



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Eléctrica

**Calidad de onda de una instalación
fotovoltaica. Influencia de las condiciones
atmosféricas**

Autor:

Deza Blanco, Mario

Tutor:

**Duque Pérez, Óscar
Ingeniería Eléctrica**

Valladolid, junio 2024.

Resumen

La calidad de energía eléctrica es un indicador del nivel de adecuación de la instalación para soportar y garantizar un buen funcionamiento de sus cargas. Dichas perturbaciones eléctricas pueden originarse en las instalaciones del usuario, las cargas del usuario o la compañía eléctrica.

En la época que vivimos debemos tener monitorizado todas las señales de corriente eléctrica para un buen funcionamiento de los elementos finales.

Se estudiará las causas de los problemas relacionados con la calidad de onda y sus posibles soluciones para paliarlos.

Finalmente se hará un estudio de las ondas eléctricas de la instalación fotovoltaica del Hospital Universitario Río Ortega, se expondrá cómo está diseñada la instalación y se monitorizará con un dispositivo FLUKE que nos dará múltiples valores con el cual crearemos un código en Matlab donde se llegarán a una serie de resultados y conclusiones entre la irradiancia absorbida por los paneles y los diferentes parámetros.

Palabras clave

Electricidad, armónicos, generación fotovoltaica, irradiancia, Matlab.

Abstract

The quality of electrical energy is an indicator of the level of adequacy of the installation to support and guarantee proper functioning of its loads. Such electrical disturbances may originate from the user's premises, the user's loads, or the power company.

In the times we live in, we must have all electrical current signals monitored for the proper functioning of the final elements.

The causes of the problems related to wave quality and their possible solutions to alleviate them will be studied.

Finally, a study will be made of the electrical waves of the photovoltaic installation of the Río Ortega University Hospital, we will talk about how the installation is designed and it will be monitored with a FLUKE device that will give us multiple values with which we will create a code in Matlab where we will arrive at a series of results and conclusions between the irradiance absorbed by the panels and the different parameters.

Keywords

Electricity, armonics, photovoltaic generation, irradiance, Matlab.

*Querría dar un agradecimiento especial a mi tutor,
Oscar Duque, que ha sido durante todo el año mi
profesor que me ha guiado con este proyecto y
me ha estado enseñando los amplios fundamentos
técnicos sobre el tema en cuestión.*

*Por otra parte, quiero dar un agradecimiento enorme
a mi familia y amigos, en especial a mi madre Mavi,
todos ellos que me han ayudado y sobre todo apoyado
en los años que he estado cursando este maravilloso
Grado en Ingeniería Eléctrica.*

Contenido

1.	CALIDAD DE ONDA	13
1.1.	INTRODUCCIÓN	13
1.2.	IMPORTANCIA ACTUAL	13
1.3.	CONCEPTO DE CALIDAD DE ONDA.....	13
1.4.	TIPOS DE PERTURBACIONES.....	14
1.4.1.	VARIACIONES DE FRECUENCIA	14
1.4.2.	VARIACIONES LENTAS DE TENSIÓN.....	17
1.4.4.	HUECOS DE TENSIÓN	20
1.4.5.	TASA DE DISTORSIÓN ARMÓNICA (THD)	22
2.	DISTORSIÓN DE LAS ONDAS DE TENSIÓN E INTENSIDAD: ARMÓNICOS	29
2.1.	DEFINICIÓN Y ASPECTOS GENERALES DE LOS ARMÓNICOS.....	30
2.2.	PARÁMETROS FUNDAMENTALES DE LOS ARMÓNICOS	31
2.3.	ORIGEN DE LOS ARMÓNICOS: CARGAS NO LINEALES.	33
2.4.	MODELO UTILIZADO EN LOS CÁLCULOS.....	35
2.5.	EFFECTOS DE LOS ARMÓNICOS EN LOS COMPONENTES DEL SISTEMA ELÉCTRICO	36
2.6.	SERIES DE FOURIER	42
3.	GENERACIÓN FOTOVOLTAICA.....	47
3.1.	ARMONICOS EN LAS INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS SOLARES	49
3.1.1.	SOLUCIONES PARA DISMINUIR EL EFECTO DE LOS ARMÓNICOS 50	
4.	HOSPITAL UNIVERSITARIO RIO ORTEGA	58
4.1.	INSTALACION FOTOVOLTAICA	58
4.2.	PLANOS DEL HOSPITAL UNIVERSITARIO RIO ORTEGA.....	61
5.	ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS EN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA.....	67
5.1	MEDIDAS REALIZADAS ANTES DE LA CONEXIÓN DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA.....	68
5.2	MEDIDAS REALIZADAS DESPUÉS DE LA CONEXIÓN DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA.....	70
5.3	INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS EN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA PRODUCIDA.....	71
6.	CONCLUSIONES.....	91
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	96

Índice de figuras

Figura 1- Valor referencia de la onda de frecuencia. Fuente: [1].....	15
Figura 2 - Imagen representativa del uso de la electricidad. Fuente: [2]	16
Figura 3 - Variación lenta de tensión durante un tiempo relativamente prolongado. Fuente: [3]	17
Figura 4 – Fluctuación de una onda. Fuente: [5]	18
Figura 5 - Hueco de tensión en onda. Fuente: [11].....	20
Figura 6 - Resultado es una deformación de la corriente. Fuente: [12].....	30
Figura 7 – Perdidas en un motor por efecto de armónicos. Fuente: [17]	38
Figura 8 - Ejemplo de instalación de energía solar fotovoltaica de autoconsumo. Fuente: [18].....	47
Figura 9 - Esquema general de una instalación fotovoltaica aislada. Fuente: [21]	48
Figura 10 – Esquema de interconexión entre producción, distribución y consumo Fuente: [22]	48
Figura 11 – Situación instalación fotovoltaica Hospital Universitario Río Ortega. Fuente: [Propia].....	58
Figura 12 - Situación instalación fotovoltaica Hospital Universitario Río Ortega. Fuente: [Propia].....	61
Figura 13- Distribución en planta de los inversores en función de los paneles. Fuente: [Propia].....	62
Figura 14- Índice de color según conexionado. Fuente: [Propia]	63
Figura 15: Armónico de tensión antes de la instalación fotovoltaica. Fuente: [Propia].....	68
Figura 16: Armónico de corriente antes de la instalación fotovoltaica. Fuente: [Propia].....	69
Figura 17: Flicker antes de la instalación fotovoltaica. Fuente: [Propia].....	69
Figura 18: Armónico de tensión después de la instalación fotovoltaica. Fuente: [Propia].....	70
Figura 19: Armónico de corriente después de la instalación fotovoltaica. Fuente: [Propia].....	70
Figura 20: Flicker después de la instalación fotovoltaica. Fuente: [Propia]....	71
Figura 21 - Valor de potencia activa mínima 27 de octubre. Fuente: [Propia]	72
Figura 22 - Valor de potencia activa media 27 de octubre. Fuente: [Propia]..	72
Figura 23 - Valor de potencia activa máxima 27 de octubre. Fuente: [Propia]	73
Figura 24 - Valor de potencia reactiva mínima 27 de octubre. Fuente: [Propia]	73
Figura 25 - Valor de potencia reactiva media 27 de octubre. Fuente: [Propia]	74
Figura 26 - Valor de potencia reactiva máxima 27 de octubre. Fuente: [Propia]	74
Figura 27 - Valor de frecuencia 27 de octubre. Fuente: [Propia]	75

