

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERIA ELÉCTRICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

TÍTULO:

**“Análisis de calidad de energía eléctrica en sistemas fotovoltaicos
conectados a la red”**

AUTORES:

**Diego Hernán Domínguez Guamán
Bryan Gerardo Salvatierra Cáneppa**

**Ing. Diego Paul Chacón Troya, Mdhd.,
Director de Trabajo de Titulación**

Cuenca, Julio de 2016

CERTIFICACION

Yo declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “**ANALISIS DE CALIDAD DE ENERGIA ELECTRICA EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A LA RED**“, realizado por **Diego Hernán Domínguez Guamán y Bryan Gerardo Salvatierra Cáneppa**, bajo la modalidad “**Artículo Académico**”, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como Trabajo de Titulación



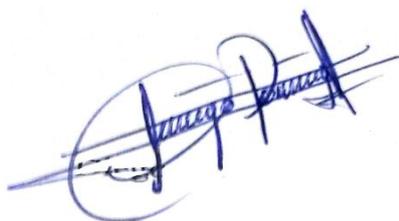
Ing. Diego Paul Chacón Troya. Mdhd.

CI: 190026816-8

Cuenca, Julio 2016

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Diego Hernán Domínguez Guamán, con documento de identificación N° 0105805493 y Bryan Gerardo Salvatierra Cáneppa, con documento de identificación N° 0705396687 del “**ANÁLISIS DE CALIDAD DE ENERGIA ELECTRICA EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A LA RED**” certificamos que el total contenido de este es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría



Diego Hernán Domínguez G.

CI: 0105805493



Bryan Gerardo Salvatierra C.

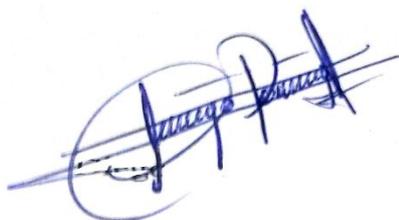
CI: 0705396687

Cuenca, Julio del 2016

© DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Diego Hernán Domínguez Guamán, con documento de identificación N° 0105805493 y Bryan Gerardo Salvatierra Cáneppa, con documento de identificación N° 0705396687, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de grado titulado: “ANALISIS DE CALIDAD DE ENERGIA ELECTRICA EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A LA RED ”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIERO ELECTRICO, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Diego Hernán Domínguez G.

CI: 0105805493



Bryan Gerardo Salvatierra C.

CI: 0705396687

Cuenca, Julio 2016

Dedicatoria

Dedico este trabajo inicialmente a Dios por haberme brindado salud, bendiciones y sabiduría. A mi padres por el apoyo brindado, y en especial a mi madre que tuvo el gran deseo de verme culminar mi estudios universitarios, a mis hermanos y de más familiares por el apoyo brindado y ahora con mucha felicidad a mi hija o hijo que está en camino va dedicado este logro que con mucho esfuerzo se ha conseguido.

Diego Hernán Domínguez G.

Dedico este trabajo en primer lugar a Dios por haberme dado salud, llenarme de bendiciones y poner a mi lado personas de bien que han ayudado a mi desarrollo personal y profesional. A mi madre y mi padre que me han brindado su apoyo en todo proyecto que he emprendido y me han motivado a alcanzar mis metas y enseñado a obtener el mayor provecho de cada una de las experiencias que vaya teniendo en la vida. A mi hermano, mis abuelas y familia en general por su apoyo y amor incondicional.

Bryan Gerardo Salvatierra C.

Agradecimiento

Agradezco a Dios por brindarme de salud y bendiciones a mi persona. A mis padres por el apoyo brindado para culminar mis estudios de
Universitarios.

A la Universidad Politécnica Salesiana por llenarme de conocimientos profesionales que serán el sustento de mi vida de aquí en adelante.

Al Ing. Diego Chacón por el apoyo brindado para desarrollo de este proyecto de titulación, y a su vez a mi compañero de titulación.

Diego Hernán Domínguez G.

Agradezco a Dios por proveer alimentos, salud y felicidad a mi familia y mi persona. A mis padres y hermano que siempre están cuando los necesito y han sido pilares fundamentales para mi desarrollo personal y profesional.

A la Universidad Politécnica Salesiana por proporcionarme las herramientas necesarias para una incursión con éxito en el campo profesional.

Al Ing. Diego Chacón por su apoyo y orientación durante el desarrollo del presente trabajo.

Bryan Gerardo Salvatierra C.

RESUMEN

El presente trabajo de titulación exhibe un análisis de la variación de la calidad de energía de la red eléctrica convencional cuando se conecta una mini-central de generación solar fotovoltaica. Para este propósito en primer lugar es necesario observar el estado de la calidad de energía del sistema eléctrico para posteriormente poder ver el impacto en la calidad de energía causado únicamente por la conexión de los paneles fotovoltaicos.

Dado que el sistema solar fotovoltaico existente era un sistema aislado y para el cumplimiento del propósito del actual proyecto era imperativo tener un sistema solar fotovoltaico conectado a la red eléctrica, fue necesaria la adquisición de equipos tales como un inversor on-grid, optando por el modelo SUNNY BOY 240-US de la familia SMA, que vino con una unidad de comunicación (SUNNY MULTIGATE) que permite el monitoreo remoto en tiempo real del sistema fotovoltaico mediante una comunicación de red Ethernet.

En lo concerniente a la obtención de la información de entrada para el análisis de calidad de energía, se requirió el uso de equipos que permitan tener una alta confiabilidad en los resultados obtenidos tales como los analizadores de energía de la familia FLUKE, el modelo 435 adquirió información de la red eléctrica, mientras que el modelo 1735 se conectó a la salida del MULTIGATE. Además para que el resultado obtenido sea producto de un análisis mucho más minucioso, se realizaron diferentes pruebas que permitieron determinar las variables que influyen en la variación de la calidad de energía. Estas pruebas requirieron del uso de equipos adicionales, tales como una sonda diferencial, una sonda de corriente y un osciloscopio.

Los resultados obtenidos son analizados acorde a lo estipulado en normas nacionales e internacionales, así como el proceso de medición de las magnitudes que varían calidad de energía.

ABSTRACT

This work exhibits a variation analysis of power quality of conventional electricity grid when a mini-plant photovoltaic generation is connected. For this purpose, observe the state of the power quality of the electrical system is necessary to see the impact on power quality caused solely by the connection of photovoltaic panels.

Since the existing photovoltaic solar system was an isolated and to fulfill the purpose of the current draft system was imperative to have a photovoltaic solar system connected to the grid, the acquisition of equipment such as an inverter on-grid was necessary, opting for model SUNNY BOY 240-US SMA family, the same wine with a communication unit (SUNNY MULTIGATE) that enables remote real-time monitoring of the photovoltaic system by Ethernet communication network.

With regard to obtaining input information for analyzing power quality, the use of equipment to have high reliability in the results such as energy analyzers the FLUKE family is required, the model 435 acquired grid information, while the 1735 model was connected to the output of MULTIGATE. In addition to that the result is the product of a more thorough analysis, different tests allowed to determine the variables that influence the variation in power quality were performed. These tests required the use of additional equipment such as a differential probe, a current probe and oscilloscope.

The results are analyzed according to stipulated in national and international standards, well as the process of measuring magnitudes varying power quality.

PREFACIO

Los sistemas fotovoltaicos aparecieron en primera instancia como sistemas aislados hasta evolucionar en sistemas que se pueden conectar a la red eléctrica. Desde la década de los 90 que se intensificaron los estudios orientados a reducir la emisión de gases contaminantes al medio ambiente. En el ámbito de la generación de energía eléctrica, las fuentes renovables parecen una opción viable desde el punto de vista ambiental, social, y hasta en ciertos casos económicos. En este contexto, en Ecuador como parte del cambio de la matriz energética se ha incentivado en los últimos años la generación de energía mediante fuentes renovables para cubrir la demanda energética del país.

La tecnología solar es relativamente novel en el Ecuador ya que antes del 2000 no se contaba con centrales de generación fotovoltaica, además de no existir hasta hace poco una normativa específica para las energías renovables que regule los parámetros de la calidad de energía. Dado lo expuesto, el presente trabajo propone un análisis de calidad de energía generada por paneles fotovoltaicos conectados a la red eléctrica, en este caso se analizará un sistema de paneles fotovoltaicos de baja potencia mediante normas y regulaciones tanto nacionales como internacionales. Con el desarrollo de este trabajo se podrá establecer los diferentes efectos generados por paneles fotovoltaicos de baja potencia en la red de distribución eléctrica, y a partir de estos resultados tomar las acciones correctivas que permitan una correcta conexión a la red eléctrica y a la vez que la confiabilidad de la red eléctrica no se vea afectada.

El proyecto es presentado a través de cinco capítulos, en donde se muestra en forma ordenada como se llegó a obtener los resultados esperados, de esta manera cualquier persona pueda entender claramente lo realizado en este trabajo. Es así, que primero se detallan los fundamentos teóricos que permitieron el desarrollo de este trabajo, así como una revisión del estado del arte de los paneles fotovoltaicos en Ecuador. Seguidamente se describe el desarrollo del proyecto a detalle para luego ilustrar los resultados y análisis respectivo que permiten llegar a ciertas conclusiones y recomendaciones expuestas en el final del trabajo.

Índice general

Dedicatoria.....	V
Agradecimientos.....	VI
Resumen.....	VII
Abstract.....	VIII
Prefacio.....	IX

1 CAPITULO: FUNDAMENTOS TEORICOS. 1

1.1 Sistemas fotovoltaicos.	1
1.1.1 Celda solar.....	1
1.1.2 Efecto fotovoltaico.....	1
1.1.3 Irradiación solar.....	1
1.1.4 Radiación solar.....	1
1.1.5 Constante solar.....	2
1.2 Instalaciones fotovoltaicas y aplicaciones.....	2
1.2.1 SFV Aislados.....	3
1.2.2 SFV Conectados a la red.....	3
1.2.3 Componentes de un SFV conectado a red.....	4
1.2.3.1 Módulo FV.....	4
1.2.3.2 Protecciones.....	5
1.2.3.3 Inversor CC/CA.....	5
1.3 Calidad de Energía.....	5
1.3.1 Armónicos.....	5
1.3.1.1 Modelos Analíticos para análisis de armónicos.....	6
1.3.2 Interrupción.....	6
1.3.3 Hendidura.....	7
1.3.4 Hueco de voltaje:.....	7
1.3.5 Carga no lineal.....	7
1.3.6 Parpadeo (Flicker).....	8
1.3.7 Periodo de Medición.....	8
1.3.8 Punto de conexión.....	8
1.3.9 Ángulos de Fase.....	8
1.3.10 Generador renovable no convencional.....	8
1.3.11 Generador renovable no convencional.....	9
1.4 Producción de energía.....	9
1.4.1 Causas de reducción de la producción.....	9
1.4.1.1 Tolerancia de potencia de los módulos fotovoltaicos.....	10
1.4.1.2 Efectos de la temperatura de operación de las células.....	10
1.4.1.3 Pérdidas por desadaptación (mismatch).....	10
1.4.1.4 Suciedad de los módulos.....	10
1.5 Normas y regulaciones de calidad de energía.....	10
1.5.1 REGULACION CONELEC 004-01.....	10
1.5.2 REGULACION CONELEC 006/00.....	13
1.5.1 REGULACION CONELEC 004/15.....	15
1.5.1 NORMA IEEE STD 519 - 2014.....	17
1.5.2 NORMA IEEE STD 929-2000.....	18
1.5.3 NORMA IEC 61000-4-30.....	18

2 CAPITULO: CENTRALES FOTOVOLTAICAS EN EL ECUADOR.	20
2.1 Generación y potencial solar en el Ecuador.	20
2.2 Incentivos económicos y fiscales.	20
2.3 Marco regulatorio	21
2.3.1 CONELEC 003/02.	21
2.3.2 CONELEC 004/04.	22
2.3.3 CONELEC 009/06.	23
2.3.4 CONELEC 004/11.	23
2.3.5 CONELEC 001/13.	24
2.3.6 2.2. GENERACION	25
2.4 Capacidad instalada.	26
2.5 Potencial	27
2.6 Proyectos FV en Ecuador	28
3 CAPITULO: DESARROLLO.	31
3.1 SISTEMA EXISTENTE DE LA UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA SEDE CUENCA.	31
3.1.1 Sistema Eléctrico.	31
3.1.1.1 Descripción del sistema eléctrico.	33
3.1.2 Sistema Fotovoltaico.	33
3.2 SISTEMA PROYECTADO DE UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA SEDE CUENCA.	34
3.2.1 Sistema Eléctrico	34
3.2.2 Sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica.	35
3.2.2.1 Elementos de conexión.	35
3.2.2.1.1 Módulos Fotovoltaicos	35
3.2.2.1.2 Inversor SUNNY BOY 240-US	36
3.2.2.1.3 Sunny Multigate US.	37
3.2.2.2 Instalación Fotovoltaica.	38
3.2.2.2.1 Orientación de los paneles fotovoltaicos.	38
3.2.2.2.2 Inclinación de los paneles fotovoltaicos.	38
3.2.2.2.3 Monitoreo en tiempo real del sistema fotovoltaico.	39
3.2.2.3 Sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica.	39
3.2.2.4 Bitácora de eventos.	40
4 CAPITULO: ANALISIS Y RESULTADOS	47
4.1 ANALISIS SIN SFV	47
4.1.1 Niveles de Voltaje.	47
4.1.2 Perturbaciones.	49
4.1.3 Desequilibrio.	50
4.1.3.1 Desequilibrio de voltaje.	50
4.1.4 Desequilibrio de corriente	51
4.1.5 Armónico de Voltaje.	52
4.1.6 Armónicos de corriente.	54
4.1.7 Frecuencia.	56
4.1.8 Angulo de Fase	56
4.2 ANALISIS CON SFV	57
4.2.1 Generación del SFV	57
4.2.2 Niveles de Voltaje.	58
4.2.3 Perturbaciones.	60

4.2.4 Armónicos	62
4.2.4.1 Armónicos de voltaje.....	62
4.2.4.2 Armónicos de corriente	65
4.2.5 Factor de Potencia.....	67
4.2.6 Desequilibrio.....	68
4.2.6.1 Desequilibrio de voltaje.....	68
4.2.6.2 Desequilibrio de corriente	70
4.2.7 Frecuencia.....	71
4.2.7.1 Ángulo de fase.....	72
5 CAPITULO: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
5.1 CONCLUSIONES.....	75
5.2 RECOMENDACIONES.....	76
6 Referencias.....	77

INDICE DE FIGURAS.

Figura 1 Energía solar térmica	2
Figura 2 Esquema SFV aislado	3
Figura 3 Esquema SFV conectado a red.....	4
Figura 4 Distorsión Armónica de una Red Eléctrica	6
Figura 5 Disminuciones de voltaje (Hendiduras).....	7
Figura 6 Generación de energía eléctrica de Ecuador en 2014.....	25
Figura 7 Capacidad Instalada de Ecuador en 2014.....	26
Figura 8 Insolación Global Promedio de Ecuador.....	28
Figura 9 Diagrama unifilar del sistema eléctrico de la UPS.....	31
Figura 10 Distribución de elemento de la instalación Fotovoltaica UPS	34
Figura 11 Diagrama Unifilar Estación de transformación 2.....	35
Figura 12 Orientación e Inclinación de los paneles Fotovoltaicos de la UPS	39
Figura 13 Arquitectura del sistema de generación.....	39
Figura 14 Sistema Fotovoltaico conectado a la red.....	40
Figura 15 Niveles de voltaje máximos registrados.....	47
Figura 16 Niveles de voltaje medios registrados.....	48
Figura 17 Niveles de voltaje mínimos registrados.....	48
Figura 18 Flickers de corta duración	49
Figura 19 Flickers de larga duración	50
Figura 20 Desequilibrio de Voltaje.....	51
Figura 21 Desequilibrio de Corriente	51
Figura 22 Armónicos de voltaje –impares.....	52
Figura 23 Armónicos de voltaje de orden par	53
Figura 24 Distorsión armónica total de voltaje.....	53
Figura 25 Armónicos de corriente de orden impar.....	54
Figura 26 Armónicos de corriente de orden par.....	55
Figura 27 Armónicos de corriente total.....	55
Figura 28 Frecuencia registrada	56
Figura 29 Angulo de desfase Voltaje-Corriente	57
Figura 30 Generación del SFV.....	58
Figura 31 Niveles de voltaje mínimos registrados.....	58
Figura 32 Niveles de voltaje medios registrados.....	59
Figura 33 Niveles de voltaje medios registrados.....	59
Figura 34 Flickers de corta duración	60
Figura 35 Flickers de larga duración	61
Figura 36 Armónicos impares de voltaje.....	62
Figura 37 Armónicos pares de voltaje.....	63
Figura 38 Distorsión total de voltaje	64
Figura 39 Armónicos de corriente impares	65
Figura 40 Armónicos de corriente pares.....	66
Figura 41 Distorsión total armónica de corriente	66
Figura 42 Factor de potencia mínimo registrado	67
Figura 43 Factor de potencia medio registrado	67
Figura 44 Factor de potencia máximo registrado.....	68
Figura 45 Desequilibrio de voltaje	69
Figura 46 Desequilibrio de voltaje-zoom	69
Figura 47 Desequilibrio de corriente mínimo registrado.....	70
Figura 48 Desequilibrio de corriente medio registrado	70
Figura 49 Desequilibrio de corriente máximo registrado	71
Figura 50 Frecuencia registrada	72
Figura 51 Frecuencia-zoom.....	72
Figura 52 Angulo de desfase Voltaje-Corriente (con FV 350W).....	73
Figura 53 Angulo de desfase Voltaje-Corriente (con FV 430W).....	74

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Eficiencia de los módulos FV	4
Tabla 2 Periodo de tiempo de pérdidas de tensión.	7
Tabla 3 Variación de voltaje permitido con respecto al voltaje nominal.....	11
Tabla 4 Valores límites establecidos THD	12
Tabla 5 Categorías y características de los fenómenos que varían la calidad de la energía	14
Tabla 6 Límites establecidos de Armónicos	16
Tabla 7 Límites de flicker.....	17
Tabla 8 Límites de distorsión de voltaje.....	18
Tabla 9 Límites de distorsión armónica de corriente para sistemas de 120V a 60KV.	18
Tabla 10 Precios de energía para centrales de generación no convencional CONELEC 003/02	21
Tabla 11 Precios de energía para centrales de generación no convencional CONELEC 004/04	22
Tabla 12 Precios de energía para centrales de generación no convencional CONELEC 009/06	23
Tabla 13 Precios de energía para centrales de generación no convencional – CONELEC 004/11	24
Tabla 14 Precios de energía para centrales de generación hidroeléctricas – CONELEC 004/11	24
Tabla 15 Generación de energía eléctrica en Ecuador periodo 2004-2014	25
Tabla 16 Capacidad Instalada Eólica y Solar en Ecuador periodo 2004-2014.....	27
Tabla 17 Proyectos FV Mayores a 1MW en Ecuador	30
Tabla 18 Características Técnicas de los paneles fotovoltaicos.	36
Tabla 19 Características técnicas Inversor Sunny Boy 240.US.....	37
Tabla 20 Características técnicas Inversor Sunny Multigate-US	38
Tabla 21 Simbología de los tipos de mensajes	41
Tabla 22 Eventos durante el periodo de monitoreo	41

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Índice de Calidad	11
Ecuación 2 Índice de severidad de flicker.	11
Ecuación 3 Índice de calidad Armónicos.	12
Ecuación 4 Factor de distorsión armónica.....	12

1 CAPITULO: FUNDAMENTOS TEORICOS.

1.1 Sistemas fotovoltaicos.

Es un conjunto de componentes que permiten la generación, transformación, y almacenamiento de la energía eléctrica proveniente de la fusión de átomos de hidrógeno en helio que se produce en el Sol, y que se transmite en forma de radiación electromagnética[1] [2].

En sus inicios los sistemas fotovoltaicos (SFV) estaban orientados al abastecimiento de energía eléctrica en zonas rurales de difícil acceso para la red convencional y con bajos consumos [3]. Los SFV evolucionaron de tal forma que en la actualidad se utilizan como generadores que aportan energía a la red eléctrica [3].

1.1.1 Celda solar.

En la celda solar se produce el efecto fotovoltaico y se transforma la energía solar lumínica en energía eléctrica. Están fabricadas de materiales semiconductores como el silicio, teniendo dos capas en una unión tipo N-P [1] [4].

1.1.2 Efecto fotovoltaico.

Se produce la transformación directa de la energía solar lumínica en energía eléctrica, debido a que la radiación solar está compuesta por partículas que contienen energía llamadas fotones, por lo que al incidir luz sobre materiales en donde se presenta este efecto, existe una emisión de electrones, produciendo una corriente eléctrica [3] [4] [2].

1.1.3 Irradiación solar

Flujo radiante o potencia que incide en una superficie por unidad de área (W/m²) [5] [1].

1.1.4 Radiación solar

Se puede describir como un flujo de energía en forma de ondas electromagnéticas procedentes del Sol; esta radiación está constituida por fotones, variando la energía de los mismos de acuerdo a las frecuencias de las ondas electromagnéticas, teniendo los siguientes valores [3] [6] [7]:

- Ultravioleta: 70 kcal/mol a 46000 kcal/mol.
- Luz visible: 37 kcal/mol a 74 kcal/mol.

- Infrarroja: 2 kcal/mol a 37 kcal/mol.

Acorde a como los objetos ubicados en la superficie terrestre reciben la radiación solar, se pueden distinguir los siguientes tipos:

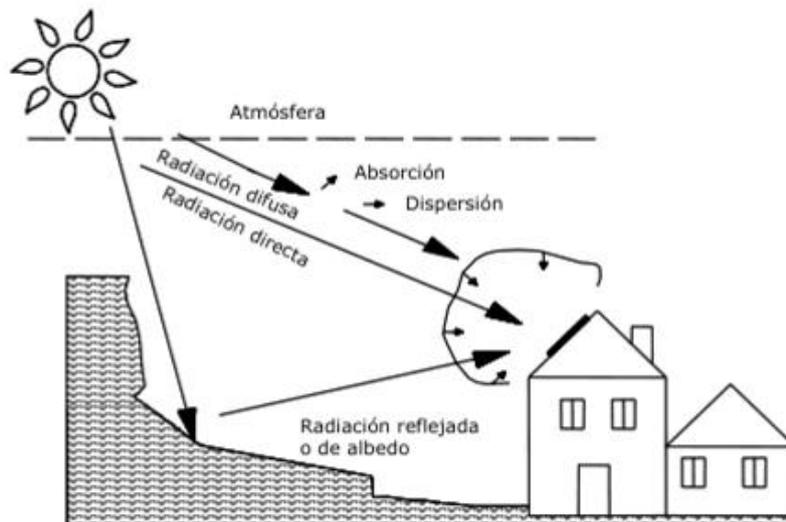
Radiación directa: radiación recibida directamente del Sol, sin que esta haya sufrido cambio alguno en su dirección [6] [8].

Radiación difusa: la radiación recibida por parte del sol sufre cambios en su dirección debido a fenómenos de reflexión, ya que parte de la radiación es reflejada o absorbida por las nubes, montañas, edificios, árboles, etc [6] [8].

Radiación reflejada: también conocida como radiación de albedo, es aquella recibida por una superficie luego de haber sido reflejada por la superficie terrestre[6] [8].

Radiación global: resultado de la suma de la radiación directa, la radiación difusa y la radiación reflejada [8].

Figura 1 Energía solar térmica [8]



1.1.5 Constante solar

Energía promedio anual recibida por unidad de tiempo (hora) sobre unidad de superficie (m²) a nivel de la superficie exterior de la atmósfera terrestre; su valor aceptado es 1367 W/m² [1] [8].

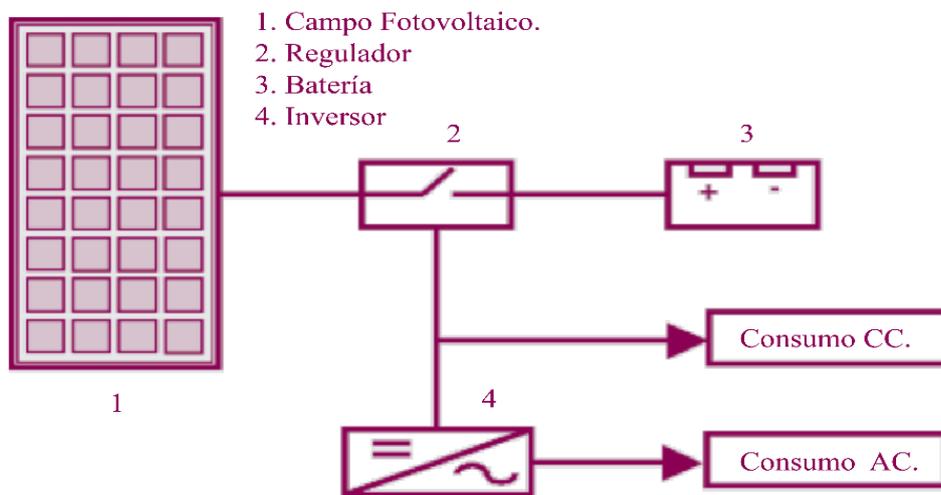
1.2 Instalaciones fotovoltaicas y aplicaciones

Los SFV se han dividido en dos sectores de aplicación claramente diferenciados: aislados y conectados a la red.

1.2.1 SFV Aislados

En este tipo de sistemas las cargas son abastecidas únicamente por la instalación solar fotovoltaica, sin dependencia de la energía eléctrica de la red convencional[9]. Los componentes básicos de una instalación fotovoltaica aislada son: generador fotovoltaico, regulador, baterías, inversor [1] [7].El esquema básico se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** [9], en donde se puede observar ue las cargas abastecidas por estos sistemas pueden ser tanto de corriente continua como de corriente alterna.

Figura 2 Esquema SFV aislado [9]



1.2.2 SFV Conectados a la red.

La generación de energía eléctrica de estos sistemas está destinada específicamente a su venta a la red eléctrica convencional[9]. Los componentes básicos de una instalación fotovoltaica conectada a la red son: generador fotovoltaico, inversor, contador de energía, ya que no se precisa el uso de un acumulador de energía [1].El esquema básico de la instalación se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Figura 3 Esquema SFV conectado a red [9]



1.2.3 Componentes de un SFV conectado a red.

1.2.3.1 Módulo FV

Encapsulado comprendido por un conjunto de celdas fotovoltaicas conectadas entre sí, que genera energía eléctrica [1].

Su eficiencia varía de acuerdo al tipo de material utilizado en las células solares, en la Tabla 1 se exponen las diferentes eficiencias que alcanzan las células y módulos FV según la tecnología.

