

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO

CARRERA: INGENIERÍA ELÉCTRICA

Tesis previa a la obtención del título de: INGENIERO ELÉCTRICO

TEMA:

**EVALUACION DE LA CALIDAD DE ENERGIA ELECTRICA EN
INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS CONECTADAS A LA RED DE BAJO
VOLTAJE.**

AUTOR:

ALEXANDER DANILO PILATASIG MONTALUISA

DIRECTOR:

JUAN CARLOS HERRERA HEREDIA

Quito, Febrero de 2015

DECLARATORIA DE AUTORÍA:

Yo, Alexander Danilo Pilatasig Montaluisa autorizo a la Universidad Politécnica Salesiana la publicación total o parcial de este trabajo de grado y su reproducción sin fines de lucro.

Además declaro que los conceptos y análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Quito, 28 de Febrero del 2015

Alexander Danilo Pilatasig Montaluisa
CC: 0502975857

AUTOR

CERTIFICA:

Haber dirigido y revisado prolijamente cada uno de los capítulos teóricos y técnicos del informe de la tesis, así como la investigación respecto a la “EVALUACION DE LA CALIDAD DE ENERGIA ELECTRICA EN INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS CONECTADAS A LA RED DE BAJO VOLTAJE” realizada por el Sr. Alexander Danilo Pilatasig Montaluisa, previa a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico en la Carrera de Ingeniería Eléctrica.

Por cumplir los requisitos autoriza su presentación.

Quito, 28 de Febrero del 2015

Ing. Juan Carlos Herrera Heredia
DIRECTOR

DEDICATORIA.

Alexander Danilo Pilatasig Montaluisa

Este proyecto es dedicado con mucho
cariño para toda mi familia, en
especial a mis padres y hermanos
quienes me han ayudado cada día para
salir adelante, y amigos con los cuales
he compartido momentos difíciles en
este camino del aprendizaje.

AGRADECIMIENTO.

Alexander Danilo Pilatasig Montaluisa

Agradezco a la Universidad
Politécnica Salesiana por haberme
permitido ser parte de ella. A todos los
docentes, por compartir sus
conocimientos y experiencias, en
especial a mi Director Ing. Juan
Carlos Herrera por su apoyo en este
trabajo y por los conocimientos
impartidos.

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA:	I
CERTIFICA:	II
DEDICATORIA.	III
AGRADECIMIENTO.	IV
ÍNDICE GENERAL.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XI
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	XII
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	2
Calidad de la energía en edificaciones	2
1.1 Calidad de Energía Eléctrica.....	2
1.1.1 Calidad de Suministro Eléctrico.	2
1.1.2 La Red de Alimentación Ideal.	2
1.2 Regulación Relativa a la Calidad de Energía eléctrica.	3
1.2.1 La Norma IEEE 519	3
1.2.2 La Norma IEEE 1547	4
1.2.3 Regulación 004/01 de calidad del servicio eléctrico emitido por el CONELEC.	5
1.3 Mecanismos de Medición de la Calidad de Energía Eléctrica.....	8
1.3.3 Identificación de problemas en la calidad en la energía eléctrica.....	8
1.3.4 Origen de los Problemas de Calidad.....	8
CAPÍTULO II.....	10

Sistemas solares fotovoltaicos en sincronismo con la red eléctrica	10
2.1 Descripción de la Arquitectura y Funcionamiento de los Sistemas Solares Fotovoltaicos Sincronizados con la Red Eléctrica de las Edificaciones.	10
2.1.1 Origen de la Energía Solar Fotovoltaica.....	10
2.1.2 Composición de las Células Fotovoltaicas	11
2.1.3 El Efecto Fotovoltaico.	12
2.1.4 Radiación Solar.....	13
2.1.4 Descripción de las Instalaciones Conectadas a la Red.	14
2.1 Regulación de sistemas solares fotovoltaicos aplicables a la instalación de equipos conectados a la red eléctrica de las edificaciones.....	17
2.2 Principales efectos de la calidad de la energía del funcionamiento de los sistemas solares fotovoltaicos conectados a la red eléctrica en edificaciones	18
2.3.1 Disturbios en el sistema eléctrico	18
2.3.2 Tipos de disturbios. [21] [22] [23].....	18
2.4 Medidas de mitigación de los efectos negativos en la calidad de la energía debidos al funcionamiento de los sistemas solares fotovoltaicos conectados a la red eléctrica en edificaciones	20
2.4.1 Plan de mantenimiento preventivo.	20
2.4.1 Plan de mantenimiento correctivo.	22
CAPÍTULO III	24
Modelación y análisis	24
3.1 Modelo matemático aplicable a la operación de los sistemas solares fotovoltaicos sincronizados con la red eléctrica de las edificaciones en términos de calidad de la energía.	24
3.1.1 Características eléctricas de la celda fotovoltaica.	24
3.1.2 Eficiencia en los componentes de un SFCR	29
3.1.3 Modelacion de los componentes del SFCR	31

3.2 Simulación de las condiciones de operación de un sistema típico.....	35
3.3 Diseño y aplicación de la campaña de medición de la calidad.	39
3.3.1 Sistema de Monitoreo	39
3.3.2 Adquisición de la información.....	41
CAPÍTULO IV	43
VALIDEZ DEL MODELO	43
4.1 Procesamiento y análisis de resultados de la campaña de medición de la calidad de la energía de un sistema fotovoltaico real en sincronismo con la red eléctrica de la edificación (Caso de Estudio).....	43
4.1.1 Características del SFCR del caso de estudio.....	43
4.1.2 Curva de carga de un día laborable.....	45
4.1.3 Análisis de los índices de calidad	49
4.1.4 Curva de carga de un día no laborable.....	56
4.1.5 Análisis de los índices de calidad de un día no laborable.....	60
4.2 Contrastación de resultados producto de la simulación y los obtenidos de la campaña de medición del Caso de Estudio.	66
4.3 Diseño de medidas de mitigación de los impactos negativos en la calidad de la energía aplicables al caso de estudio.	69
4.3.1 Resumen de la campaña de medición.....	69
4.3.2 Técnicas de compensación y filtrado de perturbaciones	70
4.3.3 Dimensionamiento de un filtro activo	75
CONCLUSIONES.....	79
RECOMENDACIONES	80
Referencias	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Sistema Trifásico de Tensiones.....	3
Figura 2.1 Carga de una célula fotovoltaica simple.....	12
Figura 2.2 Esquema de un generador solar fotovoltaico conectado a la red.....	14
Figura 2.3 Estructura del panel fotovoltaico.....	15
Figura 3.1 Esquema eléctrico equivalente simplificado de una celda solar.....	24
Figura 3.2 Circuito equivalente de un celda solar real.....	25
Figura 3.3 Curva característica V-I curva de potencia de una celda fotovoltaica.....	27
Figura 3.4 Esquema eléctrico equivalente simplificado de una celda solar.....	28
Figura 3.5 Curva I-V de una celda solar con la temperatura.....	29
Figura 3.6 Circuito eléctrico de un módulo fotovoltaica.....	31
Figura 3.7 Representación esquemática del Sistema Fotovoltaico.....	35
Figura 3.8 Representación esquemática del panel fotovoltaico.....	36
Figura 3.9. Representación esquemática del inversor.....	36
Figura 3.10. Curva de irradiación (KW/m ²) a lo largo del día	38
Figura 3.11 Curva de Potencia KW a lo largo del día.....	38
Figura 3.12 Ciclo de la información.....	39
Figura 3.13 Diagrama Unifilar del Edificio del caso de estudio.....	40
Figura 4.1 Curva de carga del edificio durante un día laborable.....	46
Figura 4.2 Curva de temperatura durante un día laborable.....	47
Figura 4.3 Curva de Irradiación KW/m ² durante un día laborable.....	47
Figura 4.4 Curva Potencia total KW / tiempo (h), durante un día laborable.....	48
Figura 4.5 Curva (Ir- Is- It- In) / t, durante un día laborable.....	48
Figura 4.6 Voltaje (Vr, Vs, Vt)/ t durante un día laborable.....	50
Figura 4.7 Curva fP / t, durante un día laborable.....	50
Figura 4.8 Resumen del comportamiento de la distorsión armónica de tensión registrados.....	50
Figura 4.9 Distorsión armónica de corriente en función de la potencia generada en un día.....	52
Figura 4.10. Curva de carga del edificio durante un día no laborable.....	57
Figura 4.11. Curva de temperatura durante el día.....	58

Figura 4.12. Curva de irradiación durante el día.....	58
Figura 4.13. Curva de Potencia generada por el SFCR.....	59
Figura 4.14. Curva $(I_r - I_s - I_t - I_n) / t$, durante un día no laborable.....	59
Figura 4.15. Curva de voltaje por fase función del tiempo durante un día no laborable....	60
Figura 4.16. Curva f_p / t , durante un fin de semana.....	61
Figura 4.17: Distorsión armónica individual de tensión.....	63
Figura 4.18 Distorsión armónica de en función a la potencia que generan durante un día.....	64
Figura 4.19. Curva potencia (kW) / (h) del 15/02/2015 simulada.....	67
Figura 4.20. Curva potencia (kW) real y simulada en función del tiempo del 15/02/2015.....	68
Figura 4.21. Eficiencia de los componentes del SFCR.....	68
Figura 4.22 Principio de funcionamiento de un filtro.....	73
Figura 4.23. Ubicación del filtro activo para filtrado de armónicos.....	74
Figura 4.24. Ubicación del filtro activo.....	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Límites de armónicos de corriente.....	5
Tabla 1.2. Límites de variación de voltaje.....	6
Tabla 1.3. Límites de la variación armónica de voltaje..	7
Tabla 3.1: Tecnologías de las celdas solares.....	30
Tabla 3.2. Irradiación (KW/m ²) 15/02/2015.....	37
Tabla 3.6. Indicadores de calidad y sus límites...	42
Tabla 4.1. Parámetros de operación de los paneles fotovoltaicos....	43
Tabla 4.2. Potencia que aportan las fuentes de suministro a la curva de carga de un día laborable.	45
Tabla 4.3. Resumen del comportamiento de los niveles de tensión registrados durante un día laborable.	49
Tabla 4.3 Distorsión armónica de tensión.....	51
Tabla 4.4 Límites de la distorsión armónica de corriente..	53
Tabla 4.5. Distorsión armónica de corriente (THDi%), en función de la potencia generada.....	53
Tabla 4.6. Distorsión armónica de corriente (THDi%) individual, en función de la potencia generada....	55
Tabla 4.7. Potencia que aportan las fuentes de suministro eléctrico a la curva de carga de un día no laborable.....	56
Tabla 4.8. Resumen del comportamiento de los niveles de tensión en un día no laborable.....	60
Tabla 4.9 Distorsión armónica de tensión de un día no laborable.....	62
Tabla 4.10. Distorsión armónica de corriente (THDi%), en función de la potencia generada.....	63
Tabla 4.11. Distorsión armónica de corriente (THDi%) individual, en función de la potencia generada.....	65
Tabla 4.12. Datos medidos del SFCR y producto de la simulación (15/02/2015).....	66
Tabla 4.12. Eficiencia de los componentes del SFCR.....	68
Tabla 4.11. Resumen de los índices de calidad de la campaña de medición.....	70
Tabla 4.12 Tipos de filtros y su aplicación.....	71
Tabla 4.13 Datos para el dimensionamiento del filtro..	75
Tabla 4.14 Guía de selección del filtro.....	77
Tabla 4.15 Características del filtro AccuSine.....	77

ÍNDICE DE ANEXOS

A1	Datos técnicos del panel fotovoltaico.....	83
A2	Datos técnicos del inversor.....	84
A 3	Medidas del equipo M12.....	85

GLOSARIO DE TÉRMINOS

THDi	Distorsión armónica de corriente.
THDv	Distorsión armónica de voltaje.
°C	Grados Centígrados
°K	Grados Kelvin
W	Vatio
kWh	Kilovatio hora
MW	Megavatio
M²	Metro cuadrado
V	Voltio
I	Corriente
CC	Corriente Continua
CA	Corriente Alterna
VCC	Voltaje de corriente continúa
VAC	Voltaje de corriente alterna
FV	Fotovoltaico
AM	Masa de aire
MPPT	Punto de Máxima Potencia
T	Temperatura
J	Joules
Hz	Hertz

Evaluación de la Calidad de Energía Eléctrica en Instalaciones Fotovoltaicas Conectadas a la Red de Bajo Voltaje

Alexander Danilo Pilatasig Montaluisa

Alexdan32@hotmail.com

Universidad Politécnica Salesiana

Resumen—Ante la creciente evolución de generación eléctrica a través de energías renovables, el presente trabajo tiene como fin realizar el estudio de la calidad de energía eléctrica que produce un sistema fotovoltaico conectado a la red (SFCR) en una edificación. Se realiza una investigación teórica y práctica, para lo cual se analizan datos del funcionamiento de una instalación real, equipada con medidores de calidad de energía eléctrica ubicados en el punto de conexión común entre la red convencional y el (SFCR).

Se contrastan los parámetros de calidad obtenidos con aquellos definidos en la normativa aplicable, nacional e internacional.

Finalmente se investigan medidas de mitigación para mejorar los índices de calidad deficitarios

Evaluation of the quality of electricity in Photovoltaic Installations Connected to the Low Voltage Network

Alexander Danilo Pilatasig Montaluisa

alexdan32@hotmail.com

Universidad Politécnica Salesiana

Abstract— With the growing development of electric energy through renewable generation, this paper aims to make the study of the quality of electricity that produces a photovoltaic system connected to the network in a building (SFCR). Theoretical and practical research is done, for which performance data from an actual facility, equipped with meters located power quality at the point of common connection between the grid and the (SFCR), are analyzed.

Quality parameters obtained with those defined in the applicable national and international regulations are contrasted.

Finally, mitigation measures are investigated to improve quality indices deficit.

INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica representa el principal insumo que mueve al mundo industrial; sin ésta, las empresas se detendrían y economías enteras entrarían en crisis. Por eso es vital saber administrarla.

Aproximadamente el 55% de la energía eléctrica producida es consumida por los sectores comercial e industrial. Por lo tanto, el buen uso de la energía eléctrica les permite incrementar su competitividad, en una economía que tiende a la globalización. De esta manera, el ahorro de energía es una alternativa viable para reducir costos de operación y mejorar los niveles de competitividad dentro del mundo industrial.

La calidad de la energía eléctrica puede definirse como la ausencia de interrupciones, sobre tensiones y deformaciones producidas por armónicas en la red y variaciones de voltaje suministrado al usuario; esto referido a la estabilidad del voltaje, la frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico.

Asimismo, se ha determinado que uno de los problemas más comunes que ocasiona el desperdicio de energía eléctrica en las empresas es la calidad de esta, pues influye en la eficiencia de los equipos eléctricos que la usan.

Actualmente la calidad de la energía es objeto de atención continua y en años recientes esta atención ha sido de mayor importancia debido al incremento del número de cargas sensibles en los sistemas, las cuales por sí solas, resultan ser una causa de la degradación en la calidad de la energía eléctrica.

En esta sección del trabajo se realiza una introducción a los fenómenos de la calidad de la energía eléctrica de acuerdo a las normas de calidad del producto, punto de partida para iniciar un estudio real de calidad de energía eléctrica de una instalación fotovoltaica conectada a la red.

CAPÍTULO I

CALIDAD DE LA ENERGÍA EN EDIFICACIONES

En el presente capítulo se tratará sobre los conceptos de calidad de energía eléctrica Así como la descripción de las normas nacionales e internacionales que rigen en su comportamiento de calidad eléctrica

1.1 Calidad de Energía Eléctrica.

1.1.1 Calidad de Suministro Eléctrico.

El termino calidad debe ser usado en términos cuantitativos, para evaluaciones técnicas como excelente, alta, media, baja, mala. En la actualidad el estudio de la calidad de la energía eléctrica ha adquirido mucha importancia la principal razón es el aumento de la productividad y competitividad de las empresas.

La calidad de energía eléctrica se emplea para describir las perturbaciones en la tensión, la corriente o la frecuencia, que se manifiestan típicamente como interrupciones, caídas de tensión, sobretensiones, distorsión armónica, desequilibrios, parpadeo o flicker y transitorios. El origen de estos problemas se puede hallar tanto en la red de distribución eléctrica como en el sistema de alimentación interno. En términos de magnitud y duración las perturbaciones eléctricas pueden durar desde microsegundos o provocar cortes de horas o incluso más tiempo. [1]

1.1.2 La Red de Alimentación Ideal.

Una red en el caso ideal está constituida por un sistema trifásico de conductores alimentados por tensiones sinusoidales desfasadas 120° en cada una de las fases. La Figura 1.1, muestra la forma de tensiones U_1 , U_2 , U_3 de cada una de las fases respecto al neutro

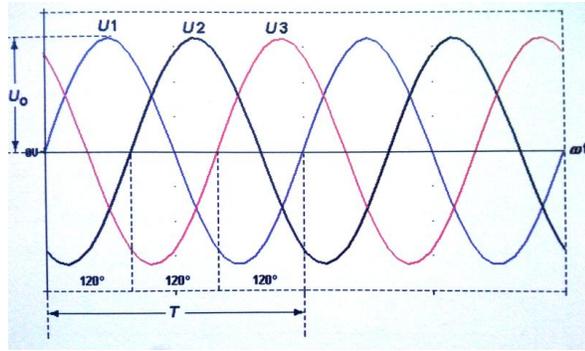


Figura 1.1. Sistema Trifásico de Tensiones

Fuente: Josep Balcells, Vicente Barra, Eficiencia en el uso de la energía eléctrica. Marcombo 2011, p. 27.

En la práctica no existe una red ideal debido dos causas.

- Los generadores y el sistema de distribución tiene una cierta impedancia interna, originando caídas de tensión y pérdidas en el sistema
- Las cargas eléctricas conectadas al sistema son generadoras de transitorios provocando un desequilibrio en la forma de onda.

La definición de calidad de energía varía dependiendo del país donde este así por ejemplo:

La Norma IEC (61000-2 -2/4) define la calidad de energía eléctrica como una característica física del suministro de electricidad la cual debe llegar al cliente en condiciones normales sin producir perturbaciones ni interrupciones en el proceso de los mismos.

La norma IEEE 1159 la calidad, se refiere a una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y corriente en un tiempo dado y en una ubicación dada.

1.2 Regulación Relativa a la Calidad de Energía eléctrica.

1.2.1 La Norma IEEE 519

El propósito de la norma IEEE 519 es, recomendar límites en la distorsión de armónicos según dos criterios distintos:

1. Existe una limitación sobre la cantidad de corriente armónica que un consumidor puede inyectar en la red de distribución eléctrica.
2. Se establece una limitación en el nivel de voltaje armónico que una compañía de distribución de electricidad puede suministrar al consumidor.

La norma IEEE 519 trata principalmente con armónicos introducidos por cargas no lineales, así como define la distorsión total e individual de voltaje y corriente con la finalidad de que los problemas de calidad de potencia puedan ser prevenidos, el cumplimiento de las normas está en crecimiento debido al incremento en la utilización de cargas no lineales. [2]

1.2.2 La Norma IEEE 1547

Esta regulación, *Interconexión de Recursos Distribuidos con Sistemas de Energía Eléctrica*, es una norma uniforme para la interconexión de recursos distribuidos (Fuentes de energía eléctrica que no están conectados directamente a un sistema de transmisión de energía a granel) con sistemas de energía eléctrica. Proporciona los requisitos pertinentes a las consideraciones de rendimiento, operación, pruebas, seguridad, y mantenimiento de la interconexión. Los requisitos deberán cumplirse en el punto de acoplamiento común (PCC), aunque los dispositivos utilizados para cumplir con estos requisitos se pueden ubicar en otros lugares. [3]

Límite de Armónicos de Corriente (THDi) de acuerdo a la norma IEEE 1547.

En la tabla 1.1 se puede observar los límites de armónicos para niveles de bajo voltaje entre 120 V y 69 kV, los límites dependen de la corriente de corto circuito (I_{cc}), donde está conectado el consumidor y el nivel de consumo (II), la norma IEEE 1547 establece el mismo límite que la norma IEEE 591

Tabla 1.1 Límites de armónicos de corriente
Fuente: IEEE 1547

I_{cc} / I_l	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	% THD
< 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20-50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50-100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100-1000	12,5	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

1.2.3 Regulación 004/01 de calidad del servicio eléctrico emitido por el CONELEC.

En Ecuador, el CONELEC es la entidad encargada de establecer los niveles de calidad de prestación de servicio eléctrico de distribución en:

- Nivel de voltaje.
- Perturbaciones de voltaje.
- Factor de potencia.

Las fórmulas que utiliza el CONELEC para calcular los índices de la calidad de energía eléctrica son:

Nivel de Voltaje. – El índice de calidad se expresa mediante la ecuación (1.1)

Índice de Calidad

$$\Delta V_k (\%) = \frac{V_k - V_n}{V_n} * 100 \quad (1.1)$$

Dónde:

ΔV_k : variación de voltaje, en el punto de medición, en el intervalo k de 10 minutos.

V_k : voltaje eficaz (rms) medido en cada intervalo de medición k de 10 minutos.

V_n : voltaje nominal en el punto de medición.

Límites

Las variaciones de voltaje admitidas con respecto al valor del voltaje nominal se señalan a en la tabla 1.2

Tabla 1.2. Límites de variación de voltaje.

Fuente: CONELEC regulación 004/01.

	Subetapa 1	Subetapa 2
Alto Voltaje	7,00%	5,00%
Medio Voltaje	10,00%	8,00%
Bajo Voltaje. Urbanas	10,00%	8,00%
Bajo Voltaje. Rurales	13,00%	10,00%

Perturbaciones.

Parpadeo (flicker): para efectos de la evaluación de la calidad, en cuanto al flicker, la normativa del CONELEC considera el Índice de Severidad por Flicker de Corta Duración (P_{st}), determinado mediante (1.2).

$$P_{st} = \sqrt{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.0657P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50}} \quad (1.2)$$

Dónde:

P_{st} : Índice de severidad de flicker de corta duración.

$P_{0.1}$, P_1 , P_3 , P_{10} , P_{50} : Niveles de efecto “flicker” que se sobrepasan durante el 0.1%, 1%, 3%, 10%, 50% del tiempo total del periodo de observación.

Límites.

El índice de severidad del Flicker P_{st} en el punto de medición respectivo, no debe superar la unidad. Se considera el límite $P_{st} = 1$ como el tope de irritabilidad sin molestia el ojo humano.

Distorsión Armónica Total.- El índice de calidad de la distorsión armónica se expresa mediante (1.3).

$$Vi' = \left(\frac{Vi}{Vn} \right) * 100$$

$$THD = \left(\frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{40} (V_i)^2}}{V_n} \right) * 100 \quad (1.3)$$

Dónde:

V_i' : factor de distorsión armónica individual de voltaje.

THD: Factor de distorsión total por armónicos, expresado en porcentaje.

V_i : Valor eficaz rms del armónico “i” (para $i=2, \dots, 40$) expresado en voltios.

V_n : Voltaje nominal del punto de medición expresado en voltios.

El CONELEC establece que los valores (rms) de los voltajes individuales V_i' y los THD que deben ser expresados como porcentaje no deben pasar los límites mostrados a continuación

*Tabla 1.3. Límites de la variación armónica de voltaje.
Fuente: CONELEC regulación 004/01*

ORDEN (n) DE LA ARMONICA Y THD	TOLERANCIA [V_i'] o [THD]	
	(% respecto al voltaje nominal del punto de medición)	
	V > 40 kV (otros puntos)	V <40 kV (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
Mayores de 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
Mayores a 12	0.2	0.5
THD	3	8

Factor de Potencia.

El índice de calidad refiere que si en el 5% o más del periodo evaluado (7 días) el valor del factor de potencia es inferior al límite mínimo 0,92 el consumidor está incumpliendo con la regulación.

1.3 Mecanismos de Medición de la Calidad de Energía Eléctrica

1.3.3 Identificación de problemas en la calidad en la energía eléctrica.

Los síntomas para identificar algún o algunos problemas con la calidad de energía pueden ser: luces que parpadean, cortes de suministro, interruptores o controladores de procesos que se disparan o se bloquean inoportunamente, los motores y transformadores se calientan en exceso o provocan demasiado ruido, así como un rendimiento ineficaz de los computadores.

1.3.4 Origen de los Problemas de Calidad

Más del 80% de los problemas de calidad se originan en las instalaciones internas, pudiendo ser los causantes de secuencias de encendido y apagado de equipos de gran potencia, conexiones incorrectas de cables y tomas a tierra, circuitos sobrecargados, menos del 20 % de los problemas se originan en el sistema de distribución y transmisión de la red eléctrica.

Otros factores como los rayos, las fallas de los equipos, las condiciones meteorológicas también afectan negativamente la calidad.

La energía eléctrica al ser un bien de consumo debe mantener una determinada calidad, caso contrario afectará a todos los equipos directa o indirectamente.

Para poder analizar la calidad de energía es necesario, la instalación de analizadores de carga eléctrica capaces de analizar por sí mismo todos los fenómenos no deseados que podrían afectar a la carga instalada, o a la fuente suministradora de la energía eléctrica.

Los equipos analizadores deben ser instalados continuamente en el punto de la acometida de suministro eléctrico.

CAPÍTULO II

SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS EN SINCRONISMO CON LA RED ELÉCTRICA

En este capítulo se analiza el funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica (SFCE), así como los efectos que estos causan en cuanto a calidad de energía eléctrica en las edificaciones. Se hace referencia a los tipos de mantenimiento aplicables.

2.1 Descripción de la Arquitectura y Funcionamiento de los Sistemas Solares Fotovoltaicos Sincronizados con la Red Eléctrica de las Edificaciones.

2.1.1 Origen de la Energía Solar Fotovoltaica

El aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica tiene sus orígenes en el siglo XIX, pero su periodo de evolución comienza en los años 50 del siglo XX. El término fotovoltaico proviene del griego foto (luz), y voltio (Alejandro Volta) que es la unidad de la fuerza electromotriz, causante del movimiento de los electrones. Por lo tanto la energía fotovoltaica trata de la transformación de la energía luminosa en energía eléctrica de modo directo. La historia atribuye a Becquerel el descubrimiento de la energía fotovoltaica dado que en 1839 publicó un estudio describiendo cómo las láminas de plata aumentaban su tensión eléctrica cuando eran expuestas a la luz del sol. [4] [5]

Entre las ventajas de la producción de electricidad mediante la tecnología fotovoltaica pueden citarse los siguientes elementos:

- El aprovechamiento de la energía solar para la generación de electricidad contribuye a la sostenibilidad del sistema energético: no produce ruido, emisiones nocivas, ni gases contaminantes. [6]
- El “combustible” es gratis.

– Es complementaria con otras fuentes de energía tanto convencionales, como renovables. [7]

– La facilidad de su proceso de instalación ya que consta de sistemas modulares y flexibles.

– No requiere ocupación de espacio adicional, pues se puede instalar en tejados o integrarla en edificios.