Figura 28- Valor de Irradiancia 4-20 de julio. Fuente: [Propia].....	75
Figura 29 - Valor de tasa de distorsión armónica mínima de tensión 4-20 de julio. Fuente: [Propia].....	76
Figura 30 - Valor de tasa de distorsión armónica media de tensión 4-20 de julio. Fuente: [Propia].....	76
Figura 31 - Valor de tasa de distorsión armónica máxima de tensión 4-20 de julio. Fuente: [Propia].....	76
Figura 32 - Valor de tasa de distorsión armónica mínima de intensidad 4-20 de julio. Fuente: [Propia].....	77
Figura 33 - Valor de tasa de distorsión armónica media de intensidad 4-20 de julio. Fuente: [Propia].....	77
Figura 34 - Valor de tasa de distorsión armónica máximo de intensidad 4-20 de julio. Fuente: [Propia].....	77
Figura 35 - Valor de Pst 4-20 de julio. Fuente: [Propia]	78
Figura 36 - Valor de Plt 4-20 de julio. Fuente: [Propia]	78
Figura 37 - Valor de Irradiancia 27 de octubre. Fuente: [Propia]	79
Figura 38 - Valor de tasa de distorsión armónica mínima de tensión 27 de octubre. Fuente: [Propia].....	79
Figura 39 - Valor de tasa de distorsión armónica media de tensión 27 de octubre. Fuente: [Propia].....	79
Figura 40 - Valor de tasa de distorsión armónica máxima de tensión 27 de octubre. Fuente: [Propia].....	80
Figura 41 - Valor de tasa de distorsión armónica mínima de intensidad 27 de octubre. Fuente: [Propia].....	80
Figura 42 - Valor de tasa de distorsión armónica media de intensidad 27 de octubre. Fuente: [Propia].....	80
Figura 43 - Valor de tasa de distorsión armónica máximo de intensidad 27 de octubre. Fuente: [Propia].....	81
Figura 44 - Valor de Pst 27 de octubre. Fuente: [Propia].....	81
Figura 45 - Valor de Plt 27 de octubre. Fuente: [Propia].....	81
Figura 46 - Valor de Irradiancia 29 de octubre. Fuente: [Propia]	82
Figura 47 - Valor de tasa de distorsión armónica mínima de tensión 29 de octubre. Fuente: [Propia].....	82
Figura 48 - Valor de tasa de distorsión armónica media de tensión 29 de octubre. Fuente: [Propia].....	83
Figura 49 - Valor de tasa de distorsión armónica máxima de tensión 29 de octubre. Fuente: [Propia].....	83
Figura 50 - Valor de tasa de distorsión armónica mínima de intensidad 29 de octubre. Fuente: [Propia].....	84
Figura 51 - Valor de tasa de distorsión armónica mínima de intensidad 29 de octubre. Fuente: [Propia].....	84
Figura 52 - Valor de tasa de distorsión armónica máxima de intensidad 29 de octubre. Fuente: [Propia].....	85
Figura 53 - Valor de Pst 29 de octubre. Fuente: [Propia].....	85
Figura 54 - Valor de Plt 29 de octubre. Fuente: [Propia].....	85

Figura 56 - Valor de variación del THDI 4-20 de julio. Fuente: [Propia]	86
Figura 57 - Valor de variación del THDI 27 de octubre. Fuente: [Propia]	87
Figura 58 - Valor de variación del THDV 27 de octubre. Fuente: [Propia]	87

1. CALIDAD DE ONDA

1. CALIDAD DE ONDA

1.1. INTRODUCCIÓN

Desde hace un tiempo, no solo se prestó atención a que la energía eléctrica producida por un sistema generador llegase a su punto de suministro y fuese consumida, sino también que se empezó a estudiar la importancia de la calidad de dicha energía, siendo relevante las interrupciones que se producían y los posibles fallos en la instalación.

Por ello se lleva a cabo una serie de normas según la legislación vigente, que vela por la continuidad de suministro con la que la forma de onda sinusoidal deba tener una determinada amplitud y frecuencia.

1.2. IMPORTANCIA ACTUAL

Actualmente, el estudio de la calidad de la energía eléctrica ha adquirido mucha preponderancia y tal vez la razón más importante es la búsqueda del aumento de productividad y competitividad de las empresas. Asimismo, porque existe una interrelación entre calidad de la energía eléctrica, la eficiencia y la productividad.

Al tener una buena calidad de energía aseguramos que todos los equipos conectados al sistema eléctrico funcionarán de forma correcta, segura y confiable. Lamentablemente, en la mayoría de los casos, la calidad de energía no se vuelve relevante para el usuario hasta que se tienen efectos atípicos de funcionamiento o daños, es decir, comienzan a tener fallas recurrentes sin identificar las posibles causas para solucionarlas. Por esta razón, el deterioro de la calidad de energía se vuelve tan importante.

Hoy en día es muy valorado por las empresas buscar una calidad de onda correcta y por eso se invierte mucho más en el estudio de estos fenómenos.

1.3. CONCEPTO DE CALIDAD DE ONDA

El real decreto de 1995/2000 del 1 de diciembre del 2000, regula las condiciones mínimas de calidad del servicio diferenciando 3 aspectos:

1. Continuidad de suministro (número y duración de interrupciones)
2. Calidad del producto (características de la onda de tensión)
3. Calidad en la atención y relación con el cliente.

Los dos primeros puntos hacen referencia a la calidad del suministro de energía eléctrica donde hay 2 aspectos concretos:

- La continuidad del servicio y la calidad de onda.
- La calidad de onda hace referencia a la degradación de algunos parámetros de la onda en algún punto de la instalación.

Una mala calidad puede producir unos efectos negativos en el consumidor final que producen armónicos, pérdida de sincronismo al variar la frecuencia fundamental, reinicio de los equipos electrónicos, etc.

Esta mala calidad se puede deber tanto a los propios clientes como a los operadores del sistema.

Se debe tener en cuenta que una variación en un punto puede repercutir en otros puntos alejados kilométricamente a través de las redes de transporte y distribución.

Los efectos nocivos que puede causar una mala calidad de onda pueden ser:

- Errores en los ordenadores y equipos informáticos.
- Daños o mal funcionamiento de sistemas de control.
- Mal funcionamiento de los equipos de protección: disparo de los interruptores y fusibles.
- Sobrecalentamiento de los transformadores y aparición de la ferresonancia.
- Sobrecalentamiento de las maquinas rotativas.
- Disminución de la vida útil de las maquinas.
- Reducción de la efectividad del sistema eléctrico.
- Interferencias en las redes de comunicación.
- Mal comportamiento de las cargas eléctricas.
- Errores de medición del consumo de energía.

1.4. TIPOS DE PERTURBACIONES

En este apartado se van a comentar diferentes perturbaciones que alteran la onda sinusoidal perfecta.

1.4.1. VARIACIONES DE FRECUENCIA

VALORES DE REFERENCIA

En condiciones normales de operación, el valor promedio de la frecuencia fundamental en los sistemas de distribución, durante 10 segundos, es, según la EN 50.160.

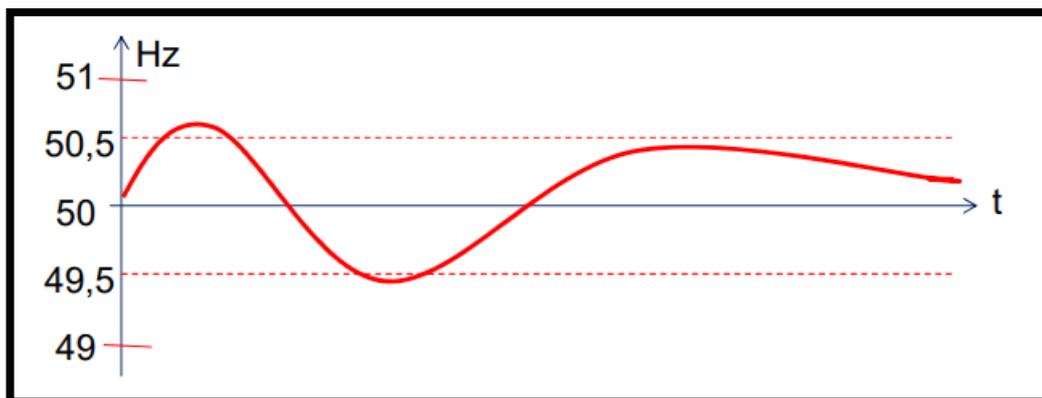


Figura 1- Valor referencia de la onda de frecuencia. Fuente: [1]

Para redes acopladas por enlaces síncronos a un sistema interconectado:

- 50 Hz \pm 1% (49,5... 50,5 Hz) durante el 95% de una semana
- 50 Hz -6%, +4% (47... 52 Hz) durante el 100% de una semana

Para redes en funcionamiento aislado:

- 50 Hz \pm 2% (49... 51 Hz) durante el 95% de una semana
- 50 Hz \pm 15% (42,5... 57,5 Hz) durante el 100% de una semana

CAUSAS

- Carga superior a generación:

La velocidad de caída de la frecuencia dependerá de la reserva de energía rodante:

- De la constante de inercia del conjunto de los generadores conectados
- Si la disminución de la frecuencia es superior al margen de tolerancia puede llegar a producirse un colapso en el sistema
- Un incremento brusco de la carga hará que los alternadores pierdan algo de velocidad. Los sistemas de regulación de los alternadores lo detectan y suministran energía mecánica adicional a las turbinas, así, el incremento de carga se reparte entre todos los generadores conectados a la red y se alcanza un nuevo equilibrio entre carga y generación
- Carga inferior a generación: aumentando la frecuencia.