Tabla 1 Eficiencia de los módulos FV[3]

TECNOLOGÍA	CAPA FINA					SILICIO CRISTALINO		CPV
	a-Si	CdTe	CI(G)S	A-Si / μ -Si	Células con tinte fotosensible	Monocris.	Policris.	
Eficiencia de la célula	4%-8%	10%-11%	7%-12%	7-9%	2%-4%	16%-22%	14%-18%	III-IV multiunión 30%-38%
Eficiencia del módulo	-	-	-	-	-	13%-19%	11-15%	20%-25%
Área necesaria Por kW (m2)	15	10	10	12	-	7	8	-

1.2.3.2 Protecciones

Como toda instalación eléctrica, los SFV necesitan para su correcto funcionamiento elementos de protección habituales como fusibles, breakers magneto-térmicos, además del uso de diodos de bloqueo y de paso.

- *Diodos de bloqueo*: actúan en situaciones de desperfecto eléctrico, evitando que se disipe la potencia de los módulos.
- *Diodos de paso*: actúan para eliminar los efectos del sombreado, impidiendo el consumo de energía por parte de las células sombreadas.

1.2.3.3 Inversor CC/CA

Dispositivo electrónico cuya función es convertir la corriente directa generada por el panel fotovoltaico en corriente alterna, adicionalmente realiza funciones tales como [5]:

- Mantener la tensión de salida y frecuencia dentro de los rangos establecidos.
- Limitar la corriente de salida.

1.3 Calidad de Energía.

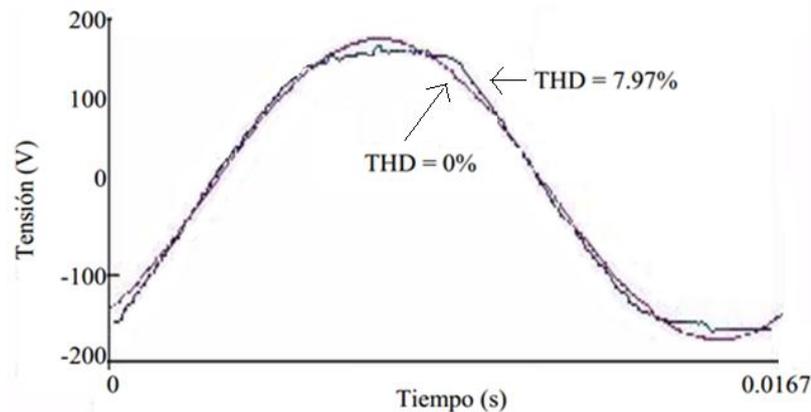
Un sistema eléctrico de potencia está compuesto de una serie de elementos con el fin de generar, transformar, transmitir, distribuir y consumir la energía eléctrica de tal manera que sea lo más confiable posible a menor costo, para ello se espera que este sistema esté completamente balanceado, sus formas de onda de voltaje y corriente sean completamente senoidales, a una amplitud determinada y constante, que maneje una única frecuencia, entonces la calidad de energía obtenida se podría considerar que es perfecta, sin embargo esto no se presenta en los sistemas de potencia debido a los elementos que está conectado a la red del sistema, de menor o mayor magnitud estos elementos poseen componentes que de alguna manera distorsionan la red eléctricas produciendo efectos en las ondas senoidales ideales, la mayoría de efectos que distorsionan a la red provienen de las cargas y componentes no lineales y variantes en el tiempo [10].

Los elementos más conocidos que producen una distorsión armónica en una red son los componentes convertidores de potencia, componentes de núcleo magnético, inversores de tensión y corriente, entre otros. Estos dispositivos pueden causar grandes distorsiones en la red produciendo pérdidas en el sistema, reducción de la vida útil de los dispositivos, interferencias con sistemas de comunicación que este muy cerca de las redes eléctricas, entre otros [10].

1.3.1 Armónicos

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** representa la distorsión armónica de una forma de onda de tensión, estos armónicos no son producidos por la empresa suministradora de energía, sino más bien se presentan por los usuarios consumidores que tienen cargas no lineales, y si estos armónicos son de gran magnitud puede llegar a afectar a todo el SEP incluso hasta otros consumidores [11].

Figura 4 Distorsión Armónica de una Red Eléctrica [11]



Par un diagnóstico adecuado de la calidad de energía existen dos campos principales de análisis que permiten hacer una evaluación de adecuada de la calidad[10]:

- El primer campo es la detección de los armónicos en la red que determina y procesa en tiempo real el contenido armónico con un monitoreo de la red eléctrica, el mismo que está enfocada este proyecto de investigativo.
- El segundo campo predice el contenido armónico en la red mediante procesos y modelos analíticos.

1.3.1.1 Modelos Analíticos para análisis de armónicos.

El dominio de la frecuencia es el modelo más utilizado para el análisis de armónicos, debido a su simplicidad ya que utiliza el marco de referencia de las componentes de secuencia para determinar la distribución de las corrientes armónicas inyectadas a la red eléctrica [10].

1.3.2 Interrupción.

Hace referencia a la pérdida parcial o completa del suministro eléctrico dentro de un periodo de tiempo, estos efectos son producidos suelen presentarse cuando existen

interrupciones de energía producidas por la baja confiabilidad de SEP, es decir se producen fallos[11]. Tabla 2

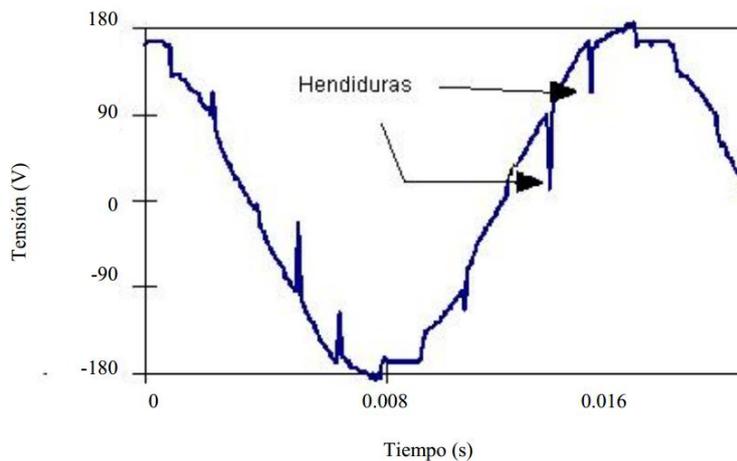
Tabla 2 Periodo de tiempo de pérdidas de tensión. [11]

Instantánea	0,5 a 30 ciclos
Momentánea	30 ciclos a 2s
Temporal	2s a 5 min
Sostenida	Mayor a 2min.

1.3.3 Hendidura.

Efecto presentado durante el periodo de tiempo de conmutación de los puentes convertidores, debido a la acción de conmutación de los componentes, referidas a las disminuciones sustractivas de voltaje., dándose casos en el cual se puede perder hasta la señal[11]. **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Figura 5 Disminuciones de voltaje (Hendiduras) [11]



1.3.4 Hueco de voltaje:

Efecto brusco de voltaje situado entre el 10% y 90% del voltaje nominal, con una duración de 0,5 ciclo hasta 1 minuto [12].

1.3.5 Carga no lineal.

Se le considera una carga no lineal cuando la corriente no tiene una relación lineal con la tensión de alimentación[12].

1.3.6 Parpadeo (Flicker)

Es un fenómeno que produce una variación de la frecuencia de voltaje de entrada, generalmente el 10% del voltaje nominal y que puede repetirse algunas veces por segundo [13]. Este fenómeno se presenta con una considerada duración que permite observar visualmente la variación de tensión, comúnmente se puede observar en la una lámpara que empieza a variar su intensidad luminosa, frecuencia del orden de 15-30Hz[11].

1.3.7 Periodo de Medición.

La regulación Ecuatoriana No. CONELEC 004-01 de calidad de energía establece un periodo de 7 días continuos para la toma de mediciones de control de calidad (armónicos, factor de potencia, niveles de tensión, etc.) del sistema eléctrico[13].

1.3.8 Punto de conexión.

Punto de acoplamiento común donde se pueden conectar uno o más generadores a la red de transmisión o de distribución de energía, por lo tanto sería el punto de medición de calidad de energía [12].

1.3.9 Ángulos de Fase.

Una estación de transformación de distribución es uno de los elementos más importantes dentro de un sistema eléctrico de potencia, su adecuado funcionamiento es crucial en estos sistemas con el fin de evitar reducir su rendimiento de operación [1], por lo cual, el análisis de ángulo de fase voltaje y corriente en diferentes ubicaciones dentro de la red son importantes variables para determinar el estado del sistema eléctrico[14]. En la actualidad existen diferentes tipos de métodos para analizar este efecto tales como: la transformada discreta de Fourier, la técnica de cruce por cero, y la técnica del paso a nivel [15].

Otra de técnica para determinar el ángulo de fase que se produce entre la corriente y el voltaje es la visualización dinámica a través de la figuras de Lissajous, técnica que grafica en los ejes cartesianos dos variables que varían en el tiempo para sistemas de la misma frecuencia[14]

1.3.10 Generador renovable no convencional.

Generadores conectados a la red mediante una máquina sincrónica que utilicen las siguientes tecnologías [12].

- Hidroeléctricas ($P_n \geq 10\text{MW}$).
- Termoeléctricas de ciclo combinado y simple, a combustibles fósiles y nucleares.

1.3.11 Generador renovable no convencional.

Enfocada a la generación que utilicen las siguientes tecnologías[12]:

- Solar fotovoltaica y solar termoeléctrica.
- Eólica.
- Pequeñas centrales hidroeléctricas ($P_n \leq 10\text{MW}$).
- Geotérmica.
- Biomasa
- Biogás
- Mareomotriz.

1.4 Producción de energía.

La Energía procedente de un sistema fotovoltaico resulta imposible cuantificar, tal que depende de la insolación disponible, temperatura, suciedad y de otros factores de ubicación, sin embargo para grandes plantas de generación su producción es óptima debido a que los paneles son ubicados en un punto estratégico evitando cualquier tipo de pérdidas por ubicación[16].

Por lo general para estimar la producción de una instalación fotovoltaica generalmente se la calcula su energía producida en un año (KWh/año) por cada Kwp de potencia debido que la inversión económica de una planta fotovoltaica está determinada por la potencia pico de la planta[16].

1.4.1 Causas de reducción de la producción

Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica, no siempre son ideales para entregar su máxima energía generada según las características técnicas y de diseño de estos sistemas, debido a que están expuestos a varios factores que de alguna u otra manera influyen en este proceso de generación eléctrica[16].

1.4.1.1 Tolerancia de potencia de los módulos fotovoltaicos.

Los módulos son fabricados con un +0%, -5% de error de su potencia nominal lo que quiere decir que cada módulo no tiene la misma potencia máxima[16].

1.4.1.2 Efectos de la temperatura de operación de las células.

Por cada grado de temperatura a su operación nominal que se aumente las células pierden un 0,5% de potencia[16].

1.4.1.3 Pérdidas por desadaptación (mismatch)

Estas pérdidas se producen por conectar dentro de un sistema fotovoltaico módulos de diferentes características, es decir paneles que no tengan la misma intensidad. Los diodos bypass que tienen incorporado los módulos están diseñados para proteger los módulos que den menos corriente debido a la suciedad o sombras de objetos[16].

1.4.1.4 Suciedad de los módulos.

De acuerdo a la reducción de la irradiación por causa de la suciedad de los módulos provoca una pérdida sustancial de potencia, proporcional a la reducción de la corriente, en épocas de lluvias constantes se suele alcanzar el 3% de pérdidas promedio[16].

1.5 Normas y regulaciones de calidad de energía.

1.5.1 REGULACION CONELEC 004-01

La presente Regulación establece niveles de calidad para la presentación del servicio eléctrico y procedimientos de evaluación por parte de las empresas distribuidoras de energía eléctrica, enfocada al análisis a cuatro variables fundamentales dentro del control de calidad de energía: Niveles de voltaje, Parpadeo (Flicker), Armónicos y Factor de potencia. Las empresas distribuidoras tiene el compromiso de prestar el servicio eléctrico a los consumidores de acuerdo al nivel de calidad que estipula la Ley de Régimen del Sector Eléctrico Ecuatoriano, el contrato de concesión y las regulaciones correspondientes, este control está bajo la supervisión del Consejo

Nacional de Electricidad CONELEC, que a partir del 2015 paso a ser la Agencia de Regulación y Control de Electricidad ARCONEL[13][12].

Nivel de voltaje: variaciones de los valores eficaces de tensión (rms) medidas durante un periodo no menor a 7 días continuos, cada 10 minutos.

Ecuación 1 Índice de Calidad

$$\Delta V_k(\%) = \frac{V_k - V_n}{V_n} * 100$$

Donde:

- ΔV_k : *variación de voltaje.*
- V_k : *voltaje eficaz (rms).*
- V_n : *voltaje nominal en el punto de medicion.*

Las empresas distribuidoras para adecuarse a las exigencias de calidad establecen sub etapas de cumplimiento, de acuerdo al reglamento de suministro de servicio eléctrico [13].

Sub etapa 1: Duración de 24 meses, sin penalización.

Sub etapa 2: A partir de la finalización de la sub etapa 1, con tiempo indefinido.

Tabla 3 Variación de voltaje permitido con respecto al voltaje nominal[13].

	Sub etapa 1.	Sub etapa 2
Alto Voltaje	± 7%	± 5%
Medio Voltaje	± 10%	± 8%
Bajo Voltaje. Urbanas	± 10%	± 8%
Bajo Voltaje. Rurales	± 13%	± 10%

Perturbaciones (Flicker): El índice de severidad del Flicker, no podrá superar la unidad[13].

Ecuación 2 Índice de severidad de flicker.

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0.1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}}$$

Donde:

Pst: Índice de severidad de flicker de corta duración.

P0.1, P1, P3, P10, P50: Niveles de efecto flicker que sobrepasan el 0.1%, 1%, 3%, 10%, 50% del total del tiempo del periodo de observación.

Armónicos: La norma ICE 6100-4-7 establece los procedimientos para la toma de datos que serán realizadas con un medidor de distorsiones de voltaje, con el fin de ubicar de manera eficiente los medidores de distorsiones armónicas. Los valores establecidos como límites (V_i' y THD) se muestran en la Tabla 4

Ecuación 3 Índice de calidad Armónicos.

$$V_i' = \left(\frac{V_i}{V_n} \right) * 100$$

Ecuación 4 Factor de distorsión armónica.

$$THD = \left(\frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{40} (V_i)^2}}{V_n} \right) * 100$$

- V_i' : factor de distorsión armónica individual de voltaje.,
- THD: factor de distorsión total por armónicos.
- V_i : Valor eficaz (rms) del voltaje armónico “i” (para $i=2\dots40$).
- V_n : Voltaje nominal del punto de medición.

Tabla 4 Valores límites establecidos THD [13]

ORDEN(n) DE LA ARMONICA Y THD.	TOLERANCIA [V_i'] o [THD'%] (En el punto de medición)	
	V>40KV (otros puntos)	V≤40KV (trafos de distribución)
Impares no múltiplos de 3		
5	2.0	6.0
7	2.0	5.0
11	1.5	3.5
13	1.5	3.0
17	1.0	2.0
19	1.0	1.5
23	0.7	1.5
25	0.7	1.5
> 25	0.1 +0.6*25/n	0.2+1.3*25/n

Impares múltiplos de tres		
3	1.5	5.0
9	1.0	1.5
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
> 21	0.2	0.2
Pares.		
2	1.5	2.0
4	1.0	1.0
6	0.5	0.5
8	0.2	0.5
10	0.2	0.5
12	0.2	0.2
> 12	0.2	0.5
THD	3	8

Factor de Potencia. El valor límite de factor de potencia para considerar una adecuada calidad de energía será como mínima 0.92, la toma de datos estará establecida por cada empresa distribuidora, en el 2% del número de consumidores, y serán tomadas cada 10 minutos al menos 7 días continuos. Si en el 5% o más del tiempo evaluado es inferior a los límites, el consumidor está violando el índice de calidad[13].

1.5.2 REGULACION CONELEC 006/00

La regulación establece el procedimiento de despacho y operación del Sistema Nacional Interconectado con el fin de dictar un marco normativo que permita la correcta conexión de los sistemas de generación. De acuerdo a los parámetros de calidad y seguridad, la presente regulación establece las condiciones de operación.

Armónicos: Las formas de onda de voltaje y corriente deberán cumplir los requisitos establecidos en la norma ANSI/IEEE STD. 519, mientras no exista una normativa nacional.

Frecuencia: El objetivo de sistema nacional interconectado establece en condiciones normales que la frecuencia será de 60Hz y su rango de variación estará entre 59,85 y 60,15Hz ($\pm 0,15$), excepto en estados de fallas, emergencias y restablecimientos del servicio.

Índices de calidad: La norma IEEE STD. 1159-2009 establece 7 categorías de los fenómenos que varían la calidad de la energía, definiendo cada uno de ellos.

En la Tabla 5 se expone las características principales de las categorías a las que hace referencia esta norma.

Tabla 5 Categorías y características de los fenómenos que varían la calidad de la energía [15]

CATEGORIA	Contenido espectral típico	Duración típica	Magnitud de voltaje típico
1. Transitorios 1.1. Impulso 1.1.1. Nanosegundo 1.1.2. Microsegundo 1.1.3. Milisegundo 1.2. Oscilatorio 1.2.1. Baja frecuencia 1.2.2. Media frecuencia 1.2.3. Alta frecuencia	5 ns de subida 1 us de subida 0.1 ms de subida <5 kHz 5-500 kHz 0.5-5 Mhz	<50 ns 50 ns-1 ms >1 ms 0.3-50 ms 20 us 5 us	0-4 p.u. 0-8 p.u. 0-4 p.u.
2. Variaciones de corta duración (rms) 2.1. Instantánea 2.1.1. Sag 2.1.2. Swell 2.2. Momentánea 2.2.1. Interrupción 2.2.2. Sag 2.2.3. Swell 2.3. Temporal 2.3.1. Interrupción 2.3.2. Sag 2.3.3. Swell		0.5 – 30 ciclos 0.5 – 30 ciclos 0.5 ciclos – 3 s 30 ciclos – 3 s 30 ciclos – 3 s >3 s – 1 min >3 s – 1 min >3 s – 1 min	0.1 – 0.9 p.u. 1.1 – 1.8 p.u. <0.1 p.u. 0.1 – 0.9 p.u. 1.1 – 1.4 p.u. <0.1 p.u. 0.1 – 0.9 p.u. 1.1 – 1.2 p.u.
3. Variaciones de larga duración (rms) 3.1. Interrupción sostenida 3.2. Sub-Voltajes 3.3. Sobre-voltajes 3.4. Sobrecarga de corriente		>1 min >1 min >1 min >1 min	0.0 p.u. 0.8 – 0.9 p.u. 1.1 – 1.2 p.u.
4. Desbalance 4.1. Voltaje 4.2. Corriente		EE (Estado Estacionario) EE	0.5 – 2% 1 – 30%
5. Distorsión de onda 5.1. DC offset 5.2. Armónicos 5.3. Inter-armónicos 5.4. Escalonamiento 5.5. Ruido	0 – 9 kHz 0 – 9 kHz Ancho de banda	EE EE EE EE	0 – 0.1% 0-20% 0-2% 0-1%
6. Fluctuaciones de Voltaje	<25 Hz	Intermitente	0.1-7% 0.2-2 Pst

7. Variaciones de la frecuencia industrial		<10 s	± 0.1 Hz
--	--	-------	----------

Para ampliar lo expuesto en la tabla anterior a continuación se presenta algunas definiciones contenidas en la norma[17].

- Un transitorio impulsivo se presenta generalmente por la caída de relámpagos.
- Un transitorio oscilatorio se presenta por la conmutación y circuitos RLC snubber.
- Las interrupciones pueden ser resultado de falla de equipos, falla del sistema de potencia.
- Cuando se presenta interrupciones la magnitud del voltaje es siempre menor al 10% del voltaje nominal.
- Los sags son la disminución del voltaje, y se debe a la conmutación de cargas grandes.
- Los swells son un incremento del voltaje, estos aparecen en condiciones de falla del sistema y son mucho menos comunes que los sags.
- Los sobrevoltajes aparecen generalmente por la conmutación en el apagado o salida de operación de una carga grande.
- Las subtensiones en cambio aparecen por la conmutación en la entrada a operación de cargas grandes.
- El desbalance puede ser aplicado para ya sea la el voltaje o la corriente y se calcula haciendo uso de la magnitud obtenida de la secuencia negativa y de la secuencia positiva.
- El escalonamiento no puede ser registrado con un equipo que sea normalmente usado para el análisis de armónicos, debido a que sus componentes de la frecuencia son bastantes altos.
- Las variaciones rápidas de la corriente de carga generalmente producen fluctuaciones de voltaje.
- Los cambios en la frecuencia están relacionados a la capacidad de la generación para adaptarse a los cambios producidos en la carga.

1.5.1 REGULACION CONELEC 004/15

Regulación enfocada a los *‘Requerimientos Técnicos para la Conexión y Operación de Generadores Renovables No convencionales a las redes de transmisión y distribución’*, con el objetivo establecer criterios y requerimientos técnicos para la conexión de generadores renovables no convencionales a las redes de trasmisión y distribución, con el fin de mantener calidad y confiabilidad del servicio de energía. La calidad del productor referente a los niveles de tensión y corriente entregadas al sistemas se ajusten a lo requerido para la adecuado operación de los equipos conectados a la red.

Para los sistemas fotovoltaicos conectados a la red la regulación establece que los inversores fotovoltaicos a ser utilizados cumplan[12]:

- Certificación en base a la norma IEC 62116.
- Calidad de energía: las ondas de voltajes seguirán los métodos de medición establecidos en la norma IEC 61004.

Dentro de los parámetros de calidad la regulación establece para generadores renovables no convencionales:

- El factor de potencia no será menor a 0.95.
- **Armónicos:** las ondas de voltaje no deberán superar a los límites establecidos en la Tabla 6

Tabla 6 Límites establecidos de Armónicos [12]

Orden de la Armónica	Medio Voltaje ($0,6kV \leq V_n < 40kV$)	Alto Voltaje ($40kV \leq V_n$)
	<i>Armónicas Impares No Múltiplo de 3</i>	
5	5	2
7	4	2
11	3	1.5
13	2.5	1.5
$17 \leq h \leq 49$	$1.9 \times \left(\frac{17}{h}\right) - 0,2$	$1.2 \times \left(\frac{17}{h}\right)$
<i>Armónicas Impares Múltiplo de 3</i>		
3	4	2
9	1.2	1
15	0.3	0.3
21	0.2	0.2
$21 < h \leq 45$	0.2	0.2
<i>Armónicas Pares</i>		
2	1.8	1.4
4	1	0.8
6	0.5	0.4
8	0.5	0.4
$10 \leq h \leq 50$	$0.25 \times \left(\frac{10}{h}\right) + 0.22$	$0.19 \times \left(\frac{10}{h}\right) + 0.16$
THD (%)	6.5	3

Flicker: La severidad de las variaciones periódicas de voltaje será evaluada de acuerdo a [12]:

- a) *Indicadores de voltaje a corto plazo (Pst):* Severidad medida en intervalos de observación de 10 minutos, indicador medido en por unidad (p.u).
- b) *Indicadores de voltaje a largo plazo (Pst):* Severidad medida en intervalos de observación a 2 horas.

En la Tabla 7 establece niveles máximos de flicker.

Tabla 7 Límites de flicker [12]

Indicador	Límite
Pst max	0,35
Plt max	0,25

Desbalance de voltaje: El desbalance máximo de voltaje en estado estable no deberá superar el 5% en cada fase [12].

1.5.1 NORMA IEEE STD 519 - 2014.

Norma IEEE internacional enfocada a la calidad de energía que va ser proporcionada en un Punto de Acoplamiento Común (PCC), direccionada a establecer Requisitos para el Control de armónicos en sistemas eléctricos. El uso de cargas no lineales conectadas a sistemas eléctricos, tales como: convertidores estáticos de potencia, dispositivos de descarga, dispositivos magnéticos, máquinas rotativas, convertidores de energía que son mayores cargas no lineales que puede convertir AC a DC, DC a DC, DC a AC, y AC a AC, estas cargas cambian la naturaleza sinusoidal de la corriente de alimentación de CA produciendo un flujo de corriente armónico por la red causando interferencias en circuitos de comunicación y demás equipos [18].

Las fuentes comunes de donde nacen estas corrientes armónicas se dan con mayor severidad en los convertidores electrónicos de potencia, hornos de arco, VAR, inversores de generación distribuida, control de fase, rectificadores entre otros.

Los límites establecidos en la norma STD 519, son para estado estacionario, recomendado para condiciones del peor caso. Tabla 8

Tabla 8 Límites de distorsión de voltaje [18].

Bus voltage V at PCC	Individual harmonic (%)	Total harmonic distortion THD (%)
$V \leq 1.0$ kV	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69$ kV	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161$ kV	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5 ^a

Los límites de distorsión armónica de corriente recomendados para sistemas de 120V hasta 60KV en el PCC, se establecen en la Tabla 9

Tabla 9 Límites de distorsión armónica de corriente para sistemas de 120V a 60KV [18].

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order (odd harmonics) ^{a, b}						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 20^c$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

1.5.2 NORMA IEEE STD 929-2000.

Esta norma establece los requisitos técnicos de conexión recomendados para la interconexión de sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica, definiendo un rango de operación fija de 59.3 a 60.5Hz para sistemas pequeños, caso contrario los inversores tendrán que salir de operación.

1.5.3 NORMA IEC 61000-4-30

Esta norma describe las técnicas y métodos de evaluación y medición de los diferentes parámetros de calidad de energía. El periodo mínimo de evaluación según esta norma deberá ser de una semana. Algunas de las técnicas sugeridas para la evaluación de los parámetros de la calidad son enumeradas a continuación.

- El número o el porcentaje de valores que excedieron los límites establecidos en las normas vigentes.

- El caso en el que se obtuvo los más bajos valores comparado con el caso con más altos valores (el periodo de medición puede ser diferente a una semana).
- El número de valores consecutivos que exceden los límites establecidos en las normas vigentes.

2 CAPITULO: CENTRALES FOTOVOLTAICAS EN EL ECUADOR.

2.1 Generación y potencial solar en el Ecuador.

Ecuador es un país privilegiado en cuanto a su ubicación geográfica, ya que se encuentra sobre la línea ecuatorial terrestre, teniendo una incidencia perpendicular de los rayos solares y no presenta mayor variación de la posición del sol durante el año. Estas condiciones convierten al Ecuador en un país idóneo para el desarrollo de producción de energía eléctrica teniendo al sol como materia prima, llegando a tener 12 horas en promedio de sol durante un día [1][19].