– Evita costes de mantenimiento y transporte de las líneas eléctricas, tanto en zonas rurales como urbanas pues no hay piezas móviles susceptibles de desgaste, rotura o sustitución. [8]

–

2.1.2 Composición de las Células Fotovoltaicas

a) Semiconductora tipo n

Están fabricados a partir de silicio cristalino que ha sido dopado con pequeñas cantidades de una impureza (usualmente fósforo), de modo que el material dopado posea un exceso de electrones libres. Los electrones son partículas subatómicas con carga eléctrica negativa, de forma que el silicio dopado de esta forma se conoce como semiconductor de tipo n (negativo). [9]

b) Semiconductores Tipo P

Están fabricados a partir de silicio cristalino, pero están dopados con muy pequeñas cantidades de distintas impurezas (usualmente Boro), que hace que el material tenga un déficit de electrones. Estos electrones perdidos reciben el nombre de agujeros, ya que la ausencia de un electrón de carga negativa puede ser considerada, de hecho, como una partícula cargada positivamente. [9]

c) Unión p-n

Se puede crear una unión p-n, que une a estos dos materiales disímiles. Esto provoca un campo eléctrico en la región de la unión. El campo eléctrico es como un campo

electrostático idéntico al que puede generarse frotando una goma sobre un plástico, esto ocasiona que las partículas cargadas negativamente se muevan en dirección opuesta. [9]

2.1.3 El Efecto Fotovoltaico.

En la Figura 2.1 observamos el efecto de la carga de una célula fotovoltaica, la cual convierte la energía luminosa que transportan los fotones de luz en energía eléctrica, cuando los fotones procedentes de la luz de una adecuada longitud de onda caen dentro de la unión p-n, pueden transferir su energía a alguno de los electrones promoviéndolos a un nivel energético más elevado. Normalmente estos electrones ayudan a mantener el material unido y forman lo que se llama la banda de valencia donde los átomos se encuentran tan juntos que no pueden moverse. En su estado excitado, sin embargo los electrones quedan libres para conducir la corriente eléctrica moviéndose a través del material. Además, cuando los electrones se mueven dejan atrás agujeros en el material, los cuales también pueden moverse. [10]

Para producir una corriente eléctrica útil se debe extraer los electrones liberados antes que se recombinen nuevamente con los huecos, se lo logra introduciendo al material semiconductor elementos químicos que producen un exceso de electrones y de huecos, las propiedades intrínsecas de los semiconductores se denominan dopantes y el proceso de su incorporación al semiconductor se llama dopado. [11]

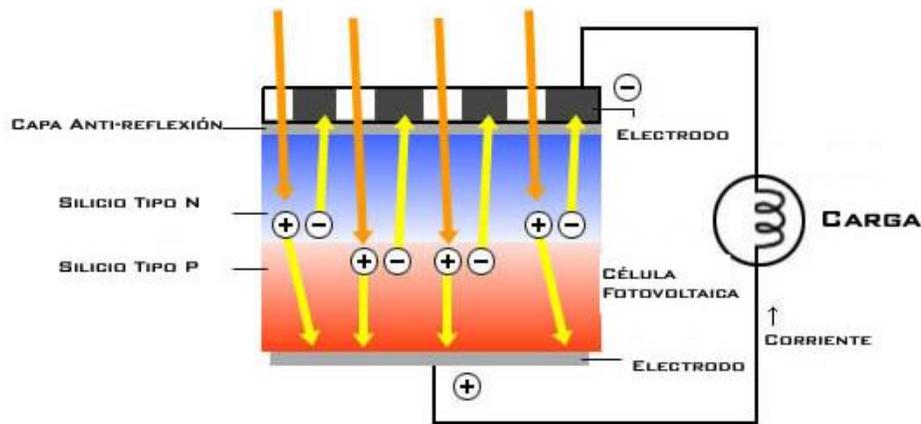


Figura 2.1. Carga de una célula fotovoltaica simple
 Fuente: Sen Zekai, *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques*. 2008, p. 273.

2.1.4 Radiación Solar

La radiación solar es la energía electromagnética que surge de los procesos de fusión de hidrogeno contenido en el sol. El valor máximo medido en la superficie terrestre es de aproximadamente 1000 kW/m².

Este tipo de instalaciones se encuentran permanentemente conectadas a la red eléctrica, así el sistema fotovoltaico en periodos de irradiación sea quien entregue la energía, y en los periodos de irradiación limitada o nula sea la red eléctrica convencional quien satisfaga la demanda.

Si la energía generada por el sistema es superior a la demanda local, la energía no puede ser almacenada y consumida posteriormente como en los sistemas aislados, si no que esta se produce para ser vendida y recibir una prima por kWh vertido. Con lo cual en un plazo de años se amortizara la inversión inicial realizada.

En la actualidad los plazos de amortización están rondando los 10 años este tipo de instalaciones tiene una vida útil de entorno a los 30 años se puede asegurar que habrá un buen número de años de beneficio económico.

2.1.4 Descripción de las Instalaciones Conectadas a la Red.

En la Figura 2.2 se muestra el esquema de un típico sistema fotovoltaico, los componentes principales que conforman un (SFCR) son:

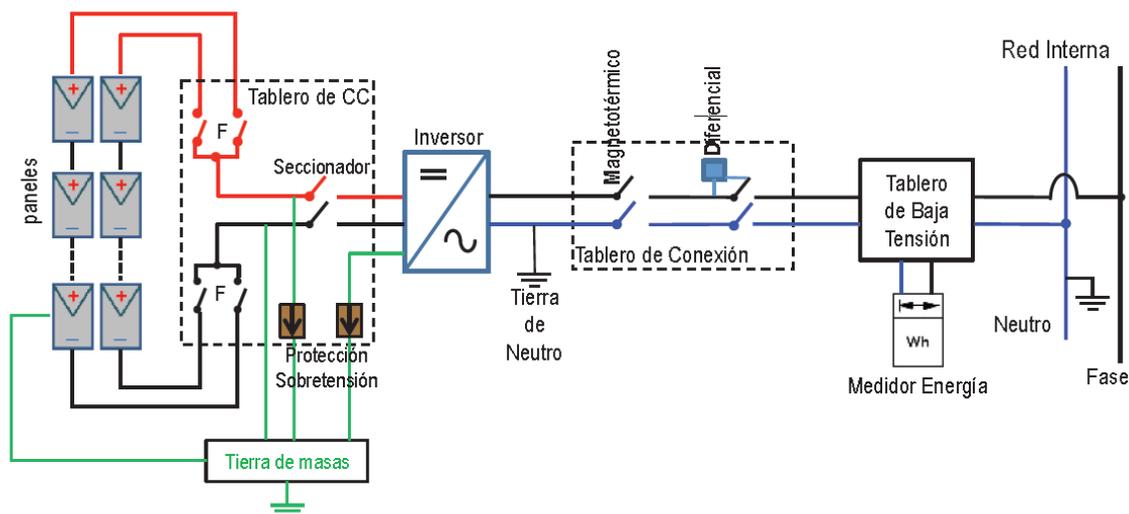


Figura 2.2. Esquema de un generador solar fotovoltaico conectado a la red
Fuente: Revista Técnica "Energía", 2013, p. 118

a) Módulos Fotovoltaicos.

Son conjuntos de celdas fotovoltaicas conectadas eléctricamente en serie o paralelo de forma que la tensión y corriente se ajusten al valor deseado, la mayoría de los paneles se constituyen asociando primero células en serie hasta conseguir el nivel de tensión deseado y posteriormente colocando en paralelo varias de estas asociaciones en serie hasta alcanzar la intensidad necesaria [12]

En la Figura 2.3 se observa la estructura típica de un panel fotovoltaico, en el mercado se encuentran en capacidades de 100 Wp hasta 300 Wp nominales, esta potencia corresponde a condiciones normalizadas con irradiación solar de 1000 kW/m², a una temperatura de 25 °C, generalmente se suelen montar con orientación e inclinación fija teniendo en cuenta la ubicación y latitud con el fin de obtener un mayor rendimiento. [4]

Las tensiones nominales de los módulos y arreglos en los sistemas pueden ser de 12 V, 24 V y 48 V, para acoplarse a bancos de baterías, sin embargo en los sistemas conectados con la red se configuran tensiones típicas entre 90 V a 600 V.

Generalmente la potencia pico (W_p) del módulo después de 20 años de operación, no debe ser inferior al 80% de su potencia nominal. [13]

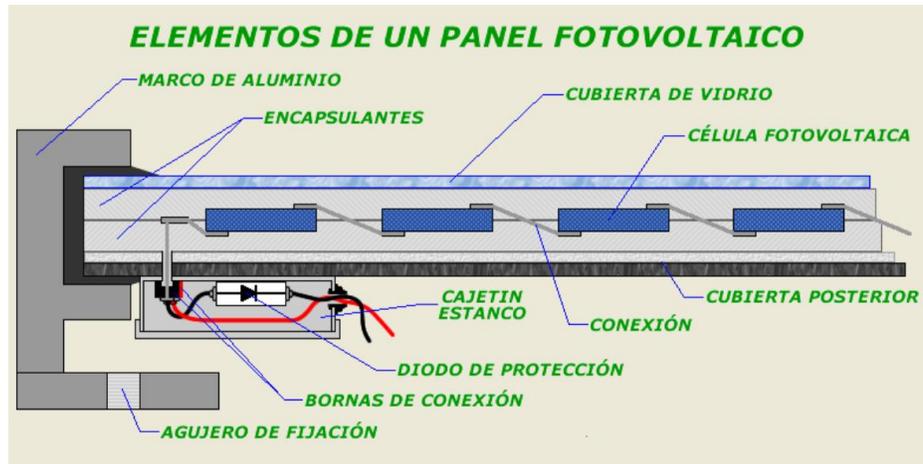


Figura 2.3. Estructura del panel fotovoltaico.
Fuente: M. Á. Sánchez Maza, *Energía solar fotovoltaica*. México: Limusa, 2011, p. 316

b) Contador de Intercambio de Energía

Son equipos electrónicos que miden la energía eléctrica entregada a la red por el usuario, son de dos tipos bidireccionales y unidireccionales, uno para medir el consumo del cliente cuando utiliza energía de la red eléctrica y el otro contador para medir la energía producida e inyectada a la red eléctrica local. En ambos casos los contadores miden en kilovatios-hora para que las empresas eléctricas distribuidoras puedan facturar a los precios autorizados.

c) Inversor

Los inversores son circuitos electrónicos de potencia, hechos con transistores o tiristores, su función es transformar la corriente continua que generan los paneles en corriente alterna es decir ondular la corriente para transformarla en función de onda senoidal, permitiendo

así que los equipos eléctricos funcionen con normalidad, cuando el sistema está conectado a la red de energía eléctrica debe suministrarle corriente alterna a 120 voltios o 220 voltios. [14]

El inversor es el enlace entre la instalación solar y la red eléctrica, el inversor es un elemento de suma importancia pues no solo realiza la conversión de la corriente continua generada por los módulos fotovoltaicos es también el equipo encargado de sincronizar la onda generada con la de la red, así como garantizar que los paneles trabajen tan cerca del punto de máxima potencia como sea posible. [10]

La conexión del inversor se rerealiza en baja tensión (210/121 V en sistemas trifásicos y 120/240 V en sistemas monofásicos a tres hilos). [13]

d) Cableado

El cableado debe poseer determinadas características para resistir la intemperie es decir estar expuesto a diferencia de temperaturas, resistente a los rayos ultravioletas, así como características mecánicas como resistencia a la tensión, a la torsión, al doblado, se distinguen tres tipos diferentes de cableado.

- Cableado de unión de los módulos para formar sting.
- Cableado principal de corriente continua que conduce la electricidad hasta el inversor.
- Cableado de corriente alterna que conduce la electricidad desde el inversor hasta la red eléctrica.

Los conductores deben cumplir con la norma NEC 2008. [9]

e) Protecciones en corriente directa (D.C).

- **Fusibles.-** Son dispositivos de protección, de formas y dimensionamiento diferente dependiendo de la intensidad para la que deben fundirse debido a cortocircuitos o por exceso de carga. [15]
- **Interruptor en corriente continua.-** Abre el circuito para proteger al circuito de sobrecarga y fallas, desconectando el inversor y llevando la sobrecarga a tierra de la instalación. [15]

f) Protecciones en corriente alterna

- **Interruptor Magneto térmico.-** Estos equipos de protección disponen de tres tipos de desconexión manual térmico y magnético, actuando sobre intensidades provocadas por sobrecargas o cortocircuitos. [15]
- **Interruptor diferencial.-** Son dispositivos de protección frente a contactos indirectos, es decir evita que el personal sufra una descarga, cuando una parte metálica haya quedado en contacto con el conductor de fase, desconectando el circuito. [15]
- **Protección contra sobre tensiones.-** El inversor internamente tienen incorporado un descargador de tensión a tierra (varistor), que protege la parte de corriente continua de la instalación, en el lado de corriente alterna se colocan descargadores de tensión por fase. [15]

2.1 Regulación de sistemas solares fotovoltaicos aplicables a la instalación de equipos conectados a la red eléctrica de las edificaciones

La Regulación N° 004/11 del CONELEC estableció los precios de la energía renovable y ciertos parámetros técnicos aplicables a la energía eléctrica suministrada por estos generadores definiendo que éstos serán los mismos que los establecidos por los generadores convencionales señalados en las regulaciones que sobre la materia [16]

El Real Decreto 1663/2000 trata sobre las características técnicas de la conexión de las instalaciones fotovoltaicas a la red de baja tensión no superior a 1 kV y cuya potencia nominal no sea superior a 100 kVA.

La norma ecuatoriana de la construcción NEC-11, establece las especificaciones y características técnicas que deben tener los sistemas fotovoltaicos (SFV) conectados a la red y aislados de hasta 100 kW, que se emplean en la generación de energía de origen fotovoltaico en el Ecuador y los servicios que deben proporcionar a las empresas

proveedoras para garantizar la confiabilidad, seguridad y durabilidad de los componentes del sistema a instalar, según sus fichas técnicas. [13]

2.2 Principales efectos de la calidad de la energía del funcionamiento de los sistemas solares fotovoltaicos conectados a la red eléctrica en edificaciones

2.3.1 Disturbios en el sistema eléctrico

Históricamente los equipos estaban diseñados para operar satisfactoriamente frente a variaciones significativas de tensión, corriente y frecuencia. El avance tecnológico en lo que se refiere a equipos electrónicos ocasionó el apareamiento de nuevos equipos tales como computadores, controladores lógicos programables, entre otros, que requieren controles de precisión, los cuales presentan alta sensibilidad a la calidad de la energía eléctrica.

Los disturbios en el sistema generalmente son variaciones temporales en la tensión del sistema que pueden causar una mala operación o fallas de equipos conectados al sistema como consecuencia perdida de producción. [17] [18] [19]

La energía eléctrica representa el principal insumo que mueve a la industria, sin ella la industria entraría en crisis, la calidad de energía eléctrica puede definirse como una ausencia de interrupciones, sobre tensiones, deformaciones producidas por armónicos en la red y las variaciones del voltaje suministrado al usuario. [20]

2.3.2 Tipos de disturbios. [21] [22] [23]

Los disturbios pueden afectar al sistema eléctrico dependiendo de su magnitud y su duración y esta combinación determinará si las cargas críticas pueden ser afectadas o dañadas. Entre los principales disturbios se tienen:

–Interrupciones de servicio (blackout).

Es la caída de energía por debajo del 10 % con una duración de 30 ciclos en adelante.

–Microcortes de voltaje.

Son disminuciones muy breves en la magnitud del voltaje que se producen en rangos que van de los microsegundos a los milisegundos.

–Bajo voltaje momentáneo (sag).

Es un decremento temporal en el nivel de voltaje entre un 10% y un 90% con una duración entre 8.3 ms a un minuto. Es muy común hoy en día y produce el parpadeo de lámparas.

–Bajo voltaje permanente (brownouts).

Corresponde a una disminución del nivel de voltaje por debajo del 90% (según norma española) del valor nominal por varios minutos.

–Sobre voltaje (over voltaje).

Corresponde al aumento de voltaje por sobre un 110% del valor nominal por más de un minuto.

–Sobretensiones transitorias (trascientes).

Son eventos de muy corta duración y de amplitud variada, las fuentes comunes de este tipo de transitorios son los rayos.

–Notching.

Es una perturbación de polaridad opuesta a la forma de onda normal.

–Ruido eléctrico.

Es una distorsión de alta frecuencia en la forma de onda de voltaje.

–Armónicos.

Son componentes de una señal que se definen como frecuencias secundarias, que acompañan a la frecuencia fundamental. En un sistema de potencia eléctrica los equipos conectados a él están diseñados para operar a 50 o 60 Hz de frecuencia con una tensión y corriente senoidal, por múltiples razones pueden aparecer flujos eléctricos a otras frecuencias sobre algunas partes del sistema de potencia, y la forma de onda resultante estaría formada por un numero de ondas senoidales de diferentes frecuencias.

La amplitud de armónicos se expresa generalmente en % respecto a la fundamental y se definen por la amplitud refiriéndose al valor de la tensión o intensidad del armónico, y el orden refiriéndose al valor de su frecuencia referido a la fundamental (60 Hz). [24]

En las instalaciones fotovoltaicas los armónicos no son una excepción pues el inversor es fuente de distorsión armónica y a través de éste se inyectan en la red eléctrica pudiendo producir desperfectos en el sistema.

2.4 Medidas de mitigación de los efectos negativos en la calidad de la energía debidos al funcionamiento de los sistemas solares fotovoltaicos conectados a la red eléctrica en edificaciones

Los SFCR no necesitan de un mantenimiento exhaustivo, por la razón que sus dispositivos no son móviles, no hay lubricantes o aceites así como no posee elementos de degradación excesiva, no obstante para el buen funcionamiento de los equipos del SFCR en el transcurso de su vida útil aproximadamente 20 años, es necesario contar con medidas de mitigación necesarias para una buena producción de energía eléctrica, la cual incluye: [25]

- Plan de mantenimiento preventivo
- Mantenimientos correctivos

2.4.1 Plan de mantenimiento preventivo.

Son considerados los trabajos de limpieza, revisión y comprobación visual que se debe realizar en la instalación comprendida entre los módulos fotovoltaicos, inversores, líneas y terminales del circuito de corriente alterna así como los dispositivos de protección.

El plan preventivo incluirá todas las operaciones de mantenimiento así como la sustitución de elementos fungibles o desgastados por el uso, con una revisión mensual que incluirá.

a.- Comprobación general de la planta.

Verificar visualmente el sombreado de paneles debido a la posible variación de la vegetación o posibles objetos situados cerca de ellos.

Comprobar que la tensión de red alterna no tenga variación superior a un 15 %, a la tensión nominal de la instalación.

Comprobar que el valor de la frecuencia de red no tenga una variación superior al 2%.

Comprobar que existiendo tensión continua en los paneles suficientes para arrancar el inversor, los parámetros P, I y V sean los correspondientes a las especificaciones técnicas.

Comprobar que los estados de funcionamiento del inversor correspondan a las especificaciones del fabricante.

b.- Comprobación del estado de la estructura que soporta los paneles fotovoltaicos.

Comprobar visualmente el estado de la estructura no muestre deterioro como puede ser grietas, oxido, deformaciones por el peso soportado, etc.

Verificar que las uniones y anclajes de la estructura no muestren señales de aflojamiento que puedan provocar vibraciones debido al viento.

c.- Comprobación de la estabilidad y sujeción de los paneles.

Verificar que los paneles estén bien sujetos a la estructura, así comprobar que no exista holgaduras, esta comprobación se la realiza visualmente comprobando que sucede al tratar de mover a los paneles.

d.- Comprobación de la limpieza en la superficie de los paneles.

Se realizara la limpieza de los módulos en caso de ser necesario y de forma manual utilizando agua y productos que no rayen la superficie de los módulos, esto se debe realizar cuando los paneles estén fríos.

e.- Comprobación del estado del cableado.

Comprobar que el cableado, los conductos de protección, así como la canalización estén en perfecto estado, sin signos de deterioro en el aislamiento o que se encuentren estancados.

f.- Comprobación del estado general del conexionado sujeción de las cajas de conexión y limpieza del inversor.

Mediante pequeños tirones verificar que estén firmemente conectados, caso contrario ajustar. Si existe prensa estopa fijadas al equipo verificar que estén correctamente fijadas.

Verificar que los terminales estén libres de corrosión, en lugares que se tiene diversidad de clima se deberá proteger la conexión con espray, grasa, etc.

Verificar que el equipo esté limpio, así también este bien sujeto.

g.- Medición de la tensión en circuito abierto.

Verificar que la tensión existente entre los terminales positivo y negativo de cada circuito generador (rama en paralelo) y del circuito principal es la misma e igual a la tensión de ensayo multiplicada por el número de módulos en serie que forman cada circuito generador.

h.- Medición de la corriente en cortocircuito.

Con la pinza amperometrica se realizara la medición provocando un cortocircuito punteando los terminales correspondientes con un conductor de sección adecuada, verificar que la corriente de cortocircuito de cada circuito generador (rama en paralelo) es la misma e igual a la corriente de ensayo, verificar que la corriente de cortocircuito principal es igual a la de ensayo multiplicada por el número de circuitos generadores (ramas en paralelo).
[25]

i.- Comprobación de la caída de tensión.

Esta comprobación se realizara en las horas centrales de caída de tensión en un día soleado y con la instalación fotovoltaica en marcha.

Comprobar con la pinza amperometrica que la corriente en el circuito de campo fotovoltaico e inversor de red es aproximadamente igual a la máxima prevista y verificar con el voltímetro que la diferencia entre la tensión en los terminales de la caja de conexiones principal del campo fotovoltaico y la tensión en los terminales del inversor correspondiente al campo fotovoltaico está dentro del margen permitido.

2.4.1 Plan de mantenimiento correctivo.

El mantenimiento correctivo comprende aquellas acciones planificadas o no cuyo objetivo es restablecer el nivel de desempeño de un equipo o sistema después de ocurrido un fallo. El mantenimiento correctivo se verá reducido si se realiza un correcto mantenimiento preventivo.

El operario encargado del mantenimiento deberá determinar si:

–La avería afecta el funcionamiento de la instalación provocando un paro en la de la producción de energía eléctrica.

–La avería no afecte aparentemente el funcionamiento, pero que se produzca una reducción de producción.

Las averías más comunes en los distintos elementos que forman una instalación SFCR suelen ser:

En los paneles fotovoltaicos.

–Presencia de sombras.

–Deterioro o rotura del vidrio.

Equipos eléctricos y de control.

Se procederá a seguir el circuito de acuerdo al plano de conexiones eléctricas y se comprobará la existencia de tensión, si se detectara el fallo de un elemento habrá que sustituirlo y continuar con la revisión, se revisará aprietes y continuidades de cable.

En los inversores se pueden presentar averías por los siguientes motivos.

–Fallos en su fabricación.

–Problemas por inversión de polaridad durante el montaje.

–Sobrecarga o sobretensión por ausencia de elementos de protección.

Cableado eléctrico.

La calidad de la señalización en el cableado influirá en la localización de la avería y se puede presentar por los siguientes motivos.

–Las conexiones se desconectan o se aflojan.

–Las conexiones se mojan.

–Las conexiones se calientan demasiado.

CAPÍTULO III

MODELACIÓN Y ANÁLISIS

En este capítulo se describen las características eléctricas de los paneles fotovoltaicos, los factores externos que influyen en la producción de energía eléctrica, representados en un modelo matemático, así como aspectos que se deben considerar en una campaña de medición para un correcto análisis de datos de una instalación real.

3.1 Modelo matemático aplicable a la operación de los sistemas solares fotovoltaicos sincronizados con la red eléctrica de las edificaciones en términos de calidad de la energía.

3.1.1 Características eléctricas de la celda fotovoltaica.

Las características se obtienen mediante un circuito equivalente de una celda ideal, donde la corriente y el voltaje dan como resultado una curva I-V que representan pares de valores de tensión e intensidad en los que puede encontrarse funcionando la celda como se indica en la Figura 3.1.

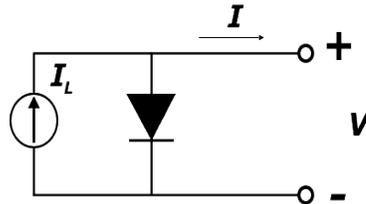


Figura 3.1. Esquema eléctrico equivalente simplificado de una celda solar
Fuente: J. R. Ibañez Plana, Manuel Rosell Polo and J. Rosell Urrutia, Tecnología solar

a) Características V-I de iluminación.

La célula solar más utilizada es la unión p/n cuya curva de funcionamiento en la oscuridad se comporta como un diodo, y cuando está iluminada el diodo se convierte en un generador cambiando su curva de funcionamiento.

En la Figura 3.2 se muestra el circuito equivalente de una celda solar real, constituida por un diodo que representa la juntura p/n de la celda en oscuro I_d , el cual está en paralelo

con una fuente que representa la corriente generada por la celda bajo iluminación I_{ph} , Una resistencia en serie R_s , que representa la resistencia en ohmios a través de los materiales semiconductores de los contactos eléctricos y de la rejilla metálica, y una resistencia en paralelo R_p a través de la cual se presenta fugas de corriente. [26]

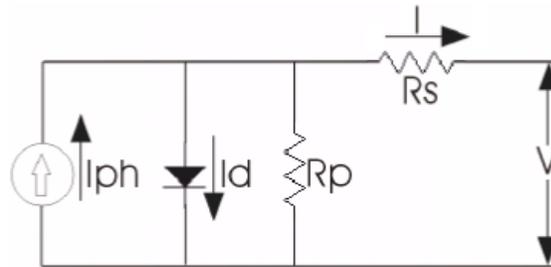


Figura 3.2. Circuito equivalente de una celda solar real
Fuente: Eduardo Norman, Revista elementos Volumen, Editorial Gran Colombiano 2012, p.70.

El comportamiento del módulo solar está representado mediante la ecuación (3.1)

$$I = I_L - I_o \left[\exp \left(\frac{q(V + R_s I)}{mKT} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (3.1)$$

Dónde:

$I_L = I_{ph}$ = Intensidad de corriente fotogenerada (A)

I_o = Intensidad de corriente de saturación del diodo (A).

R_s = Resistencia serie (Ω).

R_p = Resistencia paralelo (Ω).

m = Factor de idealidad del diodo que vale entre 0 y 1.

V = Voltaje del panel (V).

K = Constante de Boltzmann equivalente a 1.381×10^{-23} (J/K).

q = Carga del electrón equivale a 1.602×10^{-19} (C).

I = Intensidad de corriente de salida (A).

T = Temperatura ($^{\circ}$ K).

R_s = Resistencia serie (Ω).

R_p = Resistencia paralelo (Ω).

En las celdas que componen los módulos fotovoltaicos la eficiencia es grande, por lo cual la resistencia en paralelo es muy alta en relación con el numerador, el factor m para celdas de silicio es 1, y el termino KT se lo conoce como voltaje termodinámico V_T , quedando la ecuación (3.2)

$$I = I_L - I_o \left[\exp\left(\frac{(V + R_s I)}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (3.2)$$

b) Intensidad de cortocircuito (I_{cc} o I_{sc})

Cuando dicha resistencia es nula, se tiene un circuito por Dónde circulará la máxima corriente a través de la celda, el voltaje equivale a cero ($V=0$), así (3.3). El valor varía de forma proporcional en función de la radiación solar a la cual la célula está expuesta [26]

$$I_{cc} = I(V = 0) = I_L \quad (3.3)$$

c) Tensión a circuito abierto (V_{CA} o V_{OC})

Si la resistencia es infinita, se tiene un circuito abierto ($I=0$), en dónde se mide el voltaje máximo en los extremos de la celda, esto es cuando no está conectado ningún receptor. El valor medido puede ser mayor que el voltaje nominal de la celda, mediante la ecuación (3.4) [26].

$$V_{CA} = m \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_L}{I_o} + 1\right) \quad (3.4)$$

d) Punto máximo de potencia ($P_{m\acute{a}x}$)

La potencia de una celda fotovoltaica viene dada por el producto de la corriente y el voltaje, como se describe en la ecuación (3.5).