La relación entre la variación de carga y de frecuencia depende del número y capacidad de los generadores conectados a la red. Es más desfavorable en sistemas aislados, que en grandes redes interconectadas. En

el sistema interconectado europeo se obtienen valores del orden de 12.000 MW/Hz. En un sistema aislado de 120 MVA, \cong 60 MW/Hz.

EFFECTOS

- Los motores transmiten más o menos potencia.
- Los relojes eléctricos sincronizados con red atrasan o adelantan
- Los filtros de armónicos sufren un efecto distorsionador
- Alteraciones en equipos electrónicos que utilizan la frecuencia como referencia de tiempo.
- Las turbinas de las centrales eléctricas se encuentran sometidas a fuertes vibraciones que suponen un severo esfuerzo de fatiga
- Posibles problemas en el funcionamiento de instalaciones de autogeneración.

ACCIONES DE PREVENCIÓN Y CORRECCIÓN

Para prevenir fuertes variaciones transitorias de frecuencia que pudieran afectar gravemente a los equipos conectados, se recomienda disponer de un sistema de deslastre por frecuencia.

Por ello se debe cumplir siempre la siguiente ecuación:

$$\sum POTENCIA\ GENERADA = \sum POTENCIA\ DEMANDADA + \sum PERDIDAS$$

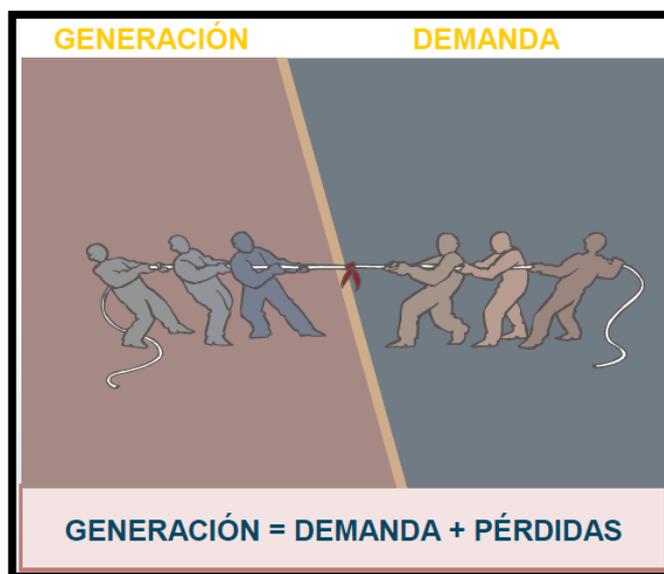


Figura 2 - Imagen representativa del uso de la electricidad. Fuente: [2]

1.4.2. VARIACIONES LENTAS DE TENSIÓN

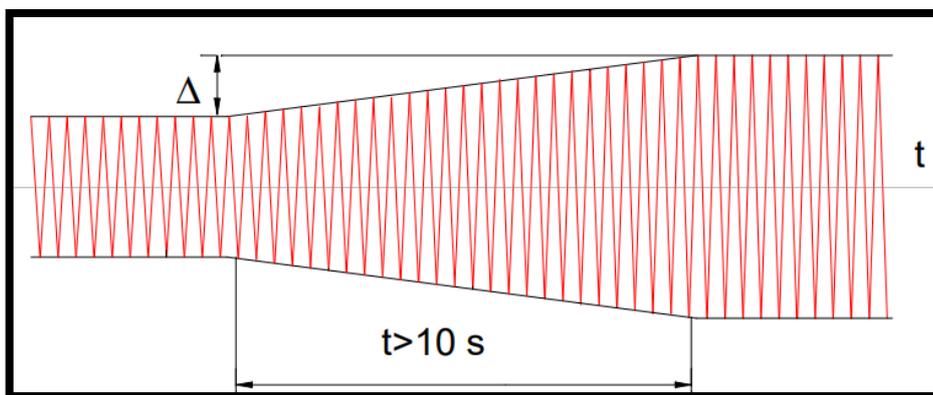


Figura 3 - Variación lenta de tensión durante un tiempo relativamente prolongado. Fuente: [3]

DEFINICIÓN

Alteración en la amplitud de la onda de tensión superior a 10 segundos

VALORES DE REFERENCIA

Se establece un margen admisible del $\pm 7\%$ respecto de la tensión nominal

CAUSAS

Planificación de la red: red demasiado cargada, líneas demasiado largas, problemas de regulación de los transformadores, o por variaciones importantes de la carga

EFECTOS

<u>RECEPTOR</u>	<u>TENSION BAJA</u>	<u>TENSION ALTA</u>
Lámparas incandescentes	Menor intensidad de lumínica	Intensidad luminosa alta
Lampara de descarga	No se ceban en su conexión	Intensidad lumínica similar
Motores	Sin par de arranque	Calentamiento
Relés, contactores	Posible desconexión	Calentamiento

MEDIDAS DE CORRECCIÓN Y PREVENCIÓN

- Transformadores de regulación
- Instalación de protecciones de máxima y mínima tensión temporizadas para la protección térmica de los equipos

1.4.3. FLUCTUACIONES DE TENSIÓN

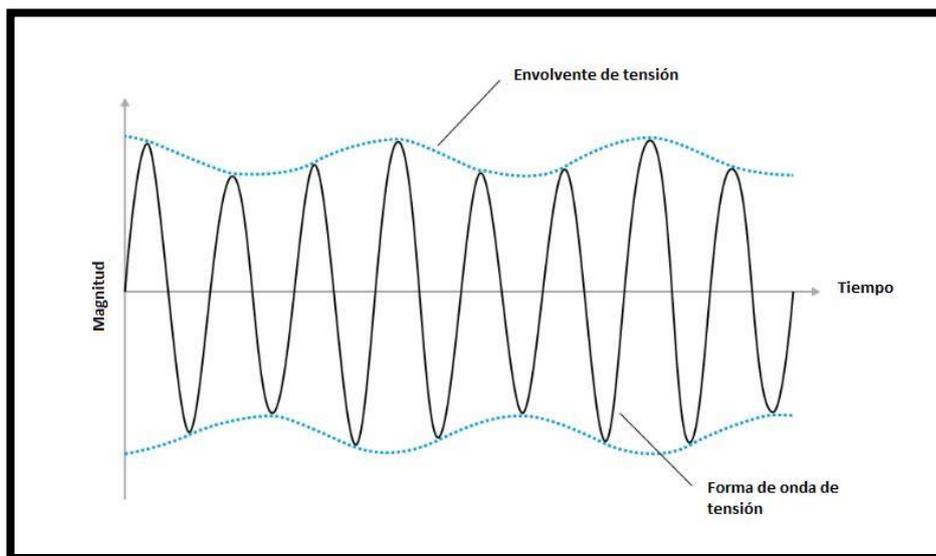


Figura 4 – Fluctuación de una onda. Fuente: [5]

DEFINICIÓN

Variaciones periódicas o aleatorias. Duración de varios ms hasta unos 10 s y con una amplitud que no supera el $\pm 10\%$ del valor nominal.