Ecuador fue uno de los primeros países en Latinoamérica y el Caribe en promulgar incentivos económicos y fiscales para las energías renovables mediante diferentes regulaciones como la Regulación 004/11 en la que se aprobaron mayoritariamente proyectos fotovoltaicos, dado esto, en la Regulación 001/13 se excluye a la energía solar fotovoltaica de las beneficiadas por los incentivos gubernamentales para las energías renovables con el propósito de impulsar el resto de tecnologías renovables como la eólica y la biomasa.

La primera central FV del país fue Paragachi ubicada en la provincia de Imbabura y con una capacidad instalada de 1MW, la misma entró en operación en el año 2013 [20].

2.2 Incentivos económicos y fiscales

Actualmente la energía FV no cuenta con incentivos, ya que se excluyó este tipo de energía de las ERNC incentivadas en la nueva regulación 001/13, debido al alto número de proyectos FV inscritos bajo el régimen de la última regulación 004/11. En la regulación en mención se definieron tarifas altas de 44.03 centavos de USD para proyectos FV en Ecuador Continental y 44.03 centavos de USD para proyectos FV en el territorio insular de Galápagos, cabe decir que estas tarifas estuvieron vigentes para proyectos con contratos hasta fines de 2012, por un periodo de 15 años.

En lo que respecta a incentivos fiscales en el Código Orgánico de la Producción, Comercio e Inversiones emitida en el año 2010 se establece la exoneración por cinco años del pago del impuesto a la renta. Además un incentivo orientado directamente al crecimiento de las tecnologías renovables ya que el servicio de rentas internas (SRI) del

Ecuador enuncia la deducción del 100% adicional de la amortización y depreciación correspondiente a la adquisición de equipos destinados a la implementación de esta tecnología [19][21].

2.3 Marco regulatorio

En este apartado se describe las regulaciones orientadas a establecer precios, incentivos entre otros conceptos relacionados a la generación de energía renovable. Se detallarán de acuerdo a la fecha de expedición de las mismas, en un orden ascendente.

2.3.1 CONELEC 003/02

Expedida el 26 de diciembre de 2002, estuvo vigente hasta el 24 de diciembre de 2004, la presente regulación sustituye a la regulación No. CONELEC – 008/00. Aquí se establecen los precios, periodo de vigencia y la forma de despacho de la energía entregada al Sistema Nacional Interconectado (SNI) y sistemas aislados producida con recursos energéticos renovables no convencionales.

Esta regulación era aplicable para centrales de generación con capacidad instalada máximo de 15 MW, en cuanto a la calidad de la energía entregada por estos generadores los parámetros técnicos eran los mismos establecidos para los generadores convencionales.

Se insta un despacho preferente para este tipo de generadores. Esta regulación establece *“El CENACE despachará, de manera obligatoria y preferente, toda la energía eléctrica que las centrales que usan recursos renovables no convencionales entreguen al Sistema, hasta el límite de capacidad instalada establecido en el Art. 21 del Reglamento para el Funcionamiento del MEM”*[22].

Los precios establecidos por la regulación se observan en la Tabla 10

Tabla 10 Precios de energía para centrales de generación no convencional CONELEC 003/02 [reg]

TIPO CENTRALES	PRECIO (cUSD/kWh)
Eólicas	10.05
Fotovoltaicas	13.65
Biomasa – Biogás	10.23
Geotérmicas	8.12

2.3.2 CONELEC 004/04

Expedida el 24 de diciembre de 2004, estuvo vigente hasta el 19 de diciembre de 2006, la presente regulación sustituye a la regulación No. CONELEC – 003/02. En esta regulación al igual que su antecesora se establecen los precios, periodo de vigencia y la forma de despacho de la energía entregada al Sistema Nacional Interconectado (SNI) y sistemas aislados producida con recursos energéticos renovables.

Esta regulación era aplicable para centrales de generación con capacidad instalada máximo de 15 MW, aunque a diferencia de la anterior regulación se hace una diferenciación a las pequeñas centrales hidroeléctricas cuya capacidad instalada no debe exceder de 10 MW. En cuanto a la calidad de la energía entregada por estos generadores los parámetros técnicos eran los mismos establecidos para los generadores convencionales.

Este tipo de generadores siguen contando con un despacho preferente tal como se lo establecía en la regulación anterior.

El cambio importante en comparación con su regulación antecesora, se da en el precio de la energía entregada por estas centrales de generación, ya que se expande un poco más los conceptos de aplicación y se hace una distinción entre el precio para el Territorio Continental y para el Territorio Insular de Galápagos, tal como se puede observar en la Tabla 11

Tabla 11 Precios de energía para centrales de generación no convencional – CONELEC 004/04

TIPO CENTRALES	PRECIO (cUSD/kWh) Territorio Continental	PRECIO (cUSD/kWh) Territorio Insular de Galápagos
Eólicas	9.31	12.10
Fotovoltaicas	28.37	31.20
Biomasa – Biogás	9.04	9.94
Geotérmicas	9.17	10.08
Pequeñas Centrales Hidroeléctricas hasta 5 MW.	5.80	6.38
Pequeñas Centrales Hidroeléctricas mayores a 5 MW hasta 10 MW.	5.00	5.50

2.3.3 CONELEC 009/06

Expedida el 19 de diciembre de 2006, estuvo vigente hasta el 14 de abril de 2011, la presente regulación sustituye a la regulación No. CONELEC – 004/04. Los puntos establecidos en la anterior regulación siguen siendo en su mayoría los mismos, con excepción del precio establecido para la energía producida por este tipo de centrales. Los precios estipulados por esta regulación se pueden observar en la Tabla 12

Tabla 12 Precios de energía para centrales de generación no convencional – CONELEC 009/06

TIPO CENTRALES	PRECIO (cUSD/kWh) Territorio Continental	PRECIO (cUSD/kWh) Territorio Insular de Galápagos
Eólicas	9.39	12.21
Fotovoltaicas	52.04	57.24
Biomasa – Biogás	9.67	10.64
Geotérmicas	9.28	10.21
Pequeñas Centrales Hidroeléctricas hasta 5 MW.	5.80	6.38
Pequeñas Centrales Hidroeléctricas mayores a 5 MW hasta 10 MW.	5.00	5.50

2.3.4 CONELEC 004/11

Expedida el 14 de abril de 2011, estuvo vigente hasta el 20 de mayo de 2013, la presente regulación sustituye a la regulación No. CONELEC – 009/06. Al igual que sus antecesoras esta regulación establece los precios, periodo de vigencia y la forma de despacho de la energía entregada al Sistema Nacional Interconectado (SNI) y sistemas aislados producida con recursos energéticos renovables, además se incluye los requisitos para la participación de generadores que utilicen fuentes renovables como eólica, biomasa, biogás, fotovoltaica, geotermia y centrales hidroeléctricas de hasta 50 MW de capacidad instalada.

Los precios estipulados por esta regulación se pueden observar en la Tabla 13

Tabla 13 Precios de energía para centrales de generación no convencional – CONELEC 004/11

TIPO CENTRALES	PRECIO (cUSD/kWh) Territorio Continental	PRECIO (cUSD/kWh) Territorio Insular de Galápagos
Eólicas	9.13	10.04
Fotovoltaicas	40.03	44.03
Solar Termoeléctrica	31.02	34.12
Corrientes Marinas	44.77	49.25
Biomasa – Biogás < 5MW	11.05	12.16
Biomasa – Biogás > 5 MW	9.60	10.56
Geotérmicas	13.21	14.53

Además para las centrales de generación hidroeléctricas de hasta 50 MW se reconocerán los precios indicados en la Tabla 14

Tabla 14 Precios de energía para centrales de generación hidroeléctricas – CONELEC 004/11

CENTRALES	PRECIO (cUSD/kWh)
Centrales Hidroeléctricas hasta 10 MW	7.17
Centrales Hidroeléctricas mayores a 10 MW hasta 30 MW	6.88
Centrales Hidroeléctricas mayores a 30 MW hasta 50 MW	6.21

Los precios establecidos en esta regulación estarán vigentes por un periodo de 15 años a partir de la fecha de suscripción del título habilitante, para sociedades que hubieren suscrito dicho contrato hasta diciembre de 2012.

Hay que decir que se hace una distinción para los generadores menores a 1 MW, ya que estos no debían firmar un contrato con las distribuidoras, y les bastaba con obtener un registro que emitía el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC).

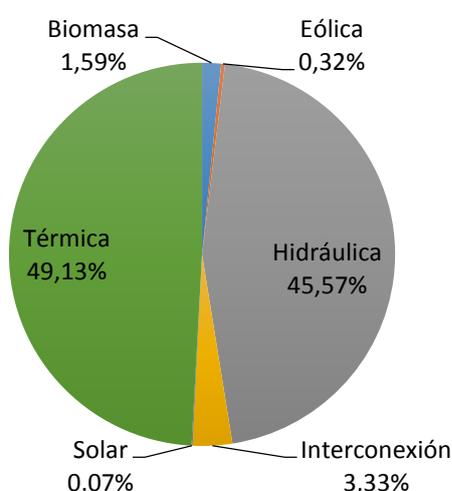
2.3.5 CONELEC 001/13

Expedida el 21 de mayo de 2013, estuvo vigente hasta el 13 de marzo de 2014, la presente regulación sustituye a la regulación No. CONELEC – 004/11. Actualmente se encuentra en vigencia la regulación codificada No. CONELEC 001/13 en la que se excluye a la solar fotovoltaica como una de las fuentes de generación de energía no renovable a ser incentivada. Dado esto, no se detallarán precios, ni requisitos establecidos en la presente regulación.

2.4 GENERACION

La generación de energía eléctrica en el país ha tenido un crecimiento exponencial en la última década, pasó de generar 14.266 GWh en 2004 a 25.144 GWh en 2014. La generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables no convencionales corresponde a cerca del 2% del total de la generación de energía eléctrica tal como se observa en la Figura 6, siendo muy bajo el aporte de energía de las centrales fotovoltaicas con tan sólo 16,48 GWh generados[20].

Figura 6 Generación de energía eléctrica de Ecuador en 2014 [20]



En la Tabla 15 se expone la generación de energía eléctrica mediante paneles fotovoltaicos, se puede observar que la generación ha sido nula hasta el año 2005 en el que se tiene una generación de 0.01GWh, el valor generado por esta tecnología no sobrepasó el 1GWh durante los siete años siguientes. En 2014 ocurre un aumento del 350.2% en el aporte de la generación solar respecto al año 2013, este dato da muestra del auge que está teniendo esta tecnología en todo el mundo, incluyendo el Ecuador.

Tabla 15 Generación de energía eléctrica en Ecuador periodo 2004-2014

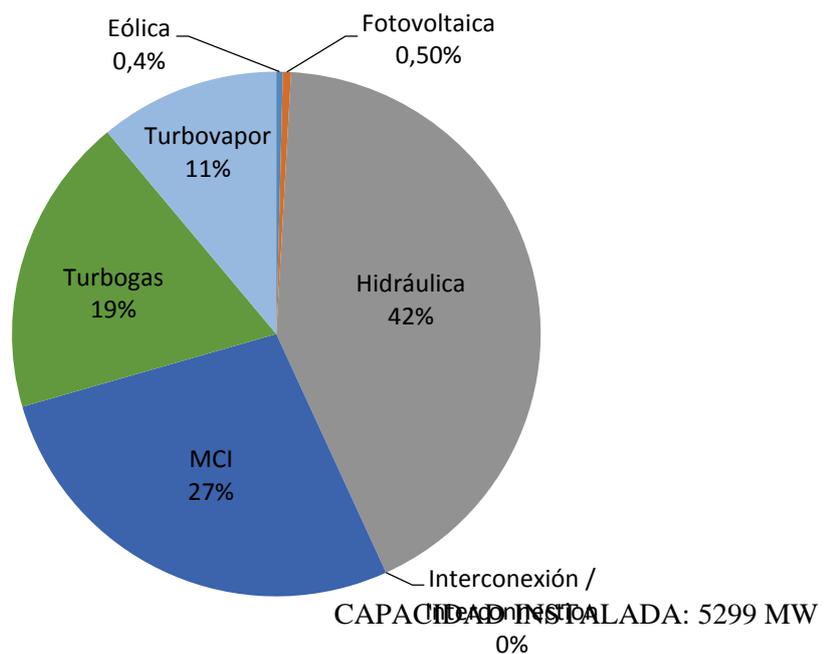
Tipo Central	2004 (GWh)	2005 (GWh)	2006 (GWh)	2007 (GWh)	2008 (GWh)	2009 (GWh)
Biomasa	3	103	146	219	208	217
Eólica	-	-	-	0.96	2.68	3.2
Solar	-	0.01	0.01	0.02	0.03	0.01
Tipo Central	2010 (GWh)	2011 (GWh)	2012 (GWh)	2013 (GWh)	2014 (GWh)	Var. (%) 2014/2013
Biomasa	236	278	296	296	399	35.05
Eólica	3.43	3.34	2.40	56.70	79.74	40.6
Solar	-	0.06	0.33	3.66	16.48	350.2

2.5 Capacidad instalada

La capacidad instalada del país hasta el año 2014 era de 5299MW, de los cuales 26.37MW corresponden a centrales fotovoltaicas, de este valor al menos 23.5MW corresponden a proyectos de gran escala, los casi 3MW restantes corresponden principalmente a instalaciones en zonas aisladas y algunos proyecto de menor escala[20].

La distribución de la capacidad instalada de Ecuador se puede observar en laFigura 7, esta distribución muestra que la fuente hidráulica y las termoeléctricas son las que mayor aportan en lo que concierne a capacidad instalada. Las fuentes de energía no convencionales tales como la eólica y la solar aportan menos del 1% de la capacidad instalada, se espera que con la puesta en funcionamiento del total de los proyectos suscritos el valor de capacidad instalada de centrales FV se aproxime a los 300MW.

Figura 7 Capacidad Instalada de Ecuador en 2014 [20]



En la Tabla 16 se presentan valores de la capacidad instalada de la energía eólica y energía solar desde el año 2004 al 2014, se puede observar que en el 2014 se presenta un crecimiento exponencial de la capacidad instalada FV, aumentando en 22.5MW que vendría a ser un aumento del 581.718% en comparación con el año 2013.

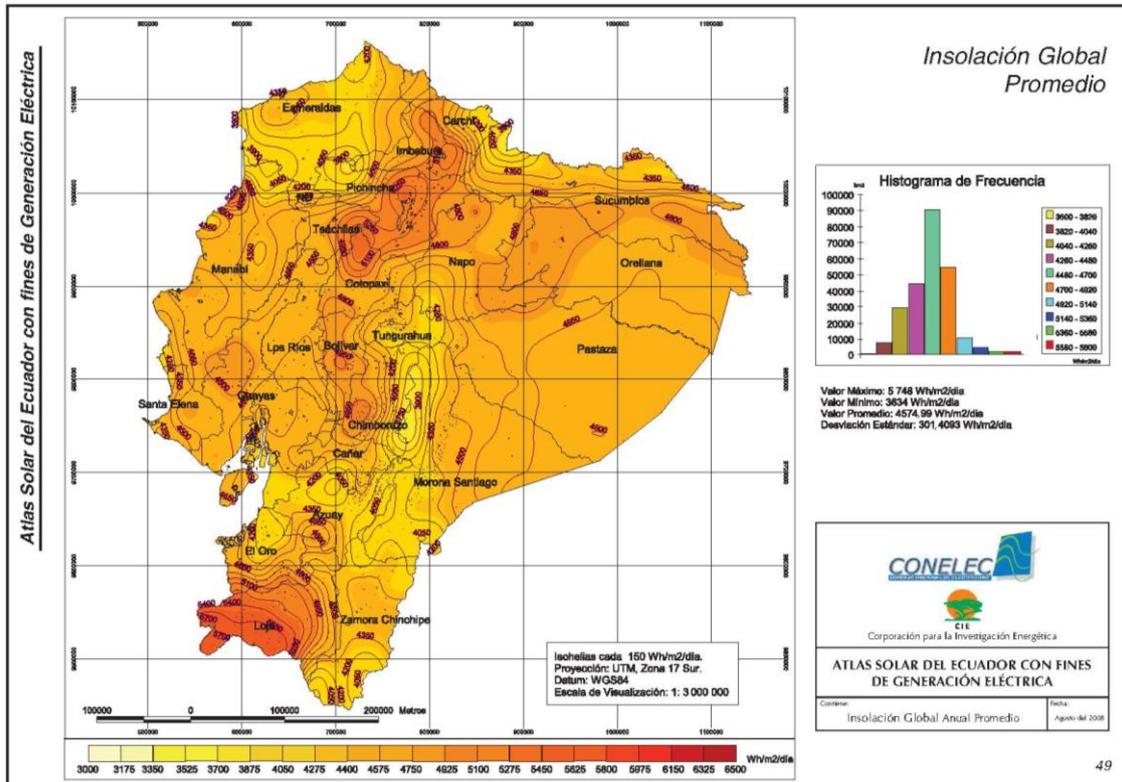
Tabla 16 Capacidad Instalada Eólica y Solar en Ecuador periodo 2004-2014

Tipo Central	2004 (MW)	2005 (MW)	2006 (MW)	2007 (MW)	2008 (MW)	2009 (MW)
Eólica	-	-	-	2.4	2.4	2.4
Solar	-	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018
Tipo Central	2010 (MW)	2011 (MW)	2012 (MW)	2013 (MW)	2014 (MW)	Var. (%) 2014/2013
Eólica	2.4	2.4	2.4	19.6	21.2	8.1
Solar	0.018	0.042	0.078	3.868	26.371	581.718

2.6 Potencial

De acuerdo a lo expuesto en [23], el promedio de radiación solar se sitúa en 4.57 kWh/m²/día, con valores que van de 3.63 - 5.74 kWh/m²/día, tal como se puede observar en la Figura 8.

Figura 8 Insolación Global Promedio de Ecuador



El potencial solar con fines de generación eléctrica que se estima en el país es de 312 GW equivalente a 476 TW-h por año o 283 millones de barriles equivalentes de petróleo (mBEP) por año. Tomando en cuenta este valor, el potencial solar vendría a ser aproximadamente 15 veces el potencial hidroeléctrico técnico y económicamente aprovechable del país [24].

2.7 Proyectos Fotovoltaicos en Ecuador

El Ecuador es un país muy diverso en cuanto a sus zonas geográficas y culturas, existiendo zonas que se encuentran sin servicio eléctrico debido a lo difícil y costoso que resulta extender la red eléctrica para abastecer un pequeño grupo de personas, dado esto, el abastecer de energía eléctrica a estos lugares con energía renovable parece ser

una solución viable técnica y económicamente. En este contexto, el país suscribió un convenio con la Unión Europea en diciembre de 2006 para abastecer de energía eléctrica a 91 comunidades mediante el programa EUROSOLAR, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de estas personas [25].

La cifra aproximada de habitantes que se beneficiaron con este proyecto es 39 629, distribuidos en siete provincias del país: Guayas, Esmeraldas, Sucumbíos, Orellana, Napo, Pastaza y Morona Santiago.

Según el Censo de población y Vivienda realizado en el año 2010 por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) [26], se tiene los siguientes valores en cuanto al abastecimiento de energía en Ecuador:

- Área Rural: 89,03%
- Área Urbana: 94,77%

Estos valores denotan que aún falta energizar una zona considerable de la parte rural, como ya se mencionó esto se debe primordialmente a cuestiones tanto económicas como técnicas.

A continuación se enumeran los proyectos FV mayores a 1MW que se encuentran suscritos actualmente:

Tabla 17 Proyectos FV Mayores a 1MW en Ecuador

EMPRESA GESTORA	PROYECTO	CAPACIDAD MW	UBICACIÓN
DESARROLLOS FOTOVOLTAICOS DEL ECUADOR S.A.	SHIRI I	50	Quito – Pichincha
GRANDSOLAR S.A.	SALINAS	2	Urququí – Imbabura
ECUADOR ENERGÉTICO S.A.	IMBABURA	25	Ibarra – Imbabura
ECUADOR ENERGÉTICO S.A.	SANTA ELENA I	25	Santa Elena – Santa Elena
ENERCAY S.A.	CENTRO DEL MUNDO	10	Cayambe – Pichincha
SUN ENERGY ECUADOR S.A.	RANCHO CAYAMBE	16	Cayambe – Pichincha
GUITARSA S.A.	VAIANA	20	Guayaquil – Guayas
RECALSER S.A.	CHOTA – PIMÁN	8	Ibarra – Imbabura
ENERGÍA SOLAR	MANABÍ	30	Montecristi – Manabí
ENERGÍAS MANABITAS S.A.	MONTECRISTI	12	Montecristi – Manabí
SUPERGALEÓN S.A.	SAN ALFONSO	6	Ibarra – Imbabura
GALAPAGOS POWER S.A.	ZAPOTILLO	8	Zapotillo – Loja
AENERDOR S.A.	LAGARTO	20	Río Verde – Esmeraldas
CONDORSOLAR S.A.	CONDOSOLAR	30	Cayambe y Tabacundo – Pichincha
SOLARCONNECTION S.A.	SOLARCONNECTION	20	Cayambe y Tabacundo – Pichincha
TOTAL CAPACIDAD		282 MW	

3 CAPITULO: DESARROLLO.

3.1 SISTEMA EXISTENTE DE LA UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA SEDE CUENCA.

3.1.1 Sistema Eléctrico.

La Universidad Politécnica Salesiana es edificación está conformada por varios espacios de gran consumo energético, conformado por aulas, talleres, laboratorios, áreas administrativas, áreas recreativas entre otras, cada uno de estos espacios están alimentados por 4 transformadores de distribución que son alimentados de la red pública de la empresa eléctrica comercializadora centro sur[27], a continuación se muestra el diagrama unifilar del sistema eléctrico de la universidad.Figura 9

Figura 9 Diagrama unifilar del sistema eléctrico de la UPS.

Fuente: Autores.

3.1.1.1 Descripción del sistema eléctrico.

- TRANSFORMADOR 1.

Trafo # 1, con código de equipo 1860, es una estación de transformación de 300KVA, alimenta a los edificios Cornelio Merchán y Guillermo Mensi, instalaciones que están conforman por aulas, talleres, laboratorios, y áreas administrativas.

- TRANSFORMADOR 2 (Punto de Análisis).

Trafo # 2, con código de equipo 19597, es una estación de transformación de 200KVA, alimenta a los edificios Guillermo Mensi, instalaciones que están conforman por espacios recreativos y descanso: Aulas, Cuartos de bombeo, Auditorios, Espacios Verdes.

- TRANSFORMADOR 3.

Trafo # 3, con código de equipo 21462, es una estación de transformación de 150KVA [9], alimenta a los edificios de la facultad de Ingeniería Mecánica y automotriz, instalaciones que se conforman de aulas, talleres, entre otras.

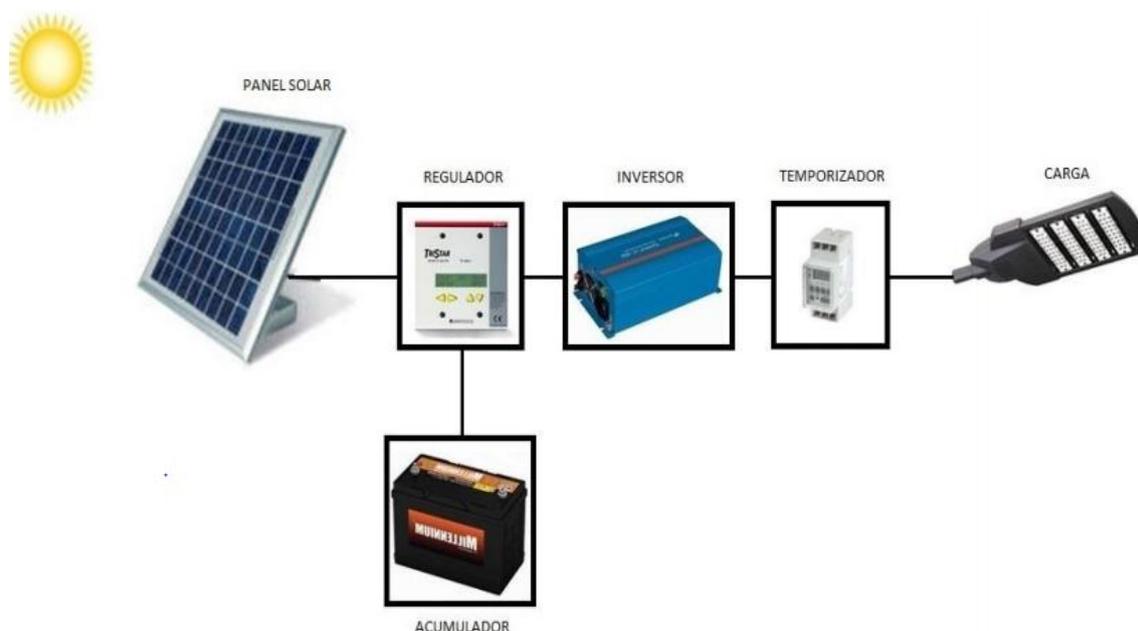
- TRANSFORMADOR 4.

Trafo # 4, con código de equipo 5925, es una estación de transformación de 112.5 KVA [9], que alimenta a los edificios del Rectorado, y Espacios de Deporte.

3.1.2 Sistema Fotovoltaico.

La universidad Politécnica Salesiana cuenta con un sistema fotovoltaico aislado de la red eléctrica con una capacidad de 870 Wp instalados, Este sistema está conformado por un grupo de 3 paneles solares policristalinos de 150W y 3 paneles monocristalinos de 140W de la marca SIMAX GREEN NEW ENERGY, que alimentan a una carga de 540 W correspondiente a 3 luminarias Greenstar GLX72XD Galaxy 180 W, instaladas en la terraza del edificio Guillermo Mensi [28]. En laFigura 10se muestra una descripción gráfica del sistema existente instalado en la UPS.

Figura 10 Distribución de elemento de la instalación Fotovoltaica UPS [28]



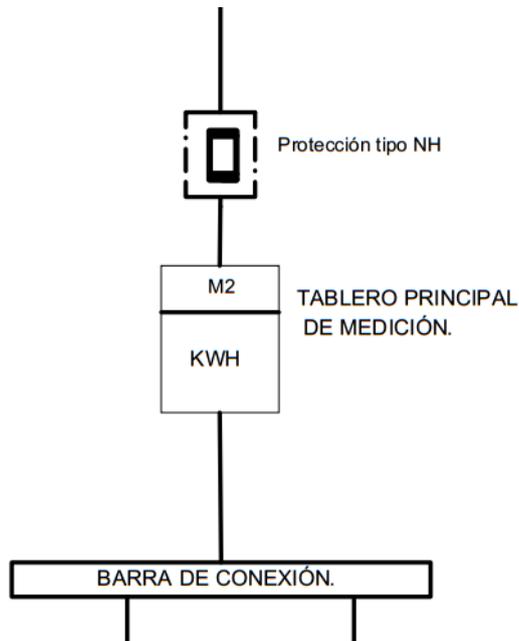
3.2 SISTEMAPROYECTADO DE UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA SEDE CUENCA.