Tanto en cortocircuito como en circuito abierto la potencia de la celda es cero. Sin embargo existe un punto de operación en el cual la potencia es la máxima disipada en la

carga. La potencia máxima o pico es el valor máximo en potencia que puede generar una celda bajo condiciones de radiación incidente, como se observa en la Figura 3.3 [26]

$$P_{Cel} = I_{MP} * V_{MP} \quad (3.5)$$

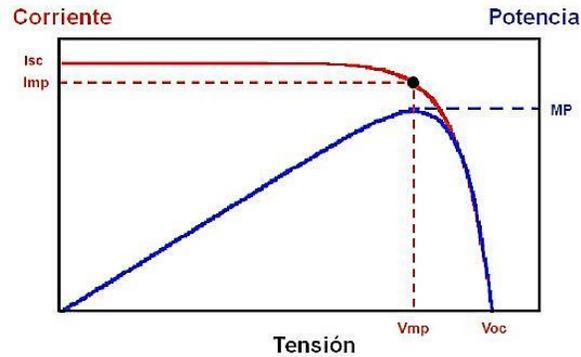


Figura 3.3. Curva característica V-I curva de potencia de una celda fotovoltaica
Fuente: J. M. Fernandez Salgado, Tecnología de las energías renovables, Primera. Madrid.

e) Factor de forma (FF)

Es el cociente entre la potencia máxima entregada por la celda y la potencia total incidente de la misma. Este valor siempre es más pequeño que la unidad y es un indicador que mide la calidad de la celda fotovoltaica como indica la ecuación (3.6).

$$FF = \frac{I_{MP} * V_{MP}}{I_{CC} * V_{CA}} \quad (3.6)$$

Aplicando esta definición, la potencia máxima de una celda se puede calcular mediante (3.7) [27]

$$P_{MÁX} = FF * I_{CC} * V_{CA} \quad (3.7)$$

En la Figura 3.4, se observa el área del rectángulo que forma la potencia máxima es menor que la del rectángulo que forma la potencia total, sin embargo ambas potencias pueden ser iguales cuando más pronunciado sea el codo de la curva característica [28]

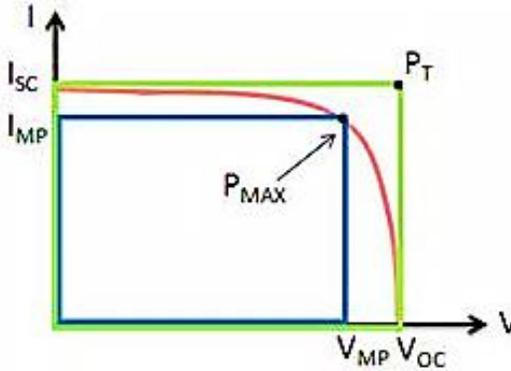


Figura 3.4. Esquema eléctrico equivalente simplificado de una celda solar
Fuente: A. A. Bayod Rujula, *Energías Renovables - Sistemas Fotovoltaicos*.

f) Eficiencia (η)

La eficiencia de una celda fotovoltaica se define como la máxima potencia de salida eléctrica dividida para la potencia de la radiación solar incidente que sobre la célula es el producto de la irradiación incidente por el área de la célula. La potencia pico solo sirve para seleccionar el panel más adecuado en una instalación determinada, más no para estimar la energía que podría generar dicho panel [28], la eficiencia se expresa mediante la ecuación (3.8)

$$\eta = \frac{FF * I_{CC} * V_{CA}}{I_S * A} \quad (3.8)$$

Dónde:

I_S = Irradiación solar (kW/m^2).

A = Área de la célula fotovoltaica (m^2).

Existen otros elementos que provoca pérdidas de energía y con ello una baja eficiencia en las celdas fotovoltaicas como por ejemplo:

- Pérdidas por reflejo debido a la reflexión Dónde se pierde parte de la luz incidente en la superficie de la celda.
- Pérdidas por transmisión cuando el semiconductor no absorbe toda la radiación solar.
- Pérdidas por el uso parcial de la energía incidente, esto es la energía absorbida en el semiconductor posee mayor magnitud comparada al ancho de banda, la diferencia de energía es absorbida por la red cristalina y se pierde en forma de calor.
- Pérdidas por recombinación debido a que algunas cargas se recombinan antes de ser

recolectadas y pierden la energía en forma de calor.

- Pérdidas por el parámetro del voltaje en los casos de dispositivos con uniones n-p, el potencial interior n-p tendrá una pequeña corriente de fuga y no será posible alcanzar resistencia paralela de valores infinitos, por tanto el Factor de Forma (FF) siempre será menor a la unidad [29]

g) Influencia de la temperatura

Los semiconductores son sensibles ante el aumento de calor. En la Figura 3.5 se observa el efecto que produce la temperatura una curva I-V, indica que el voltaje generado varía inversamente proporcional a la temperatura de la celda, mientras que la corriente de salida incrementa ligeramente, esto es debido al aumento de las longitudes de difusión de los minoritarios y al estrechamiento de la banda prohibida que traslada el umbral de absorción hacia los fotones de menor o poca energía. Tanto la corriente de cortocircuito como el voltaje a circuito abierto se ven afectados por la temperatura ambiente de trabajo, el tipo de variación y la magnitud porcentual son distintas entre sí [30]

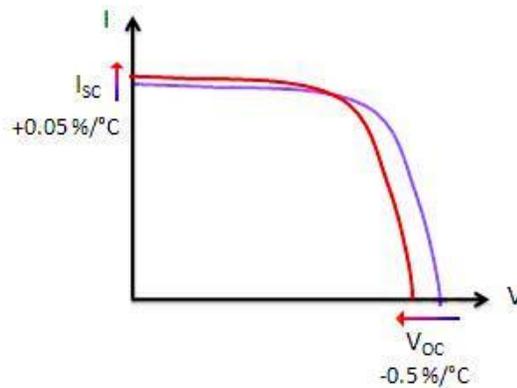


Figura 3.5. Curva I-V de una celda solar con la temperatura.

Fuente: J. R. Ibañez Plana, Manuel Rosell Polo and J. Rosell Urrutia, *Tecnología solar*, Mundi-Pren. Madrid-

3.1.2 Eficiencia en los componentes de un SFCR

La eficiencia de los componentes de un sistema solar fotovoltaico conectado a la red es un tema de estudio que considera las condiciones climáticas y persigue la reducción de las pérdidas eléctricas del sistema, mejorar el rendimiento de los equipos e incrementar la

potencia de generación entregada a la carga. En este contexto, es de particular interés analizar la eficiencia del campo solar (células fotovoltaicas) y del inversor.

a) Eficiencia del panel fotovoltaico.

La eficiencia de un panel fotovoltaico depende de factores externos tales como la temperatura, el tipo de tecnología utilizada en la fabricación del panel, etc; los cuales influyen en las pérdidas eléctricas modificando las características de funcionamiento de las celdas fotovoltaicas. La eficiencia aumenta linealmente con el nivel de radiación solar y el tamaño de la celda o panel, sin embargo, disminuye linealmente con la temperatura de la celda.

La radiación solar que recae sobre la superficie terrestre tiene una energía aproximadamente de 1000 kW/m². En la tabla 3.1 se aprecia un valor típico de la eficiencia en la conversión de energía solar en electricidad, que es del orden del (15 kW/m²) %, Por lo tanto, una celda solar puede proporcionar un 15% de energía eléctrica.

La eficiencia de las celdas solares es determinante para reducir los costos de los sistemas fotovoltaicos, ya que el campo solar suele representar los mayores costos del SFCR. Tabla 3.1: Tecnologías de las celdas solares.

Tabla 3.1: Tecnologías de las celdas solares.

Fuente: R. G. Perez, Replanteo y funcionamiento de las instalaciones solares fotovoltaicas, Andalucía: IC Editorial, 2011, pp. 167

Tecnología	Símbolo	Característica	Eficiencia de celdas en laboratorio (%)	Eficiencia típica en módulos comerciales (%)
Silicio monocristalino	sc-Si	Tipo oblea	24	13 – 15
Silicio policristalino	mc-Si	Tipo oblea	19	12 – 14
Películas de silicio cristalino sobre cerámica	f-Si	Tipo oblea	17	(8 – 11)
Silicio amorfo (incluye tandems silicio-germanio)	a-Si	Película delgada	13	6 – 9
Diseleniuro de cobre-indio / galio	CIGS	Película delgada	18	(8 – 11)
Telurio de cadmio	CdTe	Película delgada	18	(7 – 10)

b) Eficiencia en el inversor.

La eficiencia del inversor es un valor que indica cuánta energía continua (potencia de entrada) se convierte en energía alterna (potencia de salida) y que tiene relación con las especificaciones del fabricante. En general, se consideran dos tipos de pérdidas eléctricas en estos equipos: a) las dependientes de la potencia de entrada, causadas por la conmutación de los interruptores de potencia y las pérdidas en los conectores en el lado de continua, y; b) las de tipo independientes, producidas en el propio inversor inherentes al funcionamiento de sus circuitos. Ambos tipos de pérdidas conforman la curva característica de la eficiencia de un inversor. Donde se comprueba que la eficiencia del inversor es directamente proporcional a la potencia del sistema, es decir, a mayor potencia que se consume en AC, mayor será la eficiencia del inversor y esta varía con la potencia de entrada. El rendimiento energético actual de los inversores está entre el 93 y el 98 por ciento.

3.1.3 Modelación de los componentes del SFCR

La representación mediante modelos matemáticos de los componentes del sistema permite predecir el comportamiento del sistema ante distintas situaciones de operación, evitando un excesivo tiempo de experimentación y costos elevados.

a) Modelación del módulo fotovoltaico

En los sistemas de energía fotovoltaica la energía es procesada por los circuitos electrónicos por lo tanto se necesita de modelos que puedan ser simulados.

El circuito eléctrico más aceptable para representar un módulo fotovoltaico está constituido por cuatro parámetros.

Una fuente de corriente DC, un diodo y dos resistencias como se indica en la Figura 3.6.

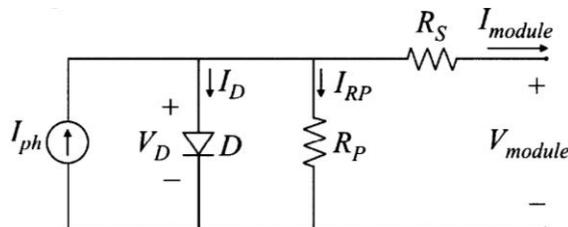


Figura 3.6. Circuito eléctrico de un módulo fotovoltaico.

El comportamiento matemático del módulo fotovoltaico parte de la ecuación (3.9), que define el comportamiento de una célula solar y sus parámetros eléctricos en función de la corriente y el voltaje de circuito abierto.

$$I = N_p \left\{ I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{q \left(\frac{V}{N_s} + \frac{R_s I}{N_p} \right)}{m \sigma_B T} \right) - 1 \right] - \frac{V}{R_p} + \frac{R_s I}{N_p} \right\} \quad (3.9)$$

Dónde:

I = Intensidad de corriente de salida (A).

I_L = Intensidad de corriente fotogenerada (A).

I_0 = Intensidad de corriente de oscuridad o inversa de saturación del diodo (A).

T = Temperatura (°K).

A = Factor de idealidad, equivale a 1,6.

σ_B = Constante de Boltzmann equivalente a 1.381×10^{-23} (J/K).

q = Carga del electrón equivale a 1.602×10^{-19} (C).

R_s = Resistencia serie (Ω).

R_p = Resistencia paralelo (Ω).

m = Parámetro adimensional que vale entre 0 y 1.

V = Voltaje de salida (V).

N_s = número de celdas en serie.

N_p = número de celdas en paralelo.

El valor de la resistencia en serie suele ser a causa de la resistencia de los contactos metálicos con el semiconductor debido a la resistencia ofrecida por las capas semiconductoras de la celda, la resistencia de la rejilla o de la metalización frontal, mientras que el valor de la resistencia en paralelo puede ser debido a fugas de corriente por la superficie de los bordes de la celda debidos a caminos de difusión a lo largo de dislocaciones.

Considerando que el valor de la exponencial es notablemente superior a 1 en todas las condiciones de operación, que la contribución de la resistencia paralelo es despreciable y que la corriente de cortocircuito es equivalente a la corriente fotogenerada, obtenemos la siguiente expresión simplificada (3.10) [31]

$$I = Np \left\{ I_L - I_O \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_S)}{N_S A \sigma_B T} \right) - 1 \right] \right\} \quad (3.10)$$

Para la corriente de saturación inversa del diodo se calcula a través de una razón entre la temperatura actual y la temperatura de referencia mediante (3.11) [32]

$$I_O = I_{Oref} \left[\frac{T}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left[\left(\frac{qE_g}{\sigma_B B} \right) \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3.11)$$

Dónde:

I_O = Corriente inversa de saturación (A).

I_{Oref} = Corriente inversa de saturación en condiciones de referencia (A).

B = Coeficiente de calidad del diodo, equivalente a 2 para el silicio cristalino y menor de 2 para el silicio amorfo.

E_g = Energía salto de banda GAP (eV), equivalente a 1.12 V para el silicio cristalino y 1.35 V para el silicio amorfo.

T_{ref} = Temperatura de referencia o nominal equivale a 298 (°K).

Para encontrar la intensidad de corriente fotogenerada se aplica (3.12) la que depende de la irradiación y la temperatura [33]

$$I_L = [I_{SC} + K_i(T - 298)] \frac{\Phi}{1000} \quad (3.12)$$

Dónde:

I_L = Intensidad de corriente fotogenerada (A).

I_{SC} = Intensidad de corriente corto circuito (A).

K_i = Constante equivale a 0,0017 (A/°C).

Φ = Irradiación incidente actual (W/m²).

T = Temperatura de la celda (°K).

b) Modelación del Inversor

La modelación del inversor permite tener una idea de la eficiencia de acuerdo a las pérdidas térmicas y eléctricas resultantes del proceso de conversión. La eficiencia del punto de máxima potencia se define como la relación entre la potencia de entrada del inversor y la potencia que el inversor podría convertir si se opera idealmente en el punto máximo de potencia [34]

La eficiencia del inversor varía en función del nivel de carga. Así el valor es mayor si el nivel de carga que se conecta se encuentra cerca del valor nominal para el que fue diseñado, y disminuye cuando opera con poca carga o sobrecarga.

En general la función de eficiencia de conversión del inversor depende de la relación entre potencia de salida del inversor y su potencia nominal (3.15). Para desarrollar esta función existen constantes involucradas en dicha ecuación que depende de las características propias del inversor a utilizar y que pueden ser extraídas mediante ajuste de la curva de eficiencia del inversor que provee el fabricante [35]

$$\eta_{MPPT} = \frac{\frac{P_{CC}}{P_{NOM}}}{\frac{P_{CC}}{P_{NOM}} + \left(M_0 + M_1 \frac{P_{CC}}{P_{NOM}} \right)} \quad (3.15)$$

Dónde:

η_{MPPT} = Eficiencia del seguidor del punto Máximo Potencia.

P_{CC} = Potencia de entrada del inversor en corriente continua (W).

P_{NOM} = Potencia nominal del inversor (W).

M_0 = Coeficiente equivale a 0,0039

M_1 = Coeficiente equivale a 0,0023

El rendimiento se evalúa como la relación entre la energía eléctrica en la entrada del inversor y la energía eléctrica que el inversor debería convertir si el mismo operase idealmente en el punto de máxima potencia.

3.2 Simulación de las condiciones de operación de un sistema típico

Para la simulación se ha empleado el programa Matlab/Simulink de MathWorks por ser un entorno abierto de cálculo numérico, el cual ofrece avanzadas herramientas de manipulación matemática, junto a Simulink su entorno gráfico representa una aplicación que logra un fácil manejo de las herramientas de simulación.

Ingresado las ecuaciones del modelo matemático del panel fotovoltaico y el inversor en el programa Simulink se obtiene el bloque con los diferentes subsistemas conformando el modelo como se observa en la Figura 3.7.

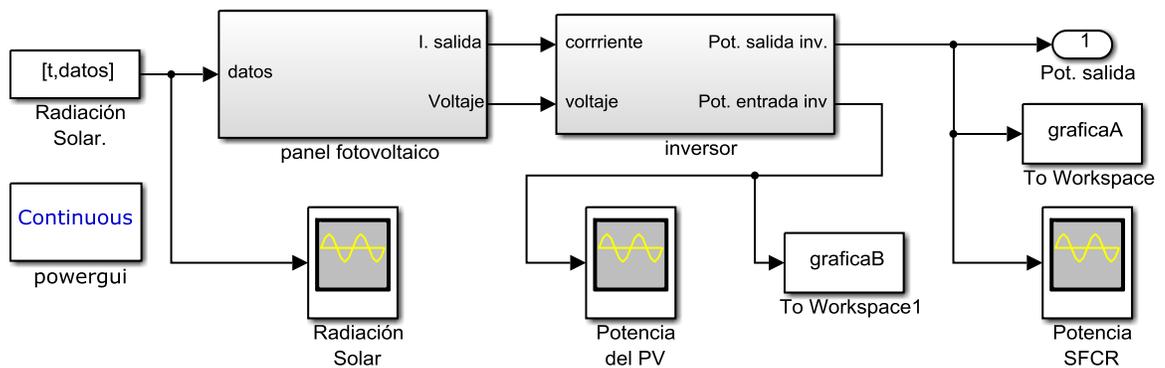


Figura 3.7. Representación esquemática del Sistema Fotovoltaico.
Fuente: Propia del Autor

Internamente, en los bloques del panel fotovoltaico y del inversor se desarrollan los diferentes subsistemas que conforman el (SFCR) Figura 3.8

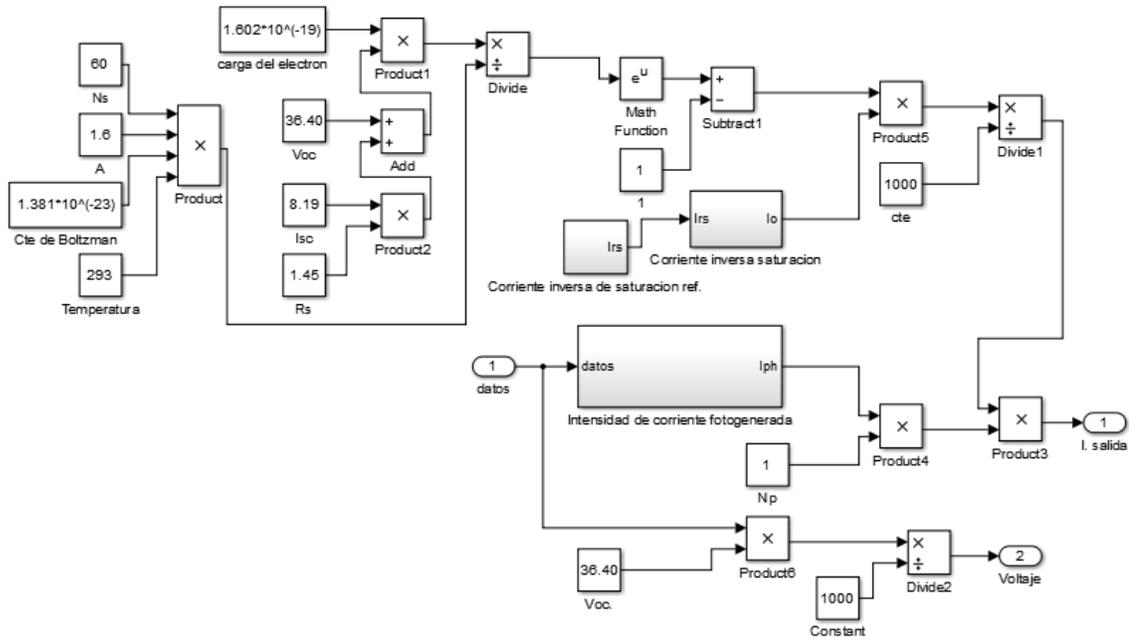


Figura 3.8. Representación esquemática del panel fotovoltaico
Fuente: propia del Autor

El rendimiento se evalúa como la relación entre la energía eléctrica en la entrada del inversor y la energía eléctrica que el inversor debería convertir si el mismo operase idealmente en el punto de máxima potencia, en la Figura 3.9 se aprecia el esquema del inversor.

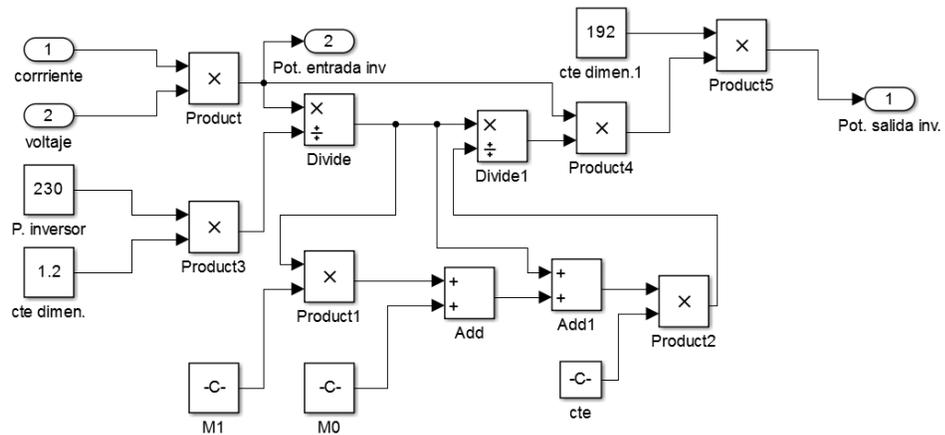


Figura 3.9. Representación esquemática del inversor.
Fuente: propia del Autor

El modelo requiere del ingreso de datos horarios de irradiación solar del emplazamiento, tal como se muestra en la tabla siguiente, que contiene información de la instalación real que se analiza en el capítulo 4 de esta tesis.

*Tabla 3.2. Irradiación (KW/m²) 15/02/2015
Fuente: Propia del Autor*

FECHA	IRRADIACION (kW/m ²)
15/07/2014 1:00	0
15/07/2014 2:00	0
15/07/2014 3:00	0
15/07/2014 4:00	0
15/07/2014 5:00	0
15/07/2014 6:00	0
15/07/2014 7:00	52
15/07/2014 8:00	202
15/07/2014 9:00	446
15/07/2014 10:00	547
15/07/2014 11:00	576
15/07/2014 12:00	759
15/07/2014 13:00	325
15/07/2014 14:00	838
15/07/2014 15:00	1032
15/07/2014 16:00	754
15/07/2014 17:00	57
15/07/2014 18:00	21
15/07/2014 19:00	0
15/07/2014 20:00	0
15/07/2014 21:00	0
15/07/2014 22:00	0
15/07/2014 23:00	0
16/07/2014 0:00	0

En la Figura F3.10 se observa la curva de irradiación, la Figura 3.11 representa la potencia de salida del inversor en función del tiempo en el día. Dicha curva tiene la misma trayectoria de la Radiación Solar color azul, pero con diferentes valores, obviamente valores cercanos a la potencia de salida del panel fotovoltaico. El valor que entrega el inversor depende del valor del rendimiento de sí mismo y de sus características propias del componente.

En la sección de Anexos se encuentra el código fuente del aplicativo desarrollado.

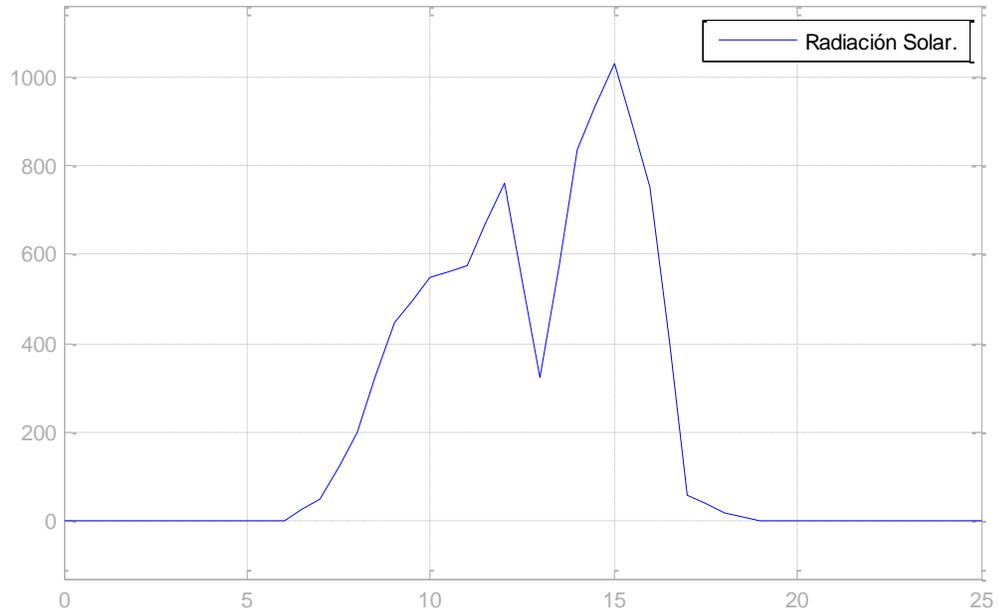


Figura 3.10 Curva de Radiación kW/m² a lo largo del día.
Fuente: Propia del Autor.

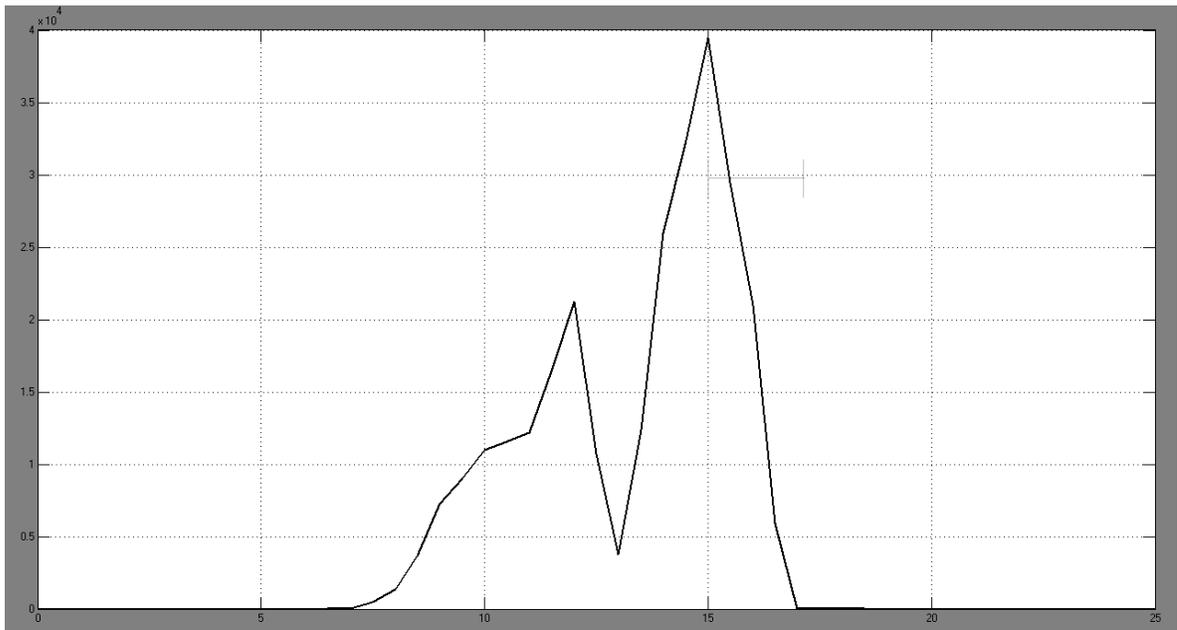
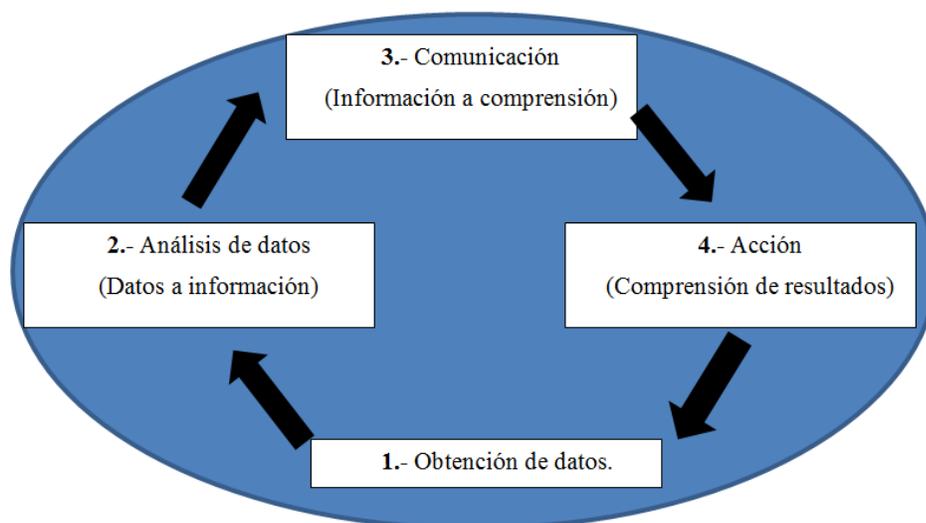


Figura 3.11 Curva de Potencia KW a lo largo del día.
Fuente: Propia del Autor.