CAUSAS

Receptores de tipo industrial cuya demanda de potencia no es constante en el tiempo:

- Máquinas de soldadura por resistencia
- Molinos trituradores
- Ventiladores de minas
- Hornos de arco
- Plantas de soldadura por arco
- Compresores
- Laminadoras
- Máquinas herramientas
- Cargas controladas por impulsos

EFECTO

El “flicker” es la percepción de la variación de la luminosidad de una lámpara, ocasionada por fluctuaciones de tensión. Origina en quien lo percibe una sensación desagradable.

Depende de la amplitud, frecuencia y duración de las fluctuaciones de tensión que lo causan.

Según el Vocabulario Electrotécnico Internacional (IEV) [2] del Comité Electrotécnico Internacional (IEC), el parpadeo se define como "Impresión de inestabilidad de la sensación visual inducida por un estímulo de luz cuya luminancia o distribución espectral fluctúa con el tiempo". Desde un punto de vista más práctico, se puede decir que las fluctuaciones de voltaje en la red de suministro provocan cambios en la luminancia de las lámparas, que a su vez pueden crear el fenómeno visual llamado parpadeo. Si bien un pequeño nivel de parpadeo puede ser aceptable, por encima de cierto umbral se vuelve molesto para las personas presentes en una habitación donde existe el parpadeo. El grado de molestia aumenta muy rápidamente con la amplitud de la fluctuación. Más adelante, a ciertas tasas de repetición de la fluctuación de voltaje, incluso las pequeñas amplitudes de fluctuación pueden resultar molestas.

La influencia del fenómeno del parpadeo en las personas es compleja de analizar dado que depende no sólo de aspectos técnicos como las características de la lámpara a la que se aplica el voltaje fluctuante sino también de la apreciación del fenómeno por parte del ojo / cerebro de cada individuo.

Hay dos índices básicos para evaluar la severidad de flicker:

- Pst: Evalúa la severidad del flicker en periodos cortos de tiempo, con intervalos de observación de 10 minutos, en v.p.u. Si $Pst > 1$, el flicker es perceptible y afecta, por tanto, a la visión.
- Plt: Evalúa la severidad del flicker a largo plazo, con intervalos de observación de 2 horas. Se calcula a partir de 12 valores consecutivos de Pst de acuerdo con la expresión:

$$Plt = \frac{\sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} (Pst)_i^3}}{12}$$

ACCIONES DE PREVENCIÓN Y CORRECCIÓN

- Determinación de las condiciones de conexión de cargas.
- Aumentar la potencia de cortocircuito en el punto de suministro.

- Instalar compensadores que dan lugar a variaciones de signo opuesto a la carga fluctuante.
- Arrancar los motores en estrella-triángulo o con autotransformador.
- Conectar condensadores en serie, aumentando así artificialmente la potencia de cortocircuito. Es una solución que se debe adoptar solo en los puntos de menor tensión de una red.
- Evitar la simultaneidad de pulsaciones de las máquinas de soldadura con circuitos de control adecuados.

•

1.4.4. HUECOS DE TENSIÓN

Se dice que ha tenido lugar un hueco de tensión en un punto de la red eléctrica cuando la tensión de una o más fases cae repentinamente por debajo de un límite establecido situado entre el 90% y el 1% del valor nominal y se recupera después de un corto período de tiempo que oscila entre medio ciclo (10 ms) y un minuto.

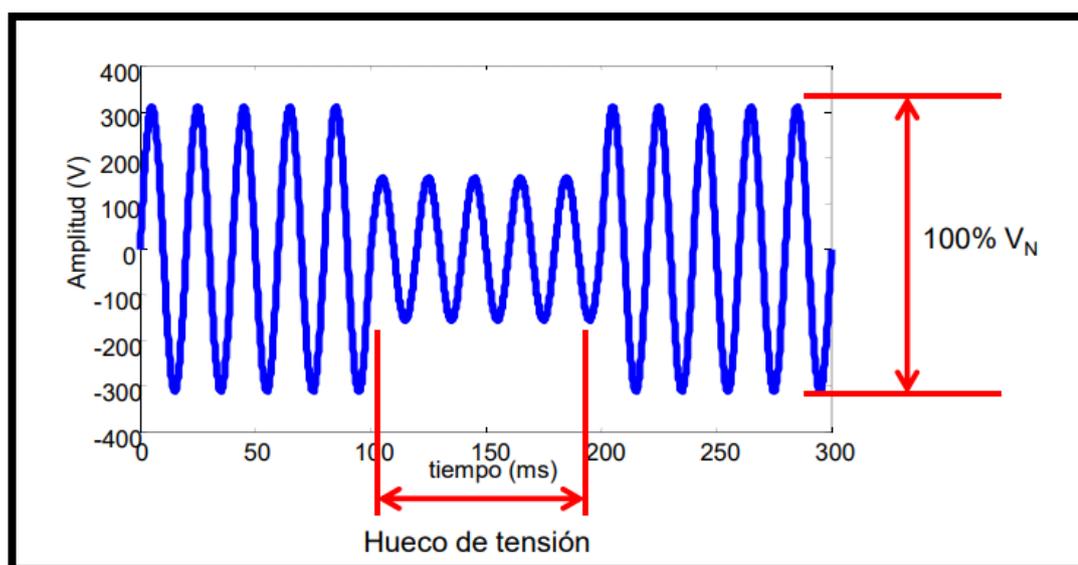


Figura 5 - Hueco de tensión en onda. Fuente: [11]

CAUSAS

- Cortocircuitos en algún punto de la instalación.
- Actuación defectuosa de pararrayos.
- Fallos de aislamiento.
- Falta de un mantenimiento adecuado en la instalación.
- Acciones de carácter accidental y fenómenos meteorológicos adversos.
- Arranque de grandes cargas o demandas transitorias de intensidad elevada por parte de algún equipo.

- Mal diseño de la instalación en cuanto a secciones de los conductores, o por ampliaciones de carga.

EFFECTOS

- Motores asíncronos: disminuye el par motor dando lugar a una ralentización que se prolonga hasta que se recupera la tensión o, incluso, a la parada del motor.
- Si la duración del hueco es mayor de 1 s. la corriente de reaceleración de los motores será de orden semejante a la del arranque lo que puede dar lugar a un nuevo hueco de tensión que, en el peor de los casos, impediría la reaceleración.
- En general, huecos menores de un 30% no originan parada, independientemente de cuál sea su duración, ya que se alcanza un nuevo equilibrio par motor-par resistente a velocidad inferior.
- Motores síncronos: Disminuye el par motor, que es proporcional a la tensión, y puede llegar a caer fuera de sincronismo si su duración es elevada y la inercia del motor pequeña.
- La probabilidad de que esto ocurra no es alta, a no ser que el hueco supere el 50%, dada la gran masa inerte que estos motores poseen generalmente y sus posibilidades de sobreexcitación. Sin embargo, si se produce, sus consecuencias suelen ser importantes.
- Sistemas de control: el control electrónico de procesos actúa en tiempo real, por lo que los huecos de tensión pueden inducir en ellos órdenes erróneas que alteren su funcionamiento.
- Ordenadores: son sensibles a los huecos de tensión, que pueden ocasionar en ellos pérdidas de información o interpretaciones erróneas de órdenes.

MEDIDAS QUE PUEDE ADOPTAR LA EMPRESA SUMINISTRADORA

- Elevar la potencia de cortocircuito de la zona.
- Actuar sobre las instalaciones en las zonas con alto índice de faltas; por ejemplo, resolviendo problemas de contaminación, nieblas, mal estado de los materiales, etc.
- Comprobar que los sistemas de protección contra las sobretensiones atmosféricas son adecuados.
- Operar el sistema separando, si es posible, el punto de conexión del cliente de las zonas que están muy expuestas a faltas; por ejemplo, usando transformadores independientes.