3.2.1 Sistema Eléctrico

En la implementación del sistema fotovoltaico conectada a la red eléctrica para la universidad, se toma como base la instalación existente aislada de la red, la cual se modifica ciertas conexiones para implementar los elementos encargados para realizar una conexión con la red eléctrica, más adelante se detallan cada uno de estos elementos, seguidamente la inyección de este sistema se lo realiza en la red pública de baja tensión del transformador 2 de la UPS, que alimenta al edificio Guillermo Mensi y cargas del área de recreación, este sistema se lo puede observar en laFigura 11.

Figura 11 Diagrama Unifilar Estación de transformación 2

Fuente: Autores



3.2.2 Sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica.

Para la implantación del proyecto fotovoltaico conectado a la red eléctrica, se utilizó el grupo de paneles fotovoltaicos existentes ubicados en la terraza del edificio Cornelio Merchán. Adicionalmente, para la conexión a red se adquirió un conjunto de equipos de la familia SMA[29] detallados a continuación.

3.2.2.1 Elementos de conexión.

3.2.2.1.1 Módulos Fotovoltaicos

Se utiliza dos grupos de paneles fotovoltaicos de diferente tecnología; dos paneles de 150W, y dos de 140W.

➤ *Silicio monocristalino (Si-m)*

Células que se obtienen a partir de barras cilíndricas de silicio que son elaboradas en hornos especiales [30][31].

➤ *Silicio policristalino (Si-p)*

Células que se obtienen a partir de bloques de silicio producidas por fusión de bocados de silicio puro en moldes especiales[30][31].

En la Tabla 18 se muestra las características técnicas de los equipos de generación fotovoltaica, para el proyecto se utilizó dos tecnologías diferentes, un conjunto de paneles de monocristalino y otro de policristalino de la marca SIMAX GREEN NEW ENERGY [30].

Tabla 18 Características Técnicas de los paneles fotovoltaicos. [31]

SIMAX GREEN NEW ENERGY (EUROPE) GmbH		SIMAX GREEN NEW ENERGY (EUROPE) GmbH	
Model	SM636-150	Model	SP636-140
Potencia máxima (Pm)	150W	Potencia máxima (Pm)	140W
Tolerancia	0~+3W	Tolerancia	0~+3W
Tensión en Pmax (Vmp) 17.8V	17.8V	Tensión en Pmax (Vmp) 17.8V	17.8V
Corriente en Pmáx (Imp)	8.43A	Corriente en Pmáx (Imp)	7.87A
Tensión de corto circuito (Voc)	21.8V	Tensión de corto circuito (Voc)	21.8V
Corriente de corto circuito (Isc)	9.27A	Corriente de corto circuito (Isc)	8.56A
Temperatura nominal de operación de la celda (NOCT)	47+-2°C	Temperatura nominal de operación de la celda (NOCT)	47+-2°C
Tensión máxima del sistema	1000VDC	Tensión máxima del sistema	1000VDC
Maxima capacidad del fusible	10A	Maxima capacidad del fusible	10A
Temperatura de operación	-40°C a +85°C	Temperatura de operación	-40°C a +85°C
Clase de aplicación	A	Clase de aplicación	A
Tecnología de la celda	Mono-Si	Tecnología de la celda	Poli-Si
Peso	10kg	Peso	10kg
Dimension (mm)	1482x676x35	Dimension (mm)	1482x676x35

3.2.2.1.2 Inversor SUNNY BOY 240-US

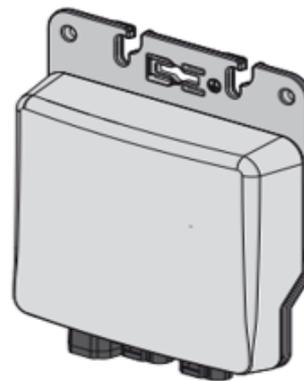
La corriente generada por los módulos fotovoltaicos es continua. Este elemento sunny boy 240-US es un micro inversor para sistemas fotovoltaicos conectados a la red, encargado de transformar a corriente alterna que sea capaz de adaptarse a la red eléctrica. Estos inversores se le atribuyen las siguientes funciones [29]:

- Transformación de corriente DC en AC.
- Conseguir el máximo rendimiento del campo fotovoltaico.
- Acoplamiento a la red eléctrica evitando modificar sus características.

En la Tabla 19 se muestran las características técnicas del inversor utilizado en el proyecto.

Tabla 19 Características técnicas Inversor Sunny Boy 240.US [29]

SUNNY BOY 240-US.	
DC INPUT.	
Maximum input voltage	45V
MPP voltage range at 240V	23.0v to 39.0 V
Rated Input voltage	29.5V
Maximum input current	8.5A
Maximum backfeed current to input source	0A
AC OUTPUT	
Rated power at 240V, 60 Hz.	240W.
Maximum apparent Ac power.	240 VA
Rated grid voltage.	240V.
Nominal AC voltage	2x120V.
AC voltage range	211V to 264V.
Nominal AC current	1A
Maximum output current.	1A
Total harmonic distortion of the output current with total harmonic distortion of the AC voltage	$\leq 3 \%$
Operating range at AC power frequency 60HZ.	59.3Hz to 60.5Hz.
Maximum output fault current	241 A
Maximum efficiency, η_{max} .	95,9%

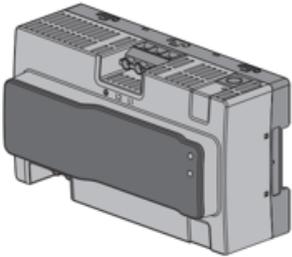


3.2.2.1.3 Sunny Multigate US.

Es un equipo de comunicación que forma el punto de conexión eléctrica con el sistema fotovoltaico, permitiendo conectar un total de doce inversores SUNNY BOY 240. Esta unidad de comunicación está conectada entre el micro inversor y la red eléctrica para alimentar la corriente alterna generada por los paneles fotovoltaicos a la red de suministro eléctrico.

Tabla 20 Características técnicas Inversor Sunny Multigate-US [29]

SUNNY MULTIGATE-US.	
AC INPUT.	
Maximum number of connected micro inverters	12
Minimum number of connected micro inverters	1
Maximum input current	12A
AC OUTPUT.	
Rated power at 240 V, 60Hz.	2880W
Rated grid voltage	240V
Nominal AC voltage	2x120V.
AC voltage range	211V to 264 V.
Nominal AC current at 240 V	12A
Total harmonic distortion of the output current with total harmonic distortion of the AC voltage	$\leq 3 \%$
AC power frequency	60Hz.
Operating range at AC power frequency 60HZ.	59.3Hz to 60.5Hz.
Maximum permissible fuse protection	15A.
Connection phases.	2



Sunny Multigate-US

3.2.2.2 Instalación Fotovoltaica.

Del sistema fotovoltaico aislado existente, se hace uso de cuatro de los seis paneles fotovoltaicos de diferente tecnología de fabricación.

3.2.2.2.1 Orientación de los paneles fotovoltaicos.

La orientación de los PV para generación depende de sus posiciones angulares con respecto al sol. Independientemente de su tecnología de fabricación estos sistemas están instalados con una orientación hacia el sur geográfico en el hemisferio norte y a su vez hacia el norte geográfico en el hemisferio sur, para nuestro caso en particular los paneles están instalados hacia el norte [32]. Véase la Figura 12

3.2.2.2.2 Inclinación de los paneles fotovoltaicos.

La inclinación de los paneles es un factor muy importante en la generación fotovoltaica, al tratarse de una instalación conectada a la red eléctrica, la inclinación va a depender del tipo de estructura en la cual es montado, para nuestro caso la inclinación de los PV están a una inclinación de 10° con el principal objetivo que la superficie reciba la mayor cantidad de radiación solar. De esta forma se maximiza la producción de energía y a la vez se evita que las celdas solares se llenen de suciedad [32]. (Véase la Figura 12)

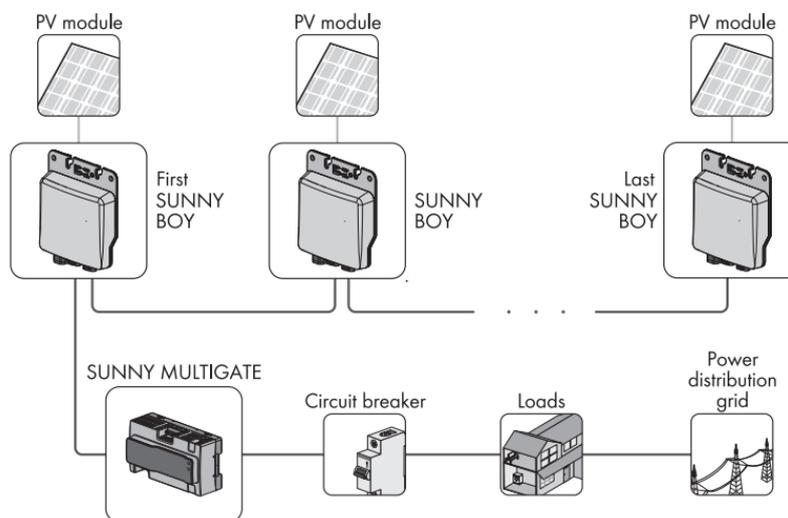
Figura 12 Orientación e Inclinación de los paneles Fotovoltaicos de la UPS [32]



3.2.2.2.3 Monitoreo en tiempo real del sistema fotovoltaico.

Sunny Multigate es el equipo que permite realizar el monitoreo de la planta fotovoltaica. Este proceso lo realiza a través de un interfaz del PLC con la plataforma virtual del equipo, creando una base de datos de algunos parámetros como: Potencia, Energía, Emisiones CO₂, Bitácora de eventos suscitados en la planta, entre otros. En la Figura 13 se puede apreciar la arquitectura del sistema fotovoltaico estudiado en el presente trabajo.

Figura 13 Arquitectura del sistema de generación [29]



3.2.2.3 Sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica.

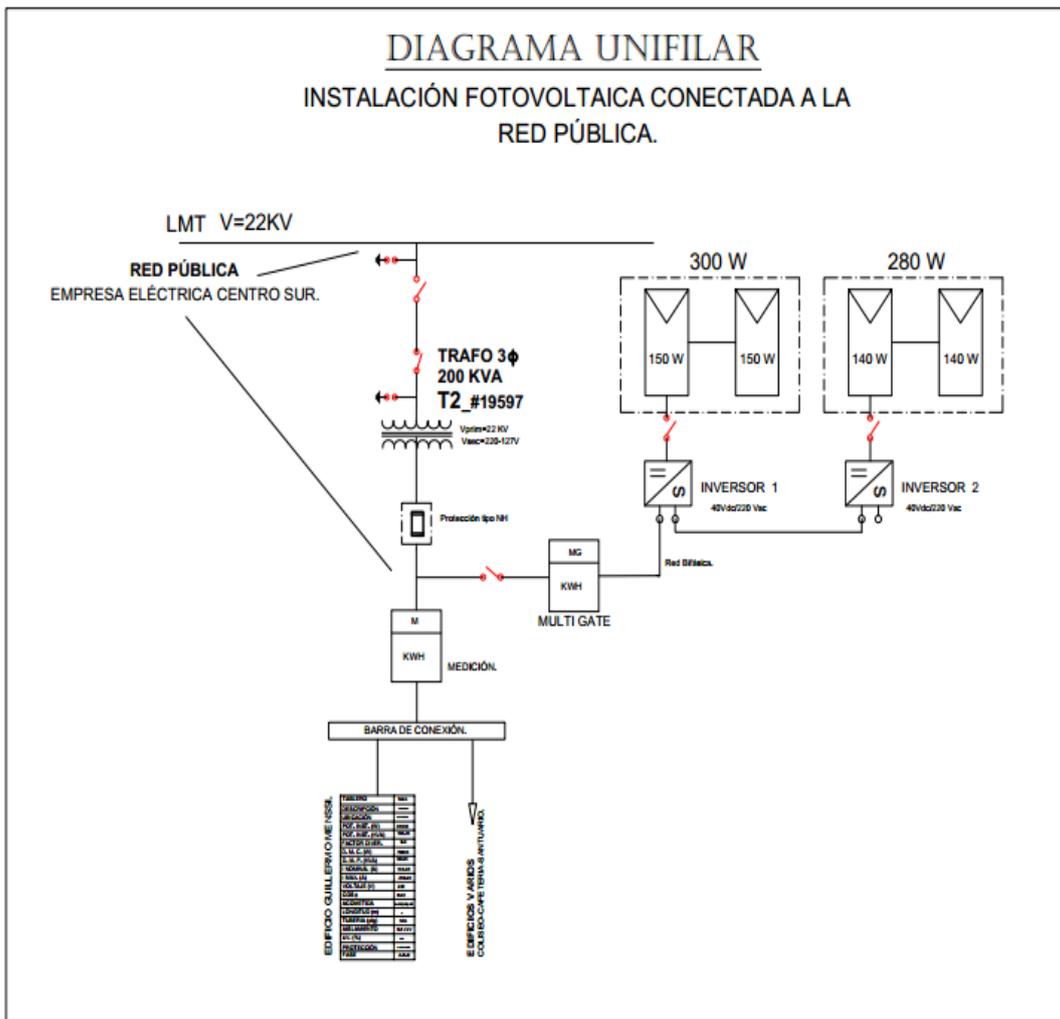
El sistema fotovoltaico está conectado a la red eléctrica en baja tensión de la estación de transformación de 200KVA, propiedad de la Universidad Politécnica Salesiana.

El sistema fotovoltaico tiene una generación de 580 Wp. Se encuentra conformado por dos paneles monocristalinos de 140 Wp y dos policristalinos de 150 Wp. Cada conjunto de paneles tiene su respectivo inversor para la conversión de la corriente directa en

corriente alterna. Antes de su conexión a la red eléctrica, la salida de los inversores se conecta a un equipo de comunicación que establece el punto de conexión común con la red eléctrica tal como se observa en la Figura 14. Este equipo además permite realizar el monitoreo remoto de la planta mediante comunicación Ethernet.

Figura 14 Sistema Fotovoltaico conectado a la red.

Fuente: Autores.



3.2.2.4 Bitácora de eventos.

Se presentaron diferentes eventos durante el periodo de medición del sistema, los eventos se identificaron mediante tres tipos de mensajes, cada uno con su símbolo correspondiente. Véase Tabla 21

Tabla 21 Simbología de los tipos de mensajes

Simbología	Tipo de mensaje
	Informativo
	Advertencia
	Error

Ya conocido el significado de la simbología usada para identificar el tipo de mensaje, es necesario identificar los equipos en los que se presenta el problema. El inversor SB 240-US-10 204 transforma la potencia generada por los paneles cristalinos de 150 Wp, mientras que el inversor SB 240-US-10 657 se encuentra conectado a los paneles monocristalinos de 140 Wp. A continuación se presenta en la Tabla 22 los eventos suscitados durante el periodo de medición.

Tabla 22 Eventos durante el periodo de monitoreo

TIPO	HORA	EQUIPOS	DESCRIPCIÓN
	07/05/2016 16:48	SB 240-US-10 204	Tensión del generador excesiva
	07/05/2016 16:48	SB 240-US-10 204	Esperando condiciones de arranque de CC
	07/05/2016 16:47	SB 240-US-10 204	Tensión del generador excesiva
	07/05/2016 16:47	SB 240-US-10 204	Esperando condiciones de arranque de CC
	07/05/2016 16:17	SB 240-US-10 204	Tensión del generador excesiva
	07/05/2016 12:17	SB 240-US-10 204	Tensión del generador excesiva
	07/05/2016 12:10	SB 240-US-10 204	Tensión del generador excesiva
	07/05/2016 12:04	SB 240-US-10 204	Sobretensión entrada A (SW)
	07/05/2016 12:04	SB 240-US-10 204	Sobretensión CC

	07/05/2016 12:03	SB 240-US-10 204	Sobretensión entrada A (SW)
	07/05/2016 12:03	SB 240-US-10 204	Sobretensión CC
	07/05/2016 12:03	SB 240-US-10 204	Sobretensión entrada A (SW)
	07/05/2016 12:03	SB 240-US-10 204	Sobretensión CC
	07/05/2016 12:03	SB 240-US-10 204	Sobretensión entrada A (SW)
	07/05/2016 12:03	SB 240-US-10 204	Sobretensión CC
	06/05/2016 17:14	SB 240-US-10 204	Tensión del generador excesiva
	06/05/2016 17:14	SB 240-US-10 204	Fallo de red
	06/05/2016 17:14	SB 240-US-10 204	Subtensión de red rápida
	06/05/2016 17:14	SB 240-US-10 204	No se han alcanzado las condiciones de arranque
	06/05/2016 15:14	SB 240-US-10 657	Tensión del generador excesiva
	06/05/2016 15:14	SB 240-US-10 657	Fallo de red
	06/05/2016 15:14	SB 240-US-10 657	Subtensión de red rápida
	06/05/2016 15:14	SB 240-US-10 657	No se han alcanzado las condiciones de arranque
	06/05/2016 10:03	SB 240-US-10 657	Tensión del generador excesiva
	06/05/2016 10:03	SB 240-US-10 657	No se han alcanzado las condiciones de arranque
	06/05/2016 10:03	SB 240-US-10 204	Tensión del generador excesiva
	06/05/2016 10:03	SB 240-US-10 204	No se han alcanzado las condiciones de arranque
	06/05/2016 9:14	SB 240-US-10 204	Fallo de red

	06/05/2016 9:14	SB 240-US-10 204	Subtensión de red rápida
	06/05/2016 9:02	SB 240-US-10 657	Tensión del generador excesiva
	06/05/2016 9:02	SB 240-US-10 657	Esperando condiciones de arranque de CC
	06/05/2016 9:02	SB 240-US-10 204	Tensión del generador excesiva
	06/05/2016 9:02	SB 240-US-10 204	Esperando condiciones de arranque de CC
	06/05/2016 8:58	SB 240-US-10 657	Fallo de red
	06/05/2016 8:58	SB 240-US-10 657	Subtensión de red rápida
	06/05/2016 8:57	SB 240-US-10 204	Fallo de red
	06/05/2016 8:57	SB 240-US-10 204	Subtensión de red rápida
	06/05/2016 8:57	SB 240-US-10 657	Fallo de red
	06/05/2016 8:57	SB 240-US-10 657	Subtensión de red rápida
	06/05/2016 8:32	SB 240-US-10 204	Tensión del generador excesiva
	06/05/2016 8:32	SB 240-US-10 657	Tensión del generador excesiva
	05/05/2016 16:27	SB 240-US-10 204	Tensión del generador excesiva
	05/05/2016 16:24	SB 240-US-10 204	Tensión del generador excesiva
	05/05/2016 12:28	SB 240-US-10 204	Tensión del generador excesiva
	05/05/2016 12:28	SB 240-US-10 204	Fallo de red
	05/05/2016 12:28	SB 240-US-10 204	Subtensión de red rápida
	05/05/2016 12:28	SB 240-US-10 204	No se han alcanzado las condiciones de arranque

	05/05/2016 12:13	SB 240-US-10 657	Tensión del generador excesiva
	05/05/2016 12:13	SB 240-US-10 657	Fallo de red
	05/05/2016 12:13	SB 240-US-10 657	Subtensión de red rápida
	05/05/2016 12:13	SB 240-US-10 657	No se han alcanzado las condiciones de arranque
	05/05/2016 9:48	SB 240-US-10 204	Tensión del generador excesiva
	05/05/2016 9:48	SB 240-US-10 657	Tensión del generador excesiva
	05/05/2016 9:48	SB 240-US-10 204	No se han alcanzado las condiciones de arranque
	05/05/2016 9:48	SB 240-US-10 657	No se han alcanzado las condiciones de arranque
	05/05/2016 8:48	SB 240-US-10 204	Tensión del generador excesiva
	05/05/2016 8:48	SB 240-US-10 657	Tensión del generador excesiva
	05/05/2016 8:48	SB 240-US-10 204	Esperando condiciones de arranque de CC
	05/05/2016 8:48	SB 240-US-10 657	Esperando condiciones de arranque de CC
	05/05/2016 8:26	SB 240-US-10 204	Fallo de red
	05/05/2016 8:26	SB 240-US-10 204	Subtensión de red rápida
	05/05/2016 8:17	SB 240-US-10 657	Tensión del generador excesiva
	05/05/2016 8:17	SB 240-US-10 204	Tensión del generador excesiva
	05/05/2016 8:15	SB 240-US-10 204	Subtensión de red rápida
	05/05/2016 8:15	SB 240-US-10 204	Fallo de red
	05/05/2016 8:15	SB 240-US-10 657	Fallo de red

	05/05/2016 8:15	SB 240-US-10 657	Subtensión de red rápida
	05/05/2016 8:15	SB 240-US-10 204	Subtensión de red rápida
	05/05/2016 8:15	SB 240-US-10 657	Fallo de red
	05/05/2016 8:15	SB 240-US-10 657	Subtensión de red rápida
	05/05/2016 8:15	SB 240-US-10 657	Subtensión de red rápida
	04/05/2016 12:35	SB 240-US-10 204	Tensión del generador excesiva
	04/05/2016 12:35	SB 240-US-10 204	Fallo de red
	04/05/2016 12:35	SB 240-US-10 204	Subtensión de red rápida
	04/05/2016 12:35	SB 240-US-10 204	No se han alcanzado las condiciones de arranque
	04/05/2016 12:28	SB 240-US-10 657	Tensión del generador excesiva
	04/05/2016 12:28	SB 240-US-10 657	Fallo de red
	04/05/2016 12:28	SB 240-US-10 657	Subtensión de red rápida
	04/05/2016 12:28	SB 240-US-10 657	No se han alcanzado las condiciones de arranque
	04/05/2016 10:05	SB 240-US-10 204	Tensión del generador excesiva
	04/05/2016 10:05	SB 240-US-10 204	No se han alcanzado las condiciones de arranque
	04/05/2016 10:05	SB 240-US-10 657	Tensión del generador excesiva
	04/05/2016 10:05	SB 240-US-10 657	No se han alcanzado las condiciones de arranque
	04/05/2016 9:05	SB 240-US-10 204	Tensión del generador excesiva
	04/05/2016 9:05	SB 240-US-10 204	Esperando condiciones de arranque de CC

	04/05/2016 9:04	SB 240-US-10 657	Tensión del generador excesiva
	04/05/2016 9:04	SB 240-US-10 657	Esperando condiciones de arranque de CC
	04/05/2016 8:35	SB 240-US-10 204	Fallo de red
	04/05/2016 8:35	SB 240-US-10 204	Subtensión de red rápida
	04/05/2016 8:35	SB 240-US-10 204	Fallo de red
	04/05/2016 8:35	SB 240-US-10 204	Subtensión de red rápida
	04/05/2016 8:35	SB 240-US-10 657	Fallo de red
	04/05/2016 8:35	SB 240-US-10 657	Subtensión de red rápida
	04/05/2016 8:35	SB 240-US-10 657	Fallo de red
	04/05/2016 8:35	SB 240-US-10 657	Subtensión de red rápida
	04/05/2016 8:35	SB 240-US-10 204	Subtensión de red rápida
	04/05/2016 8:34	SB 240-US-10 657	Subtensión de red rápida
	04/05/2016 8:34	SB 240-US-10 204	Tensión del generador excesiva
	04/05/2016 8:34	SB 240-US-10 657	Tensión del generador excesiva

4 CAPITULO: ANALISIS Y RESULTADOS

En esta sección se presentan diferentes gráficas usadas para ilustrar los resultados producto de las mediciones realizadas durante siete días continuos. Las mediciones y el posterior análisis se hicieron acorde a lo establecido en la regulación 004/01 para análisis de calidad de energía. Para magnitudes que nos constan en la regulación antes mencionada, se usó normas internacionales tales como la IEEE Std. 1159.

4.1 ANALISIS SIN SFV

En este apartado se analiza la red eléctrica convencional sin la conexión del SFV.

4.1.1 Niveles de Voltaje

En las Figura 15, se puede apreciar las variaciones de voltaje máximo, medio y mínimo del sistema eléctrico alimentado por el transformador de 200 KVA antes mencionado, donde se puede observar que inicialmente el sistema presenta variaciones de niveles de voltaje que están dentro del rango permitido que establece la regulación Ecuatoriana 004/01. En la Figura 17 se presenta en el día 3 un efecto de variación de voltaje que viola los límites establecidos por la regulación.

Figura 15 Niveles de voltaje máximos registrados.

Fuente: Autores.