3.3 Diseño y aplicación de la campaña de medición de la calidad.

La calidad de energía en cuanto a la electricidad puede expresarse en términos de mediciones físicas fundamentales como tensión, corriente, armónicos, etc. Estas medidas vuelven a procesarse para convertirlas en datos digitales y posteriormente en información.



*Figura 3.12. Ciclo de la información.
Fuente: Propia del autor*

3.3.1 Sistema de Monitoreo

La edificación del caso de estudio dispone de un sistema de monitoreo en tiempo real, que mide toda la energía eléctrica que ingresa al edificio desde sus tres fuentes de suministro:

- El Sistema Nacional Interconectado (SNI) a través de la subestación de Santa Rosa.
- El grupo electrógeno propio de la edificación.
- El sistema de energía renovable conformada por un generador solar fotovoltaico y un aerogenerador.

La edificación posee 13 medidores (MODELO WM40-96), de gestión y control de la energía eléctrica ubicadas en sus cargas principales como se puede observar en el diagrama unifilar de la edificación Figura 3.13, los equipos recogen las principales variables eléctricas y las concentran en un RTU (Remote Terminal Unit), que cuenta con un registro histórico dando un reporte cada 24 horas de las medidas tomadas.

3.3.2 Adquisición de la información.

La toma de datos comienza con la propia medición en el lugar adecuado el momento oportuno y solo la cantidad apropiada. La información a ser analizada será tomada del equipo M12 (Analizador de Redes y Calidad de Red WM40-96), que es el medidor encargado de monitorear en tiempo real el SFCR, así también se tomara muestras de los otros medidores con el objetivo de ver el comportamiento de los otros generadores, así como la carga a la que estos alimentan.

Básicamente, la medición eléctrica se basa en la tensión y la corriente que circula por los conductores, estos valores conducen a todos los demás como potencia, energía, factor de potencia, etc.

Para garantizar la coherencia de los estudios de calidad se debe garantizar en primer lugar la coherencia de la precisión de los equipos.

Características del medidor (Analizador de Redes y Calidad de Red WM40-96)

Entre las características principales del analizador de energía trifásico tenemos:

- Dimensiones del panel frontal: 96x96 mm
- Grado de protección (frontal): IP65.
- Puerto de comunicación óptico frontal (ANSI tipo 2).
- Protocolo MODBUS RTU, compatibilidad con iFIX SCADA.
- Cumple con las normas de medición de equipos eléctricos (EN62053-22, EN50470-3 EN62053-23).
- Precisión: $\pm 0,2$ en la lectura (intensidad/tensión).
- Variables del sistema: VLL, VLN, A, VA, W, var, fp, Hz.
- Variables de cada fase: VLL, VLN, AL, An (calculado o real según la opción), VA, W,
- Variables del sistema y de cada fase con cálculo medio, mínimo y máximo.
- Medida de intensidad neutro (opcional)
- Análisis de armónicos hasta el armónico n° 32 (intensidad y tensión)
- Alimentación universal: 19 a 60VCA (48 a 62Hz), 90 a 265VCA/VCC

La campaña de medición permite establecer si las mediciones cumplen con los indicadores de calidad según las normas y regulaciones vigentes ya mencionadas en el capítulo 1.

Los índices de calidad a ser analizados son:

*Tabla3.6. Indicadores de calidad y sus límites
Fuente: Propia del autor*

Indicadores	Perturbaciones	Limites
N.T	Nivel de tensión	($\pm 10\%$ Vn)
FP	Factor de potencia	0,92
THDv	Distorsión armónica de tensión	8%
THDi	Distorsión armónica de corriente	5%

El medidor M12 proporciona datos en Excel, con medidas tomadas cada 5 minutos durante todo el año, el sistema de monitoreo entrega un reporte cada 24 horas con datos de:

- Radiación solar (W/ m²)
- Temperatura (g°C)
- Potencia Fotovoltaica (KW)
- Voltaje ente fases ,fase-neutro
- Corrientes por fase y neutro.
- Factor de potencia
- Frecuencia
- Armónicos (THDv, THDi).
- Potencia reactiva (KVAR)

CAPÍTULO IV

VALIDEZ DEL MODELO

En este capítulo se describe el análisis de los datos tomados por los medidores implementados en la edificación, con el fin de determinar la forma en la cual los factores externos influyen en la generación de electricidad de un sistema fotovoltaico real conectado a la red, así también se verificara el estado de calidad de energía de acuerdo a las normas y regulaciones vigentes, para concluir con medidas de mitigación para mejorar los índices de calidad.

4.1 Procesamiento y análisis de resultados de la campaña de medición de la calidad de la energía de un sistema fotovoltaico real en sincronismo con la red eléctrica de la edificación (Caso de Estudio).

4.1.1 Características del SFCR del caso de estudio

La instalación del SFCR está ubicada al sur de la ciudad e incorporada en el techo de una edificación con las siguientes características:

a) Paneles fotovoltaicos.

Los paneles fotovoltaicos son de la marca HJ Solar Hengji PV-Tech Energy Co. Ltda. Son paneles de silicio policristalino con un rango de +/- 3% de la potencia especificada.

En la Tabla 4.1 se observa las características de operación del panel fotovoltaico, tomadas del manual proporcionado por el fabricante:

*Tabla 4.1. Parámetros de operación de los paneles fotovoltaicos.
Fuente: Data Sheet del panel fotovoltaico.*

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Potencia Pico (Wp)	W	230
Tensión en vacío (Voc)	V	36,4
Corriente en corto circuito (Isc)	A	8,5
Tensión en PMP (Vmp)	V	29,2
Corriente en PMP (Imp)	A	7,88

El Sistema Solar Fotovoltaico cuenta con 192 paneles de 230 Wp a 24 Vdc conectados a los alimentadores comunes, los cuales se unen en la caja de empalmes hermética IP65 correspondiente, para luego ir con el alimentador de cables protegidos por tubería EMT hacia los dos inversores, tanto el arreglo fotovoltaico como su estructura están conectados a la malla de tierra del edificio.

b) Inversores Fotovoltaicos.

El sistema para su conversión de DC/AC está compuesto de dos inversores de la marca Ingecon ® Sun Smart, los cuales cuentan con un avanzado sistema de seguimiento del punto de máxima potencia para extraer la máxima energía del campo fotovoltaico.

Las características eléctricas de los inversores son las siguientes: [36]

- La máxima eficiencia del inversor de 15 kW es de 95.5 %, la máxima eficiencia del inversor de 25 kW es de 96.1%.
- El autoconsumo del inversor de 15 kW y de 25 kW es igual en ambos casos 30 W.
- El factor de potencia, de la potencia generada es lo más cercano a 1 y puede ser ajustable.

El inversor incorpora protección frente a:

- Cortocircuitos en alterna.
- Tensión de red fuera de rango.
- Frecuencia de red fuera de rango ($59 \text{ Hz} \leq 60 \text{ Hz} \leq 61 \text{ Hz}$)
- Sobretensiones
- Perturbaciones presentes en la red como micro-cortes, pulsos, defectos de ciclos, ausencia y retorno de la red, etc.

c) Punto de conexión

El punto de conexión a la red de la edificación se encuentra directamente a la barra de suministro del tablero de distribución principal.

4.1.2 Curva de carga de un día laborable

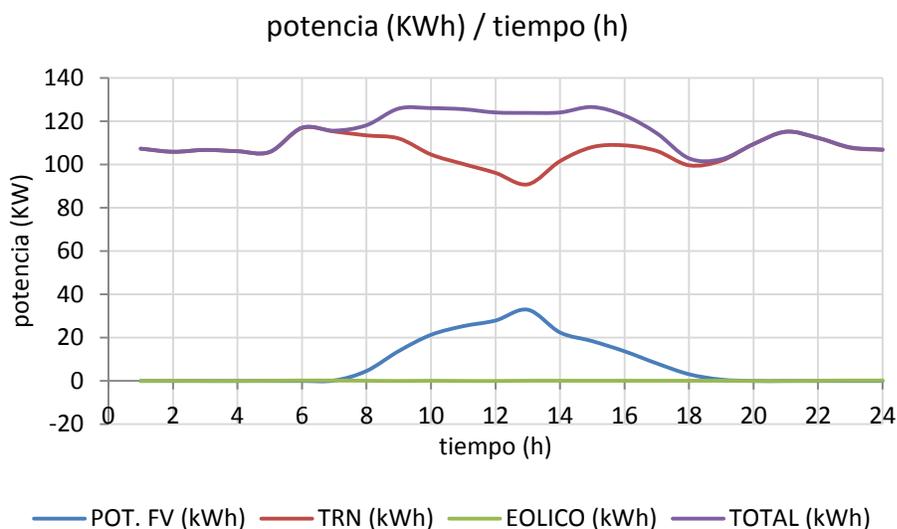
La curva de carga tiene como objetivo caracterizar el consumo de energía eléctrica en la edificación y es la representación gráfica de la forma en que el consumidor es un determinado intervalo de tiempo hace uso de sus equipos eléctricos, La curva presenta zonas pronunciadas en las que el requerimiento de potencia eléctrica es mayor, denominadas picos, y otras que presentan depresión llamados valles (bajo consumo de energía eléctrica).

En la tabla 4.2 se describe la potencia que entregan las fuentes de generación renovables y la del Sistema Nacional Interconectado a la curva de carga diaria del edificio.

*Tabla 4.2. Potencia que aportan las fuentes de suministro a la curva de carga de un día laborable.
Fuente: Propia del Autor.*

HORAS	POT. FV (kWh)	TRN (kWh)	EOLICO (kWh)	TOTAL (kWh)
1	0	107,28	0,004	107,284
2	0	105,8	0,1	105,9
3	0	106,7	0	106,7
4	0	106,1	0	106,1
5	0	105,7	0,1	105,8
6	0	116,8	0,2	117
7	0,2	115,2	0,2	115,6
8	4,6	113,4	0,1	118,1
9	13,8	112	0	125,8
10	21,3	104,6	0,1	126
11	25,3	100,2	0	125,5
12	27,9	96,1	0	124
13	32,9	90,8	0,1	123,8
14	22,4	101,5	0,1	124
15	18,4	108	0,1	126,5
16	13,7	108,8	0,1	122,6
17	8,1	106,2	0,1	114,4
18	3,1	99,6	0,1	102,8
19	0,6	101,7	0,1	102,4
20	0	109,4	0	109,4
21	0	115,1	0	115,1
22	0	112,2	0,1	112,3
23	0	107,7	0,2	107,9
24	0	106,7	0,2	106,9
Σ PARCIAL	192,3	2557,58	2,004	
Σ TOTAL				2751,884

En la Figura 4.1 podemos observar la curva de carga del edificio de un día laborable representada por la línea morada, la curva roja representa la potencia consumida por la edificación proporcionada por la cámara de transformación (TRN), la curva azul (POT. FV) y la curva verde (EOLICO) representan el aporte a la curva total generada por el sistema fotovoltaico y eólico respectivamente.



*Figura 4.1. Curva de carga del edificio durante un día laborable.
Fuente: Propia del Autor.*

Del análisis de los datos del medidor M1 el cual monitorea la cámara de transformación denominado (TRN), del medidor M12 que monitorea el campo solar (FV), así como del medidor M13 que monitorea el sistema eólico sacamos el aporte individual de suministro diario kWh.

TRN= 2557, 58 kWh.

FV= 192,3 kWh.

EOLICO= 2,004 kWh.

Suministro total = TRN + FV + EOLICO= 2751,884 kWh.

El campo solar en este día ha proporcionado el 7,51 % a la carga total del edificio, el porcentaje de aporte depende de factores externos, como la temperatura durante el día como

se observa en la Figura 4.2, así como la cantidad de irradiación solar que se puede apreciar en la Figura 4.3.

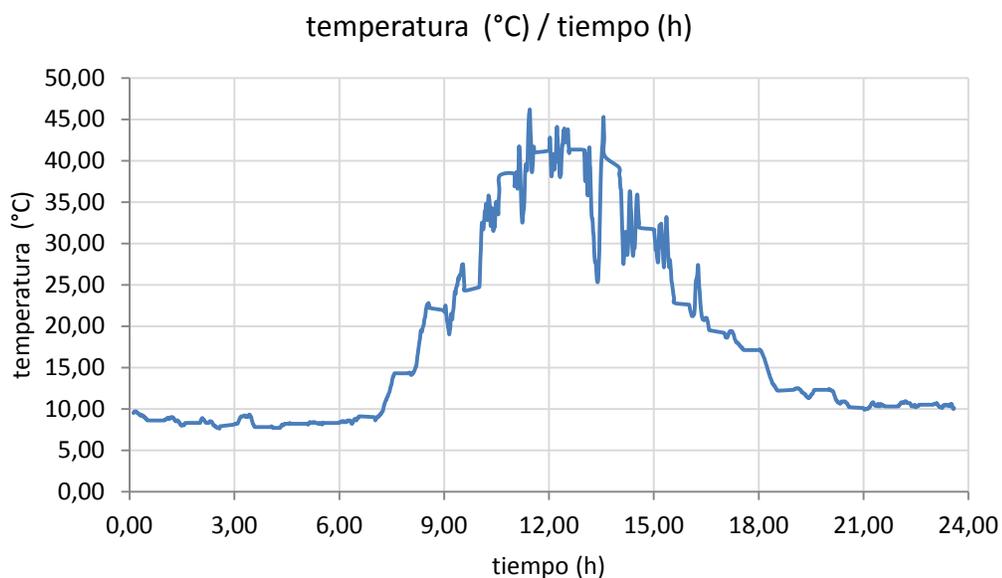


Figura 4.2. Curva de temperatura durante un día laborable.

Fuente: Propia del autor

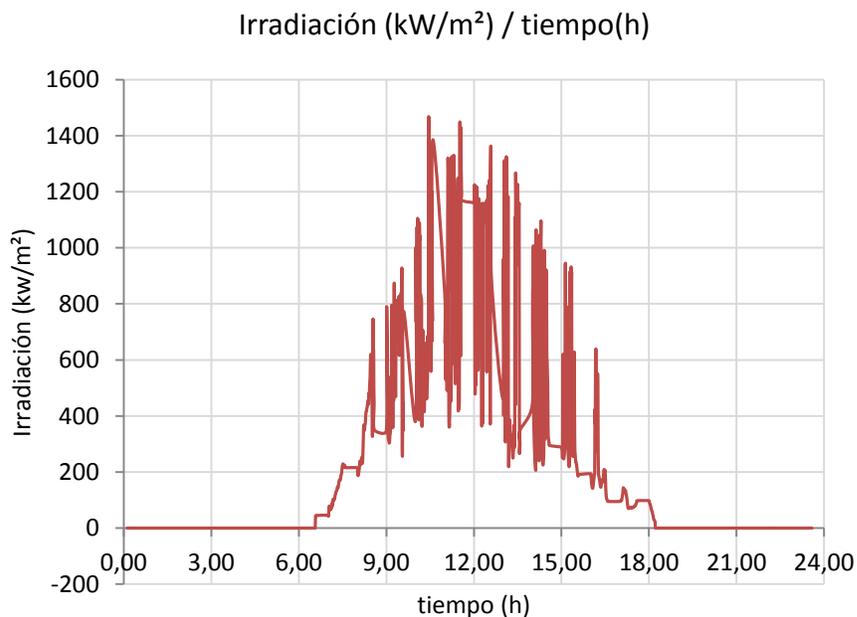


Figura 4.3. Curva de la Irradiación KW/m² durante un día laborable.

Fuente: Propia del autor

La potencia generada por el campo solar es directamente proporcional a la irradiación y viceversa como se observa en la Figura 4.4.

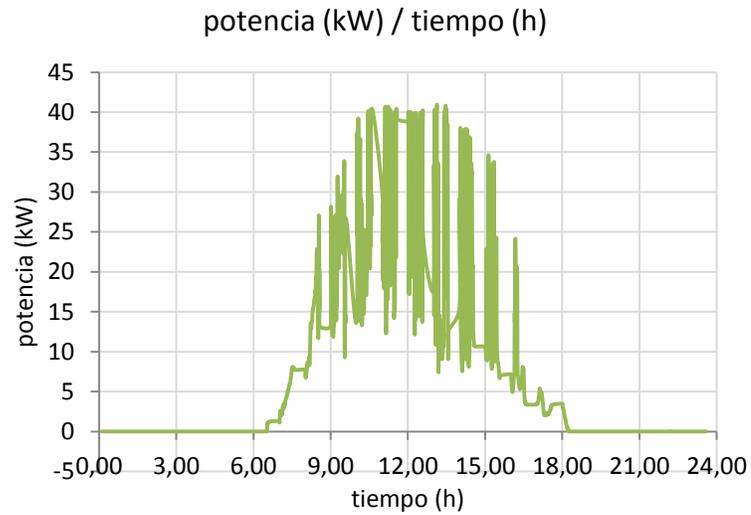


Figura 4.4. Curva Potencia total kW / tiempo (h), durante un día laborable
Fuente: Propia del Autor.

La Figura 4.5 representa la curva de corrientes por fase y neutro en función del tiempo, de lo cual se observa que la curva de corriente por fase es directamente proporcional y viceversa a la curva de potencia e irradiación (Figura 4.4) y (Figura 4.3) respectivamente.

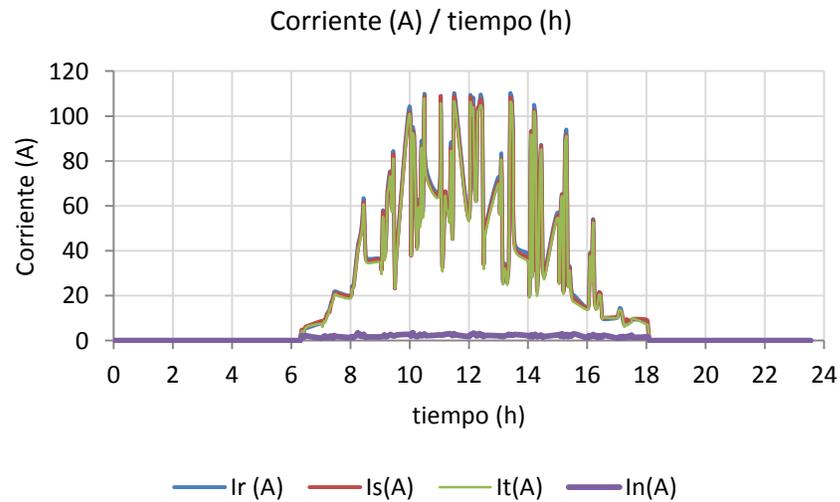


Figura 4.5. Curva $(I_r - I_s - I_t - I_n) / t$, durante un día laborable
Fuente: Propia del Autor.

4.1.3 Análisis de los índices de calidad

a) Nivel de voltaje

Límites.- Se admite el $\pm 10\%$ de la tensión nominal (127 Voltios entre fase y neutro) durante el 95% del periodo de medición conforme la Regulación No. 004/01 – CONELEC.

Resultados. De los valores obtenidos en la medición Tabla 4.3, así como de la Figura 4.5 (curva de voltajes por fase en función del tiempo) se concluye que hay un cumplimiento del 100% de acuerdo a la regulación vigente.

*Tabla 4.3. Resumen del comportamiento de los niveles de tensión registrados durante un día laborable.
Fuente: Propia del autor.*

NIVELES DE TENSIÓN FASE A		NIVELES DE TENSIÓN FASE B		NIVELES DE TENSIÓN FASE C	
Límites $\pm 10\%$		Límites $\pm 10\%$		Límites $\pm 10\%$	
114	139,7	114	139,7	114	139,7
Valor medido					
mínimo	máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo
120,04	126,4	122,11	127,42	121,14	126,18
cumple 100% la regulación		cumple 100% la regulación		cumple 100% la regulación	

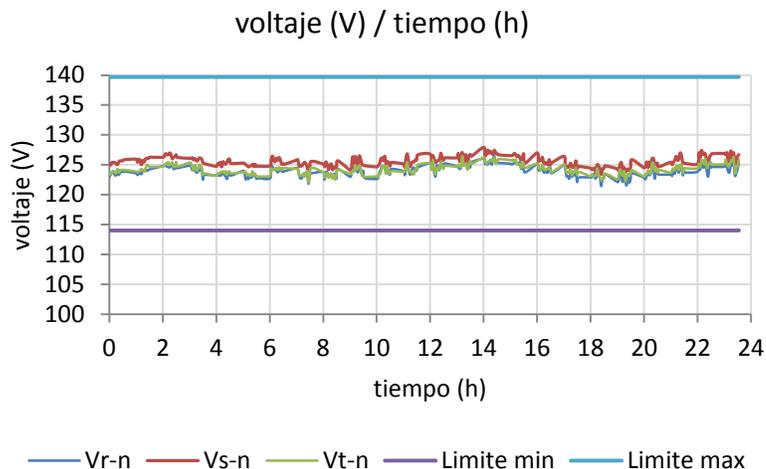


Figura 4.6. Voltaje (Vr, Vs, Vt)/t durante un día laborable.
Fuente: Propia del Autor.

a) Factor de Potencia.

Para efectos de la evaluación de calidad el factor de potencia debe ser superior a 0,92 durante el 95% del periodo de medición, de acuerdo a la regulación No. 004/01 – CONELEC. La magnitud del factor de potencia es un efecto de la carga y su curva se observa en la Figura 4.7, de la cual se concluye que el factor de potencia de la edificación cumple con la regulación vigente.

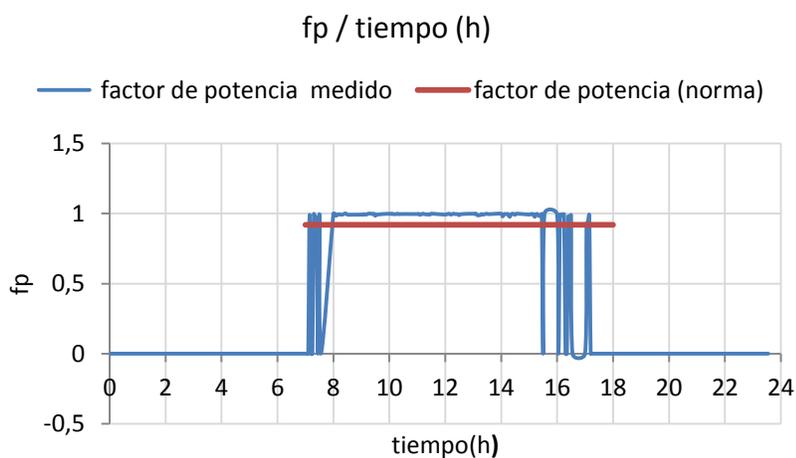


Figura 4.7. Curva fp / t, durante un día (2015/01/08).
Fuente: Propia del autor.

b) Armónicos

Referencia: La distorsión armónica total de tensión THD se mide de acuerdo a los procedimientos especificados en la Regulación No. 004/01 - CONELEC).

Límites: La distorsión armónica total de voltaje (THD_v) debe ser menor o igual al 8% y las armónicas individuales su cumplimiento debe estar en función de los parámetros que se indican en la tabla 1.2 (Regulación No. 004/01 - CONELEC).

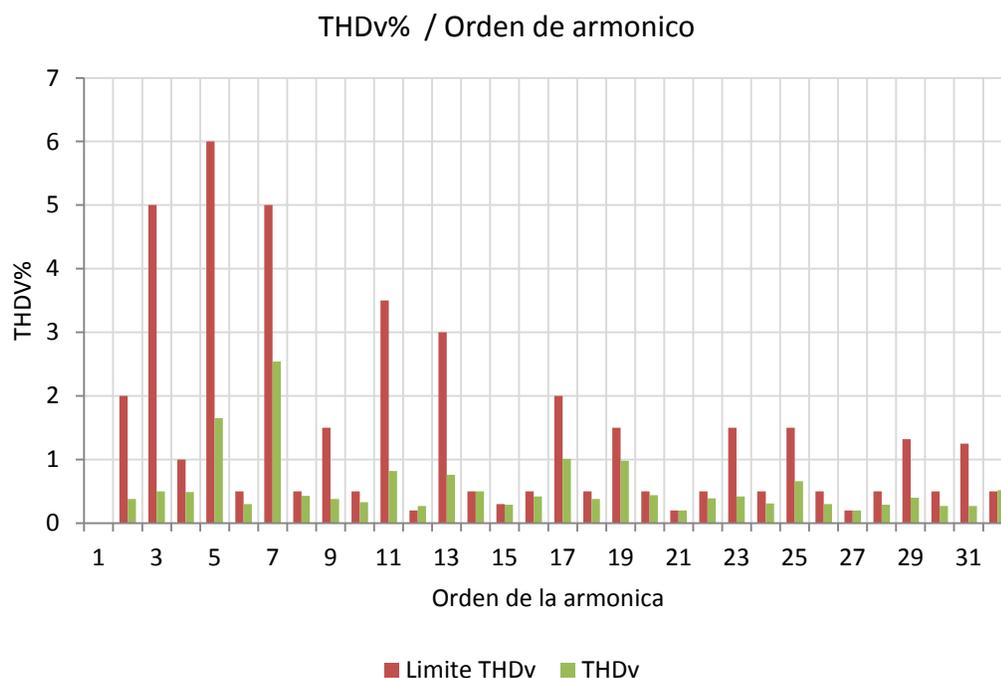
La Tabla 4.3 representa los resultados del análisis de los datos de distorsión armónica de tensión (THD_v) y su comparación con la regulación vigente.

Tabla 4.3 Distorsión armónica de tensión.

Fuente: Propia del Autor.

CUMPLE	ARMONICOS						
NO CUMPLE							
	IMPARES NO MULTIPLOS DE 3						
ORDEN DE LA ARMONICA	5	7	11	13	17	19	23
LIMITE	6	5	3,5	3	2	1,5	1,5
VALOR MEDIDO	1,65	2,54	0,82	0,76	1,01	0,98	0,42
ORDEN DE LA ARMONICA	25	29	31				
LIMITE	1,5	1,32	1,25				
VALOR MEDIDO	0,66	0,4	0,27				
	IMPARES MULTIPLOS DE 3						
ORDEN DE LA ARMONICA	3	9	15	21	27		
LIMITE	5	1,5	1,32	0,2	0,2		
VALOR MEDIDO	0,5	0,38	0,29	0,2	0,2		
	PARES						
ORDEN DE LA ARMONICA	2	4	6	8	10	12	14
LIMITE	2	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
VALOR MEDIDO	0,38	0,49	0,3	0,43	0,33	0,27	0,5
ORDEN DE LA ARMONICA	16	18	20	22	24	26	28
LIMITE	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
VALOR MEDIDO	0,42	0,38	0,44	0,39	0,31	0,3	0,29
ORDEN DE LA ARMONICA	30	32					
LIMITE	0,5	0,5					
VALOR MEDIDO	0,27	0,52					
LIMITE THD _v 8%	2,83						

De la Tabla 4.3 y la Figura 4.8 que representa el comportamiento de la distorsión armónica de tensión de un día laborable, lo que permite concluir que cumple con los límites establecidos en la regulación (No. 004/01 – CONELEC) y además en las normas IEEE 519 e IEEE 1547.