MEDIDAS QUE PUEDE ADOPTAR EL CLIENTE

Para evitar su producción:

- Instalación de arrancadores suaves de tipo apropiado.
- Arranque escalonado de cargas importantes.
- Diseño y ejecución cuidada de las instalaciones.
- Protecciones internas adecuadas: tiempos de actuación apropiados.
- Mantenimiento adecuado.

Para reducir sus repercusiones:

- Alimentación independiente a los circuitos de control y a los circuitos de potencia.
- Alimentación de los circuitos de control con fuentes de muy alta calidad.
- Diseño de los procesos considerando el aprovechamiento de la energía propia almacenada (mecánica, térmica, química, etc.) para mantener el funcionamiento ante huecos de tensión.

1.4.5. TASA DE DISTORSIÓN ARMÓNICA (THD)

DEFINICIÓN

Cuando la onda sinusoidal, prácticamente pura, que generan las centrales eléctricas sufre deformaciones en las redes de alimentación a los usuarios

NIVELES DE REFERENCIA

Para cuantificar el grado de deformación de una onda de tensión o de intensidad que no es sinusoidal pura –aunque sí periódica, con 50 Hz de frecuencia– se recurre a su análisis frecuencial.

A los armónicos se les designa normalmente por su orden, un número que resulta de la relación existente entre su propia frecuencia y la de la componente fundamental.

La propagación de los armónicos se produce desde el nivel de tensión en el que han sido generados, a todos los demás, tanto superiores como inferiores.

Para entender esto mejor debemos explicar unos conceptos antes:

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{N=1}^N I_N^2} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 \dots I_N^2}$$

También ocurre lo mismo con la tensión:

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{N=1}^N V_N^2} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 \dots V_N^2}$$

Y para hallar la tasa de distorsión armónica debemos dividir el valor eficaz de la corriente o tensión, pero si la componente fundamental entre la componente fundamental:

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{N=2}^{40} V_N^2}}{V_1} = \sqrt{V_2^2 + V_3^2 \dots V_{40}^2}$$

Y lo mismo pasaría para la corriente.

CAUSAS

- Cargas de característica no lineal.
- Receptores de uso industrial
- Equipos electrónicos.
- Equipos de arco eléctrico.
- Equipos ferromagnéticos con corriente de magnetización claramente no lineal.

Receptores de uso doméstico:

- Receptores de televisión.
- Aparatos controlados mediante elementos electrónicos (electrodomésticos, reguladores de luminosidad, etc.).
- Lámparas fluorescentes.
- Lámparas de descarga de vapor de sodio.

Elementos de instalaciones eléctricas:

- Dispositivos electrónicos de control y mando que regulan la intensidad absorbida.
- Equipos que poseen núcleos magnéticos cuando funcionan en condiciones de saturación.

Los armónicos de tensión introducidos en la red de distribución, por otro cliente, pueden ocasionar armónicos de tensión en la alimentación de la propia fábrica. El efecto de los armónicos se puede incrementar, de forma importante, si se producen resonancias, entre las baterías de condensadores de corrección del factor de potencia, y las inductancias de la red interior y el transformador de potencia.

EFFECTOS

Depende del valor de las tasas de armónicos y de la sensibilidad de los equipos. La incidencia será menor cuanto mayor sea la potencia de cortocircuito en el punto de conexión

- Condensadores: registran pérdidas adicionales y calentamientos que pueden deteriorarlos.
- Fusibles: pueden sufrir fusión en situaciones de intensidad normal.
- Cables: armónicos de alta frecuencia producen fallos en aislamiento, altos gradientes de tensión y efecto corona.
- Balastos inductivos: el circuito resonante formado por su inductancia y por la capacidad instalada en el sistema de alumbrado ocasiona una amplificación de armónicos que produce, a su vez, un aumento de calor capaz de causar fallos prematuros en estos dispositivos.
- Relés de protección: pueden actuar de manera intempestiva.
- Equipos que están diseñados para utilizar la onda de tensión de la forma más pura posible: como los que se emplean en sistemas de comunicaciones, manipulación de datos, control de procesos electrónicos, etc: Se pueden producir pérdidas de datos o aparición de datos erróneos en ordenadores, operaciones fuera de secuencia en máquinas herramienta o robots controlados por ordenador, etc.
- Sistemas de transmisión de señales por la red: pueden verse afectados cuando existen componentes armónicas cuya frecuencia es parecida a la de la corriente portadora.
- Redes eléctricas: se incrementan las pérdidas por calentamiento, especialmente en conductores neutros de baja tensión, transformadores y motores, degradando los aislamientos y acortando su vida útil.

ACCIONES DE PREVENCIÓN Y CORRECCIÓN

Reglas generales en presencia de equipos generadores de corrientes armónicas

- Sobredimensionar condensadores (en tensión y potencia).
- Sobredimensionar transformadores de potencia.
- Sobredimensionar conductores. La sección del conductor neutro debe ser igual a la de las fases.
- Alimentar separadamente las cargas generadoras de corrientes armónicas del resto de la instalación.
- Estudiar cuidadosamente la posibilidad de resonancia entre baterías de condensadores y reactancias de transformador de potencia y red.

Para evitar la generación de armónicos

- Reducir el consumo de corrientes armónicas por parte de los receptores mediante un cuidadoso diseño de los circuitos electrónicos de potencia.
- Procurar que las máquinas, que utilizan núcleos ferromagnéticos, funcionen en la zona no saturada.

Para evitar la propagación de armónicos

- Inserción de filtros anti armónicos en la alimentación a los circuitos generadores de armónicos.
- Alimentación eléctrica independiente a los receptores generadores de armónicos.
- Transformador con un devanado en triángulo, para evitar los armónicos homopolares.

Para evitar problemas de resonancia

- Diseño y ejecución del centro de transformación, analizando los valores de inductancia del transformador y capacidad de batería de condensadores juntamente con las frecuencias armónicas previsibles.
- Instalación de filtros anti armónicos.

2. DISTORSIÓN DE LAS ONDAS DE TENSIÓN E INTENSIDAD: ARMÓNICOS

2. DISTORSIÓN DE LAS ONDAS DE TENSIÓN E INTENSIDAD: ARMÓNICOS

La forma ideal de la tensión de red es una función senoidal del tiempo con frecuencia constante. Las cargas de tipo lineal conectadas a dicha red originan corrientes también senoidales. Los parámetros que definen este tipo de respuesta son:

- Amplitud: máximo valor instantáneo (V_0 , I_0)
- Período: duración de un ciclo completo (T)
- Frecuencia: número de ciclos por segundo ($f = 1/T$)
- Pulsación: se define como $\omega = 2\pi f$
- Fase: Desplazamiento angular de la función senoidal respecto al origen de ángulos. Además, se usan otros valores para indicar la magnitud de tensiones y corrientes. Estos valores son:
- Valor medio: Es la media aritmética de los valores instantáneos a lo largo de un período. En el caso de una tensión o corriente alterna el valor medio es nulo. En caso de no ser nulo, el valor medio indicaría la presencia de una componente continua.
- Valor eficaz: El valor eficaz de una función periódica es la media cuadrática de la función a lo largo de un período. La importancia del valor eficaz radica en el hecho de que la potencia de un receptor depende precisamente del cuadrado de la tensión o de la corriente. Así pues, el valor eficaz de una magnitud periódica es directamente proporcional a la potencia.

En la práctica estas condiciones de frecuencia y tensión constantes, y la forma de la onda senoidal no suelen cumplirse, ya que los propios generadores y la red de distribución presentan una cierta impedancia interna y otras condiciones no ideales que ocasionan desviaciones con respecto a dicho comportamiento ideal. Así pues, se aceptan como normales ciertas desviaciones en el valor eficaz de la tensión y en la frecuencia, habiéndose establecido normas que marcan los límites tolerados para dichas desviaciones.

No obstante, el valor eficaz de la tensión y la frecuencia, no definen totalmente la "calidad" de una red, puesto que nada indican acerca de la forma de onda o de su posible distorsión con respecto al valor teórico senoidal.