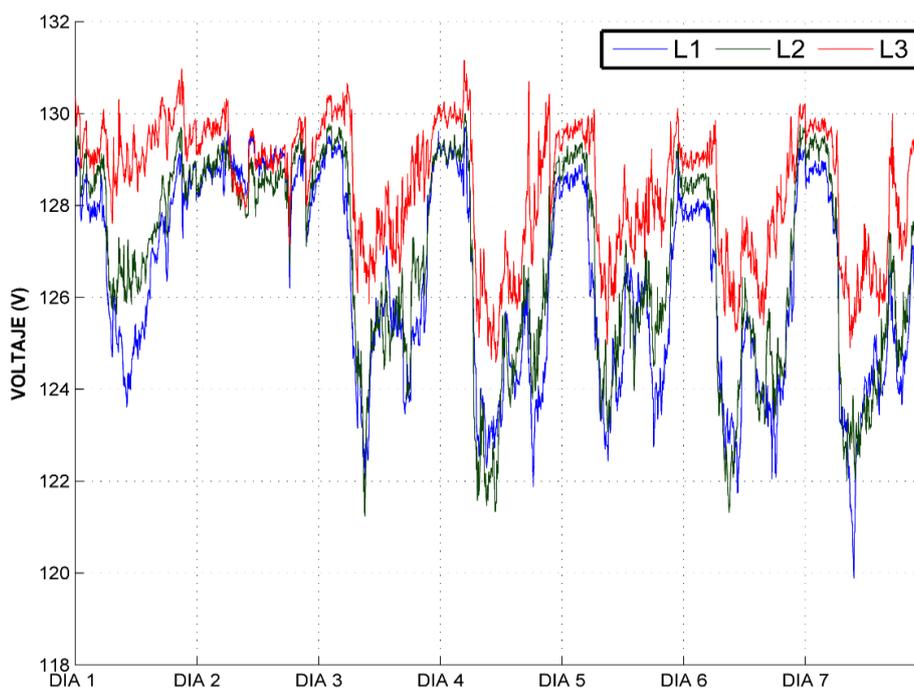


Figura 16 Niveles de voltaje medios registrados

Fuente: Autores

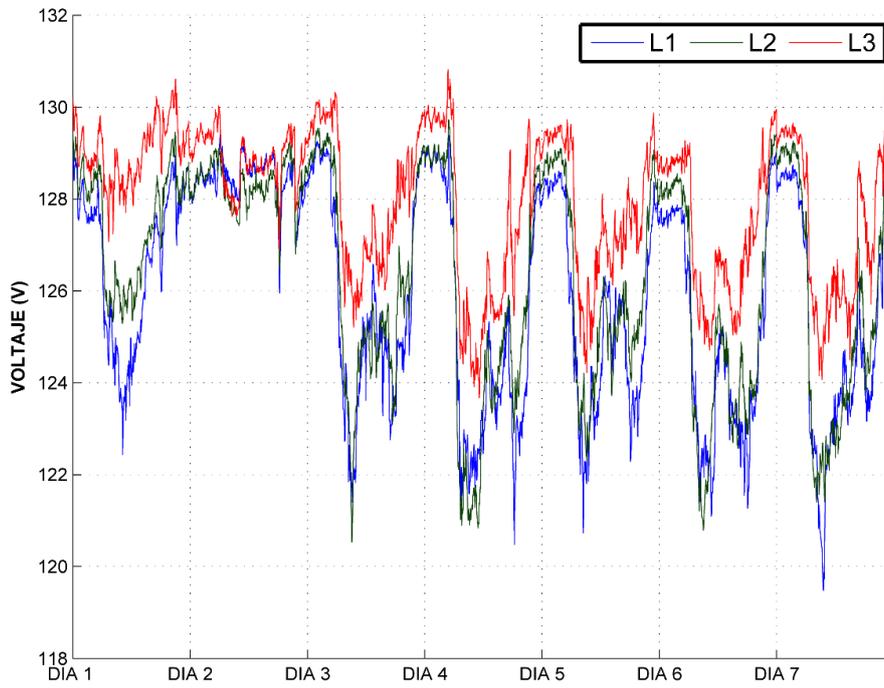
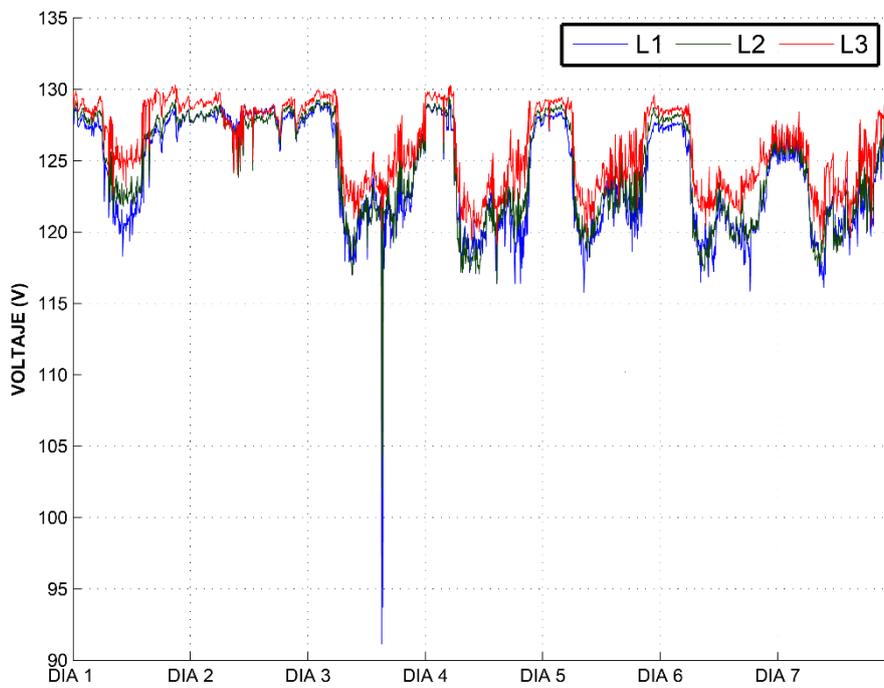


Figura 17 Niveles de voltaje mínimos registrados

Fuente: Autores.

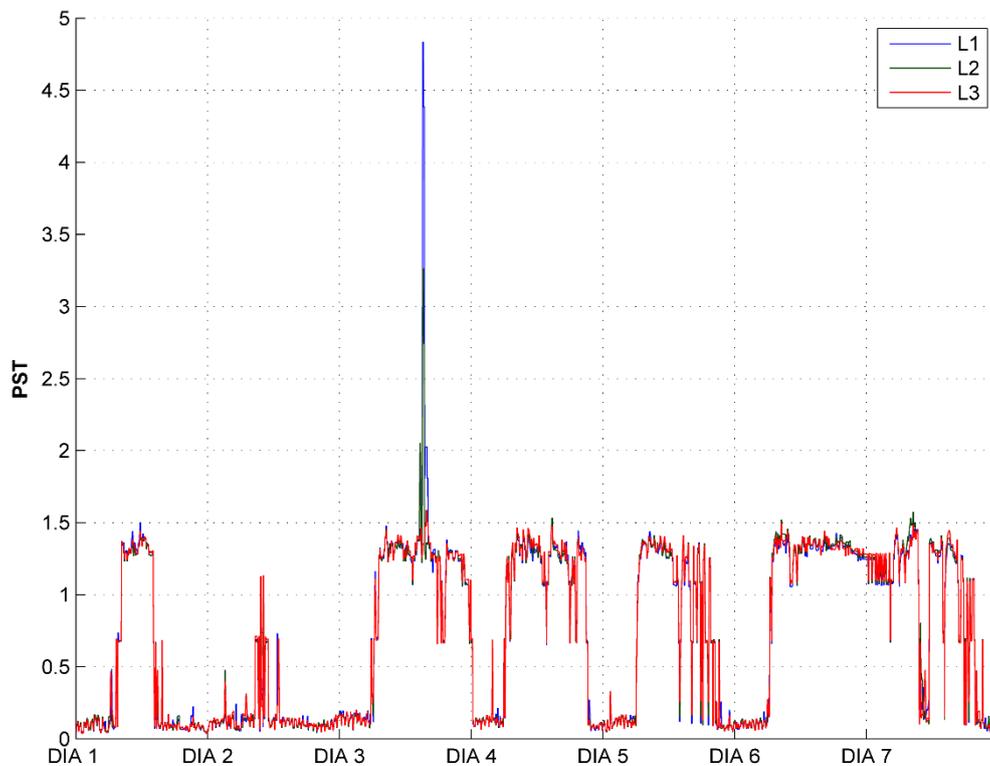


4.1.2 Perturbaciones.

Las perturbaciones de corta duración no deben superar la unidad de acuerdo a lo estipulado en la regulación ecuatoriana. En la Figura 18 se aprecia que en la mayoría del tiempo las perturbaciones de corta duración alcanzan valores que exceden el límite permitido. Resulta evidente concluir que este efecto se produce en función de carga, dado que esta magnitud alcanza valores superiores en momentos en los cuales la universidad trabaja a mayor carga.

Figura 18 Flickers de corta duración

Fuente: Autores



Las perturbaciones de larga duración se muestran en la Figura 19 donde se puede apreciar que inicialmente el sistema presenta una violación de flickers, lo fijado por normas internacionales establece como máximo permitido de 0,8, lo que se puede ver que viola este límite, nuevamente es evidente relacionar este efecto producido en función de la carga.

Figura 19 Flickers de larga duración

Fuente: Autores.



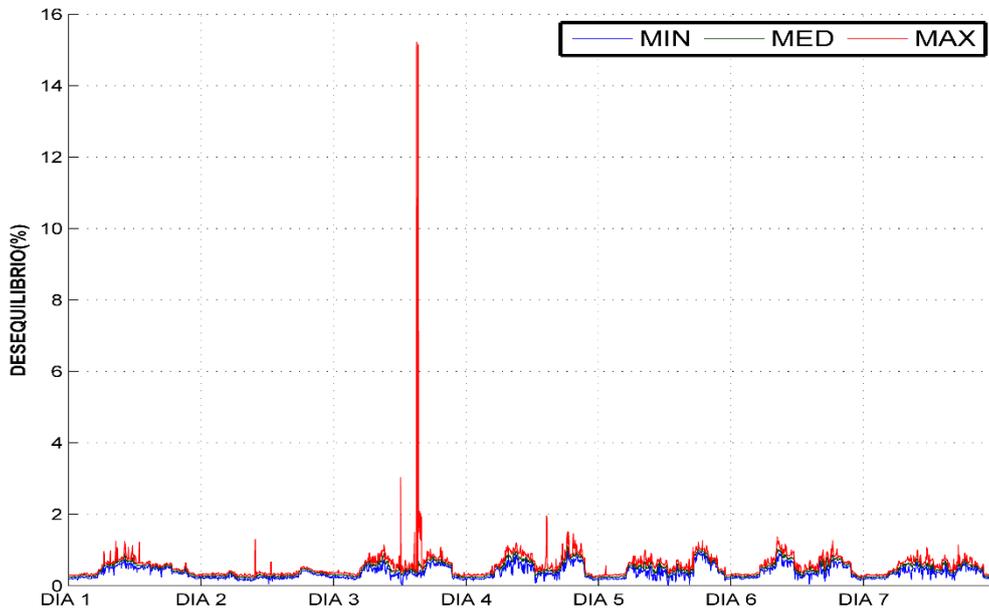
4.1.3 Desequilibrio

4.1.3.1 Desequilibrio de voltaje

El límite permitido por normas de desequilibrio de voltaje establece como máximo un 2%, inicialmente el sistema en la mayoría de tiempo de los datos registrados cumple con los permitidos, solo produciéndose un incremento fuera de rango en el día 3, efecto producido por desbalance de carga entre fases del sistema trifásico, Véase la Figura 20

Figura 20 Desequilibrio de Voltaje.

Fuente: Autores.

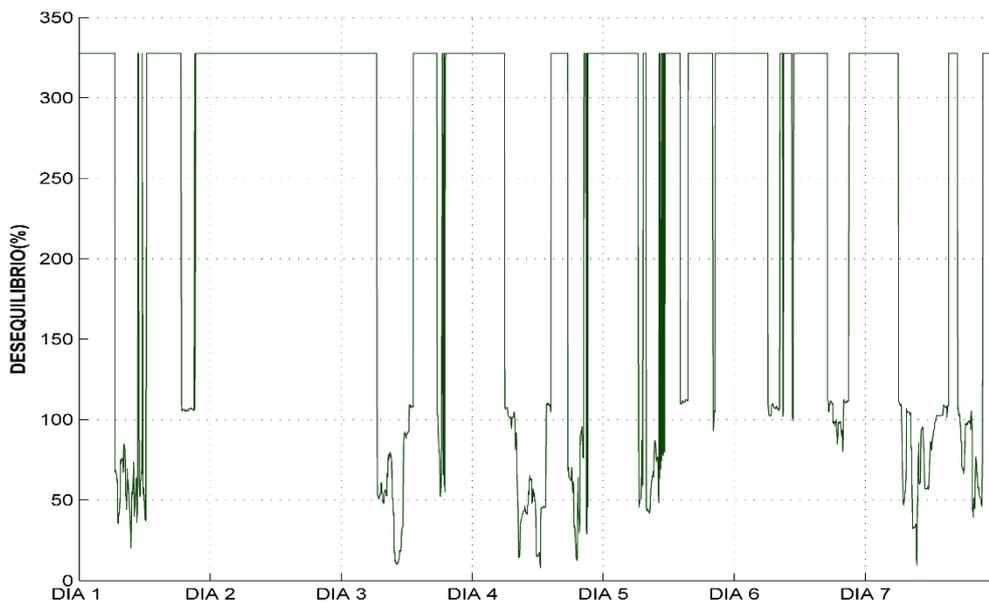


4.1.4 Desequilibrio de corriente

El desequilibrio de corriente presente en la Figura 21 muestra valores sumamente altos a lo permitido por normas del 10%, en la mayoría del tiempo de registro se puede apreciar valores considerables de incremento, lo expuesto en la Figura 21 son valores medios.

Figura 21 Desequilibrio de Corriente

Fuente: Autores

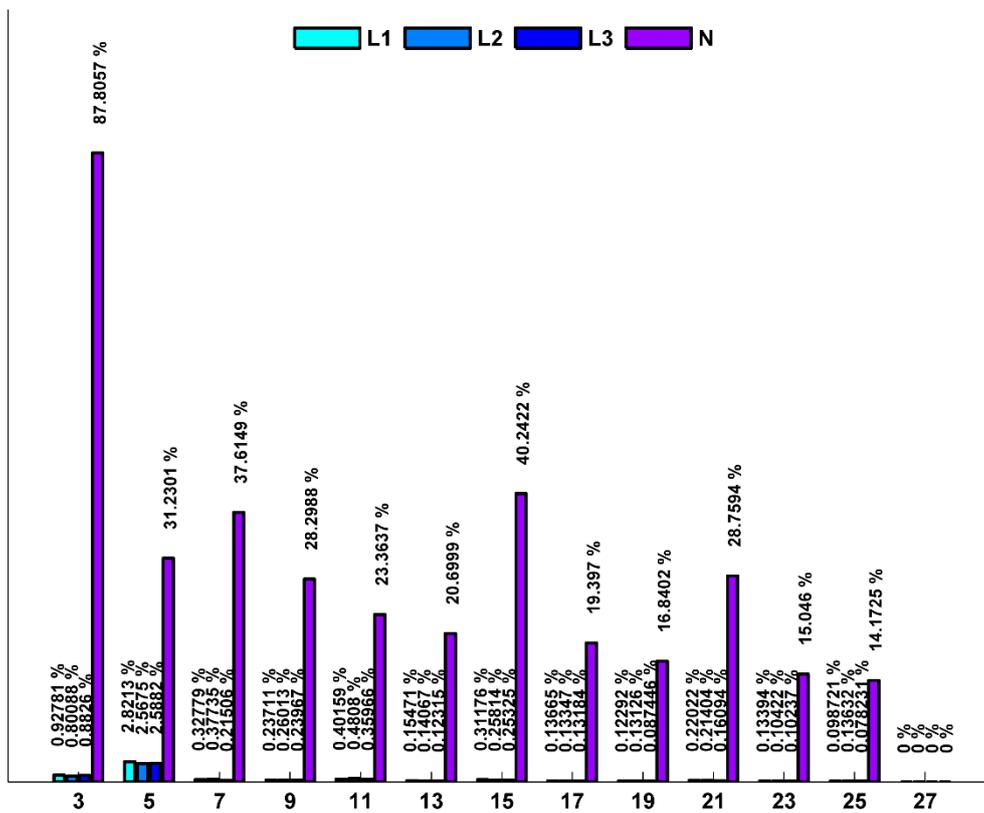


4.1.5 Armónico de Voltaje

En la Figura 22 se aprecia una gráfica en forma de barras donde se puede observar que la única violación de los valores permitidos por la regulación ecuatoriana y normas internacionales se presenta en el neutro del sistema y un cierto incremento en el armónico 5 de las fases, estando así dentro de los valores permitidos por normas, indicando que el sistema de distribución en las líneas no presentan una distorsión armónica que viole la calidad de energía.

Figura 22 Armónicos de voltaje –impares

Fuente: Autores.



Algo similar sucede con los armónicos del orden par en el neutro, se puede ver que los armónicos pares del 10 al 18 viola los límites establecidos y en el resto de armónicos presentan valores normales. Esto se puede verificar en la Figura 24 donde se puede ver de manera total el porcentaje armónico.

Figura 23 Armónicos de voltaje de orden par

Fuente: Autores.

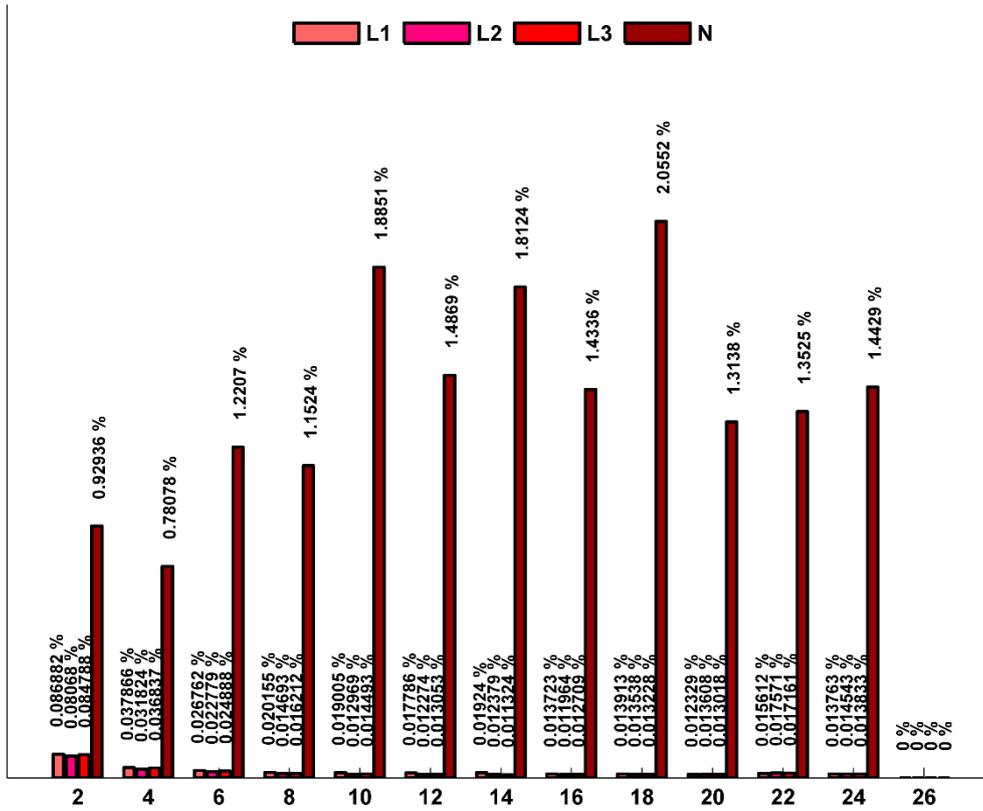
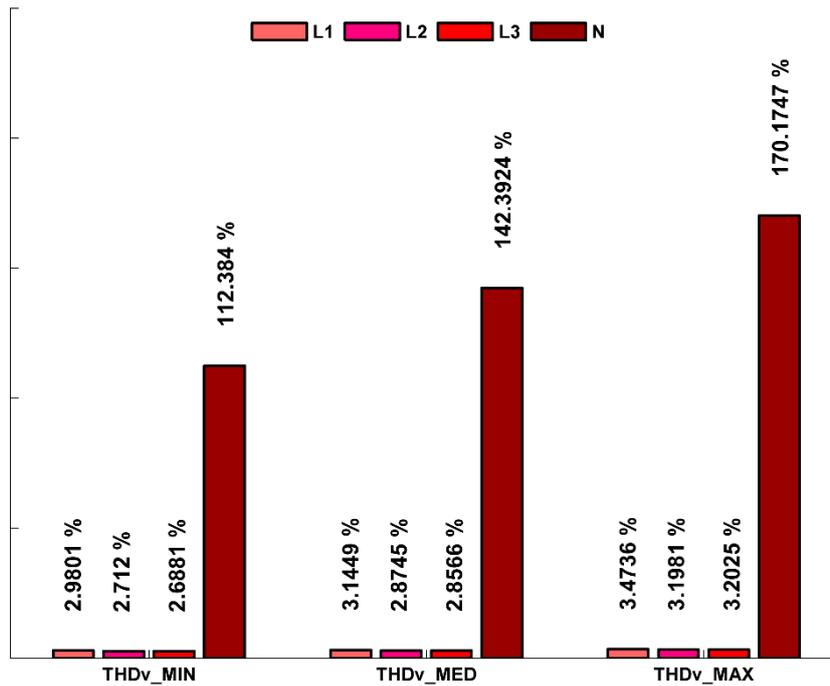


Figura 24 Distorsión armónica total de voltaje

Fuente: Autores.



4.1.6 Armónicos de corriente

Evidentemente se puede observar la variación considerable de los armónicos de corriente de orden par e impar fuera de los valores permitidos, esto se produce por la presencia de cargas no lineales a la cual está sometido el transformador de distribución. En la Figura 25, 26 se puede observar esta distorsión armónica. Esto se puede verificar en el Figura 27

Figura 25 Armónicos de corriente de orden impar

Fuente: Autores.

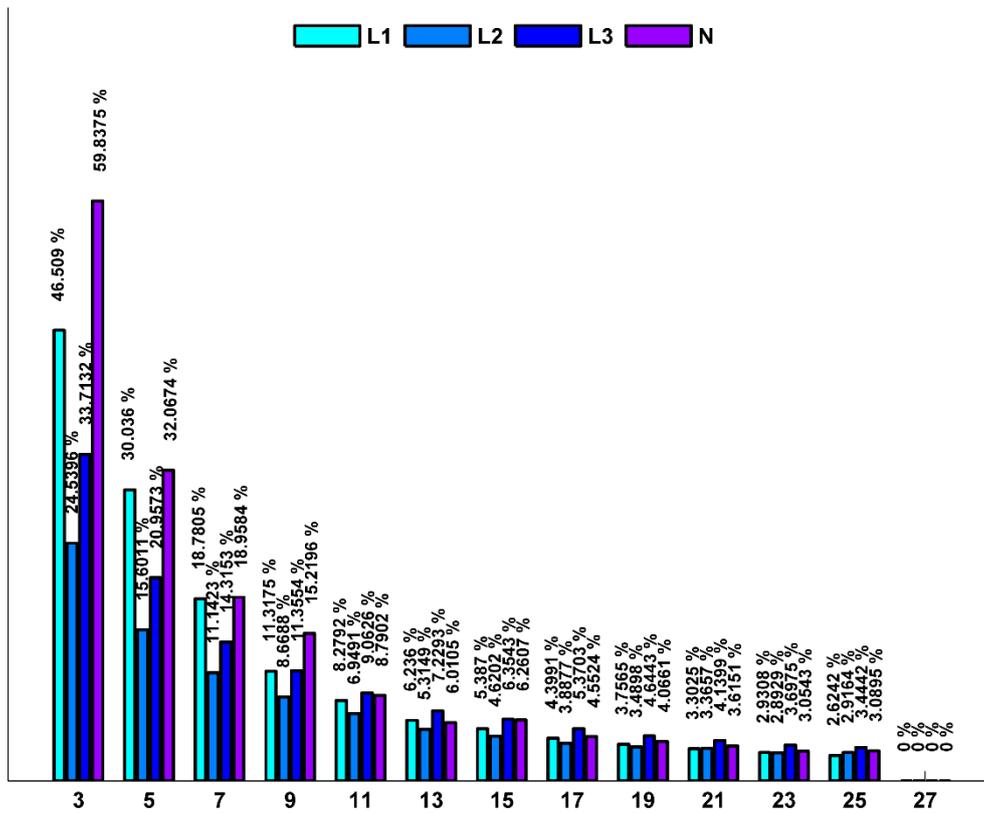


Figura 26 Armónicos de corriente de orden par.

Fuente: Autores.

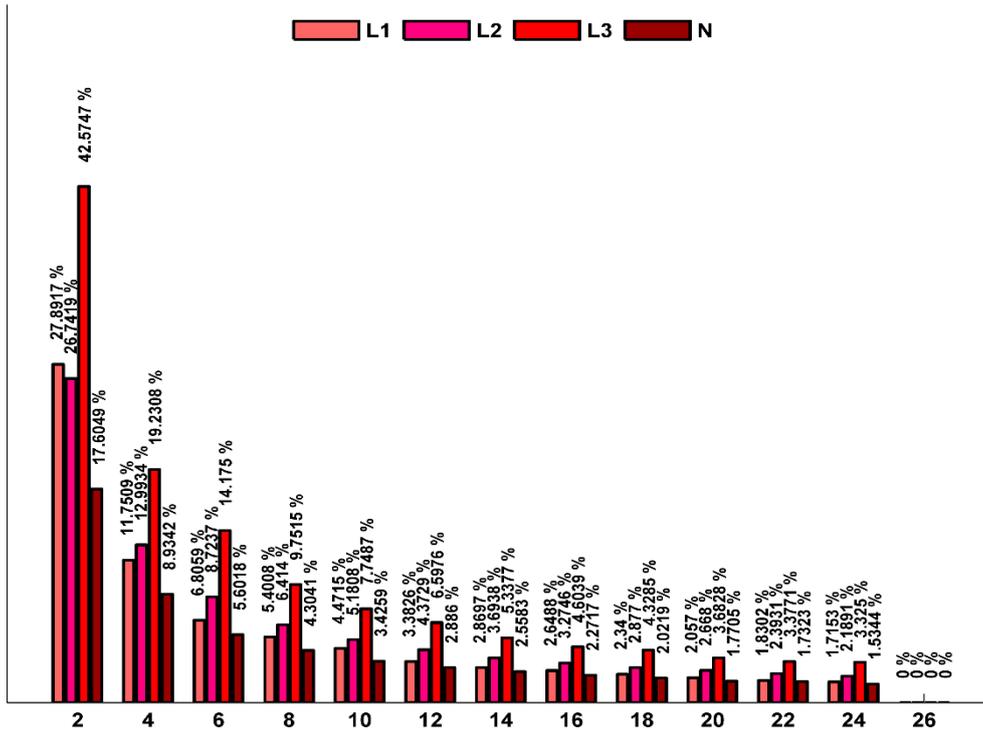
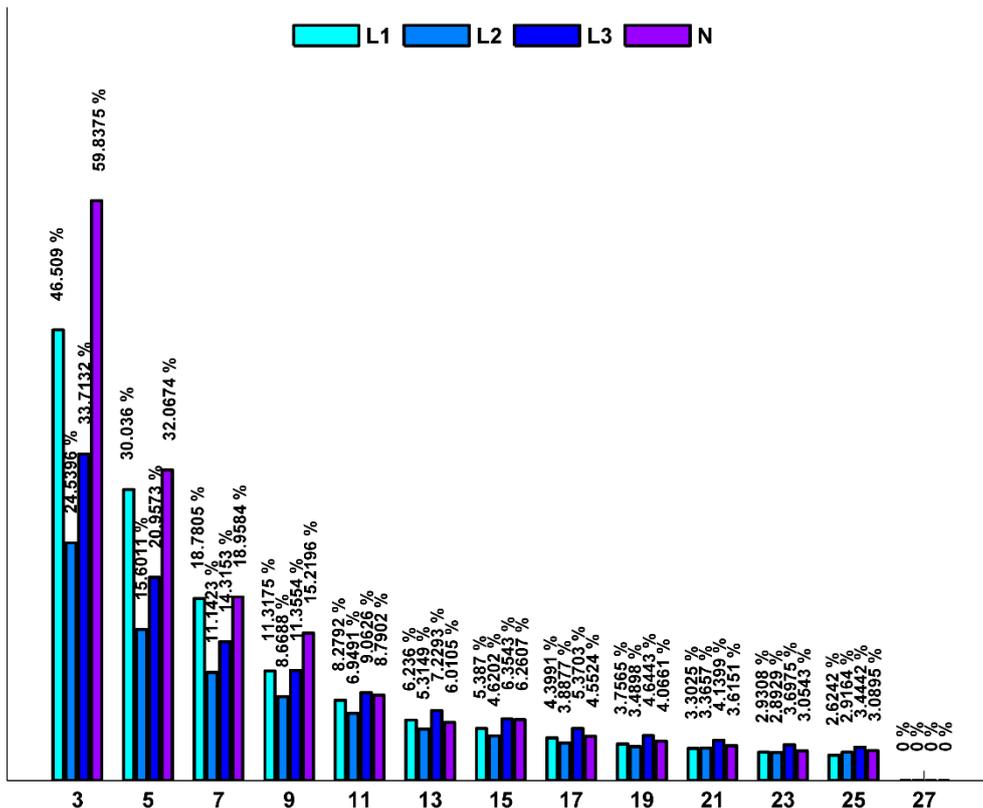


Figura 27 Armónicos de corriente total

Fuente: Autores.