*Figura 4.8: Resumen del comportamiento de la distorsión armónica de tensión registrados.
Fuente: Propia del autor.*

Límite de Armónicos de Corriente (THDi) de acuerdo a la norma IEEE 1547

En la Tabla 4.5 se puede observar los límites de armónicos para niveles de bajo voltaje entre 120 V y 69 KV, los límites dependen de la corriente de corto circuito (I_{cc}), donde está conectado el consumidor y el nivel de consumo (Il), la norma IEEE 1547 establece el mismo limite que la norma IEEE 591.

Tabla 4.4 Límites de la distorsión armónica de corriente.
Fuente: IEEE 1547.

I_{cc} / I_l	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	% THD
< 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20-50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50-100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100-1000	12,5	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

El edificio se encuentra dentro de la primera categoría es decir que se debe tener una distorsión armónica de corriente máxima de 5%.

En la Tabla 4.5 se indica un muestreo de los valores de potencia en KW durante un día típico (jueves), así como la distorsión armónica de corriente (THDi%), de acuerdo a la norma vigente, y el porcentaje medido por el analizador de carga M12.

Tabla 4.5. Distorsión armónica de corriente (THDi%), en función de la potencia generada.
Fuente: Propia del autor

POTENCIA (kW) MEDIDA	THDi % NORMA	THDi % MEDIDO
41	5	3,59
35	5	3,69
30	5	3,99
25	5	5,82
20	5	6,00
15	5	8,12
10	5	13,95
5	5	23,48
4	5	33,52
3	5	45,53
2	5	90,89
CUMPLE		
NO CUMPLE		

En la Figura 4.9 se representa la curva de distorsión armónica de corriente en función de la potencia generada de acuerdo a la Tabla 4.4.

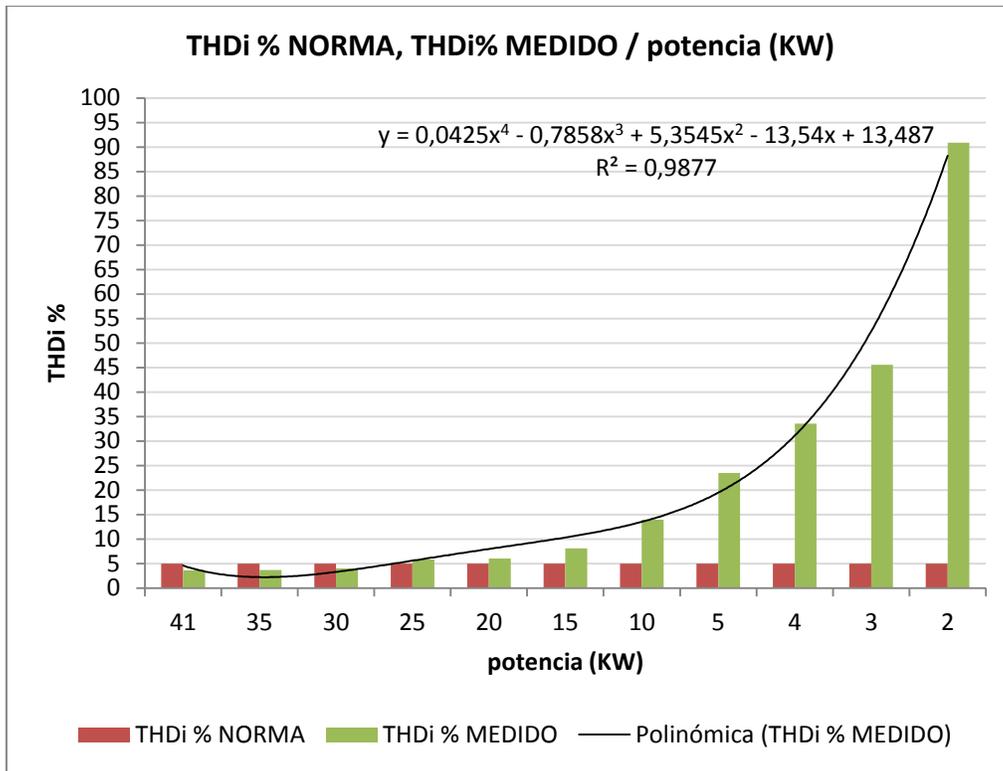


Figura 4.9 Distorsión armónica de corriente en función de la potencia generada en un día.

Fuente: Propia del autor.

Se puede observar que el contenido armónico de la corriente entregada por el sistema fotovoltaico crece de manera no lineal con la potencia generada. Se puede establecer un modelo que describe este comportamiento mediante la regresión que se muestra en la figura. Este modelo resulta polinómico de orden 4 con un factor de correlación cercano a la unidad.

De la Tabla 4.4 así como de la Gráfica 4.9, se concluye que la distorsión armónica de corriente, es inversamente proporcional a la potencia generada por el sistema fotovoltaico, pues a mayor potencia es menor la distorsión armónica y viceversa.

El generador fotovoltaico por debajo de la mitad de su potencia empieza a tener armónicos de corriente por fuera de la norma.

En la Tabla 4.6, se representa la distorsión armónica individual para un día laborable, como se observa en la tabla cuando el campo solar genera altas potencias el %THDi es bajo así también los armónicos típicos 5,7,11 empiezan aparecer desde potencias inferiores a 10 KW es decir debajo del 22,72 % de la potencia nominal del generador fotovoltaico.

Tabla 4.6. Distorsión armónica de corriente (THDi%) individual, en función de la potencia generada.
Fuente: Propia del autor.

		POTENCIA (kW)										
		41	35	30	25	20	15	10	5	4	3	2
orden de la armónica	% THDI Norma	Distorsión armónica individual medida %										
1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2	4	0,16	0,27	0,4	0,34	0,44	0,54	1,54	1,06	2,11	9,62	4
3	4	0,15	0,14	0,15	0,59	1,57	0,73	0,47	0,62	2,1	3,39	3,77
4	4	0,32	0,19	0,02	0,12	0,16	0,44	0,69	1,53	1,44	0,76	2,26
5	4	1,44	1,5	1,06	1,01	0,82	0,83	2,13	3,28	5,59	6,67	10,3
6	4	0,06	0,06	0,35	0,01	0,26	0,15	0,21	1,35	0,44	1,38	0,63
7	4	1,57	2,02	2,1	2,55	2,86	3,49	5,69	7,77	11,2	12,93	18,6
8	4	0,31	0,16	0,29	0,15	0,04	0,49	0,71	0,15	0,24	0,76	2,54
9	4	0,13	0,17	0,23	0,32	0,39	0,34	0,45	1,19	1,1	2,19	2,71
10	4	0,11	0,04	0,23	0,26	0,14	0,42	0,57	0,91	0,95	0,98	1,88
11	2	0,28	0,22	0,72	0,66	0,93	1,21	1,62	3,9	3,06	1,98	5,54
12	2	0,22	0,23	0,46	0,31	0,25	0,49	1,14	0,55	0,91	1,1	1,42
13	2	0,17	0,46	0,26	1,12	0,25	1,63	3,02	2,81	2,66	4,07	3,85
14	2	0,21	0,61	0,39	0,25	0,14	0,83	1,96	1,58	1,54	4,32	2,87
15	2	0,1	0,19	0,13	0,17	0,11	0,56	1,01	0,86	0,51	2,12	2,03
16	2	0,19	0,13	0,15	0,39	0,34	0,42	0,66	0,55	1,32	1,77	2,79
17	1,5	1,18	1,7	1,66	2,14	2,44	2,28	6,33	12,82	15,24	21,61	26,27
18	1,5	0,1	0,09	0,12	0,26	0,17	0,4	0,28	0,47	0,68	0,19	2,55
19	1,5	0,98	0,29	1,14	1,74	1,95	3,17	5,12	6,5	12,26	16,43	23,83
20	1,5	0,6	0,68	0,69	0,89	0,98	0,77	2,32	4,07	4,79	6,4	10,52
21	1,5	0,4	0,4	0,58	0,95	0,6	1,5	1,17	2,37	3,35	4,65	6,57
22	1,5	0,41	0,23	0,42	1,07	0,82	1,07	1,76	3,31	5,17	7,78	10,9
23	0,6	0,59	0,52	0,72	1,36	1,05	1,26	2,87	3,97	7,16	8,77	17,06
24	0,6	0,01	0,16	0,25	0,11	0,19	0,1	0,62	0,9	2,36	2,01	2,34
25	0,6	0,55	0,31	1,43	1,9	2,21	3,16	4,82	6,87	12,23	16,57	27,74
26	0,6	0,47	0,72	0,64	1,08	0,82	1,69	1,7	3,31	2,87	5,22	8,39
27	0,6	0,47	0,23	0,43	0,33	0,35	0,29	0,36	0,61	0,23	2,06	2,87
28	0,6	0,19	0,23	0,03	0,19	0,64	0,71	0,46	1,9	3,44	5,46	2,05
29	0,6	0,5	1	1,58	1,72	1,61	0,3	3,92	7	11,5	6,74	11,29
30	0,6	0,08	0,12	0,41	0,13	0,23	0,15	0,08	0,81	1,59	0,78	0,76
31	0,6	0,25	0,04	0,16	0,13	0,09	0,26	0,24	0,32	1,57	2,94	2,23
32	0,6	0,17	0,32	0	0,08	0,22	0,33	0,32	0,12	0,26	0,11	0,22
NO CUMPLE LA NORMA												

4.1.4 Curva de carga de un día no laborable

En la Tabla 4.7 se describe la potencia que entregan las fuentes de generación renovables y la del sistema nacional interconectado a la curva de carga diaria del edificio.

Tabla 4.7. Potencia que aportan las fuentes de suministro eléctrico a la curva de carga de un día no laborable

Fuente: Propia del autor

HORAS	POT. FV (kWh)	TRN (kWh)	EOLICO (kWh)	TOTAL (kWh)
1	0	106,93	0,128	107,058
2	0	105,7	0,1	105,8
3	0	107,9	0,2	108,1
4	0	106,9	0,1	107
5	0	105,1	0,2	105,3
6	0	104,4	0,2	104,6
7	0,3	92,9	0,2	93,4
8	4,1	84,9	0,2	89,2
9	12,8	80,1	0,1	93
10	21,1	70,8	0	91,9
11	24,9	67,8	0	92,7
12	23,6	68	0,1	91,7
13	17,7	74,1	0,1	91,9
14	20,2	72,5	0	92,7
15	19,4	70,4	0,1	89,9
16	24,9	66,9	0	91,8
17	7,8	81,2	0	89
18	0,8	90,1	0	90,9
19	0	95,4	0	95,4
20	0	106,4	0	106,4
21	0	106,6	0	106,6
22	0	106,6	0	106,6
23	0	104,8	0	104,8
24	0	102,9	0	102,9
Σ PARCIAL	177,6	2179,33	1,728	
Σ TOTAL				2358,658

En la Figura 4.10 se observa la curva de carga del edificio de un día no laborable representada por la línea morada, la curva roja representa la potencia consumida por la edificación proporcionada por la cámara de transformación (TRN), la curva azul (POT. FV) y la curva verde (EOLICO) representan el aporte a la curva total generada por el sistema fotovoltaico y eólico respectivamente.

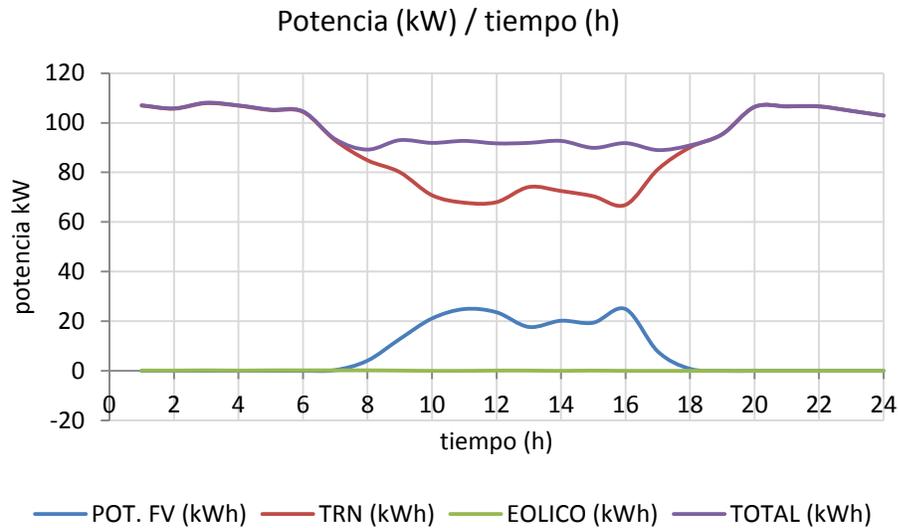


Figura 4.10. Curva de carga del edificio durante un día no laborable
Fuente: Propia del autor

Del análisis de los datos del medidor M1 el cual monitorea la cámara de transformación denominado (TRN), del medidor M12 que monitorea el campo solar (FV), así como del medidor M13 que monitorea el sistema eólico se obtiene el aporte individual de suministro diario kWh.

TRN= 2179,33 kWh.

FV= 177,6 kWh.

EOLICO= 1,728 kWh.

Suministro total = TRN + FV + EOLICO= 2358,66 kWh.

El campo solar en este día ha proporcionado el 7,52 % a la carga total del edificio, el porcentaje de aporte depende de factores externos, como la temperatura durante el día como se observa en la Figura 4.11, así como la cantidad de irradiación solar que se puede apreciar en la Figura 4.12.

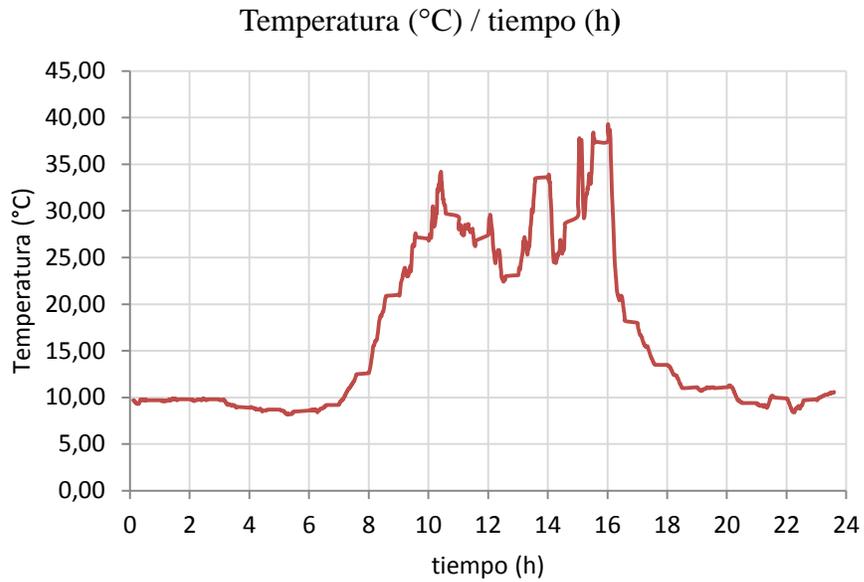


Figura 4.11. Curva de temperatura durante el día

Fuente: Propia del autor

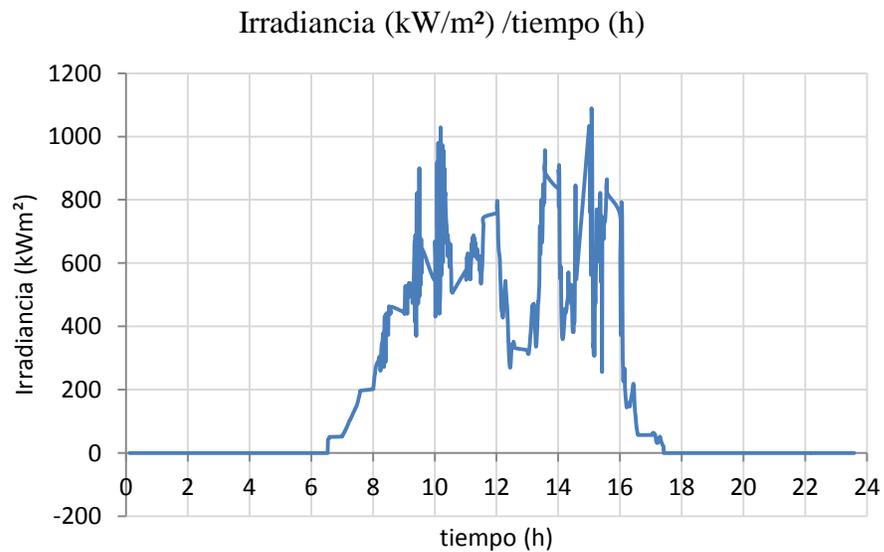


Figura 4.12. Curva de irradiación durante el día.

Fuente: Propia del autor

La potencia generada por el campo solar es directamente proporcional a la irradiación y viceversa como se observa en la Figura 4.13.

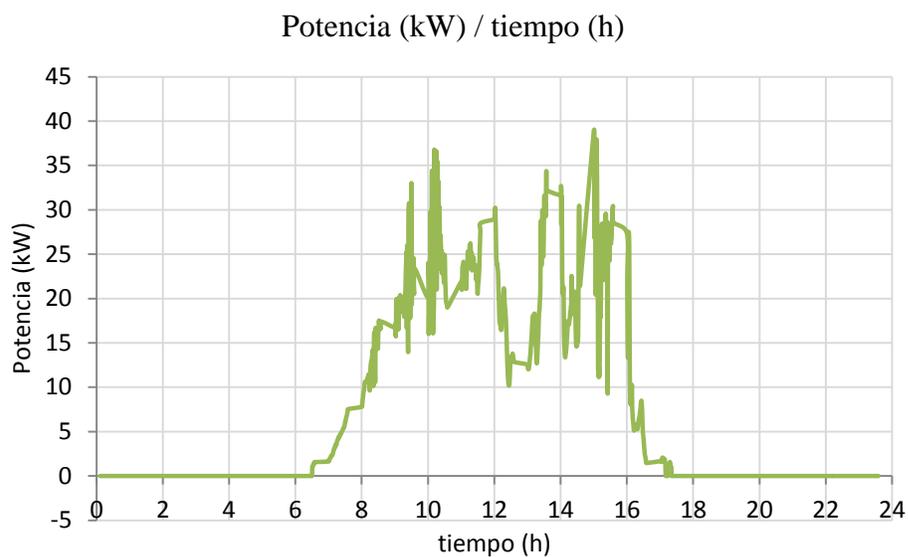


Figura 4.13. Curva de Potencia generada por el SFCR.
Fuente: Propia del autor

De la Figura 4.14 que representa la curva de corrientes por fase y neutro en función del tiempo, se concluye que la curva de corrientes de fases son directamente proporcional a la curva de potencia (Figura 4.13), y de irradiación (Figura 4.12).

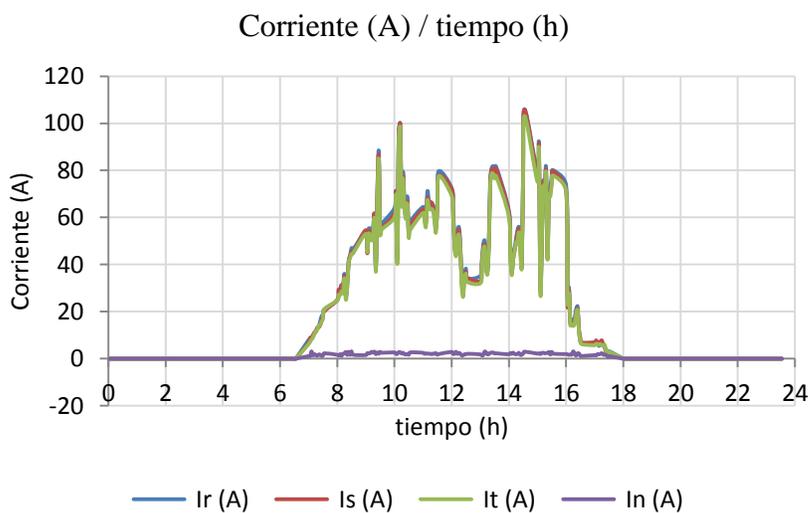


Figura 4.14. Curva $(I_r - I_s - I_t - I_n) / t$, durante un día no laborable
Fuente: Propia del Autor

4.1.5 Análisis de los índices de calidad de un día no laborable.

a) Nivel de voltaje

En la Tabla 4.8, se muestra el resumen del comportamiento de los datos analizados del medidor M12. Así como de la Figura 4.15 (curva de voltaje por fase en función del tiempo), se concluye que se cumple en un 100% con la regulación (No. 004/01 – CONELEC)

Tabla 4.8. Resumen del comportamiento de los niveles de tensión en un día no laborable.

Fuente: Propia del Autor.

NIVELES DE TENSIÓN FASE A		NIVELES DE TENSIÓN FASE B		NIVELES DE TENSIÓN FASE C	
Límites $\pm 10\%$		Límites $\pm 10\%$		Límites $\pm 10\%$	
114	139,7	114	139,7	114	139,7
Valor medido					
mínimo	máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo
121,42	126,409	123,37	127,91	112,63	126,46
cumple 100% la regulación		cumple 100% la regulación		cumple 100% la regulación	

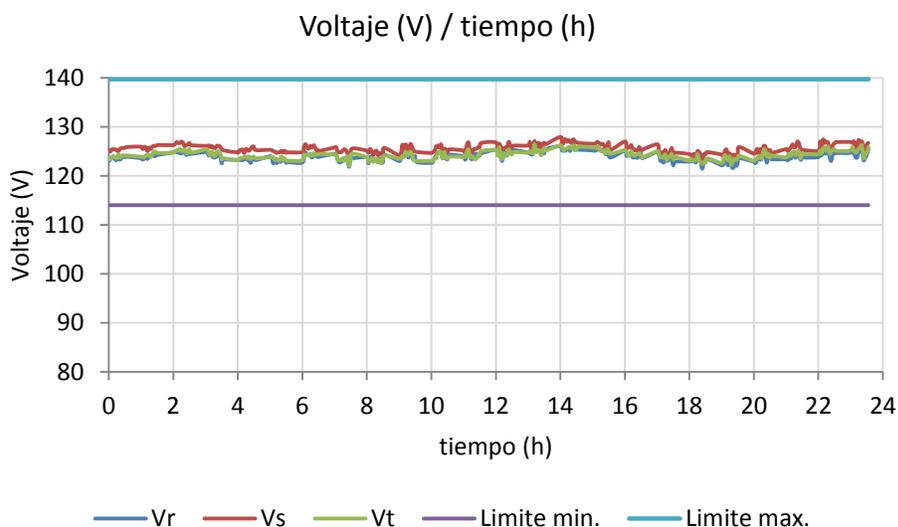


Figura 4.15. Curva de voltaje por fase función del tiempo durante un día no laborable

Fuente: Propia del autor

b) Factor de potencia.

Para efectos de la evaluación de calidad el factor de potencia debe ser superior a 0,92 durante el 95%, del periodo de medición, de acuerdo a la regulación No. 004/01 – CONELEC.

En la Figura 4.16 se representa su curva para un día no laborable, de los datos analizados del medidor M12, así como de la curva se concluye que el factor de potencia durante un día no laborable cumple con la regulación.

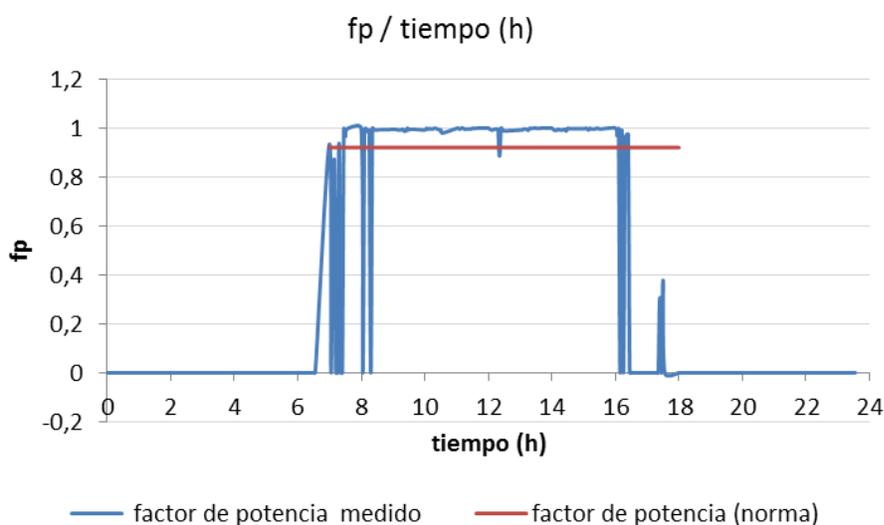


Figura 4.16. Curva fP/t , durante un fin de semana.
Fuente: Propia del autor.

c) Armónicos

La Tabla 4.9 representa la distorsión armónica de tensión (THDv) de un día no laborable y su comparación con los límites establecidos por la (Regulación No. 004/01 - CONELEC).

De los datos analizados del medidor M12, así como de la Figura 4.17 que representa la curva de distorsión armónica individual, se concluye que la THDv cumple con la regulación vigente.

Tabla 4.9 Distorsión armónica de tensión de un día no laborable.
Fuente: Propia del autor.

CUMPLE	ARMONICOS						
NO CUMPLE							
	IMPARES NO MULTIPLOS DE 3						
ORDEN DE LA ARMONICA	5	7	11	13	17	19	23
LIMITE	6	5	3,5	3	2	1,5	1,5
VALOR MEDIDO	1,84	2,73	0,73	0,63	0,99	0,99	0,66
ORDEN DE LA ARMONICA	25	29	31				
LIMITE	1,5	1,32	1,25				
VALOR MEDIDO	0,73	0,48	0,28				
	IMPARES MULTIPLOS DE 3						
ORDEN DE LA ARMONICA	3	9	15	21	27		
LIMITE	5	1,5	1,32	0,2	0,2		
VALOR MEDIDO	0,64	0,38	0,33	0,2	0,2		
	PARES						
ORDEN DE LA ARMONICA	2	4	6	8	10	12	14
LIMITE	2	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
VALOR MEDIDO	0,42	0,54	0,29	0,38	0,33	0,31	0,46
ORDEN DE LA ARMONICA	16	18	20	22	24	26	28
LIMITE	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
VALOR MEDIDO	0,38	0,35	0,45	0,37	0,26	0,25	0,45
ORDEN DE LA ARMONICA	30	32					
LIMITE	0,5	0,5					
VALOR MEDIDO	0,27	0,5					
LIMITE THDv 8%	2,92						

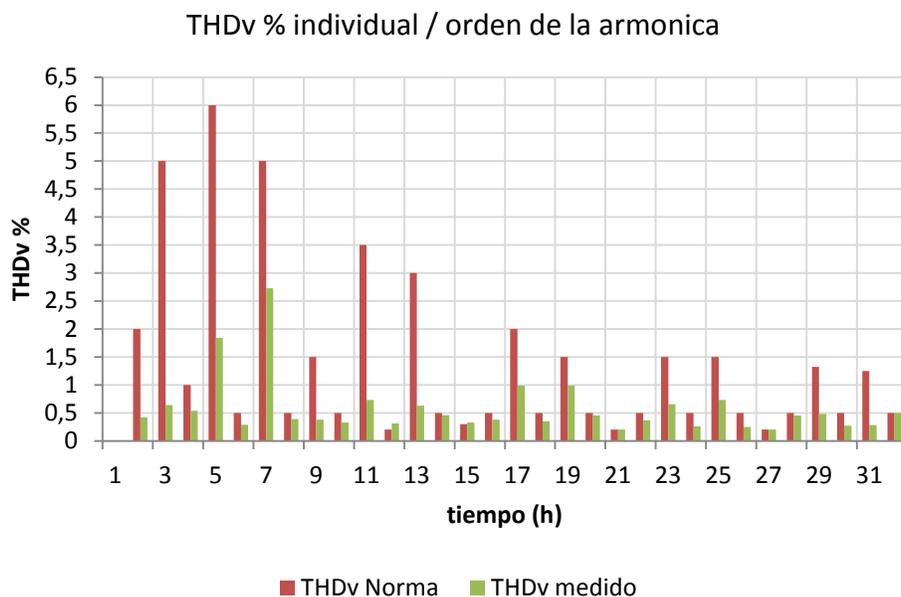


Figura 4.17: Distorsión armónica individual de tensión.
Fuente: Propia del autor.