Dicha distorsión se mide, por lo general, por el contenido de armónicos. Su origen es debido a la no linealidad de ciertos receptores que generan una serie de corrientes armónicas y dan lugar a un reparto de dichas corrientes entre la red y las cargas. La tensión de red ya no será por tanto senoidal, sino que resultará distorsionada por la caída de tensión que las corrientes armónicas produzcan sobre la impedancia interna de la red.

2.1. DEFINICIÓN Y ASPECTOS GENERALES DE LOS ARMÓNICOS

Se definen los armónicos como la deformación de la forma de onda senoidal de tensión o intensidad por superposición de senoides de frecuencia múltiple de la fundamental de 50 Hz. Un armónico es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental. Los términos clave en esta definición son "frecuencia fundamental" y "múltiplo entero". La frecuencia fundamental es un punto de referencia arbitrario al cual se relacionan las frecuencias de los armónicos.

Múltiplo entero de la frecuencia fundamental significa multiplicar dicha frecuencia fundamental por un número entero, como 2, 3, 4, etc.

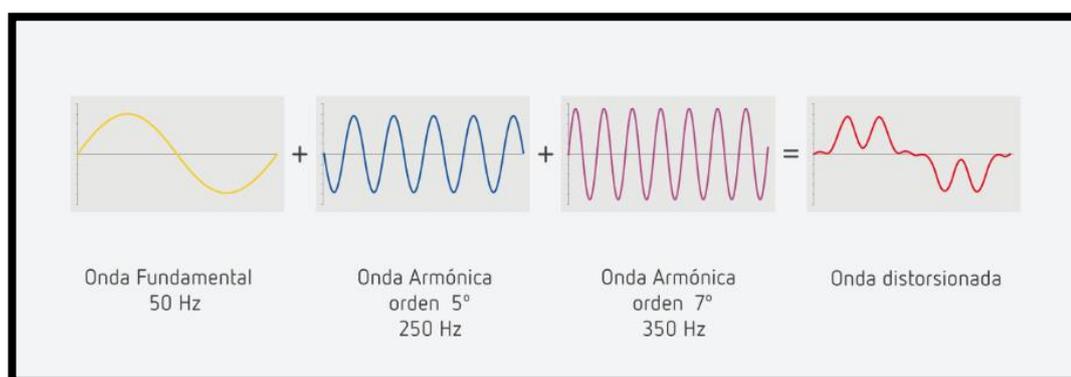


Figura 6 - Resultado es una deformación de la corriente. Fuente: [12]

Los armónicos de corriente de diferentes fuentes producen armónicos de tensión a través de la impedancia de la red. Entre los armónicos de tensión/intensidad se pueden observar frecuencias que no son un múltiplo entero de la fundamental de 50 Hz. Es lo que se denomina interarmónicos. Pueden aparecer tanto en baja tensión como en alta tensión, y como frecuencias discretas o por toda la banda del espectro.

El método de estudio para tratar las corrientes periódicas de forma no senoidal fue propuesto por el matemático francés Jean Baptiste J. Fourier, que demostró que cualquier función periódica acotada, puede descomponerse en una suma de funciones seno y coseno con frecuencias múltiplos enteros de la fundamental.

En la práctica las amplitudes de los armónicos de corriente suelen ser decrecientes a medida que aumenta su número de orden "n", de forma que los armónicos de orden superior a 20 rara vez suelen tener efectos importantes sobre la red y receptores contiguos (salvo resonancias). Lo mismo puede decirse en general de los armónicos de tensión que aparecen en cualquier punto de la red.

Además, la existencia de ciertas simetrías en la onda periódica hace que ésta no contenga algunas de las componentes armónicas. Es importante saber

identificar tales simetrías para conocer qué armónicos estarán presentes a la vista de la forma de onda, o incluso cómo pueden repartirse las cargas para eliminar ciertos armónicos de la red a base de provocar tales simetrías. A continuación, se da un resumen de las simplificaciones más importantes:

- Onda con simetría par: $f(t) = f(-t)$
- Onda con simetría impar: $f(t) = -f(-t)$
- Simetría de media onda respecto al eje de tiempos: $f(t) = -f(t + T/2)$
- Ondas con simetría par y nulas fuera del intervalo de $[-T/(2p), T/(2p)]$, con "p" entero.
- Ondas con varias simetrías simultáneas.

Como ejemplo tomamos la onda típica de un puente rectificador trifásico, a la cual podemos aplicar las siguientes simplificaciones:

- Es una función par $f(t) = f(-t)$ por tanto todos los armónicos tienen fase nula respecto a la componente fundamental.
- Es simétrica respecto al eje de tiempos $f(t) = -f(t + T/2)$ por tanto no contiene armónicos de orden par y en particular no contiene componente continua.
- Cada una de las mitades positivas y negativas son nulas fuera del intervalo $[-T/6, T/6]$ por tanto no contiene armónicos múltiplos de 3.

Como resumen de todo ello vemos que la onda contiene sólo los armónicos 5, 7, 11, 13, 17, 19, en general $3n \pm 1$ con "n" entero.

2.2. PARÁMETROS FUNDAMENTALES DE LOS ARMÓNICOS

Onda compleja: Una onda compleja es una forma de onda creada a partir de añadir a la amplitud de la onda fundamental las amplitudes de los diversos armónicos, en cada instante de tiempo. Las variables que afectan a la apariencia de esta forma de onda incluyen las amplitudes de las diversas componentes (tanto las positivas como las negativas), y los desfases entre dichas componentes. Una onda compleja en general no tiene semejanza con la forma de la onda fundamental o con la forma de onda de cada uno de los armónicos individuales. En los sistemas de potencia de corriente alterna, la componente fundamental es una senoide con una cierta amplitud y una frecuencia de 50 Hz en Europa y 60 Hz en EE. UU. La forma de onda de las componentes armónicas también es sinusoidal con ciertas amplitudes, pero con las frecuencias múltiplos enteros de los 50/60 Hz. La forma de onda

compleja resultante, que consiste en la suma de la componente fundamental más las componentes armónicas, en general no será una senoide.

- Carga no lineal: una carga no lineal es cualquier equipo eléctrico que cambia o modifica la forma de la onda de tensión o de corriente, en una forma de onda que no es sinusoidal. El resultado es una onda compleja.
- Valor eficaz: el valor eficaz mide el efecto de calentamiento de la corriente alterna sobre los distintos equipos del sistema eléctrico de potencia. En un sistema de potencia de corriente alterna sin corrientes armónicas, la onda de intensidad tiene una amplitud que es 1.414 veces el valor eficaz. En otras palabras, el valor eficaz de una corriente es 0.707 veces el valor de pico de la onda de intensidad. Una relación similar existe cuando se consideran las tensiones.
- Factor de cresta: el factor de cresta es la razón del valor de pico de una onda a su valor eficaz. Dicho factor se puede expresar como:

$$\text{Factor de cresta} = \text{Valor de Pico} / \text{Valor eficaz}$$

- El factor de cresta para una onda sinusoidal es siempre 1.414, para una onda compleja puede ser 1.414, o puede ser cualquier otro valor. Para la onda compleja formada principalmente por armónicos impares, o armónicos "triples", es decir, los armónicos múltiplos de 3 (3, 9, 15, etc.), este valor puede variar desde 2.0 a 3.0, y se han registrado valores de hasta 4.0.
- Equipo de medida de valor eficaz: este equipo de medida, que incluye voltímetros y amperímetros, mide el valor medio o el valor de pico de la onda y lo multiplica por 1.112 o 0.707, respectivamente, para indicar su valor eficaz. Esta multiplicación se ejecuta mecánica o electrónicamente, dependiendo del tipo de equipo. Es importante señalar que estos equipos son exactos solamente si la onda es sinusoidal. Utilizando este mismo equipo con una onda compleja puede dar como resultado unos errores de lectura de 25% a 30% por debajo del valor eficaz real. Por lo tanto, no es conveniente utilizarlo para las mediciones derivadas de cargas no lineales. Este aspecto se comenta en varias referencias indicadas en el capítulo 3.
- Equipo de medida de verdadero valor eficaz: este equipo de medida suele utilizar microprocesadores para medir las características eléctricas del sistema. El microprocesador muestrea un elevado número de puntos a lo largo de la onda y entonces calcula su valor eficaz. Este equipo es muy exacto tanto con ondas

sinusoidales como con ondas complejas. El único equipo de verdadero valor eficaz es el térmico.