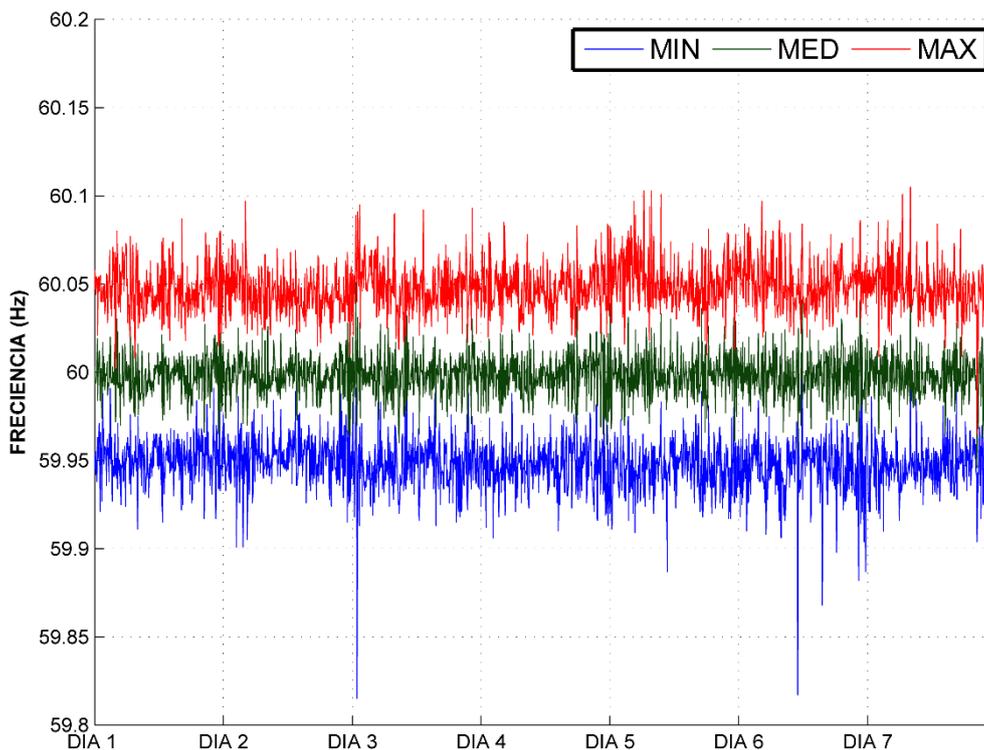


4.1.7 Frecuencia.

La variación de frecuencia permitida por la regulación ecuatoriana establece una variación de ± 0.15 Hz con respecto a lo 60Hz frecuencia de operación en el Ecuador, de acuerdo a esto el sistema eléctrico analizado presenta en la mayoría del periodo analizado valores dentro de lo permitido, presentándose una cierta variación en el día 3 y 6.

Figura 28 Frecuencia registrada

Fuente: Autores.

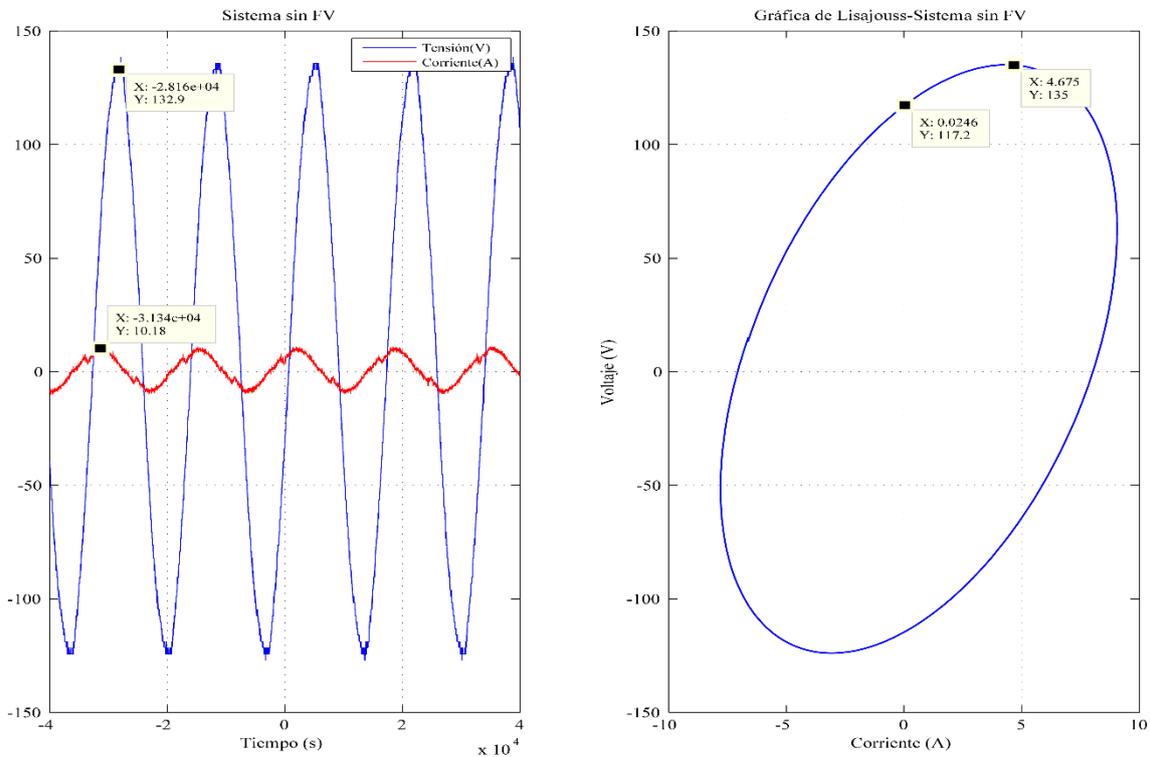


4.1.8 Angulo de Fase

En la Figura 29 se puede apreciar una gráfica donde se muestra el desfase del voltaje con la corriente del sistema sin generación fotovoltaica, indicando la posición inicial en el cual el sistema se encuentra, de acuerdo a la gráfica de Lisayouss en el sistema se puede observar que el voltaje se encuentra adelantada con respecto a la corriente alrededor de los 70° .

Figura 29 Angulo de desfase Voltaje-Corriente

Fuente: Autores.



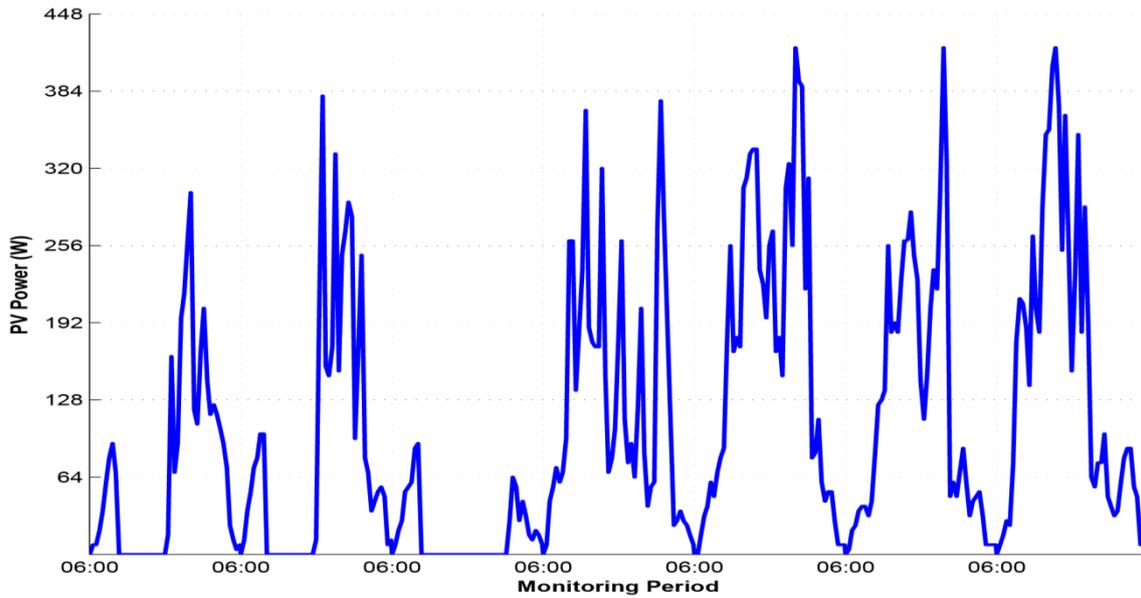
4.2 ANALISIS CON SFV

4.2.1 Generación del SFV

Durante el periodo de monitoreo el SFV mantuvo una curva de generación similar en todos los días, con excepción del día 3, en el cual el sunny portal no registró generación por parte del SFV. La razón de esta inusual situación es un problema presentado en el equipo de comunicación y los inversores para establecer condiciones de arranque adecuadas. La máxima generación que se obtuvo durante este periodo fue de 420 W. En la Figura 30 se ilustra la generación del SFV durante el periodo de monitoreo desde las 06:00 a 18:00 horas que es el rango de tiempo en el cual se tiene la presencia del Sol.

Figura 30 Generación del SFV.

Fuente: Autores.



4.2.2 Niveles de Voltaje

Los niveles de voltaje deben de mantenerse con un rango de variación máximo de $\pm 10\%$, límite establecido en la regulación ecuatoriana 004/01 para niveles de bajo voltaje en áreas urbanas. Esta magnitud cumple con los estándares de calidad, tan solo en dos momentos se producen variaciones que exceden con el límite establecido. En general el voltaje fluctúa entre 120V y 130V, tal como se lo puede apreciar en la **Error!** o se encuentra el origen de la referencia.

Figura 31 Niveles de voltaje mínimos registrados

Fuente: Autores.

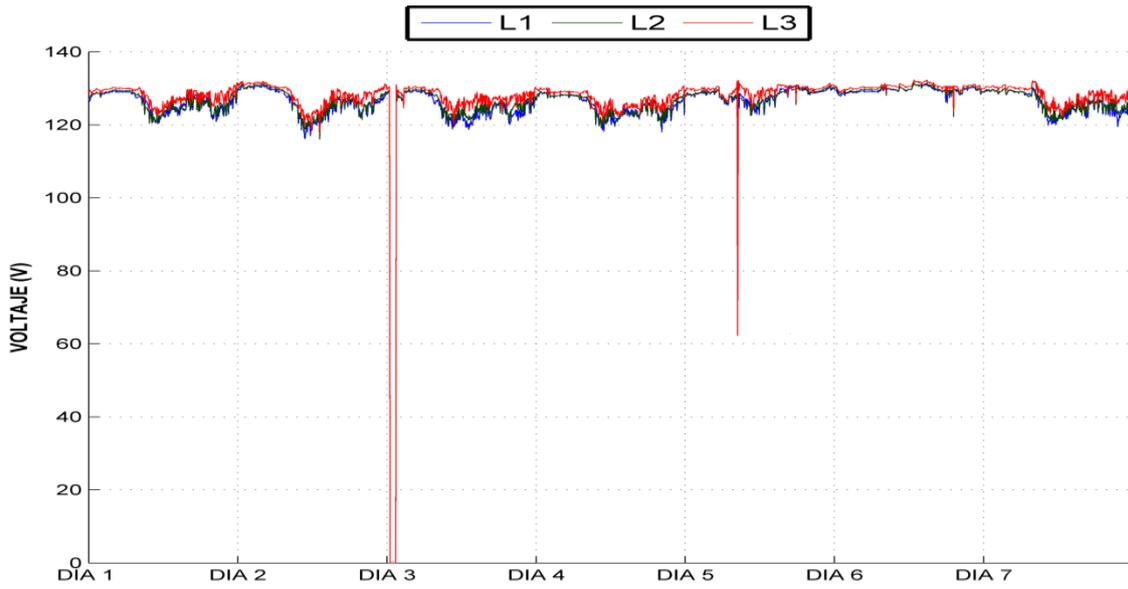


Figura 32 Niveles de voltaje medios registrados.

Fuente: Autores.

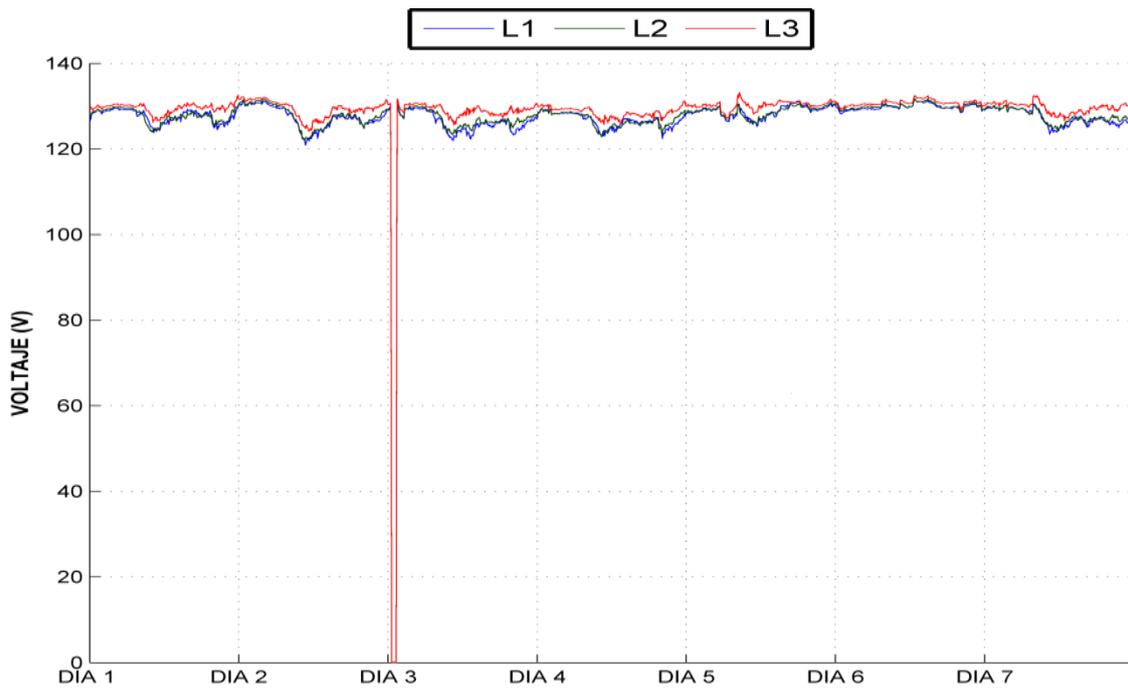
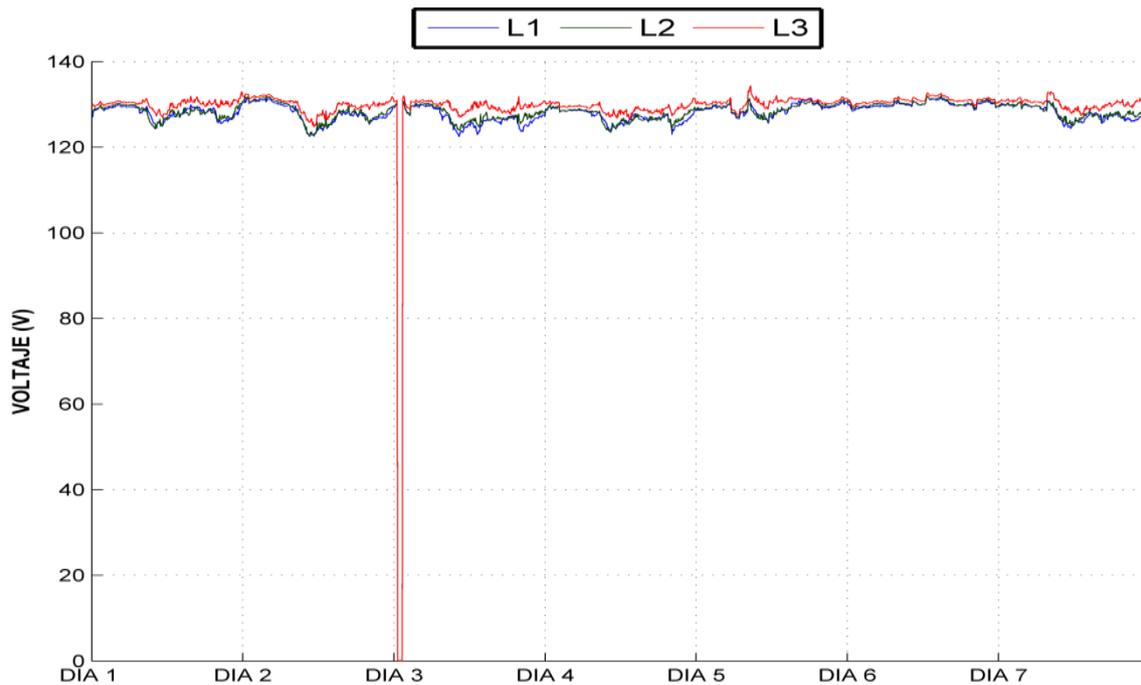


Figura 33 Niveles de voltaje medios registrados

Fuente: Autores.



4.2.3 Perturbaciones

La regulación ecuatoriana solo hace referencia a las perturbaciones de corta duración, por lo que para las perturbaciones de larga duración se usó la norma internacional IEEE Std. 1453 que indica como límites 1 y 0.8 respectivamente para los flickers. En la Figura 34, se aprecia el comportamiento de las perturbaciones durante el periodo de monitoreo. Los valores que exceden los límites, sobrepasan el 95% de las muestras. El único día que se obtuvo perturbaciones dentro de los rangos permitidos fue el día 6 del periodo de monitoreo que corresponde al día domingo. Por lo tanto, es evidente que la causa de las perturbaciones fue la carga del sistema.

Figura 34 Flickers de corta duración

Fuente: Autores.

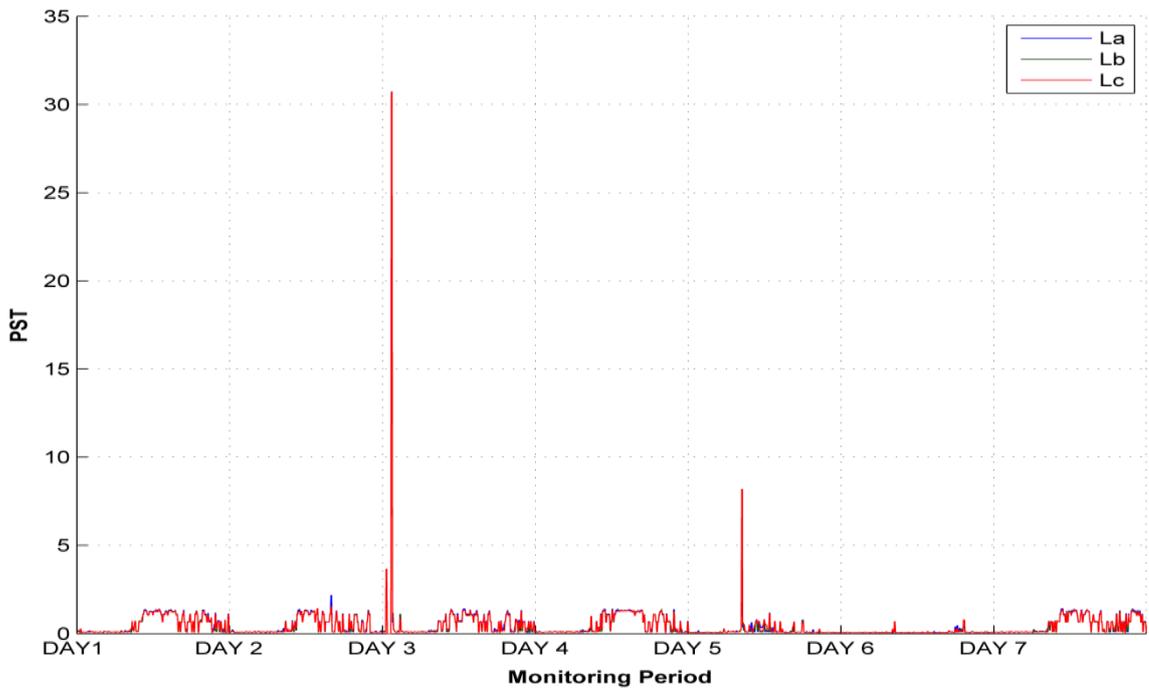
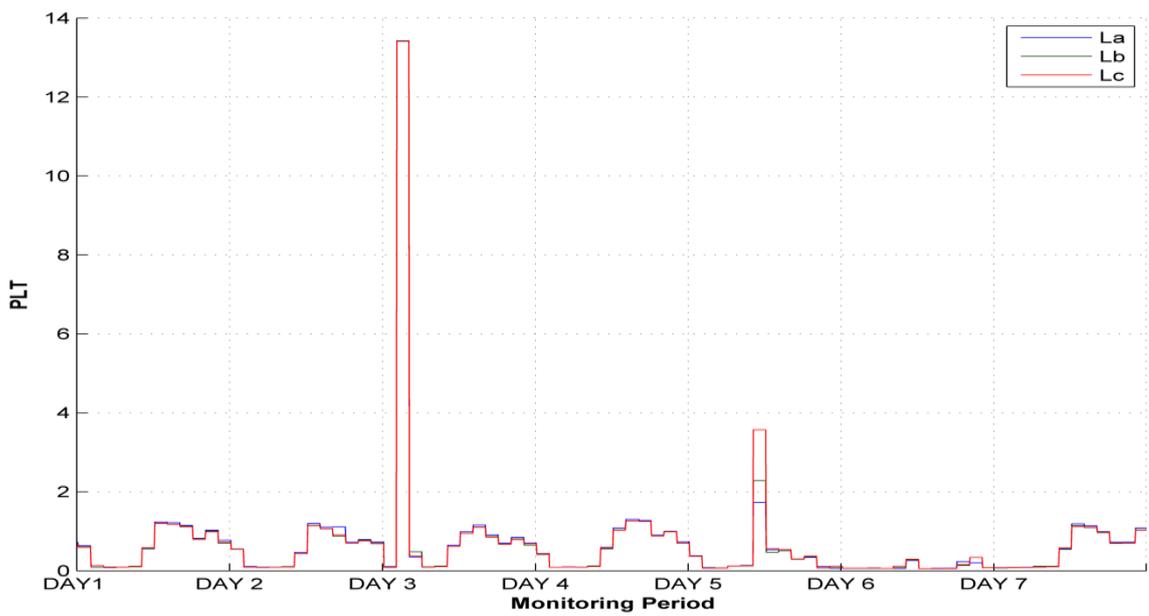


Figura 35 Flickers de larga duración

Fuente: Autores.



4.2.4 Armónicos

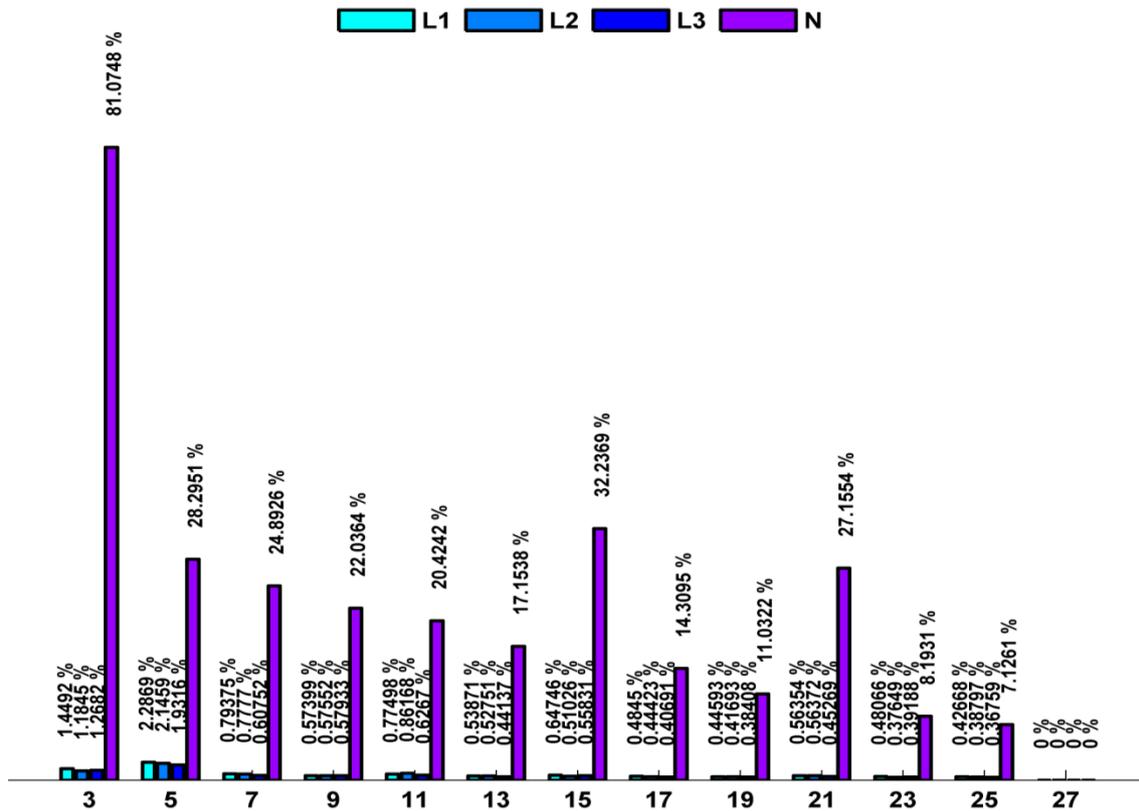
Los armónicos pares e impares son mostrados en el siguiente apartado. Los límites son establecidos por la regulación ecuatoriana y la norma internacional y se enumeraron en la sección 1 del presente trabajo.