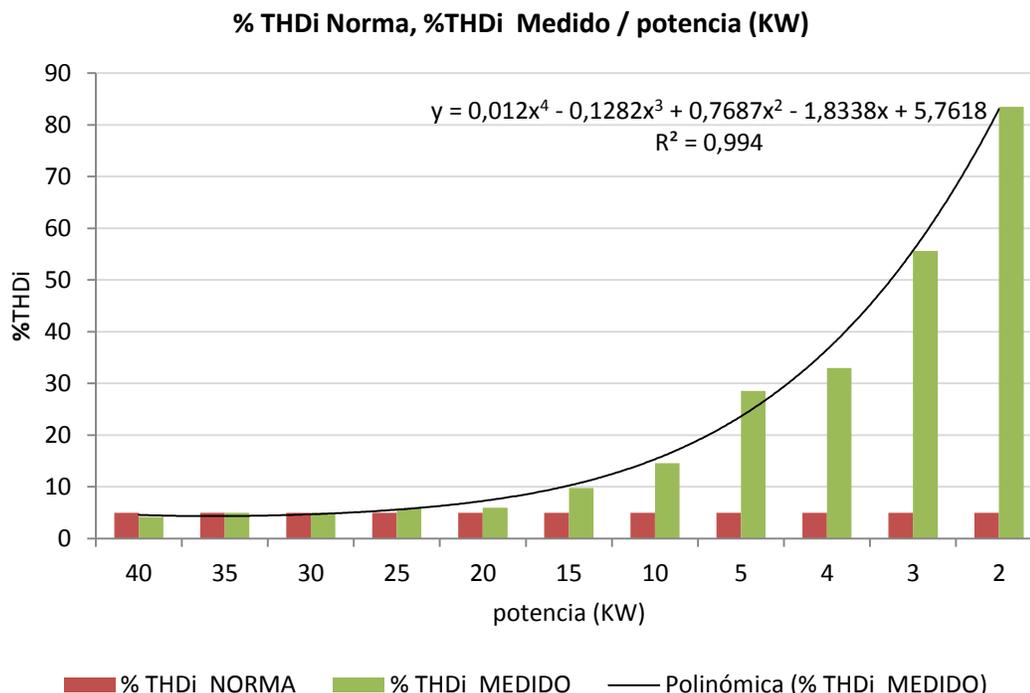
Distorsión Armónica de Corriente (THDi%)

En la Tabla 4.10, se tabula el muestreo de la distorsión armónica de corriente de los valores medidos contrastados con la norma en función de la potencia que genera el sistema fotovoltaico conectado a la red.

Tabla 4.10. Distorsión armónica de corriente (THDi%), en función de la potencia generada.
Fuente: Propia del autor.

POTENCIA (kW)	% THDi NORMA	% THDi MEDIDO
40	5	4,16
35	5	5
30	5	4,94
25	5	5,86
20	5	5,93
15	5	9,77
10	5	14,58
5	5	28,53
4	5	32,99
3	5	55,63
2	5	83,53
CUMPLE		
NO CUMPLE		

La Figura 4.18 representa la curva generada de acuerdo a la Tabla 4.10.



*Figura 4.18 Distorsión armónica de en función a la potencia que generan durante un día.
Fuente: Propia del Autor.*

Al igual que en la figura 4.9, se observa una relación polinómica entre la distorsión armónica y la potencia generada. A menor potencia generada por el inversor se observa un mayor contenido armónico en la corriente. El modelo potencial de cuarto orden es consistente para representar este comportamiento, aunque se ha probado también con un modelo de tercer orden obteniéndose resultados satisfactorios.

De la Tabla 4.4 (límites de la distorsión armónica de corriente de acuerdo a la norma IEEE 1547) así como de la Figura 4.18, se concluye que la distorsión armónica de corriente es inversamente proporcional a la potencia generada por el sistema fotovoltaico, pues a mayor potencia es menor la distorsión armónica y viceversa.

El generador fotovoltaico por debajo de la mitad (22 kW) de su potencia nominal empieza a tener armónicos significativos de corriente por fuera de la norma.

Límite de Armónicos de Corriente (THDi) de acuerdo a la norma IEEE 1547.

En la Tabla 4.11, se tabula la distorsión armónica individual para un día no laborable (domingo), como se observa en la tabla cuando el campo solar genera altas potencias el %THDi es bajo así también los armónicos típicos 5,7,11 empiezan aparecer desde potencias inferiores a 10 kW es decir debajo del 22,72 % de la potencia nominal del generador fotovoltaico.

Fuente: Propia del Autor

orden de la armónica	% THDI Norma (individual)	POTENCIA KW										
		40	35	30	25	20	15	10	5	4	3	2
		Distorsion armonica individualde corriente medida (%)										
1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2	4	0,49	0,25	0,24	0,27	0,65	1,28	0,56	1,87	6,21	1,08	8,97
3	4	0,45	0,71	0,60	1,04	0,24	1,77	1,09	2,89	7,73	2,92	4,21
4	4	0,31	0,28	0,29	0,32	0,58	0,74	0,84	2,25	3,60	2,15	1,54
5	4	1,64	1,03	0,97	1,09	0,93	1,72	1,90	4,52	8,97	8,85	9,22
6	4	0,15	0,12	0,09	0,16	0,16	0,12	0,06	0,82	1,83	1,38	1,21
7	4	1,69	1,89	1,56	2,66	2,29	3,67	4,55	8,43	14,22	12,06	18,29
8	4	0,16	0,01	0,22	0,25	0,25	0,24	0,37	1,57	1,34	1,64	1,21
9	4	0,37	0,27	0,27	0,20	0,25	0,51	0,59	1,40	1,44	1,77	3,00
10	4	0,23	0,14	0,12	0,33	0,25	0,31	0,82	1,57	1,75	0,14	1,33
11	2	0,35	0,16	0,52	0,42	0,07	1,17	0,04	2,98	4,94	3,68	7,50
12	2	0,14	0,04	0,13	0,23	0,09	0,92	0,10	0,65	0,54	1,35	1,16
13	2	0,51	0,32	0,68	0,16	0,71	0,69	1,54	3,57	1,85	0,21	3,78
14	2	0,04	0,40	0,53	0,10	0,34	0,59	0,96	3,05	2,07	0,67	3,90
15	2	0,25	0,23	0,35	0,17	0,12	0,50	0,99	1,45	1,78	1,28	3,02
16	2	0,17	0,26	0,18	0,21	0,44	0,76	0,49	2,24	1,64	2,79	3,00
17	1,5	1,40	2,01	1,29	2,11	0,79	3,24	4,23	13,99	19,87	18,90	25,25
18	1,5	0,18	0,11	0,16	0,06	0,05	0,40	0,30	0,90	0,82	0,81	1,82
19	1,5	1,10	1,40	2,30	1,83	3,23	2,77	5,98	11,07	14,71	13,48	23,05
20	1,5	0,57	0,90	0,72	0,95	0,63	1,87	1,25	5,65	6,87	7,39	13,52
21	1,5	0,49	0,43	0,62	0,68	0,76	1,23	2,16	2,67	3,14	4,29	5,19
22	1,5	0,57	1,00	1,00	0,60	1,07	1,99	2,10	7,93	5,57	6,39	12,59
23	0,6	0,50	1,51	1,71	1,98	2,12	2,62	4,67	9,13	11,15	9,98	17,91
24	0,6	0,20	0,23	0,23	0,25	0,32	0,43	0,76	1,55	1,18	2,39	2,58
25	0,6	1,32	2,14	2,70	2,53	3,43	3,99	6,97	11,35	17,15	15,51	26,65
26	0,6	0,51	0,65	0,52	0,80	1,02	1,42	2,37	5,19	5,69	5,53	5,13
27	0,6	0,19	0,09	0,40	0,45	0,36	0,73	0,82	1,94	1,50	0,59	3,06
28	0,6	0,26	0,17	0,62	0,12	0,56	0,34	1,78	1,21	0,54	3,71	6,60
29	0,6	1,22	1,05	0,53	1,55	0,37	2,65	0,26	8,30	9,15	1,66	17,40
30	0,6	0,22	0,20	0,10	0,18	0,17	0,37	0,21	1,54	0,74	0,10	2,38
31	0,6	0,10	0,05	0,39	0,12	0,41	0,22	0,54	0,33	1,36	1,33	0,71
32	0,6	0,17	0,23	0,24	0,06	0,15	0,13	0,35	0,01	0,25	0,20	0,24
NO CUMPLE LA NORMA												

4.2 Contratación de resultados producto de la simulación y los obtenidos de la campaña de medición del Caso de Estudio.

El Sistema Solar Fotovoltaico del caso de estudio cuenta con 192 paneles de 230 Wp que en condiciones ideales darían una potencia de: $(192 \cdot 230) = 44.160 \text{ kW}$.

La simulación se la realizó en base al rendimiento que genera un sistema fotovoltaico conectado a la red, el cual consta de un panel solar y un inversor.

El sistema modelado consta de un panel fotovoltaico el cual en condiciones ideales proporcionaría una potencia de 230 W. Con fines de simulación se multiplicó la potencia de salida del inversor por 196 paneles con el fin de obtener una curva similar a la real.

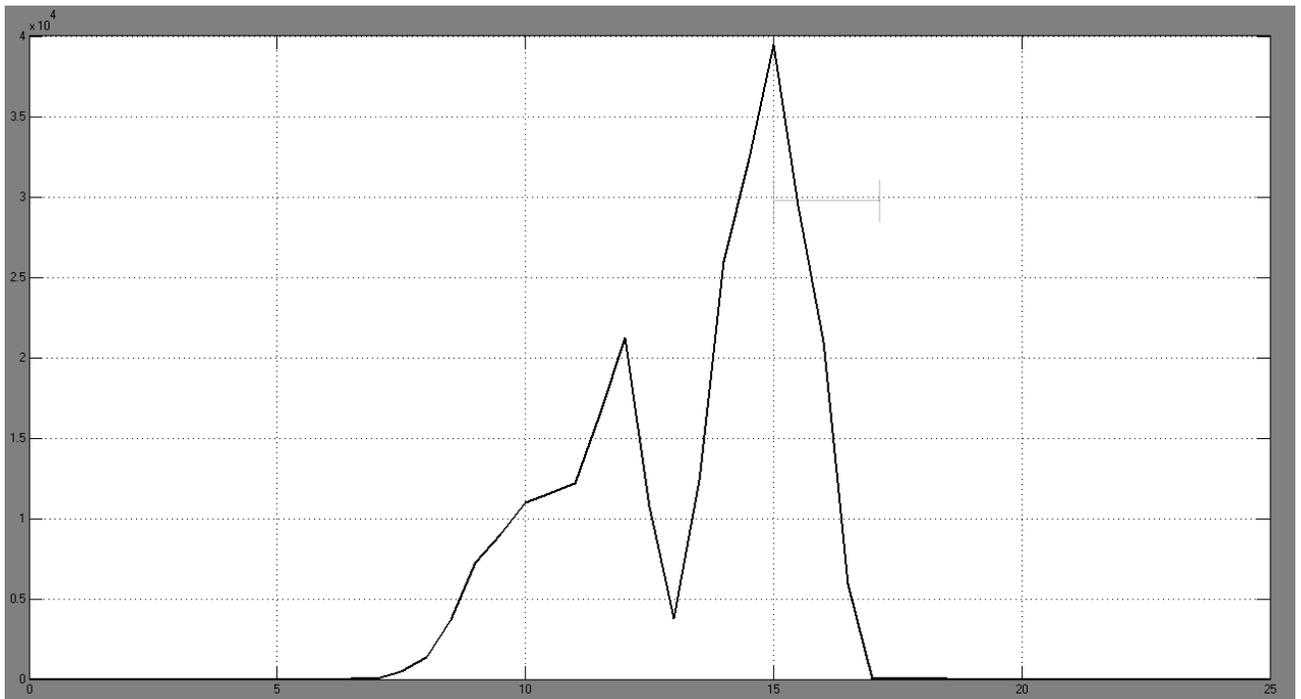
En la Tabla 4.12 se muestra los valores de irradiación solar (15/02/2015), potencia real así también la potencia producto de la simulación bajo las mismas condiciones de irradiación.

*Tabla 4.12. Datos medidos del SFCR y producto de la simulación (15/02/2015)
Fuente: Propia del Autor.*

Tiempo (h)	Irradiación (kW/m ²)	Potencia (kW) del SFCR	Potencia (kW) producto de la simulación	% de desviación
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	52	1,48	0,02	1,46
8	202	7,57	1,25	6,32
9	446	16,8	7,5	9,3
10	547	20,75	11,25	9,5
11	576	21,25	12,3	8,95
12	759	29,2	21,5	7,7
13	325	12,47	3,75	8,72

14	838	30,26	25,75	4,51
15	1032	40,1	39	1,1
16	754	29,89	21,2	8,69
17	57	1,54	0,2	1,34
18	21	0	0	0
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0
21	0	0	0	0
22	0	0	0	0
23	0	0	0	0
24	0	0	0	0

En la Figura 4.19 se observa la curva de potencia producto de la simulación.



*Figura 4.19. Curva potencia (kW) / (h) del 15/02/2015 simulada
Fuente: Propia del Autor*

En la Figura 4.20 se observa la curva generada producto de la simulación así también la curva producto de la simulación.

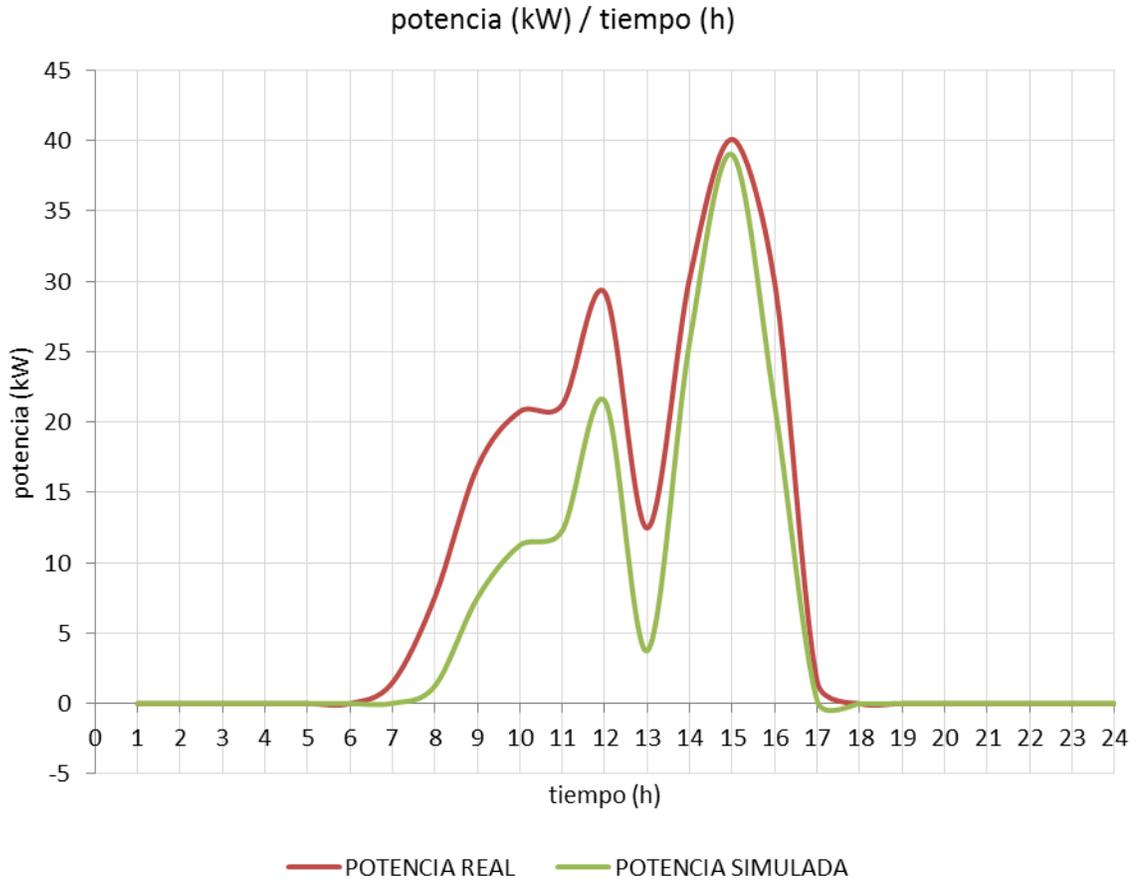
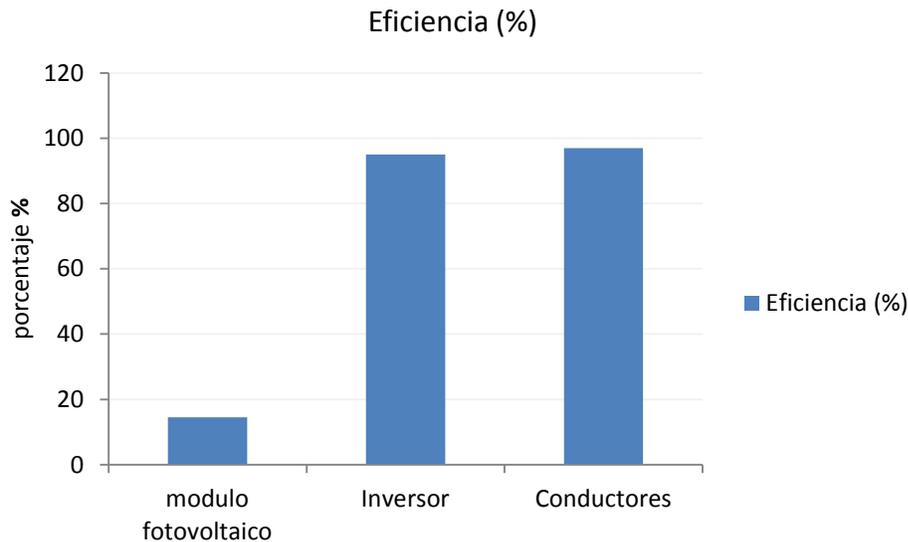


Figura 4.20. Curva potencia (kW) real y simulada en función del tiempo del 15/02/2015
Fuente: Propia del Autor

En cuanto a la eficiencia, las pérdidas se dan principalmente en el módulo fotovoltaico, luego de convertir la radiación solar en corriente y voltaje continuo por medio del efecto fotoeléctrico, presenta una eficiencia muy baja de conversión dependiendo del tipo de material fabricado, en tanto que el inversor y el cableado poseen eficiencias altas de acuerdo al fabricante como se observa en la Tabla 4.12, y su representación en la Figura 4.21.

Tabla 4.12. Eficiencia de los componentes del SFCR.
Fuente Propia del Autor

Componente	Eficiencia (%)
modulo fotovoltaico	14,5
Inversor	95
Conductores	97



*Figura 4.21. Eficiencia de los componentes del SFCR
Fuente Propia del autor.*

De la campaña de medición del caso de estudio, así como del producto de la simulación se verificó que la generación de energía eléctrica depende exclusivamente de la cantidad de radiación que llega a los módulos, pues la curva de irradiación en un día es directamente proporcional a la curva de potencia y a la curva de corriente como se observó en el capítulo tres.

4.3 Diseño de medidas de mitigación de los impactos negativos en la calidad de la energía aplicables al caso de estudio.

Luego de analizar los datos de los medidores de energía en el capítulo 3 se puede evidenciar un alto contenido de armónicos en corriente cuando la radiación solar es baja y el inversor, por tanto, trabaja a potencias muy inferiores a la nominal. En este subcapítulo se tratará de los distintos métodos de mitigación para mejorar los índices de calidad.

4.3.1 Resumen de la campaña de medición

De los datos analizados en la campaña de medición, para un día laborable así como para un día no laborable se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 4.11).

Tabla 4.11. Resumen de los índices de calidad de la campaña de medición
Fuente: Propia del Autor

PARA UN DÍA LABORABLE		
Descripción del parámetro analizado	Cumple las normas y regulaciones	Observaciones
Nivel de tensión	SI	El 0% de registros están fuera de los límites permitidos
Factor de potencia	SI	El 95 % de registros están dentro de los límites permitidos
Distorsión armónica de voltaje	SI	El 0% de registros están fuera de los límites permitidos
Distorsión armónica de corriente	Si / No	El 22 % de registros correspondientes a las potencia más altas por encima de los 30 KW cumplen con la norma, por debajo de esta potencia incumplen con las normas
PARA UN DÍA NO LABORABLE		
Descripción del parámetro analizado	Cumple las normas y regulaciones	Observaciones
Nivel de tensión	Si	El 0% de registros están fuera de los límites permitidos
Factor de potencia	Si	El 95% de registros están dentro los límites permitidos
Distorsión armónica de voltaje	SI	El 0% de registros están fuera de los límites permitidos
Distorsión armónica de corriente	Si / No	El 25 % de registros correspondientes a las potencia más altas por encima de los 28 kW cumplen con la norma, por debajo de esta potencia incumplen con las normas

4.3.2 Técnicas de compensación y filtrado de perturbaciones

La mayor parte de los problemas de perturbaciones son corregidos mediante filtros, lógicamente cada tipo de problema requiere un estudio de las cargas que puedan ser el origen de las perturbaciones. En la tabla 4.12 se presenta un resumen de las posibles

soluciones a distintos tipos de problemas que puedan presentarse en las redes.

Tabla 4.12 Tipos de filtros y su aplicación.

Fuente: Joseep Balcells, *Eficiencia en el uso de la energía eléctrica*, Marcombo 2011, p 288.

ANOMALIA	CAUSAS	SOLUCION	EQUIPOS
Después de la conexión de condensadores: •Sobrecarga en condensadores •Problemas con controles electrónicos •Vibraciones de transformador	Resonancia de la batería de condensadores con el transformador como consecuencia de los armónicos existentes	Eliminación de la resonancia	Baterías con filtros de rechazo, Serie PLUS FR, PLUS FRE, FAR Q, FARE Q
Sobrecarga de neutro en líneas de: •Alumbrado •Ordenadores	Circulación del tercer armónico (homopolar)	Filtro de bloqueo o compensación del tercer armónico	•Sistemas de bloqueo TSA, FB3 •Filtros activos
Calentamiento por sobrecarga de: •Conductores de fase •Transformadores •Motores •Interruptores automáticos	Existencia de armónicos de diferentes rangos	Filtrado de armónicos	•Filtros de absorción FAR H, LCL, FAR-Q •Filtros activos
Disparos de: •Interruptores diferenciales	Existencia de fugas de corrientes de alta frecuencia. Origen filtros EMI	Protección diferencial inmunizada y Filtrado	•Reactancias LR(1) •Diferenciales inmunizados (2)
Interferencias en equipos electrónicos	Altas frecuencias conducidas	Filtros de altas frecuencias (EMI)	•Filtros EMR •Reactancias LR
Líneas desequilibradas + armónicos en neutro	Reparto desigual de cargas monofásicas	Equilibrado de fases y filtrado de armónicos	Filtro activo NETACTIVE multifunción

En un contexto general, se puede hacer referencia a los filtros armónicos como filtros pasivos y activos. Su diferencia esencial se encuentra en que proporcionan un (pasivo), acción de filtrado dentro de un ancho de banda seleccionado, o como resultado de un (activo) que es proceso de monitoreo en tiempo real que conduce a la inyección de la cancelación de las corrientes armónicas en tiempo real.

Los Filtros de armónicos pasivos suelen ser diseñados como elementos de un solo sintonizado que proporcionan un camino de baja impedancia para las corrientes armónicas a una frecuencia puntual o como dispositivos de paso de banda que pueden filtrar armónicos sobre un ancho de banda de frecuencia determinada. [37]

Los más sofisticados conceptos de filtros activos operan en una amplia gama de frecuencia, de esta manera, están diseñados para inyectar corrientes armónicas para contrarrestar las componentes armónicas existentes que se muestran en el sistema.

En la Tabla 4.11 se recogen las anomalías que se encontradas como producto del análisis de los datos de la campaña de medición y procesamiento de datos. Relacionando esta información con los casos de aplicación descritos en la Tabla 4.12 se recomienda como solución la aplicación de filtros activos puesto que cubren un amplio rango de componentes armónicas, que se han verificado existen en la instalación en estudio.

Filtros activos.

Del análisis de los resultados los filtros activos son los idóneos, dentro su funcionamiento implementan electrónica de potencia y la compensación armónica que cubre va del orden (2do al orden 25, o desde el orden 2 al orden 50) según las necesidades, pues además de eliminar los armónicos de cualquier orden, contribuyen con la mejora del factor de potencia, la función principal del filtro es la compensación de corrientes armónicas, La compensación se consigue mediante la inyección en contrafase de corrientes armónicas iguales a las existentes en la instalación. [38]

Esto permite que, aguas arriba del punto de conexión del filtro, la señal no presente prácticamente distorsión armónica.

La regulación de corriente generalmente la realiza un DSP de forma automática, el DSP es un procesador de señal digital que realiza el procesamiento de datos en tiempo real que básicamente adquiere una señal digital y la procesa para mejorar la misma.

Principio de funcionamiento

Los filtros activos se basan en el siguiente principio:

$$I_{\text{FILTRO}} = I_{\text{RED}} - I_{\text{CARGA}}$$

Es decir, detectan la diferencia existente entre la onda senoidal deseada (I_{RED}) de corriente y la señal deformada por efecto de los armónicos (I_{CARGA}). Por tanto, procede a inyectar la diferencia existente entre ambas ondas (I_{FILTRO}) su representación se la presenta en la Figura 4.22.

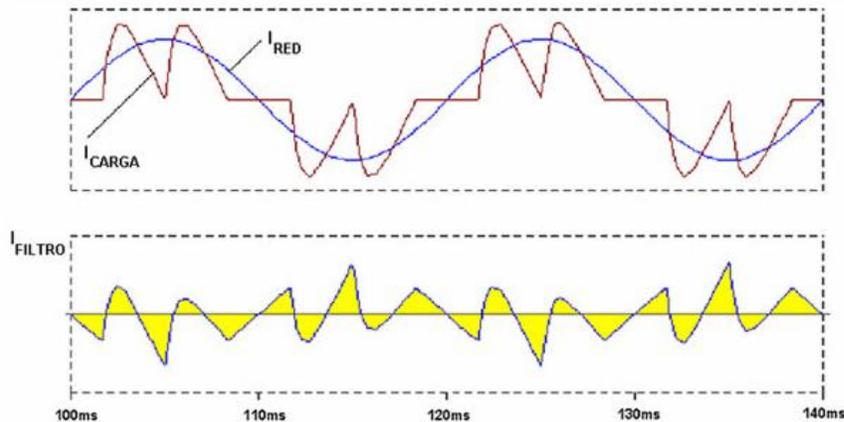


Figura 4.22 Principio de funcionamiento de un filtro
Fuente: <http://circuitos.es/es/formacion/armonicos-electricos/filtros-activos>.