- Distorsión armónica total (THD): es una condición que existe cuando se suman una o más componentes armónicas a la onda fundamental, alterando su forma.

-

2.3. ORIGEN DE LOS ARMÓNICOS: CARGAS NO LINEALES.

Un receptor o carga se dice que es lineal cuando la tensión aplicada a sus extremos y la corriente que los atraviesa están relacionados por un factor constante. Por el contrario, un receptor es no lineal cuando la relación tensión/corriente no es constante.

Las cargas no lineales conectadas a la red de corriente alterna senoidal absorben corrientes que no son senoidales, aunque por lo general sí son periódicas. Como ejemplos más típicos de tales cargas podemos citar: los convertidores estáticos (grupos rectificadores, reguladores de velocidad, arrancados estáticos, cargadores de baterías, etc.), hornos de arco, instalaciones de iluminación con lámparas de descarga, transformadores (debido a la no linealidad de su circuito magnético en saturación, se produce una deformación de la forma de onda de la intensidad), reactancias con núcleo de hierro, máquinas rotativas, electrodomésticos con equipos de regulación de tensión y potencia, etc..

- Los convertidores estáticos en la red trifásica: Los puentes rectificadores y en general los convertidores estáticos (diodos y tiristores) son generadores de corrientes armónicas. La corriente continua "perfecta" suministrada, impone una corriente alterna compuesta de escalones. El orden y magnitud de estos armónicos se desarrollan en el apartado correspondiente de este trabajo. Los otros convertidores de potencia tales como los graduadores (reguladores), los ciclo convertidores, etc. tienen espectros variables y más ricos en armónicos que los rectificadores. Hay que destacar que poco a poco son reemplazados por los convertidores de técnica PWM (Pulse Width Modulation) que trabajan con una frecuencia de corte de 20 a 50 kHz, y que son normalmente concebidos para generar un débil nivel de armónicos. Las corrientes armónicas de muchos convertidores se combinan vectorialmente, al nivel del juego de barras común de alimentación. Sus fases generalmente no son conocidas, salvo en el caso de rectificadores con diodos. Esto permite, con dos puentes hexafásicos de diodos con cargas iguales, atenuar las corrientes

armónicas de orden 5 y 7, si los dos transformadores de alimentación tienen los acoplamientos adecuadamente escogidos.

- El horno de arco: El horno de arco utilizado en siderurgia puede ser de corriente alterna o de corriente continua.
- Horno de arco de corriente alterna: el arco es no lineal, asimétrico, e inestable. Induce espectros que contienen rayas impares, pares y una componente continua (ruidos de fondo a frecuencias cualesquiera). El nivel espectral es función del tipo de horno, de su potencia, del período de funcionamiento considerado: proceso, afinado, Sólo las medidas pueden determinar el espectro de manera precisa.
- Horno de arco de corriente continua: el arco se alimenta entonces por medio de un rectificador y es más estable que en corriente alterna. La corriente absorbida se descompone en:
 - Un espectro parecido al de un rectificador.
 - Un espectro continuo de nivel inferior al de un horno de corriente alterna.
- El alumbrado: El alumbrado, por lámparas de descarga y tubos fluorescentes, es generador de corrientes armónicas. Un factor individual del 25% del 3er armónico puede ser elevado en algún caso, por lo que se ha de prestar una atención particular a la determinación de la sección y de la protección del conductor neutro que transporta la suma de las corrientes armónicas de las tres fases, con riesgo de un calentamiento elevado.
- Las inductancias saturables: Dichas inductancias tienen su impedancia función de la amplitud de la corriente que circula por ellas, y son las que provocan las deformaciones notables de esta corriente. Este es el caso, en cierta medida, de los transformadores, sometidos a una sobretensión permanente.
- Las máquinas rotativas: Las máquinas rotativas dan los armónicos de ranura de rango elevado y de amplitudes a menudo despreciables. Las pequeñas máquinas síncronas son, sin embargo, generadoras de tensiones armónicas de 3er orden que pueden tener una incidencia sobre:
 - El calentamiento permanente de las resistencias de puesta a tierra del neutro de los alternadores;
 - El funcionamiento de los relés amperimétricos de protección contra los defectos de aislamiento.

2.4. MODELO UTILIZADO EN LOS CÁLCULOS

En la ejecución de los cálculos las fuentes perturbadoras, convertidores estáticos y hornos de arco, se consideran como generadores de corrientes armónicas. En una gran medida, las corrientes armónicas absorbidas por las fuentes perturbadoras son independientes de las otras cargas y del conjunto de las impedancias de la red. Estas corrientes pueden ser igualmente consideradas como inyectadas: es suficiente cambiarles arbitrariamente el signo.

En los cálculos de redes, las fuentes perturbadoras se consideran como verdaderas fuentes de corriente. La aproximación es menos precisa para los hornos de arco. En este caso el modelo para la fuente de corriente debe ser corregido por una impedancia paralela y escogida adecuadamente.

Para el estudio de tales corrientes no senoidales y de los circuitos no lineales debe recurrirse a métodos distintos de los utilizados en el estudio de la teoría de circuitos clásica. Incluso la respuesta de ciertos componentes como inductancias y condensadores que pueden considerarse lineales a frecuencia constante, dejan de serlo para frecuencias variables.

Además, cualquiera de las impedancias que se manejan en el cálculo de armónicos debe calcularse o medirse a la frecuencia de dicho armónico teniendo en cuenta los siguientes puntos:

- Las resistencias R aumentan con la frecuencia debido al efecto "pelicular" (Skin).
- Las inductancias con núcleo pueden aumentar en proporción no lineal con la frecuencia.
- Los condensadores pueden no variar linealmente su impedancia con la frecuencia debido a distintas pérdidas.

En definitiva, para conocer el valor de los armónicos de tensión en un punto cualquiera de la red deberá conocerse el circuito equivalente a la frecuencia de cada armónico. Este es uno de los puntos más difíciles de obtener ya que puede depender del estado de carga de la red y de otros muchos factores poco controlables.

Como consecuencia de los distintos valores de impedancia a cada frecuencia el espectro de armónicos de tensión en un determinado punto de la red puede resultar muy distinto del espectro de corrientes armónicas generadas por las cargas no lineales de la red. Esta diferencia puede ser especialmente importante si aparecen resonancias serie o paralelo a alguna de las frecuencias de los armónicos.

2.5. EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS EN LOS COMPONENTES DEL SISTEMA ELÉCTRICO

Los efectos no deseados de los armónicos o distorsión de la onda de tensión en los equipos eléctricos dan lugar a problemas de daños para los equipos, en los accionamiento u operación y aumento en los costos económicos de una instalación. Estos efectos pueden dividirse en tres apartados:

1. Calentamientos
2. Defectos sobre el aislamiento
3. Fallos de operación

A continuación, se van a describir a qué equipos y cómo son los efectos mencionados anteriormente.

1. CALENTAMIENTOS

El flujo de corrientes armónicas por los equipos eléctricos da lugar en general a un calentamiento adicional debido al aumento de pérdidas, y por lo tanto a envejecimiento prematuro de los aislamientos. Entre los equipos que más sufren este tipo de efecto están las lámparas de incandescencia, motores, generadores, transformadores, reactancias, condensadores y cables.

- Lámparas de incandescencia: Este tipo de lámparas ve muy afectada su vida por tensiones distorsionadas que superen las tensiones nominales, dada la mayor temperatura a la que trabaja el filamento.
- En lámparas de descarga, los únicos efectos que se conocen es la aparición en ciertos casos de un ligero ruido, y la posibilidad de resonancia del equipo de encendido con los armónicos, si bien ésta es poco probable, al encontrarse entre los 75-80 Hz.
- Motores y generadores: El incremento en el calentamiento de generadores y motores se produce por dos efectos diferentes:
 - El primero es el producido por el aumento de la corriente que atraviesa los bobinados con respecto a una corriente perfectamente sinusoidal, y el reparto de esta corriente dentro de los conductores (a mayores frecuencias el efecto pelicular toma mayor importancia, concentrándose la corriente en el exterior de los conductores y aumentando las pérdidas por Joule en esas zonas). Las pérdidas causantes de los calentamientos adicionales en este caso son las pérdidas por Joule en estator y rotor y las pérdidas adicionales, no influyendo apenas las pérdidas en el hierro.