4.2.4.1 Armónicos de voltaje

Los valores registrados durante el periodo de medición son ilustrados en la Figura 36 y la Figura 37, mediante gráficas de barras.

Figura 36 Armónicos impares de voltaje

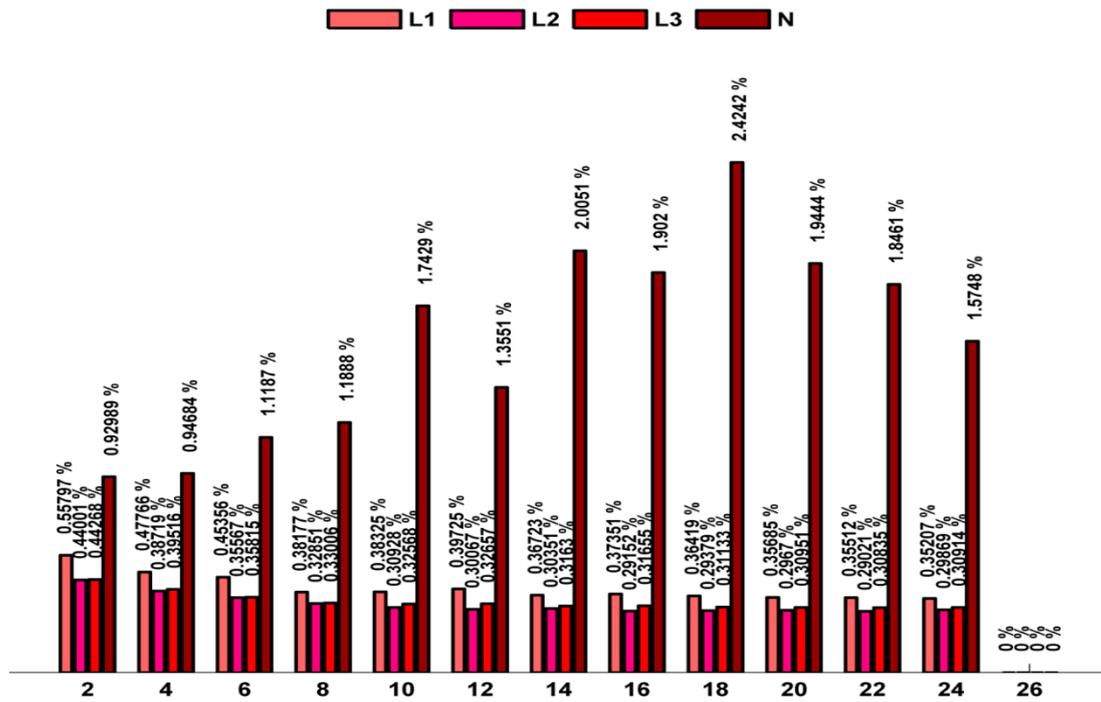
Fuente: Autores.



Los armónicos de voltaje impares en el neutro no cumplen en ninguno de sus órdenes con límites establecidos. En lo referente a los armónicos impares presentes en las ondas de voltaje de las fases, se tiene valores que se encuentran por debajo de los límites. Los armónicos de voltaje de orden par presentan valores menores que los de orden impar por lo que lógicamente cumplen con los límites en todas las fases mientras que en el neutro se excede los límites a partir del orden 6 en adelante. Los armónicos de orden superior a 25, son de valor cero por lo que no son graficados.

Figura 37 Armónicos pares de voltaje

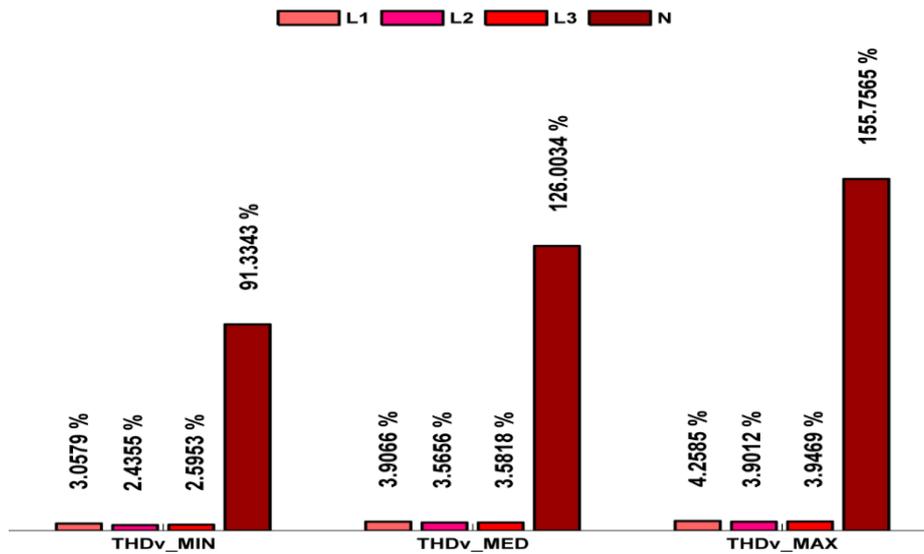
Fuente: Autores.



La distorsión total de armónicos de voltaje confirma lo expuesto mediante las gráficas de armónicos, los valores en las fases no superan los límites establecidos en las normas, mientras que en el neutro si lo hacen. En la Figura 38 se exponen los valores mínimos, medios y máximos alcanzados durante el periodo de medición.

Figura 38 Distorsión total de voltaje

Fuente: Autores.



4.2.4.2 Armónicos de corriente

Se obtienen valores mucho más altos en los armónicos de corriente de orden par e impar que los armónicos de voltaje. La distorsión de la onda de corriente se debe principalmente a las cargas no lineales presentes en el sistema. Los valores de los armónicos son graficados como porcentaje de la corriente fundamental, tal como se lo puede apreciar en la Figura 39, 40. Los valores ilustrados en las gráficas de barras son promedios de los valores registrados durante el periodo de monitoreo.

La distorsión total de corriente se observa en la Figura 41 y confirma lo observado en las gráficas de armónicos de corriente. La onda de corriente se distorsiona de tal manera que incumple con los límites. La distorsión total de corriente se gráfica mediante barras los valores mínimos, medios y máximos registrados.

Figura 39 Armónicos de corriente impares

Fuente: Autores.

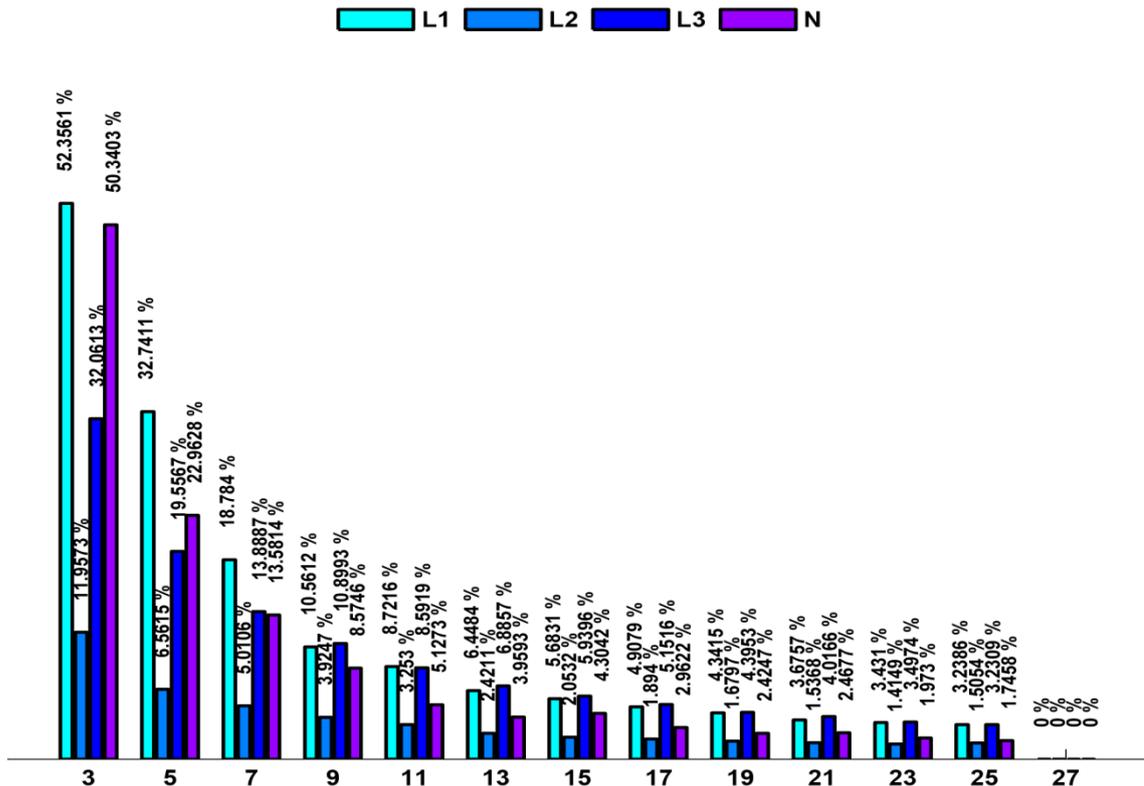


Figura 40 Armónicos de corriente pares

Fuente: Autores.

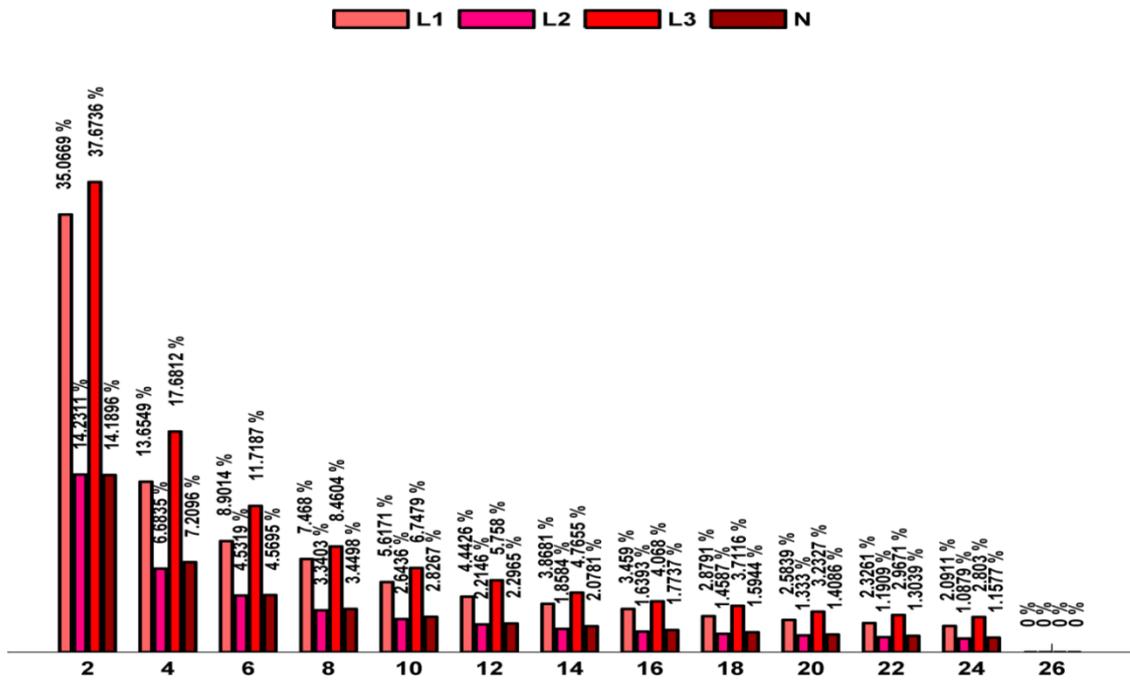
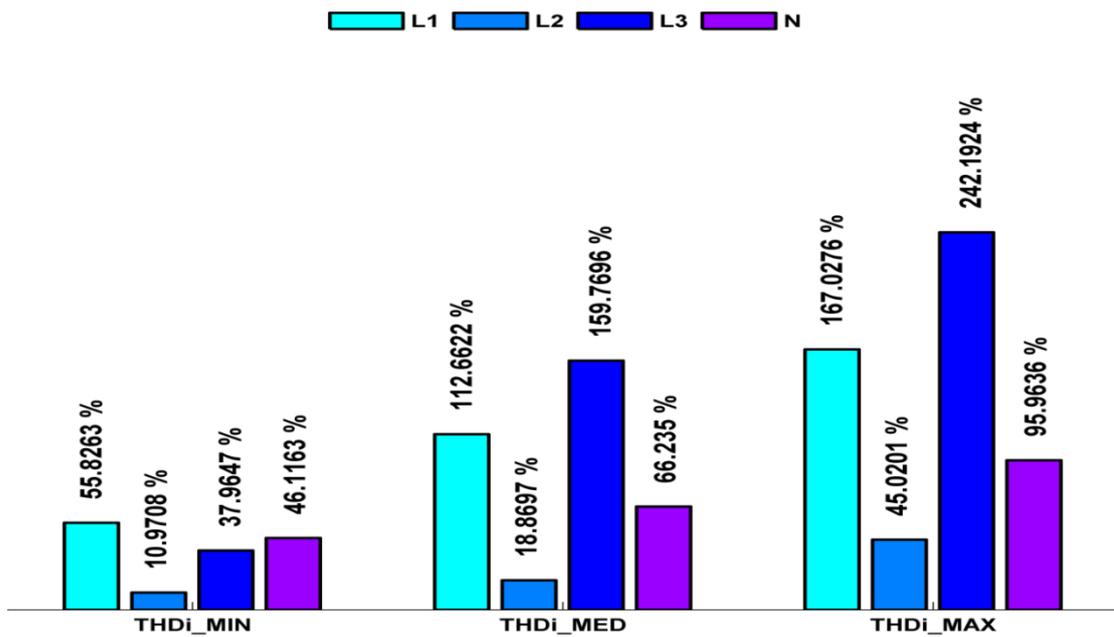


Figura 41 Distorsión total armónica de corriente

Fuente: Autores.



4.2.5 Factor de Potencia

En Ecuador se establece un factor de potencia de 0.92 como mínimo para efectos de mantener una calidad de energía adecuada. La Figura 42, 43, 44 muestra el comportamiento del factor de potencia mínimo, medio, y máximo registrado respectivamente durante el periodo de medición. Se observa como el factor de potencia va variando sin mantenerse dentro de los rangos establecidos de calidad.

Figura 42 Factor de potencia mínimo registrado

Fuente: Autores.

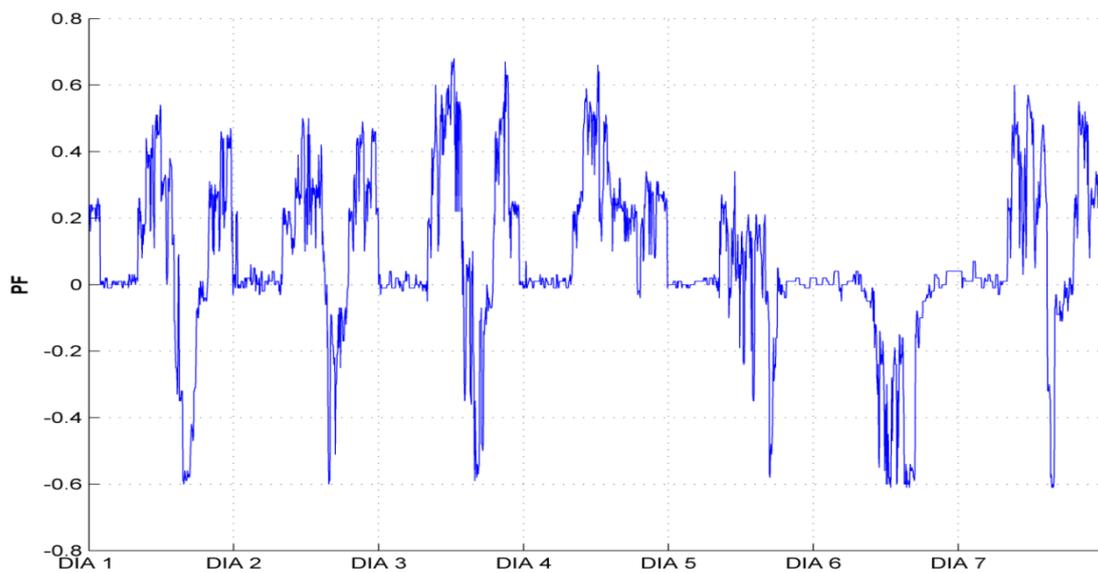


Figura 43 Factor de potencia medio registrado

Fuente: Autores.

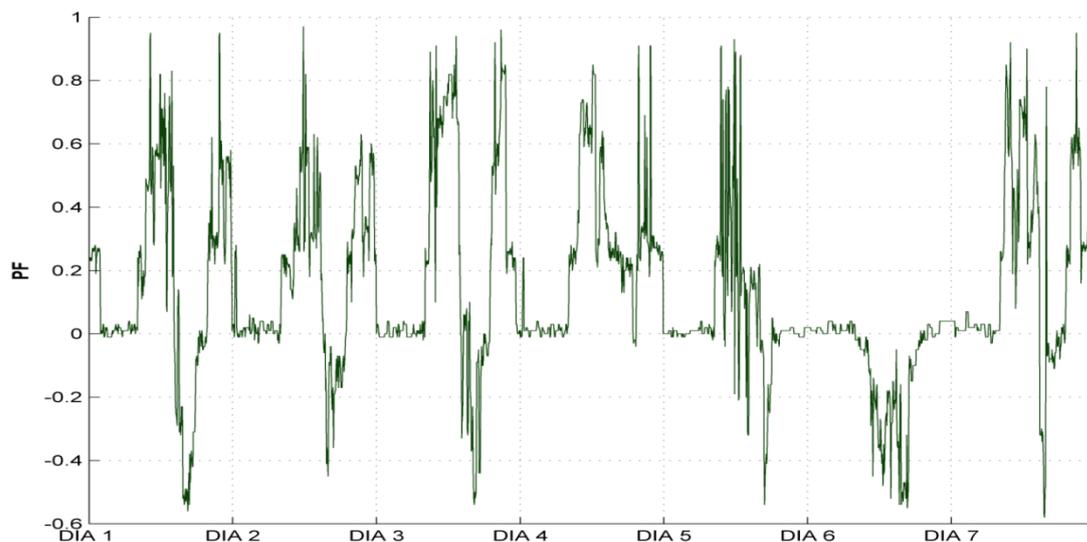
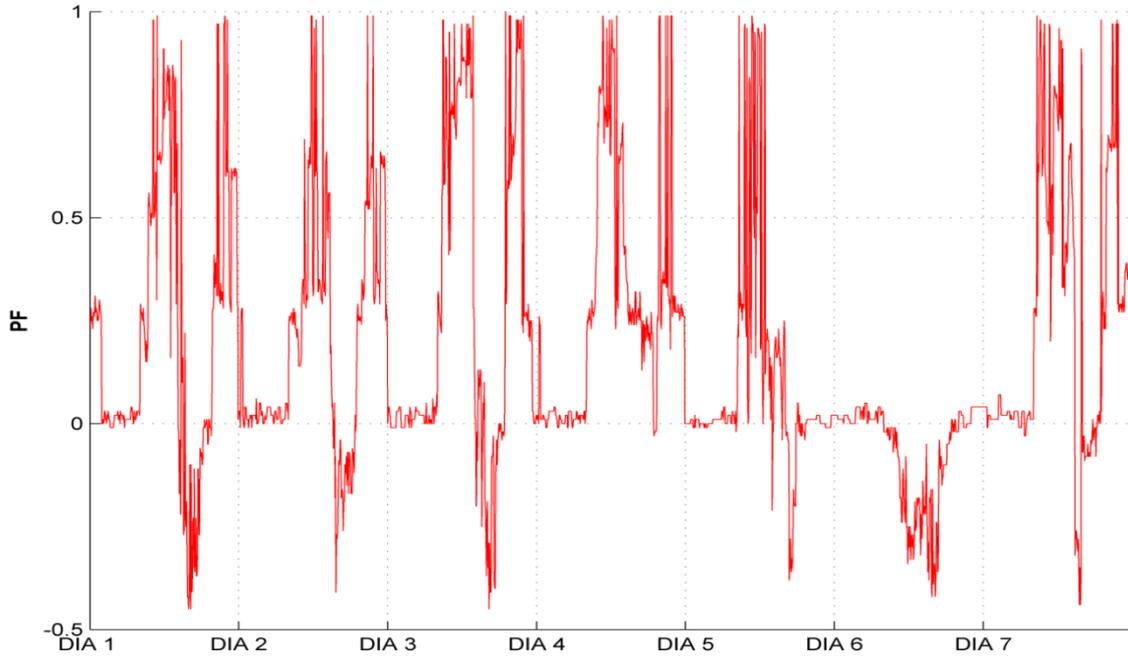


Figura 44 Factor de potencia máximo registrado.

Fuente: Autores.



4.2.6 Desequilibrio

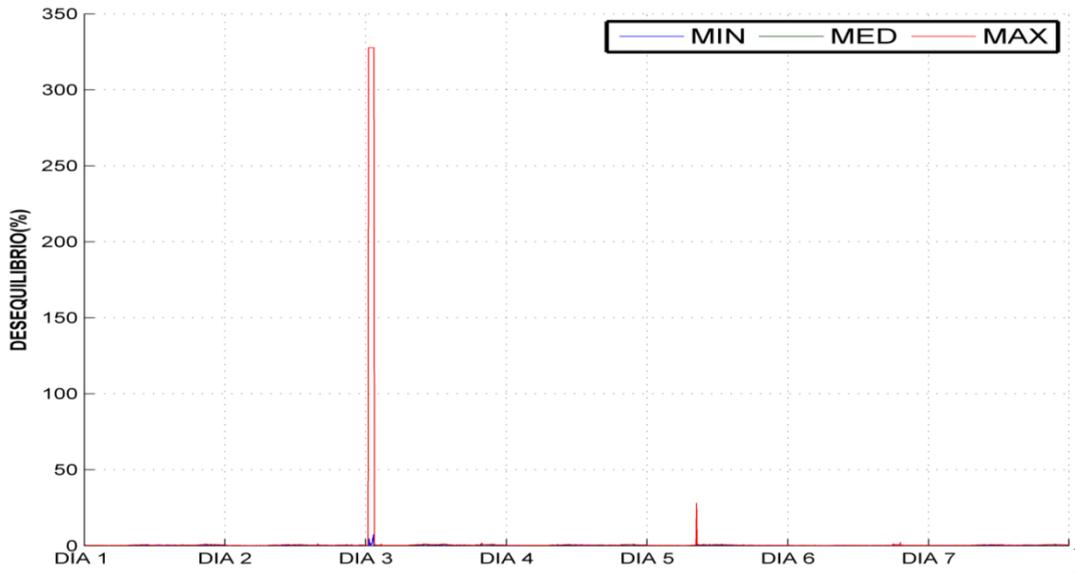
La variación de fases entre las ondas tanto de corriente como de voltaje debería de ser 120° para que un sistema sea balanceado.

4.2.6.1 Desequilibrio de voltaje

El desequilibrio de voltaje se presenta especialmente cuando se tiene cargas monofásicas conectadas a un sistema trifásico como es el caso estudiado. En la Figura 45 se ilustra el desequilibrio de voltaje mínimo, medio y máximo obtenido durante el periodo de medición.

Figura 45 Desequilibrio de voltaje

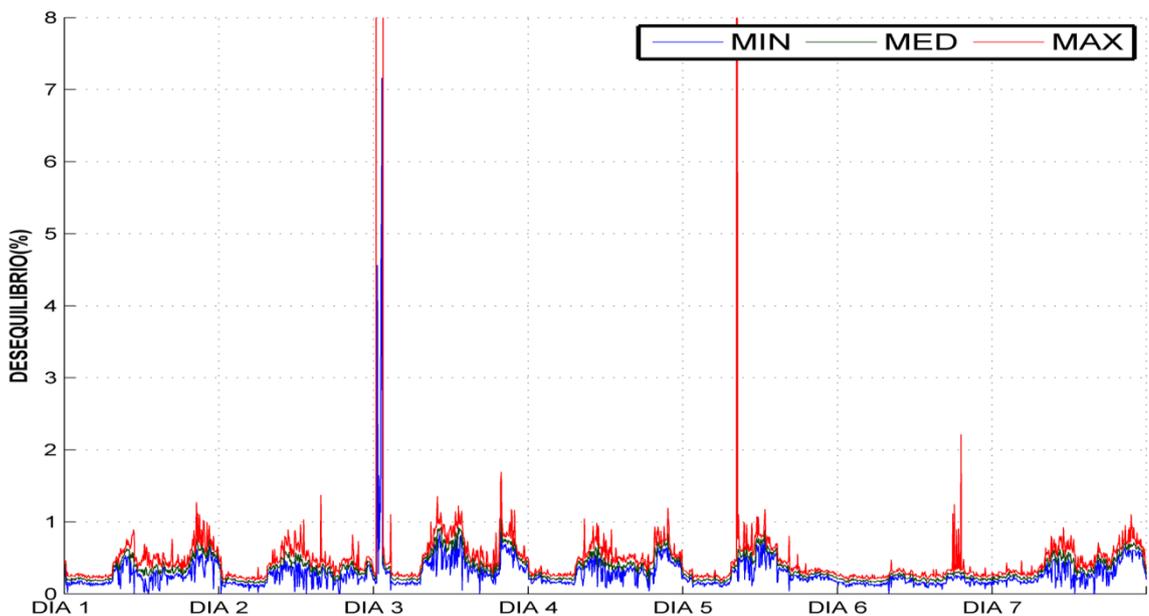
Fuente: Autores.



Dado que la imagen anterior no permite observar la variación de los valores durante la mayor parte del periodo analizado, en la Figura 46 se observa los mismos datos graficados en la figura anterior, con la única diferencia que se ignora el pico registrado durante el tercer día debido a fallas externas. Se observa claramente que durante la mayoría del periodo los valores no exceden el límite de 2% impuesto en las normas vigentes, manteniéndose generalmente con valores menores a la unidad.

Figura 46 Desequilibrio de voltaje-zoom

Fuente: Autores.