Lugar de instalación de los equipos de filtrado. [39]

Existen tres puntos posibles en una instalación para colocar equipos, para la eliminación de perturbaciones y su ilustración se indica en la Figura 4.23.

En bornes de las cargas generadoras de armónicos

Es lo más idónea ya que elimina la perturbación justo en el lugar en que se produce, evitando su distribución a lo largo de las líneas de distribución de la instalación.

En cuadros secundarios

Cuando existen diferentes cargas de pequeña potencia conectadas a los cuadros secundarios de distribución.

Su eliminación permite la descarga de las líneas que van al cuadro general.

En el cuadro general de Baja Tensión

Cuando las perturbaciones han sido eliminadas o atenuadas en las propias cargas o en los cuadros secundarios, la colocación en el cuadro general de un equipo de filtrado permite la eliminación de los residuos restantes.

De esta manera se garantiza un correcto estado de la señal eléctrica en el punto de conexión con la Compañía suministradora.

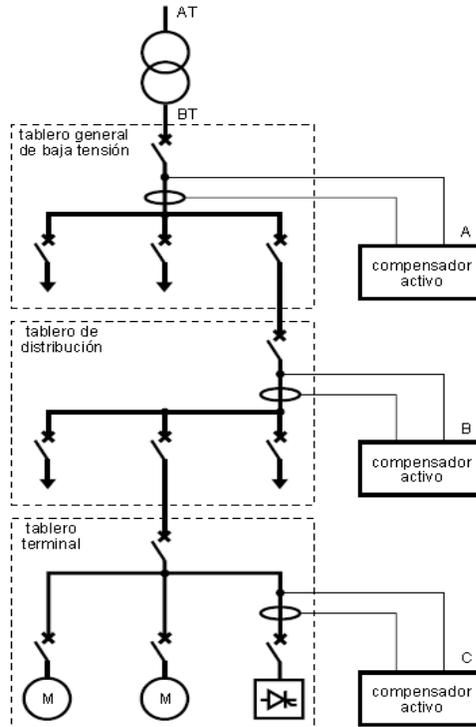


Figura 4.23. Ubicación del filtro activo para filtrado de armónicos
Fuente: Cuaderno Técnico Schneider Electric n 183/p26

4.3.3 Dimensionamiento de un filtro activo

Los filtros activos se dimensionan en base a [40]

- Nivel de voltaje en la instalación (220, 440, etc.)
- Potencia reactiva o corriente rms.

En la Tabla 4.13 se tabula los resultados relevantes de la campaña de medición para el dimensionamiento del filtro.

Tabla 4.13 Datos para el dimensionamiento del filtro.
Fuente: Propia del Autor.

Tensión del sistema (V)	216
Corriente promedio (A)	6,93
THD en corriente %	90,89
Energía reactiva consumida (KVAR)	1,72

Mediante la ecuación (4.1) es posible estimar la corriente armónica rms, es decir la componente efectiva relacionada con las frecuencias no fundamentales. [40]

$$I_h = \frac{I_{rms}}{\sqrt{\frac{1}{THDi^2} + 1}} \quad (4.1)$$

Dónde:

I_{rms} : Corriente total de carga.

THDi: Tasa de distorsión armónica en corriente

I_h : Corriente efectiva armónica.

Una vez obtenida los datos se estima la corriente armónica total.

$$I_h = \frac{6,93 \text{ A}}{\sqrt{\frac{1}{0,9089^2} + 1}} = 4,66 \text{ (A)}$$

El filtro compensa simultáneamente los armónicos y los reactivos mediante inyección dinámica de corriente. La capacidad total de inyección del filtro está dada por la siguiente ecuación (4.2). [40]

$$I_{filtro} = \sqrt{I_h^2 + I_r^2}$$

Dónde:

I_{filtro} Capacidad requerida del filtro activo.

I_h Corriente efectiva armónica requerida.

I_r Corriente efectiva reactiva requerida.

Finalmente estima la corriente equivalente necesaria para recompensar los 1,72 KVAR que absorbe la carga, asumiendo un factor de potencia unitario. [40]

$$I_r = \frac{Q_c}{\sqrt{3} * VL - L} = \frac{1,72 \text{ KVAR}}{\sqrt{3} * 216} = 4,79 \text{ (A)}$$

La capacidad del filtro requerido es:

$$I_{filtro} = \sqrt{I_h^2 + I_r^2}$$

$$I_{filtro} = \sqrt{4,66^2 + 4,79^2} = 6,68 \text{ A}$$

Existe diversidad de equipos para compensación global de armónicos, un equipo idóneo para mitigar los defectos de calidad del caso de estudio por sus características es el filtro activo de Schneider Electric modelo AccuSine de 50 amperios basados en los resultados y en la guía de selección de filtros que nos da el fabricante Tabla 4.14.

*Tabla 4.14 Guía de selección del filtro .
Fuente: Schneider Electric filtro AccuSine.*

Corriente nominal máxima rms (A)	Máxima potencia reactiva (kVAr)		
	208 (V)	400 (V)	480 (V)
50	18	34,8	41,8
100	38	88,2	83,1
300	108	207,8	249,5

En la Tabla 4.15 podemos observar las características del filtro.

*Tabla 4.15 Características del filtro .
Fuente: Schneider Electric filtro AccuSine.*

Características del filtro AccuSine
Marca: Scheneider Electric
Modelo: AccuSine
Capacidad de corrección por equipo: 50, 100, 300 (A)
Alimentación: 208 -690 VAC trifásica
Compensación de armónicos: del armónico 2 al armónico 50
Compensación reactiva, corrección del factor de potencia
Comunicación Modbus TCP/IP o Ethernet IP
Frecuencia nominal: 50-60 Hz \pm 3%
Tiempo de respuesta: 100 microsegundos
HMI gráfica y táctil

En la Figura 4.24 se ilustra la conexión del filtro activo en la barra de energías renovables como medida de mitigación a la carga que alimenta el SFCR.

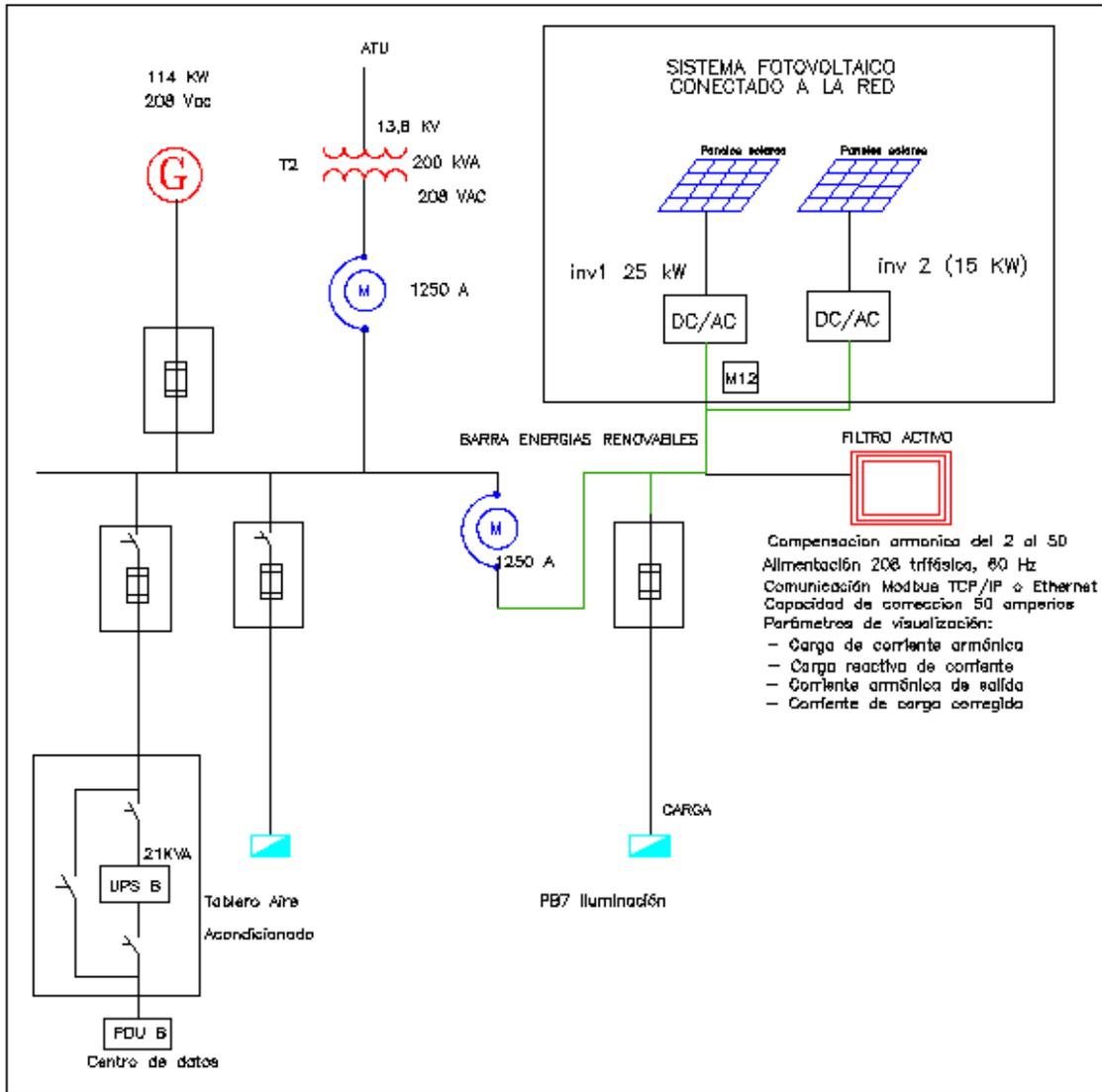


Figura 4.24. Ubicación del filtro activo.

Fuente: Propia del Autor.

CONCLUSIONES

Del estudio realizado y análisis de datos se concluye que mejores condiciones de funcionamiento para un sistema fotovoltaico, en el ámbito de la calidad del servicio, estarán dadas en días despejados, con alto nivel de irradiación directa, con la superficie captadora perpendicular al sol, sin objetos que se interpongan en la trayectoria de la luz (sombras de árboles, edificios, suciedad del panel) y con amplios periodos de insolación.

La generación solar fotovoltaica es la mejor opción para la generación distribuida o autónoma a pequeñas escalas. Tiene muy bajo costo de mantenimiento y esta es la clave para la sustentabilidad y viabilidad financiera de un proyecto de generación de este tipo de energía, hay que tomar en cuenta que su vida útil es alrededor de 20 a 25 años.

Los avances tecnológicos indican que se seguirá aumentando el porcentaje de eficiencia en los paneles los cuales en la actualidad son menores al 20%, al tener una alta eficiencia en la calidad del producto hace de este tipo de generación un atractivo pues a diferencia de otras tecnologías tienen aspectos positivos como el medioambiental, de confiabilidad, de descentralización los cuales son de interés en el cambio de la matriz productiva energética que el país se encuentra actualmente sumergido.

De los análisis, se concluye que el SFCR bajo estudio, cumple con las normas nacionales e internacionales de calidad del producto como generador pues el factor de potencia, la variación de voltaje, así como la distorsión armónica de voltaje total como individual están dentro de los rangos permitidos.

El incumplimiento de las norma las realiza la edificación en estudio debido al tipo de cargas que posee como son las unidades de alimentación ininterrumpida (UPS, computadores, centro de datos) al ser cargas no lineales estas generan anomalías en la calidad de energía vertiendo a la red un alto contenido de armónicos tanto grupal como individual.

Los modelos matemáticos así como las herramientas de simulación nos permiten tener una perspectiva inicial de la producción que tendríamos al instalar una real. El análisis desarrollado ha permitido encontrar un modelo matemático que representa el contenido armónico de la corriente del sistema fotovoltaico en función de la potencia entregada. Esta modelación podrá emplearse en futuros trabajos de investigación en los que sea necesario simular el comportamiento armónico de una determinada instalación fotovoltaica, relacionándola con la potencia entregada por el inversor e incluso con la irradiación incidente en el campo solar.

La potencia que genera el sistema fotovoltaico conectado a la red es inversamente proporcional a la distorsión armónica de corriente pues a mayor potencia es menor el espectro armónico y viceversa.

RECOMENDACIONES

A pesar que los SFCR no necesitan de un mantenimiento exhaustivo, por la razón que sus dispositivos no son móviles, no hay lubricantes o aceites así como no posee elementos de degradación excesiva, no obstante para el buen funcionamiento de los equipos del SFCR en el transcurso de su vida útil aproximadamente 20-25 años, es necesario contar con medidas de mitigación programadas ya sean mensuales, semestrales o anuales, de un plan de mantenimiento preventivo y correctivo.

Se recomienda un estudio de calidad de producto eléctrico total de las edificaciones con el fin de emitir mejores criterios en cuanto a las medidas de mitigación.

Es necesario promover el estudio e implementación de las nuevas fuentes de energía alternativas como son los sistemas fotovoltaicos en la arquitectura de las nuevas edificaciones, permitirá reducir la contaminación al medio ambiente de gases de efecto invernadero .que producen las actuales fuentes no renovables.

REFERENCIAS

- [1] A. B. Andreas Sumper, *Electrical Energy efficiency*, wiley, 2012.
- [2] American National Standard , «IEEE Recommended Practicas and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems,» 1992.
- [3] IEEE, «IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems,» Institute of Electrical and Electronics Engineers , NEW YORK, 2003.
- [4] Centro de investigaciones energeticas, medioambientales y tecnologicas (CIEMAT), *Tendencias tecnologicas mundiales en el desarrollo y aplicacion de paneles solares fotovoltaicos*, (gobierno de España), 2009.
- [5] *Tendencia tecnologicas mundiales en el desarrollo y aplicacion de paneles solares fotovoltaicos*.
- [6] H. Scheer, *Autonomia energetica*, Barcelona : Icaria Editorial , 2009.
- [7] P. G. Zaragoza, «El mercado de las Energias Renovables en el Ecuador,» 2011.
- [8] G. G. Gregorio, *Energias del siglo XXI*, Madrid: Mundi-Prensa, 2008.
- [9] M. S. Masa, *Energia solar fotovoltaica*, Mexico DF: Limusa, 2011.
- [10] M. M. Vallina, *Instalaciones Solares Fotovoltaicas*, Madrid: Paraninfo S.A, 2010.
- [11] J. M. d. Juana, *Energias Renovables para el desarrollo*, Thomson-Madrid : Paraninfo, 2007.
- [12] *Replanteo y funcionamiento de las instalaciones solares fotovoltaicas*, España : IC Editorial , 2011.
- [13] C. E. d. I. N. E. d. I. Construcción, «NEC-11 Energias renovables,» 2011.
- [14] M. F. Barrera, *Energia Solar "Electricidad Fotovoltaica"*, Madrid: Liberfactory.
- [15] J. R. Vilorio, *Instalaciones solares fotovoltaicas*, Madrid: Paraninfo, 2010.
- [16] CONELEC, «Regulación No. CONELEC 001-14 sobre Autogeneración,» 2012.
- [17] L. L. Grigsby., *Power Systems.*, 2007.
- [18] [En línea]. Available: www.conelec.gob.ec/normativa/CalidadDeServicio.doc.
- [19] T. T. N. N. Vichakorn Hengsrutawat, «Optimal sizing of photovoltaic distributed generators in a distribution system with consideration of solar radiation and harmonic distortion,» 2012.
- [20] Universidad del Atlantico , «Calidad de Energia».

- [21] F. V. D. A. Cardenas Miranda, «Auditoria Energetica Electrica del campus sur de la Universidad Politecnica Salesiana,» Quito , 2012.
- [22] Schneider Electric, «Ahorro de energia y mejora de la calidad de energia corrigiendo el valor de potencia total».
- [23] J. H. O. G. M.J. Ortega, «Measurement and assessment of power quality characteristics for photovoltaic systems: Harmonics, flicker, unbalance, and slow voltage variations,» 2013.
- [24] R. G. Perez, Replanteo y funcionamiento de las instalaciones solares fotovoltaicas, Andalucia: IC Editorial, 2011, pp. 167-169.
- [25] M. E. d. I. H. Leon, Mantenimiento de Instalaciones Solares Fotovoltaicas, España: IC Editorial, 2011.
- [26] E. Norman, Revista elementos Vol 2, Politecnico Grancolombiano, 2012, pp. 60-71.
- [27] J. F. Salgado, Tegnologia de las energia renovables, España: Mundi prensa , 2009.
- [28] B. Rujula, Energias Renovables, España , 2009.
- [29] Matsumoto, «Celdas Solares de Silicio Fundamento y Tendencias».
- [30] «Wind an Solar Power System,» CRC-PRES, 2005.
- [31] A.Peña, Caracterizacion del voltaje VOC de una celda fotovoltaica de silicio monocristalina respecto a la temperatura.
- [32] J. B. Adan, «Prototipo fotovoltaico con seguimiento del sol para procesos electriquimicos,» 2007.
- [33] M. B. A. G. A. M. Tarak Salmi, «MATLAB/Simulink Based Modelling of SolarPhotovoltaic Cell,» 2012.
- [34] K. C. R. Rampinelli, «G. a. Rampinelli, a. Krenzinger, and F. Chenlo Romero, “Mathematical models for efficiency of inverters used in grid connected photovoltaic systems,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 34, pp. 578–587, Jun. 2014.,» 2014.
- [35] P. Caceres, «Modelo matematico para simular la iteracion entre un sistema de generacion fotovoltaica y la red de baja tension,» 2010.
- [36] Ingecon ® Sun Smart, «Data Sheer manual del inversor».
- [37] F. C. d. I. Rosa, HARMONIC AND POWER SYSTEM, CRC, 2006.
- [38] J. Balcells, J. Autonell, V. BARRA, J. BROSSA , F. FORNIELES, B. GARCIA y J. ROS, EFICIENCIA EN EL USO DE LA ENERGIA ELECTRICA, BARCELONA: MARCOMBO, 2011.
- [39] Schneider Electric, «Armonicos: rectificadores y compensadores activos, cuaderno tecnico 183,» 2000.
- [40] Schneider Electric, «Filtro activo de armonicos».

ANEXOS

A1 Datos técnicos del panel fotovoltaico

HJM230P-20

HJM220P-20

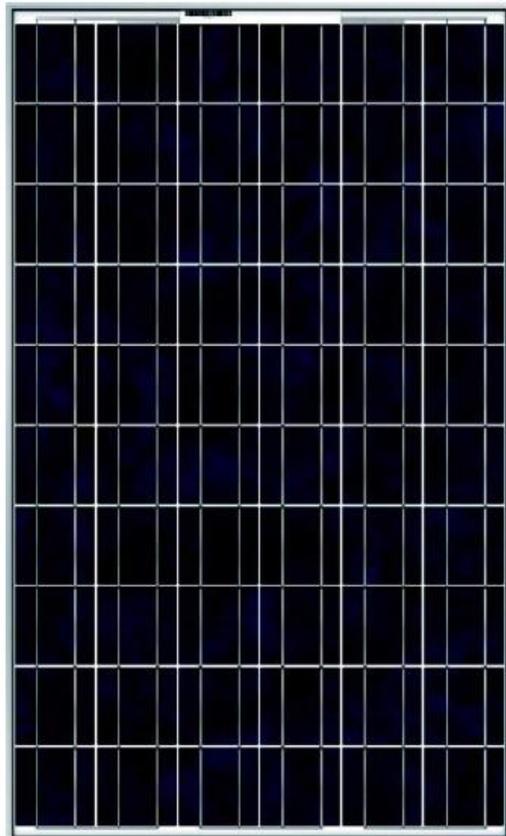
HJM225P-20

HJM235P-20

HJM240P-20

The HJM230P-20, HJSOLAR Solar's 230 watt photovoltaic module features 17% encapsulated cell efficiency and 14.5% module efficiency. With a 25 year warranty, the HJM230P-20 has superb durability to withstand rigorous operating conditions. Ideal for grid-connected and remote power systems, the HJM230P-20 modules offer the maximum usable power per square foot of solar array.

- High-power module using 156mm poly crystal silicon solar cells with 17% module conversion efficiency.
- Bypass diode minimizes the power drop caused by shade.
- Tempered glass, EVA resin, and weatherproof film, and anodized aluminum frame for extended outdoor use.
- TUV, UL Listings: UL 1703, IEC61215, IEC61730.
- 25-year limited warranty on power output.





Electrical Data

The electrical data applies to standard test conditions (STC): Irradiance at the module level of 1,000 W/m² with spectrum AM 1.5 and a cell temperature of 25° C

Model type	HJM220P-20	HJM225P-20	HJM230P-20	HJM235P-20	HJM240P-20
Peak power(Pmax)	220W	225W	230W	235W	240W
Cell type	Poly Crystalline Silicon, 156mm x 156mm				
Number of cells	60 cells in a series				
Weight	19.5 kg				
Dimensions	1646×992×45mm				
Maximum power voltage (Vmp)	29.00	29.20	29.20	29.40	29.40
Maximum power current (Imp)	7.59	7.70	7.88	7.99	8.16
Open circuit voltage (Voc)	36.20	36.40	36.40	36.50	36.50
Short circuit current (Isc)	8.19	8.31	8.50	8.64	8.81
Maximum system voltage	TUV DC 1000V/UL DC600V				
Temp. Coeff. of Isc (TK Isc) Temp.	0.009%/ °C				
Coeff. of Voc (TK Voc) Temp.	-0.34%/ °C				
Coeff. of Pmax (TK Pmax)	-0.37 %/ °C				
Normal Operating Cell Temperature	45±2 °C				

A2 Datos técnicos del inversor.

PROTECCIONES

Aislamiento galvánico entre la parte DC y AC.

Polarizaciones inversas.

Cortocircuitos y sobrecargas en la salida.

Fallos de aislamiento.

Anti-isla con desconexión automática.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

	Ingecon Sun 10	Ingecon Sun 12,5	Ingecon Sun 15	Ingecon Sun 20	Ingecon Sun 25	Ingecon Sun 30
VALORES DE ENTRADA (DC)						
Rango de potencia del campo PV recomendado ⁽¹⁾	11 – 13 kWp	13 – 16 kWp	16 – 20 kWp	21 – 26 kWp	26 – 33 kWp	31 – 39 kWp
Rango de tensión MPP	De 405 a 750 V					
Tensión máxima DC ⁽²⁾	900 V					
Corriente máxima DC	26 A	32 A	39 A	52 A	65 A	78 A
Número de entradas DC	8	8	8	10	10	10
MPPT	1	1	1	1	1	1
VALORES DE SALIDA (AC)						
Potencia nominal AC modo HT ⁽³⁾	10 kW	12,5 kW	15 kW	20 kW	25 kW	30 kW
Potencia nominal AC modo HP ⁽⁴⁾	11 kW	13 kW	16 kW	22 kW	27,5 kW	33 kW
Corriente máxima AC	19 A	22 A	23 A	37 A	50 A	50 A
Tensión y frecuencia nominal AC	400 V – 50/60 Hz					
Coseno de Phi ⁽⁵⁾	1					
Regulación coseno de Phi	±0,9 a P _{nom}					
THD ⁽⁶⁾	< 3 %					
RENDIMIENTO						
Eficiencia máxima	94,9 %	94,9 %	94,9 %	96,1 %	96,1 %	96,1 %
Euroeficiencia	93,3 %	93,5 %	93,8 %	94,5 %	94,9 %	94,2 %

A 3 Medidas del equipo M12

fecha/hora	FOT Vr-s (V)	FOT Vs-t (V)	FOT Vt-r (V)	FOT Vr-n (V)	FOT Vs-n (V)	FOT Vt-n (V)
12/02/2015						
12:00	216.405.411	215.687.958	214.540.649	124.075.012	125.475.952	123.877.159
12/02/2015						
12:05	215.599.731	214.210.724	213.411.987	123.237.305	124.514.191	123.798.035
12/02/2015						
12:10	217.699.188	216.131.317	216.656.754	124.356.651	125.828.430	124.537.079
12/02/2015						
12:15	217.176.193	217.300.079	216.104.858	124.979.248	125.576.897	125.330.574
12/02/2015						
12:20	216.151.672	217.820.892	215.637.527	124.304.016	125.997.864	124.581.543
12/02/2015						
12:25	217.534.851	215.394.684	214.644.119	124.197.144	125.016.823	124.467.812
12/02/2015						
12:30	215.900.269	213.037.781	213.988.770	123.338.608	124.212.044	123.073.364
12/02/2015						
12:35	215.560.974	215.357.559	214.302.017	123.857.758	124.806.053	124.312.172
12/02/2015						
12:40	216.751.373	216.439.575	215.388.367	124.142.761	125.858.917	124.925.667
12/02/2015						
12:45	216.261.749	216.916.138	214.989.090	124.380.470	125.104.980	124.715.202
12/02/2015						
12:50	216.062.897	216.906.219	214.859.985	124.238.602	125.354.385	124.059.471
12/02/2015						
12:55	214.973.022	213.618.103	212.863.235	122.764.313	124.240.707	123.488.136
12/02/2015						
13:00	215.223.038	214.882.797	212.218.933	123.471.489	124.413.742	123.177.979
12/02/2015						
13:05	218.623.657	217.343.445	216.382.858	124.754.425	126.304.779	125.487.770
12/02/2015						
13:10	217.931.961	216.903.809	215.710.800	124.610.146	125.536.880	125.082.237
12/02/2015						
13:15	215.530.579	215.006.805	213.703.598	123.065.842	125.118.347	123.933.952
12/02/2015						
13:20	215.791.412	215.555.603	214.440.964	123.628.189	125.213.318	124.400.902
12/02/2015						
13:25	215.861.053	214.110.855	213.386.108	123.131.187	124.602.768	123.756.432
12/02/2015						
13:30	217.286.377	216.220.886	215.220.093	124.249.557	125.898.071	124.331.032
12/02/2015						
13:35	216.658.752	216.109.894	215.073.929	123.698.074	125.610.535	124.739.784
12/02/2015						
13:40	215.043.610	216.451.309	214.434.036	123.804.337	125.362.701	124.398.964
12/02/2015						
13:45	218.200.500	218.625.046	216.662.781	124.550.949	126.636.932	125.703.186
12/02/2015						
13:50	219.168.137	219.676.376	217.712.631	125.700.157	127.129.280	126.286.316

12/02/2015							
13:55	217.474.564	216.631.302	215.584.488	124.959.290	125.516.861	124.998.375	
12/02/2015							
14:00	216.731.232	215.990.479	214.894.470	124.078.857	125.607.048	124.124.580	
fecha/hora	FOT Ir (A)	FOT Is (A)	FOT It (A)	FOT In (A)	FOT Pr (kW)	FOT Ps (kW)	
12/02/2015							
12:00	106.760.483	104.277.641	103.416.290	2.603.405	13.208.160	13.026.401	
12/02/2015							
12:05	54.858.353	54.139.076	53.163.975	1.840.157	6.720.589	6.723.243	
12/02/2015							
12:10	108.931.152	107.906.113	105.736.038	2.654.797	13.496.470	13.514.186	
12/02/2015							
12:15	103.608.963	102.073.029	100.449.165	2.673.693	12.965.806	12.803.748	
12/02/2015							
12:20	107.883.133	104.513.397	103.637.039	3.309.899	13.360.174	13.157.379	
12/02/2015							
12:25	67.777.496	67.480.331	64.922.424	3.127.187	8.390.804	8.424.699	
12/02/2015							
12:30	65.446.838	62.647.751	62.268.497	2.171.279	8.024.862	7.775.453	
12/02/2015							
12:35	103.364.746	103.264.648	101.550.240	2.247.189	12.846.076	12.808.022	
12/02/2015							
12:40	104.699.783	104.158.691	102.542.992	3.192.314	13.000.697	13.112.461	
12/02/2015							
12:45	109.630.096	107.563.927	104.843.231	2.319.799	13.597.867	13.442.808	
12/02/2015							
12:50	106.259.628	103.312.782	102.416.168	2.711.587	13.161.984	12.876.569	
12/02/2015							
12:55	36.135.674	35.608.749	33.716.385	1.798.798	4.427.231	4.393.037	
12/02/2015							
13:00	49.601.147	48.910.789	46.819.023	2.301.160	6.083.786	6.077.832	
12/02/2015							
13:05	72.877.762	70.501.114	69.633.438	2.120.659	9.051.189	8.931.941	
12/02/2015							
13:10	58.192.101	56.479.156	56.133.022	1.874.804	7.220.485	7.061.302	
12/02/2015							
13:15	82.729.355	80.221.344	79.993.904	2.120.954	10.137.892	10.015.697	
12/02/2015							
13:20	26.498.634	27.319.958	25.697.121	1.741.074	3.217.266	3.385.991	
12/02/2015							
13:25	34.084.457	33.282.497	31.986.954	2.017.803	4.105.790	4.211.883	
12/02/2015							
13:30	31.772.093	32.067.894	30.373.180	2.197.543	3.926.579	3.985.664	
12/02/2015							
13:35	27.962.168	25.889.669	24.906.624	2.392.536	3.434.543	3.204.715	