4.2.6.2 Desequilibrio de corriente

Contrario a lo expuesto en el desequilibrio de voltaje, el desequilibrio de corriente alcanza valores sumamente altos. Durante la mayoría del periodo de medición se observa valores que exceden el límite permitido del 10%. Para una mejor apreciación, a continuación se presentan mediante las Figura 47, 48, los valores mínimos, medios y máximos registrados.

Figura 47 Desequilibrio de corriente mínimo registrado

Fuente: Autores.

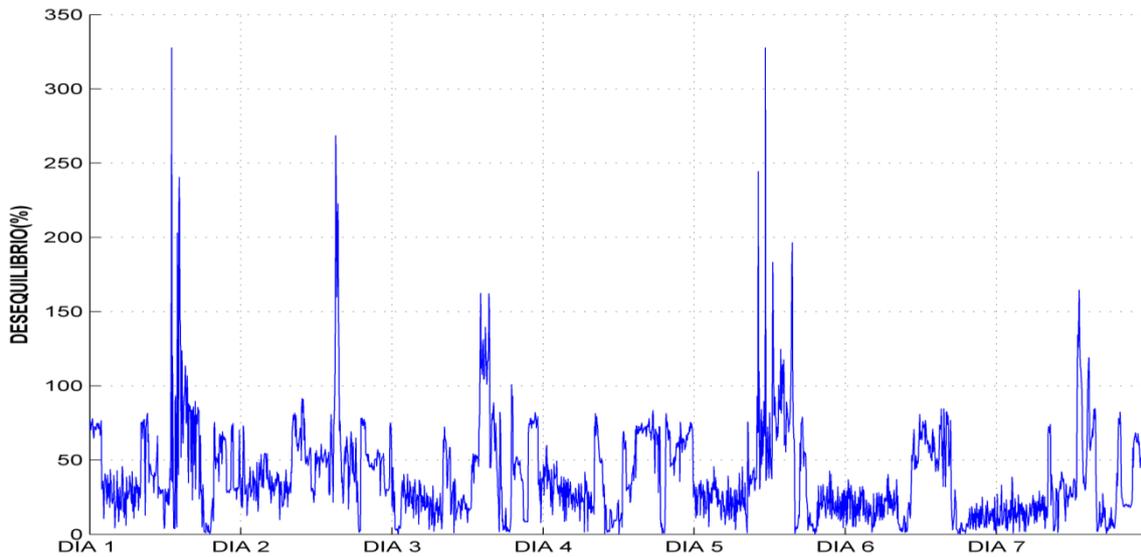


Figura 48 Desequilibrio de corriente medio registrado

Fuente: Autores.

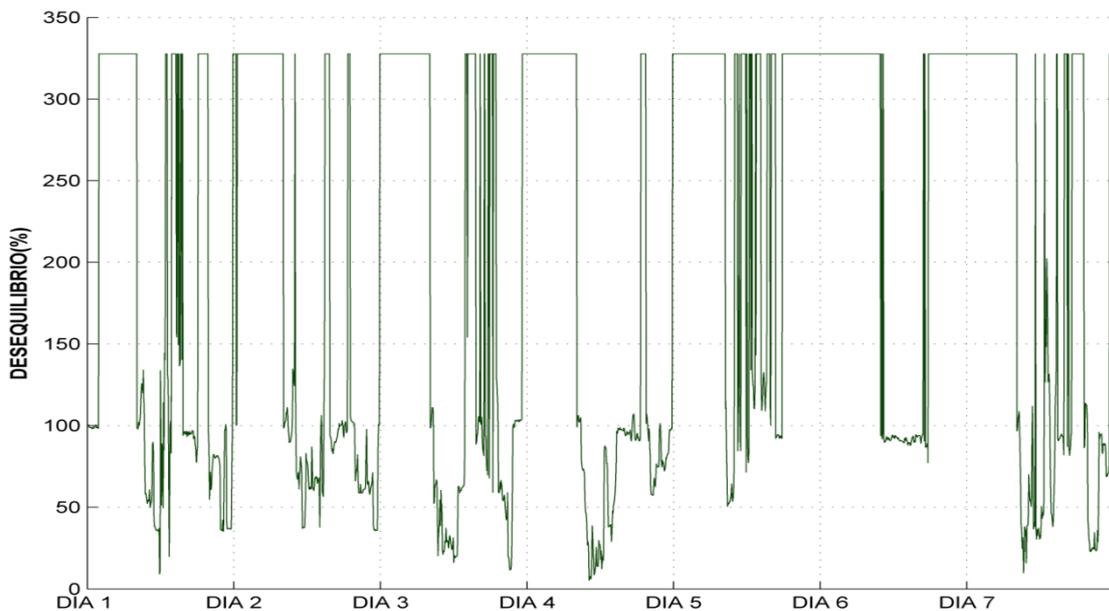
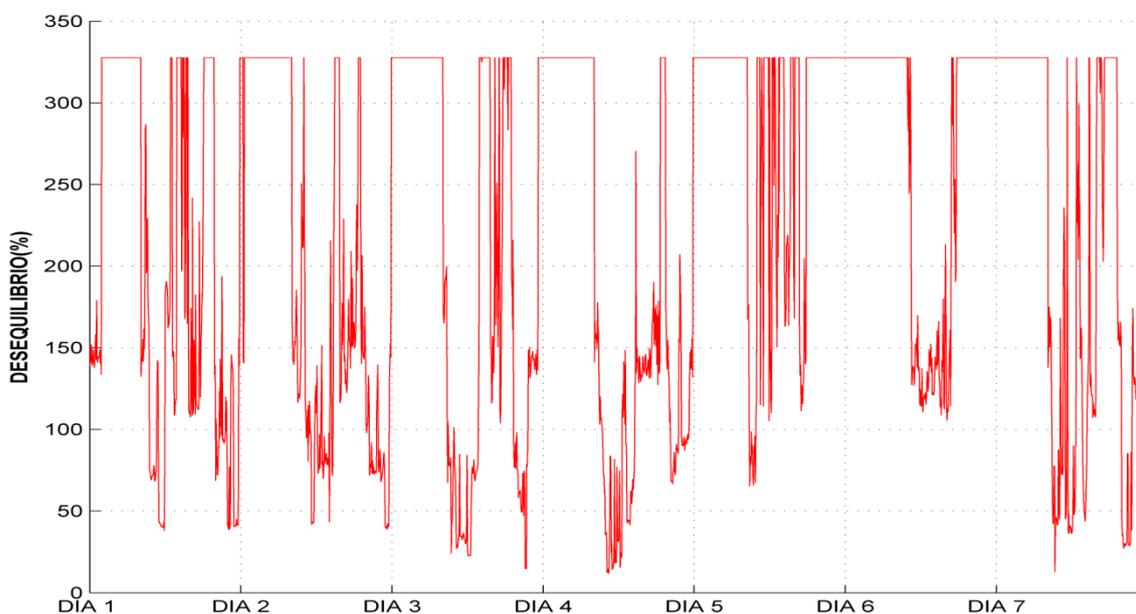


Figura 49 Desequilibrio de corriente máximo registrado

Fuente: Autores.



4.2.7 Frecuencia

La regulación ecuatoriana establece una variación máxima de ± 0.15 Hz en la frecuencia para un estado de funcionamiento estable. En la Figura 50 se muestra el comportamiento de la frecuencia durante el periodo de medición. Su comportamiento es similar en cada uno de los días analizados. El pico observado durante el día 2, fue de duración instantánea así como los demás picos observados en la Figura 50. Dado que la existencia de los picos antes mencionados no permiten apreciar claramente las variaciones producidas en la frecuencia en estado estable, en la Figura 51 se ignora estos picos y se grafica los demás valores.

Figura 50 Frecuencia registrada

Fuente: Autores.

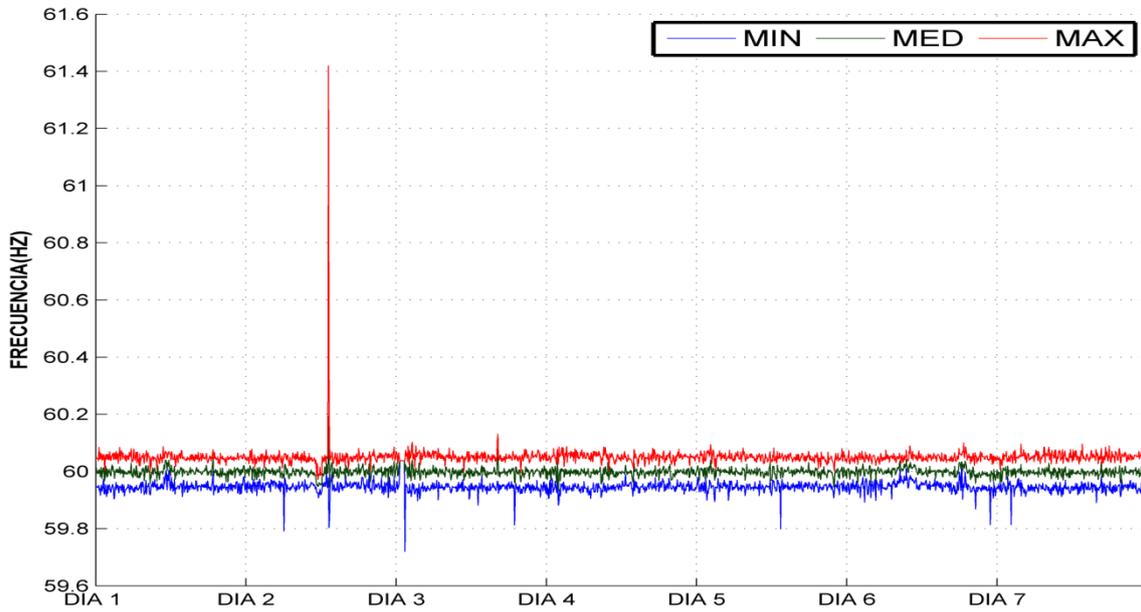
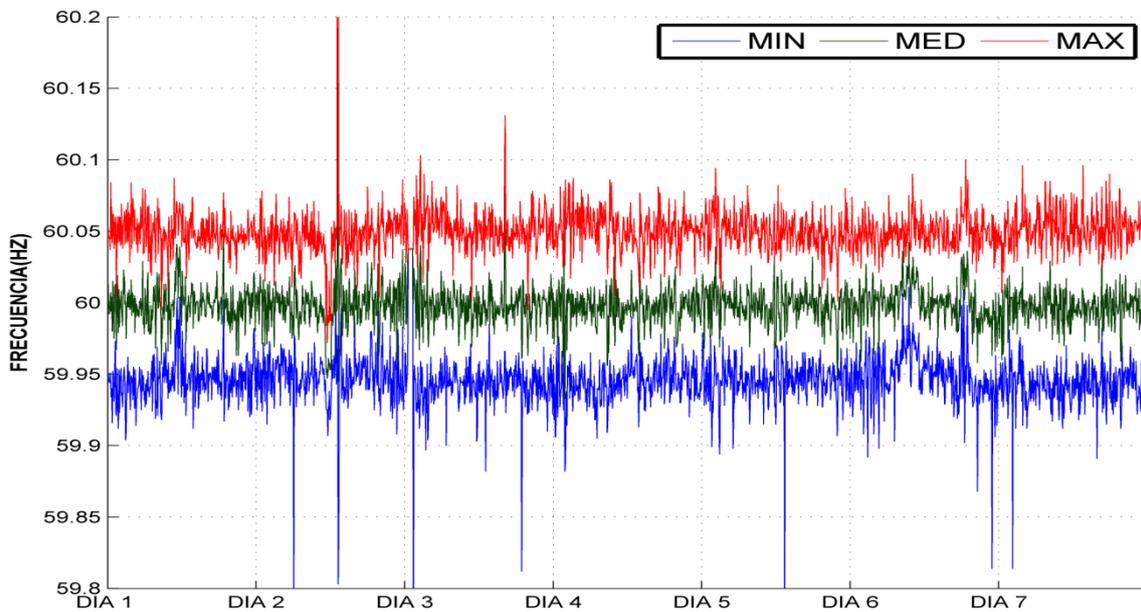


Figura 51 Frecuencia-zoom

Fuente: Autores.



4.2.7.1 Ángulo de fase

Para sistemas de la misma frecuencia se realizó un análisis de ángulos de fases donde se puede observar que al introducir un sistema fotovoltaico a la red produce un desfase

entre el voltaje y corriente, para observar de manera dinámica este fenómeno, se utilizó un método gráfico llamado las gráficas de Lisayouss, donde se puede observar un desfase de 25° indicando que el voltaje esta adelantado con respecto a la corriente, este efecto se dio a una potencia de generación del SFV de 350W tal como se puede observar en la Figura 52.

En la Figura 53 se produjo un incremento de la potencia de generación a 430W, produciendo una variación de la frecuencia en un $\pm 0,10\text{Hz}$ pero manteniendo el mismo Angulo de desfase, indicando así que mientras incrementa la potencia de generación produce ciertas variaciones de frecuencia en el punto común de acoplamiento de este sistema.

Figura 52 Angulo de desfase Voltaje-Corriente (con FV 350W)

Fuente: Autores.

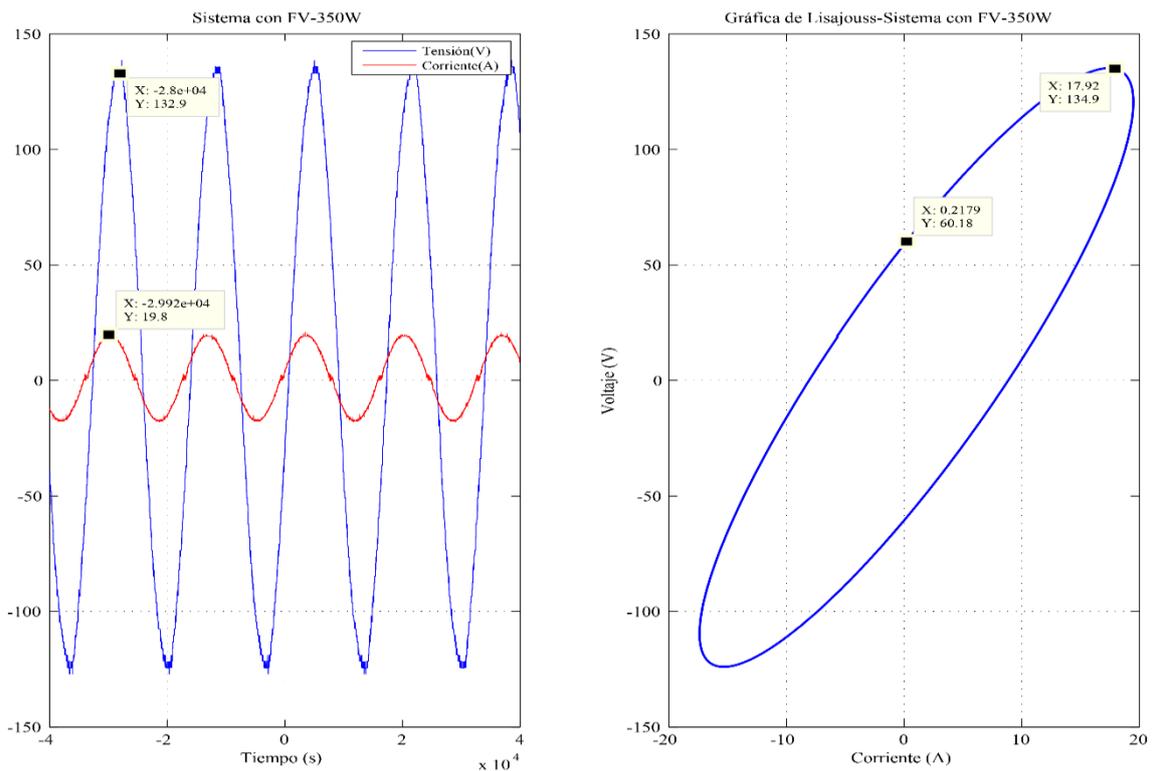
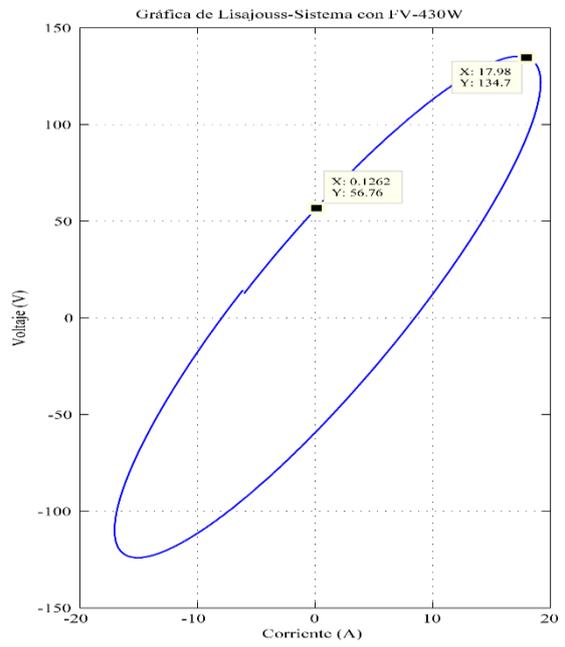
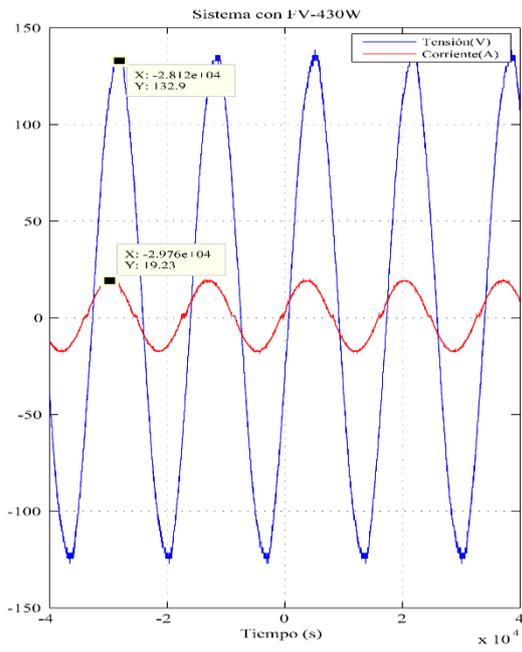


Figura 53 Angulo de desfase Voltaje-Corriente (con FV 430W)

Fuente: Autores.



5 CAPITULO: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

En un balance general el impacto del sistema fotovoltaico en la calidad de energía de la red eléctrica fue positivo. Permitió tener valores más altos de voltaje en el PCC, aunque eleva las magnitudes que varían la calidad de energía cuando se encuentra generando menos de 100 W. Los problemas presentados por el sistema fotovoltaico pueden ser fácilmente resueltos con la desconexión de la red eléctrica del SFV en horas que este no se encuentra generando. Cuando el sistema fotovoltaico no se encuentra generando potencia, el sistema fotovoltaico se comporta como carga e introduce problemas en la calidad de energía de la red eléctrica.

El SFV se lo conecto a un sistema desbalanceado, dado que en Ecuador la mayoría de los puntos del lado de baja tensión de la red de distribución se encuentran desbalanceados. Este fenómeno se debe principalmente a las cargas a nivel residencial, y se espera que aumente con el ingreso de las cocinas de inducción.

Las magnitudes en la que fue menor la incidencia del SFV fueron los flickers, manifestándose una incidencia marginal.

Producto del análisis efectuado, se puede concluir que tan solo los niveles de voltaje y el desbalance de voltaje cumplen con los límites establecidos en las normas vigentes. Así mismo, se observó que el incumplimiento con los límites se debe a problemas con el suministro de energía y las cargas.

Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica presentan un efecto considerable en la frecuencia, produciendo una variación en función de la potencia generada, en este trabajo se pudo determinar que para eventos donde el sistema fotovoltaico presentaba un incremento de potencia produce un variación de frecuencia durante un periodo corto de tiempo hasta que el sistema se estabilice.

El precio de los paneles FV cada vez es menor, por lo que en el corto plazo su uso se extenderá en una gran parte de los hogares del Ecuador. Con toda seguridad esto se dará si se presenta un escenario con un uso masivo de cocinas de inducción, la introducción de vehículos eléctricos para movilización, y un alto precio del kWh de las empresas de

distribución debido a la gran inversión realizada por el gobierno en la SEP. Con el presente trabajo se pretende ayudar en la introducción de SFV en Ecuador.

El equipo de comunicación tarda 6 minutos en inyectar corriente a la red convencional, y otros 20 a 30 minutos en establecer la comunicación Ethernet y enviar los datos del estado del sistema FV al portal.

5.2 RECOMENDACIONES

Tomar en consideración los periodos de medición para la toma de datos que establecen las normas para realizar un análisis adecuado de la calidad de energía.

Es necesario desconectar el SFV en horas de la madrugada, ya que en esos momentos no se cuenta con la presencia del Sol y el SFV introduce distorsión en las magnitudes evaluadas que varían la calidad de energía.

La Universidad debería estructurar un plan de mantenimiento y monitoreo del SFV con el fin de optimizar su funcionamiento y darles un uso adecuado.

El SFV debería transmitir su generación con el mismo número de fases que el sistema convencional al que se conecta.

6 Referencias

- [1] NEC, «Norma Ecuatoriana de construcción-Energías Renovables.,» 2011.
- [2] M. M. Fondevila y S. Scarpellini, Guía de mercados energéticos, Zaragoza: Prensas de la Universidad de Zaragoza, January 2013, p. 308.
- [3] C. S. Antonio, B. D. David , C. F. Eduardo y C. G. Manuel Alonso, Generación distribuida, autoconsumo y redes inteligentes, Madrid: UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia, July 2015 , p. 8 de 856.
- [4] N. Takeuchi, Energía y medio ambiente: manual básico de innovaciones tecnológicas para su mejor aprovechamiento, Editorial Miguel Ángel Porrúa, January 2014, p. 33 de 146.
- [5] M. C. Tobajas Vázquez, Instalaciones solares fotovoltaicas, Ediciones Octaedro, S.L., January 2012, p. 7 de 164.
- [6] X. E. Castells, Energías renovables, Madrid: Ediciones Díaz de Santos, January 2012, p. 145.
- [7] IDAE, Energía Solar Fotovoltaica: Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red, Madrid: PROGNSA (Promotora General de Estudios, S.A.), Julio 2011, p. 46.
- [8] M. C. Tobajas Vázquez, Energía solar térmica para instaladores, 4 ed., Cano Pina, January 2012, p. 19 de 223.
- [9] J. d. C. y. León, Energía Solar Fotovoltaica: Manual del Arquitecto, JUNTA DE CASTILLA Y LEÓN - CONSEJERÍA DE ECONOMÍA Y EMPLEO.
- [10] A. Medina, «Metodologías avanzadas para el modelado y análisis de armónicos y su impacto en la calidad de energía,» de *BIENAL 2001*, Irapuato-México, 2001.
- [11] S. R. Castaño y E. A. Cano Plata , Calidad del servicio de energía eléctrica, Manizales: Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Abril 2006.
- [12] ARCONEL, «REGULACION 004/15: Requerimientos Técnicos para la Conexión y Operación de Generadores Renovables no Convencionales a las Redes de Transmisión y Distribución,» Quito-Ecuador, Octubre 2015.
- [13] CONELEC, «REGULACION 004/01: Calidad de Servicio Eléctrico de Distribución,» Quito-Ecuador, 2001.
- [14] C. Yao, Z. Zhao, Y. Mi, C. Li, Y. Liao y G. Qian, «Improved Online Monitoring Method for Transformer Winding Deformations Based on the Lissajous Graphical Analysis of Voltage and Current,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, p. 9,

2015.

- [15] T. Xia y Y. Liu, «Single-Phase Phase Angle Measurements in Electric Power Systems,» *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, vol. 25, p. 9, 2010 .
- [16] NAP, Energía Solar Fotovoltaica, Madrid: Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicaciones, 2002.
- [17] CONELEC, REGULACION 006/00: Procedimientos de despacho y operación, Quito-Ecuador, 2000, p. 121.
- [18] IEEE, «NORMA IEEE Std 519™-2014: Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems,» New York, March 2014.
- [19] A. NACIONAL, «Codigo Orgánico de la Producción, Comercio e Inversiones,» 2010.
- [20] M. C. d. S. Estratégicos., «Balance Energético Nacional 2014,» Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos., 2014. [En línea]. Available: www.sectoresestrategicos.gob.ec.
- [21] SRI, «Servicio de Rentas Internas: "Deducciones",» Marzo 2016. [En línea]. Available: www.sri.gob.ec.
- [22] CONELEC, «REGULACIÓN 003/02: Precio de la Energía Producida con recurso Energéticos Renovables no Convencionales.,» Ecuador, 2002.
- [23] CONELEC; CIE, «Atlas Solar con fines de Generación Eléctrica.,» Ecuador , 2008.
- [24] J. P. Muñoz Vizhñay, «Microgeneración Distribuida Fotovoltaica,» *Universidad Nacional de Loja-Area de Energía, Industria y Recursos Naturales no Renovables*, 2014.
- [25] MEER, «Electrificación Rural con Energías Renovables,» Ministerio de Electricidad y Energías Renovables, 2016. [En línea]. Available: www.energia.gob.ec.
- [26] INEC, «Instituto Nacional de Estadísticas y Censos: Censo de población y Vivienda,» 2010. [En línea]. Available: <http://www.inec.gob.ec/>.
- [27] C. SUR, «Empresa Eléctrica Centro Sur.,» Marzo 2016. [En línea]. Available: www.centrosur.com.ec.
- [28] A. J. Ramón Zoliz y R. E. Pineda Erreyes, «Análisis del rendimiento de los acumuladores de energía de sistema fotovoltaico existente en la Universidad Politécnica Salesiana,» *UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA*, 2015.
- [29] SMA, «SMA Solar Technology,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.sma-south-america.com/>.

- [30] D. P. Lora Encalada y L. J. Ortega Moreno, «Estudio de un sistema integral de generación eléctrica fotovoltaica conectado a la red para la facultad de educación ciencia y tecnología de la universidad técnica del norte, e implementar un modelo demostrativo con acumulación de energía en el taller de,» *UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE-IBARRA*, 2012.
- [31] SIMAX, «Simax Green New Energy,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.simaxsolar.com/>.
- [32] P. A. Peña Ortiz y F. S. Pinos Vergara , «Parametrización de los Sistemas Fotovoltaicos basadas en las condiciones climáticas de la Ciudad de Cuenca, aplicado a la Universidad Politécnica Salesiana,» *UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA* , p. 225, 2014 .
- [33] CONELEC, «Precios de la Energía Producida con Recursos Energeticos Renovables No Convencionales (ERNC).,» Quito-Ecuador, 2015.