12/02/2015	13:40	36.648.472	35.044.827	34.887.856	2.791.501	4.494.653	4.380.243
12/02/2015	13:45	110.107.071	108.138.107	106.359.695	2.327.037	13.720.869	13.686.502
12/02/2015	13:50	108.437.241	106.551.163	105.418.427	2.604.048	13.513.014	13.607.079
12/02/2015	13:55	91.452.148	87.698.563	86.723.557	2.401.427	11.310.524	11.010.757
12/02/2015	14:00	43.231.903	41.932.091	40.862.511	2.731.019	5.298.456	5.229.474

fecha/hora	FOT Pt (kW)	FOT Ptotal (kW)	FOT Qr (kVAR)	FOT Qs (kVAR)	FOT Qt (kVAR)	FOT Qtotal (kVAR)	
12/02/2015	12:00	12.760.528	39.159.557	-0.770421	-0.794214	-0.926416	-2.489.091
12/02/2015	12:05	6.533.278	20.012.434	-0.590206	-0.621218	-0.650947	-1.856.179
12/02/2015	12:10	13.199.176	40.250.717	-0.744683	-0.799256	-0.824629	-2.377.749
12/02/2015	12:15	12.508.250	38.279.884	-0.830381	-0.813356	-0.910139	-2.551.618
12/02/2015	12:20	12.866.725	39.483.269	-0.824555	-0.837357	-0.985863	-2.648.209
12/02/2015	12:25	8.025.029	24.788.252	-0.747179	-0.732793	-0.786712	-2.271.878
12/02/2015	12:30	7.621.774	23.525.764	-0.652313	-0.686048	-0.788321	-2.130.447
12/02/2015	12:35	12.566.222	38.367.989	-0.738775	-0.781796	-0.832664	-2.361.244
12/02/2015	12:40	12.789.219	38.821.404	-0.748265	-0.846424	-0.804326	-2.409.201
12/02/2015	12:45	13.023.643	40.157.032	-0.830486	-0.817854	-0.944797	-2.600.375
12/02/2015	12:50	12.694.303	38.892.868	-0.805316	-0.820712	-0.989547	-2.616.368
12/02/2015	12:55	4.126.072	12.882.127	-0.543698	-0.539860	-0.549231	-1.632.750
12/02/2015	13:00	5.754.599	17.808.207	-0.578996	-0.588103	-0.606035	-1.774.866
12/02/2015	13:05	8.662.675	26.634.394	-0.646300	-0.672048	-0.759097	-2.069.649
12/02/2015	13:10	6.986.246	21.339.018	-0.586965	-0.640661	-0.687900	-1.905.350
12/02/2015	13:15	9.812.509	29.955.208	-0.606452	-0.693117	-0.785889	-2.088.685

12/02/2015							
13:20	3.142.244	9.748.821	-0.507553	-0.569968	-0.539820	-1.615.265	
12/02/2015							
13:25	3.888.222	12.282.757	-0.516873	-0.558160	-0.501638	-1.568.127	
12/02/2015							
13:30	3.728.631	11.693.268	-0.511505	-0.558936	-0.528290	-1.606.931	
12/02/2015							
13:35	3.044.304	9.694.695	-0.508471	0.586850	-0.591666	-0.512849	
12/02/2015							
13:40	4.271.945	13.161.654	-0.538289	-0.572059	-0.611306	-1.713.617	
12/02/2015							
13:45	13.250.729	40.791.908	-0.853093	-0.812491	-0.928687	-2.600.144	
12/02/2015							
13:50	13.222.569	40.193.516	-0.775202	-0.828654	-0.844915	-2.457.299	
12/02/2015							
13:55	10.775.382	33.046.989	-0.758779	-0.724244	-0.937721	-2.422.784	
12/02/2015							
14:00	5.036.529	15.611.606	-0.624388	-0.631640	-0.654454	-1.905.939	

fecha/hora	FOT Fact. Pot.	FOT Frec. (Hz)	FOT Ea (kWh)	FOT Er (kVARh)	FOT THD_V
12/02/2015					
12:00	-0.999296	59.803.669	35.157.855.469	1.840.044.922	2.436.188
12/02/2015					
12:05	-0.992231	60.220.585	35.160.156.250	1.840.044.922	2.371.395
12/02/2015					
12:10	-0.996196	60.109.650	35.162.609.375	1.840.046.997	2.452.550
12/02/2015					
12:15	-0.996565	60.044.991	35.165.214.844	1.840.048.950	2.449.714
12/02/2015					
12:20	-0.999742	59.825.718	35.168.515.625	1.840.048.950	2.491.900
12/02/2015					
12:25	-0.992431	60.190.815	35.171.421.875	1.840.052.002	2.572.684
12/02/2015					
12:30	-0.995929	59.801.624	35.173.406.250	1.840.057.861	2.368.879
12/02/2015					
12:35	-0.999591	59.861.290	35.176.589.844	1.840.057.861	2.285.916
12/02/2015					
12:40	-0.996508	60.027.081	35.179.660.156	1.840.060.059	2.411.951
12/02/2015					
12:45	-0.996423	60.122.757	35.182.621.094	1.840.063.965	2.455.956
12/02/2015					
12:50	-0.996295	60.002.571	35.185.621.094	1.840.064.941	2.598.569
12/02/2015					
12:55	-0.988364	60.064.449	35.188.476.562	1.840.065.918	2.441.692
12/02/2015					
	-0.995956	59.975.647	35.190.777.344	1.840.072.021	2.240.631

13:00						
12/02/2015						
13:05	-0.999059	59.933.601	35.192.953.125	1.840.073.975	2.606.189	
12/02/2015						
13:10	-0.996010	59.952.316	35.194.921.875	1.840.083.008	2.529.945	
12/02/2015						
13:15	-0.999825	59.802.433	35.197.703.125	1.840.087.036	2.637.429	
12/02/2015						
13:20	-0.987819	59.841.751	35.199.171.875	1.840.105.957	2.493.253	
12/02/2015						
13:25	-0.988319	60.014.824	35.200.304.688	1.840.116.943	2.575.927	
12/02/2015						
13:30	-0.988582	60.243.187	35.201.308.594	1.840.128.906	2.420.634	
12/02/2015						
13:35	-0.997427	60.100.529	35.202.144.531	1.840.148.926	2.445.679	
12/02/2015						
13:40	-0.991822	59.896.042	35.203.136.719	1.840.169.922	2.510.107	
12/02/2015						
13:45	-0.996363	60.226.051	35.205.871.094	1.840.174.072	2.517.401	
12/02/2015						
13:50	-0.997019	60.082.928	35.209.058.594	1.840.174.072	2.508.759	
12/02/2015						
13:55	-0.999883	59.926.651	35.212.207.031	1.840.174.072	2.530.020	
12/02/2015						
14:00	-0.995880	59.791.821	35.213.226.562	1.840.187.988	2.578.438	

fecha/hora	armV 1(%)	armV 2(%)	armV 3(%)	armV 4(%)	armV 5(%)	armV 6(%)
12/02/2015						
12:00	100.000.000	0.223316	0.301536	0.358535	0.752903	0.081483
12/02/2015						
12:05	100.000.000	0.109769	0.121371	0.067764	0.773624	0.139929
12/02/2015						
12:10	100.000.000	0.105885	0.158886	0.223226	0.890273	0.105885
12/02/2015						
12:15	100.000.000	0.134524	0.294973	0.388865	0.760435	0.066450
12/02/2015						
12:20	100.000.000	0.054553	0.060615	0.178993	0.563750	0.164667
12/02/2015						
12:25	100.000.000	0.043566	0.145410	0.336845	0.774576	0.101052
12/02/2015						
12:30	100.000.000	0.102143	0.080019	0.195814	0.660541	0.104873
12/02/2015						
12:35	100.000.000	0.157770	0.103691	0.179188	0.708304	0.059764
12/02/2015						
12:40	100.000.000	0.129185	0.184188	0.155365	0.687975	0.188790
12/02/2015						
12:40	100.000.000	0.157084	0.110618	0.117003	0.571573	0.143947

12:45							
12/02/2015							
12:50	100.000.000	0.079133	0.182985	0.356228	0.689760	0.198158	
12/02/2015							
12:55	100.000.000	0.160298	0.155045	0.036404	0.653026	0.057560	
12/02/2015							
13:00	100.000.000	0.057684	0.201023	0.193144	0.653753	0.066885	
12/02/2015							
13:05	100.000.000	0.131353	0.076803	0.141227	0.761402	0.098842	
12/02/2015							
13:10	100.000.000	0.199750	0.183695	0.314091	0.732603	0.141449	
12/02/2015							
13:15	100.000.000	0.318919	0.219313	0.271276	0.835873	0.131307	
12/02/2015							
13:20	100.000.000	0.120334	0.195619	0.136427	0.715064	0.155550	
12/02/2015							
13:25	100.000.000	0.103321	0.353657	0.190359	0.705667	0.103499	
12/02/2015							
13:30	100.000.000	0.279501	0.111617	0.264410	0.788738	0.035296	
12/02/2015							
13:35	100.000.000	0.321998	0.220106	0.402377	0.719881	0.042952	
12/02/2015							
13:40	100.000.000	0.148329	0.117841	0.343842	0.395902	0.132247	
12/02/2015							
13:45	100.000.000	0.106164	0.022516	0.393034	0.868921	0.128135	
12/02/2015							
13:50	100.000.000	0.173461	0.126211	0.351584	0.809242	0.042904	
12/02/2015							
13:55	100.000.000	0.119213	0.085480	0.355591	0.643802	0.070747	
12/02/2015							
14:00	100.000.000	0.080780	0.324735	0.099390	0.880820	0.040278	

fecha/hora	armV 7(%)	armV 8(%)	armV 9(%)	armV 10(%)	armV 11(%)	armV 12(%)
12/02/2015						
12:00	1.760.066	0.142950	0.226024	0.067902	0.567138	0.076823
12/02/2015						
12:05	1.662.721	0.095833	0.148587	0.130558	0.433689	0.130839
12/02/2015						
12:10	1.806.309	0.084092	0.049915	0.040605	0.506869	0.177201
12/02/2015						
12:15	1.948.629	0.159852	0.200255	0.126910	0.385453	0.085080
12/02/2015						
12:20	1.855.217	0.289177	0.244646	0.098674	0.679318	0.057504
12/02/2015						
12:25	1.813.713	0.137769	0.119629	0.272351	0.396047	0.050807
12/02/2015						
12:30	1.706.154	0.245565	0.141289	0.128149	0.498438	0.055235

12/02/2015							
12:35	1.632.359	0.077709	0.025745	0.276747	0.621675	0.067024	
12/02/2015							
12:40	1.717.852	0.186160	0.121613	0.162713	0.469336	0.192050	
12/02/2015							
12:45	1.524.497	0.040698	0.141937	0.109234	0.458234	0.104812	
12/02/2015							
12:50	1.903.167	0.101739	0.092643	0.133523	0.492917	0.074084	
12/02/2015							
12:55	1.719.810	0.198376	0.051840	0.200315	0.445529	0.078876	
12/02/2015							
13:00	1.502.312	0.144146	0.136641	0.187806	0.509162	0.056059	
12/02/2015							
13:05	1.861.276	0.193252	0.160415	0.146858	0.612622	0.168377	
12/02/2015							
13:10	1.826.740	0.175555	0.070724	0.107079	0.616311	0.078462	
12/02/2015							
13:15	1.694.171	0.132847	0.108299	0.204471	0.632714	0.193979	
12/02/2015							
13:20	1.716.268	0.142434	0.215710	0.283032	0.787030	0.148574	
12/02/2015							
13:25	1.836.107	0.088493	0.184846	0.288290	0.590037	0.025785	
12/02/2015							
13:30	1.653.294	0.216314	0.048803	0.207053	0.425325	0.060533	
12/02/2015							
13:35	1.656.372	0.110847	0.027165	0.113478	0.424336	0.224751	
12/02/2015							
13:40	1.704.642	0.230959	0.078906	0.259420	0.578631	0.100716	
12/02/2015							
13:45	1.915.677	0.349939	0.181211	0.155121	0.601591	0.084940	
12/02/2015							
13:50	1.660.479	0.227336	0.206531	0.050834	0.551268	0.096120	
12/02/2015							
13:55	1.835.037	0.236426	0.070489	0.192378	0.490897	0.051288	
12/02/2015							
14:00	1.603.420	0.114083	0.187582	0.186232	0.619846	0.080557	

fecha/hora	armV 13(%)	armV 14(%)	armV 15(%)	armV 16(%)	armV 17(%)	armV 18(%)
12/02/2015						
12:00	0.198573	0.021898	0.152199	0.311346	0.936247	0.109321
12/02/2015						
12:05	0.377244	0.086143	0.059694	0.135528	0.876331	0.146596
12/02/2015						
12:10	0.220916	0.027070	0.147277	0.137232	0.894953	0.063196
12/02/2015						
12:15	0.373192	0.078440	0.106605	0.258342	0.963251	0.220718
12/02/2015						
	0.206179	0.166442	0.130568	0.135539	0.757126	0.084209

12:20							
12/02/2015							
12:25	0.382592	0.171853	0.126867	0.138456	0.908232	0.141842	
12/02/2015							
12:30	0.229141	0.188263	0.181333	0.340435	0.912464	0.229141	
12/02/2015							
12:35	0.167835	0.036408	0.145887	0.184553	0.560140	0.213765	
12/02/2015							
12:40	0.423571	0.256526	0.168339	0.130451	0.875298	0.175664	
12/02/2015							
12:45	0.289182	0.093205	0.115842	0.250270	0.724041	0.209625	
12/02/2015							
12:50	0.428558	0.233567	0.152095	0.209014	0.698595	0.116586	
12/02/2015							
12:55	0.416224	0.163932	0.146750	0.245710	0.755870	0.188480	
12/02/2015							
13:00	0.150545	0.073218	0.119771	0.159604	0.574851	0.190348	
12/02/2015							
13:05	0.044203	0.303591	0.040731	0.106040	0.866059	0.170984	
12/02/2015							
13:10	0.317563	0.115880	0.192391	0.347641	0.937649	0.088812	
12/02/2015							
13:15	0.178896	0.210006	0.082733	0.239706	0.824397	0.142391	
12/02/2015							
13:20	0.267897	0.180269	0.137649	0.327708	0.756400	0.046465	
12/02/2015							
13:25	0.193152	0.237030	0.150967	0.259639	0.673747	0.206463	
12/02/2015							
13:30	0.170569	0.069018	0.063198	0.181699	0.872762	0.085606	
12/02/2015							
13:35	0.418425	0.145911	0.140894	0.320793	0.827919	0.084388	
12/02/2015							
13:40	0.146907	0.364436	0.087323	0.066123	0.474064	0.079348	
12/02/2015							
13:45	0.308982	0.212419	0.097749	0.371035	0.938652	0.128135	
12/02/2015							
13:50	0.254170	0.088448	0.053547	0.254170	0.846861	0.059497	
12/02/2015							
13:55	0.430339	0.240866	0.160602	0.163645	0.852940	0.098395	
12/02/2015							
14:00	0.230680	0.126234	0.174230	0.277827	0.796228	0.141708	
fecha/hora	armV 19(%)	armV 20(%)	armV 21(%)	armV 22(%)	armV 23(%)	armV 24(%)	
12/02/2015							
12:00	0.904628	0.432534	0.069247	0.103960	0.111658	0.038889	
12/02/2015							
12:05	0.655539	0.239773	0.024244	0.198538	0.115159	0.111759	

12/02/2015							
12:10	0.800562	0.208984	0.178026	0.163880	0.188522	0.079616	
12/02/2015							
12:15	0.892695	0.218741	0.180983	0.312663	0.243782	0.105067	
12/02/2015							
12:20	0.663614	0.266774	0.067769	0.319883	0.070688	0.237638	
12/02/2015							
12:25	0.844087	0.248367	0.173611	0.202666	0.204808	0.209844	
12/02/2015							
12:30	0.835832	0.214363	0.156829	0.231023	0.288514	0.068616	
12/02/2015							
12:35	0.423985	0.282345	0.166624	0.152790	0.156599	0.038378	
12/02/2015							
12:40	0.837780	0.241494	0.038219	0.221623	0.206879	0.142620	
12/02/2015							
12:45	0.851977	0.324333	0.179575	0.217926	0.171782	0.062887	
12/02/2015							
12:50	0.927024	0.138666	0.106168	0.265108	0.111911	0.030947	
12/02/2015							
12:55	0.954335	0.260544	0.246980	0.127559	0.179680	0.146122	
12/02/2015							
13:00	0.692209	0.060804	0.086419	0.135963	0.224318	0.031004	
12/02/2015							
13:05	0.800398	0.266746	0.085222	0.148852	0.128803	0.089649	
12/02/2015							
13:10	0.937710	0.236201	0.063863	0.206568	0.206568	0.074435	
12/02/2015							
13:15	0.901384	0.258209	0.115410	0.092648	0.346231	0.069353	
12/02/2015							
13:20	0.861651	0.177669	0.196473	0.134365	0.169960	0.099320	
12/02/2015							
13:25	0.730664	0.271054	0.331610	0.076877	0.286233	0.032729	
12/02/2015							
13:30	0.787808	0.163886	0.078925	0.244015	0.208728	0.146284	
12/02/2015							
13:35	0.795392	0.339838	0.091115	0.197113	0.166796	0.091922	
12/02/2015							
13:40	0.297011	0.089499	0.107112	0.067433	0.124200	0.034486	
12/02/2015							
13:45	0.701937	0.226373	0.059245	0.269691	0.135098	0.159582	
12/02/2015							
13:50	0.919661	0.144884	0.126492	0.087846	0.126211	0.145858	
12/02/2015							
13:55	0.941252	0.266226	0.102754	0.247819	0.233237	0.105733	
12/02/2015							
14:00	0.703330	0.395057	0.117967	0.142722	0.260688	0.080108	

armV 25(%) armV 26(%) armV 27(%) armV 28(%) armV 29(%) armV 30(%)

fecha/hora							
12/02/2015	12:00	0.396634	0.070827	0.073133	0.193015	0.072881	0.104490
12/02/2015	12:05	0.425565	0.057500	0.261747	0.060912	0.198815	0.127281
12/02/2015	12:10	0.369435	0.175956	0.065193	0.145400	0.111284	0.120606
12/02/2015	12:15	0.452008	0.038049	0.234705	0.143001	0.272257	0.128609
12/02/2015	12:20	0.136753	0.038812	0.085077	0.146607	0.387934	0.111439
12/02/2015	12:25	0.263424	0.094249	0.074446	0.131712	0.133002	0.305897
12/02/2015	12:30	0.189559	0.191142	0.276174	0.075913	0.184116	0.142748
12/02/2015	12:35	0.193894	0.000000	0.111560	0.230667	0.209239	0.167395
12/02/2015	12:40	0.249160	0.067563	0.148146	0.083952	0.240660	0.090846
12/02/2015	12:45	0.128039	0.029070	0.182469	0.251684	0.260332	0.090444
12/02/2015	12:50	0.291955	0.116586	0.112894	0.048932	0.205370	0.159657
12/02/2015	12:55	0.255119	0.085160	0.048917	0.263425	0.163256	0.121499
12/02/2015	13:00	0.258115	0.073218	0.141819	0.021923	0.165964	0.079279
12/02/2015	13:05	0.342183	0.081688	0.198243	0.097149	0.128085	0.116636
12/02/2015	13:10	0.349848	0.093044	0.048446	0.208053	0.033404	0.039718
12/02/2015	13:15	0.374763	0.091442	0.136012	0.012165	0.038470	0.151090
12/02/2015	13:20	0.146936	0.032856	0.100623	0.193899	0.402216	0.025156
12/02/2015	13:25	0.030388	0.034381	0.090351	0.115476	0.360433	0.091165
12/02/2015	13:30	0.321735	0.086670	0.042803	0.101471	0.149872	0.203033
12/02/2015	13:35	0.155579	0.027165	0.149409	0.131408	0.274424	0.153310
12/02/2015	13:40	0.285421	0.037405	0.147857	0.133432	0.313902	0.154791
12/02/2015	13:45	0.248702	0.093674	0.162848	0.201102	0.175859	0.012490
12/02/2015	13:50	0.254170	0.053877	0.077574	0.155148	0.101319	0.166697
12/02/2015		0.330897	0.130199	0.224375	0.122389	0.169350	0.068916

fecha/hora	FOT THD_I	arml 1(%)	arml 2(%)	arml 3(%)	arml 4(%)	arml 5(%)	arml 6(%)
13:55							
12/02/2015							
14:00	0.201392	0.030022	0.060343	0.166830	0.319192	0.045728	
12/02/2015							
12:00	3.781.109	100.000.000	0.582733	0.107903	0.130626	1.694.542	0.060111
12/02/2015							
12:05	6.043.025	100.000.000	0.439130	1.570.239	0.156006	0.817618	0.258554
12/02/2015							
12:10	3.647.152	100.000.000	0.465420	0.402372	0.407884	2.024.214	0.051168
12/02/2015							
12:15	3.662.559	100.000.000	0.552467	0.322994	0.097405	1.828.863	0.062744
12/02/2015							
12:20	3.723.616	100.000.000	0.498679	0.198441	0.279540	1.848.573	0.115793
12/02/2015							
12:25	5.819.017	100.000.000	0.335952	0.587195	0.124480	1.010.952	0.014335
12/02/2015							
12:30	6.787.535	100.000.000	0.676627	0.966489	0.776599	0.268294	0.418991
12/02/2015							
12:35	3.847.522	100.000.000	1.142.777	0.099706	0.226050	1.866.880	0.209071
12/02/2015							
12:40	3.874.138	100.000.000	0.450617	0.331192	0.299486	1.516.854	0.187950
12/02/2015							
12:45	4.514.858	100.000.000	0.617656	0.609887	0.126734	1.624.520	0.053089
12/02/2015							
12:50	3.756.773	100.000.000	0.213097	0.040167	0.413541	1.568.207	0.271773
12/02/2015							
12:55	6.812.368	100.000.000	1.141.040	0.711037	0.168578	0.637299	0.105020
12/02/2015							
13:00	7.590.363	100.000.000	0.767389	0.692774	0.253364	1.254.243	0.331392
12/02/2015							
13:05	4.687.008	100.000.000	0.363113	0.372943	0.031701	0.768737	0.090778
12/02/2015							
13:10	9.414.222	100.000.000	0.676197	0.284196	0.608885	0.580922	0.156152
12/02/2015							
13:15	5.814.999	100.000.000	0.581702	0.720332	0.065586	0.722739	0.081350
12/02/2015							
13:20	13.952.662	100.000.000	1.541.220	0.476922	0.696407	2.139.303	0.217436
12/02/2015							
13:25	10.526.707	100.000.000	1.301.093	0.787791	0.167116	1.588.031	0.302833
12/02/2015							
13:30	10.939.979	100.000.000	1.785.036	1.265.354	0.416860	1.175.090	0.260290
12/02/2015							
13:35	13.343.204	100.000.000	1.569.975	0.893069	0.714147	0.821995	0.221944
12/02/2015							
13:40	10.241.784	100.000.000	0.791343	0.178820	0.382854	0.815150	0.168429

12/02/2015	13:45	3.786.317	100.000.000	0.409960	1.336.722	0.261289	1.553.262	0.208508
12/02/2015	13:50	3.735.651	100.000.000	0.244425	0.402334	0.451815	1.724.087	0.284493
12/02/2015	13:55	3.954.022	100.000.000	0.790721	1.647.046	0.198578	1.463.805	0.202631
12/02/2015	14:00	7.836.230	100.000.000	1.343.654	1.487.715	0.487313	0.925408	0.054546

fecha/hora	arml 7(%)	arml 8(%)	arml 9(%)	arml 10(%)	arml 11(%)	arml 12(%)	
12/02/2015	12:00	2.121.761	0.173989	0.293186	0.153385	0.156495	0.134711
12/02/2015	12:05	2.863.660	0.035673	0.390882	0.136132	0.933315	0.245293
12/02/2015	12:10	2.064.872	0.251055	0.298488	0.198561	0.483277	0.189432
12/02/2015	12:15	1.650.355	0.332246	0.226226	0.222807	0.239744	0.138606
12/02/2015	12:20	1.969.803	0.037702	0.127780	0.194135	0.671273	0.100900
12/02/2015	12:25	2.551.877	0.152388	0.323677	0.261677	0.660833	0.313157
12/02/2015	12:30	3.034.424	0.453352	0.249660	0.230719	0.505161	0.147542
12/02/2015	12:35	1.692.110	0.133972	0.228857	0.124390	0.205149	0.351937
12/02/2015	12:40	2.187.265	0.098697	0.248653	0.167692	0.038345	0.099439
12/02/2015	12:45	2.035.724	0.125817	0.254987	0.257773	0.286435	0.188674
12/02/2015	12:50	2.076.441	0.202297	0.307568	0.185769	0.210402	0.089156
12/02/2015	12:55	2.987.296	0.418400	0.507956	0.287259	1.053.264	0.272518
12/02/2015	13:00	3.066.185	0.098264	0.690737	0.383073	1.180.719	0.336849
12/02/2015	13:05	2.262.678	0.082423	0.082666	0.099240	0.495552	0.224071
12/02/2015	13:10	3.415.605	0.053343	0.123071	0.339052	0.664310	0.056916
12/02/2015	13:15	2.435.077	0.373346	0.308835	0.238998	0.521092	0.178692
12/02/2015	13:20	5.697.537	0.715648	0.452843	0.578766	1.628.802	1.147.997
12/02/2015	13:25	3.983.353	0.518250	0.652049	0.508204	0.419713	0.555593
12/02/2015		4.538.818	0.469976	0.323776	0.571590	0.694521	0.116798

13:30							
12/02/2015							
13:35	5.091.997	0.656367	0.439063	0.107746	1.147.005	0.249825	
12/02/2015							
13:40	4.634.928	0.223644	0.370339	0.430696	1.666.592	1.054.601	
12/02/2015							
13:45	2.138.083	0.243636	0.180152	0.150900	0.292044	0.032457	
12/02/2015							
13:50	1.559.254	0.284138	0.177898	0.247216	0.241517	0.020092	
12/02/2015							
13:55	2.160.357	0.270659	0.184903	0.326421	0.536680	0.179662	
12/02/2015							
14:00	3.750.214	0.402825	0.419523	0.062376	1.239.735	0.105899	
12/02/2015							
14:05	3.993.168	0.313325	0.705426	0.612352	0.944951	0.221554	