- El segundo está relacionado con el aumento de la resistencia del rotor a altas frecuencias. Dependiendo del tipo de componente de secuencia del armónico, éste se transmite al rotor con una frecuencia " $n+1$ " veces superior al valor del armónico " n " al que pertenecen si son de secuencia negativa, y " $n-1$ " si son de secuencia positiva, dando lugar a un aumento de pérdidas importantes en el rotor. Este efecto es comparable con el funcionamiento de este tipo de equipos en redes con tensiones desequilibradas. En el caso de máquinas síncronas el efecto puede ser aún más perjudicial al fluir parte de las corrientes del rotor por zonas no diseñadas para la circulación de intensidades de corriente alterna. De hecho, algunos autores proponen limitar el contenido de armónicos mediante una equivalencia entre éste y la limitación de corrientes de secuencia negativa permitidas para las máquinas rotativas.

Otro efecto adicional de la presencia de armónicos de tensión en la alimentación a motores es la reducción del par eficaz generado por el motor, equivalente a una reducción en la amplitud de la componente fundamental de la tensión, como consecuencia de los armónicos de secuencia negativa que dan lugar a un campo magnético rotativo que gira en sentido contrario al campo rotativo creado por la componente fundamental.

De estudios realizados, se demuestra que, para limitar estos efectos de los armónicos sobre los motores, no basta con limitar la distorsión total de la onda, ya que algunos armónicos (por ejemplo, el segundo), tienen efectos más perjudiciales que el resto. Asimismo, demuestran que los motores menores de 5 CV se ven más afectados que los grandes.

En relación con la interacción entre armónicos y generadores síncronos, son de destacar los problemas potenciales que pueden aparecer en generadores que alimenten cargas no-lineales aislados de la red, en instalaciones con SAI's alimentados desde grupos de emergencia.

Otro efecto perjudicial es la aparición de vibraciones torsionales debidas a los armónicos, que reducen la vida de los equipos por fatiga, y el aumento del ruido producido por el equipo.



Figura 7 – Pérdidas en un motor por efecto de armónicos. Fuente: [17]

- Condensadores: Las pérdidas en los condensadores son en general pequeñas, y no hay gran información de cómo varían éstas con la frecuencia. El incremento de pérdidas en los condensadores y sus equipos asociados (resistencias de descarga, conexiones, etc.) son también pequeños, pero debido a su pequeño tamaño, éste puede dar lugar a un aumento de la temperatura sustancial, y por lo tanto un acortamiento de la vida de este elemento.
- Este efecto, así como las sobretensiones permanentes a las que se pueden ver sometidos los condensadores, se agravan con la posibilidad de resonancia entre estos y otras partes de la red. Es por ello por lo cual el diseño e instalación de baterías de condensadores en redes con presencia de armónicos se menciona en todas las guías y tratados de diseño de instalaciones de compensación de energía reactiva mediante bancos de condensadores.
- Transformadores y reactancias: En los transformadores, los armónicos causan un aumento de pérdidas en el cobre y adicionales, principalmente por aumento de la circulación de corrientes parásitas y por el efecto pelicular. Del mismo modo, armónicos de secuencia homopolar pueden dar lugar a calentamientos excesivos en zonas no diseñadas para la circulación permanente de corrientes.
- Dos son las soluciones al problema de utilización de transformadores en presencia de armónicos:

sobredimensionamiento del transformador, o un diseño especial, siendo esta segunda medida la más recomendada.

- El primer método se trata en la normativa de construcción de estas máquinas, por ejemplo, en la IEEE C57.110. El segundo se basa en un diseño aparecido recientemente en USA y que cubre los requisitos de transformadores en presencia de armónicos denominado factor k desarrollado por los laboratorios Underwriter's Laboratories [13] y [98], y denominado transformador k-rated asociado a un determinado factor k.
- IEEE C57.110-1986: esta publicación de IEEE detalla dos métodos para sobredimensionar los transformadores como consecuencia del calentamiento adicional que sufren cuando dichos transformadores suministran potencia a cargas que generan un nivel específico de armónicos. Uno realiza un elaborado análisis mediante ordenador del efecto que el calentamiento tiene sobre los transformadores. El otro es más sencillo y se puede realizar utilizando una calculadora manual.
- Los transformadores "K-rated": un transformador k-rated es aquel que se diseña específicamente para operar en su temperatura de diseño mientras suministra potencia a una carga que genera un nivel específico de armónicos. Los cambios en el diseño de estos transformadores, respecto del diseño de transformadores estándar incluyen:
 - ❖ Conductores de hilo múltiple en lugar de conductores sólidos.
 - ❖ Conductores de neutro más grandes.
 - ❖ Conductores paralelos para disminuir el efecto Skin
 - ❖ Modificaciones en el diseño del circuito magnético.
 - ❖ Apantallamiento entre los devanados primario y secundario.
- Estos transformadores se someten a una serie de ensayos por parte del fabricante, de acuerdo con la norma indicada en IEEE C57.110-1986, y se les asigna un factor "K". Valores típicos son: k-4, k-9, k-13, k-15, k-20, etc. Un transformador con un factor k-1 sólo es válido para usarlo con cargas lineales. Actualmente el coste de un transformador k-rated es aproximadamente el doble del coste de un transformador estándar.
- Para determinar este factor se suelen utilizar los valores de por ciento más que los valores actuales reales. Debido a esto la suma de los productos de $(h^2 \times fh^2)$ se divide por la suma de las unidades de porcentaje elevadas al cuadrado (fh^2) , es decir:

$$k = \frac{\sum h^2 * fh^2}{\sum fh^2}$$

- A estos calentamientos que son producidos por los armónicos, se debe tener en cuenta los sobre esfuerzos mecánicos que se pueden producir en los bobinados y el núcleo, y como consecuencia un aumento del ruido.

2. DEFECTOS DE AISLAMIENTO

La presencia de armónicos en el sistema da lugar a sobretensiones y por lo tanto a la probabilidad de aparición del efecto corona, degradación de los aislamientos y fallos en los mismos. Estos efectos se hacen notar principalmente en los bancos de condensadores, asociados a menudo con casos de resonancia, aunque también se han detectado en elementos de protección contra sobretensiones, filtros utilizados en sistemas de comunicación de onda portadora, existiendo incluso una referencia de fallos de cables de 33 kV en Inglaterra debido a armónicos.

3. FALLOS DE OPERACIÓN

Los fallos de operación abarcan un amplio campo de equipos. A continuación, se van a enumerar algunos de los más representativos:

- Interruptores automáticos. La capacidad de corte de corrientes de cortocircuito en interruptores automáticos puede verse afectada por la distorsión de la onda debido a aumentos en la variación de crecimiento de la onda de intensidad, lo cual puede dificultar el apagado del arco; así como a la incapacidad de soplar el arco en los interruptores de soplado magnético.
- Fusibles. Un contenido muy elevado de armónicos puede dar lugar a un calentamiento de los fusibles, que, si bien difícilmente va a dar lugar a su fusión, si desplaza su curva de funcionamiento, dando lugar a operaciones no deseadas y fallo de coordinación con otros dispositivos, especialmente durante fallos de baja magnitud.
- Equipos de medida. Se han desarrollado varios estudios para comprobar los errores de medida en equipos electromecánicos y digitales de medida. Los equipos modernos son relativamente inmunes, con errores menores del 1% en ondas producidas por choppers y ángulos de disparo entre 0 y 135°. En vatímetros de inducción, el error llegaba a alcanzar el 20% con ángulos de disparo de 90°.
- Convertidores y equipos electrónicos. Los equipos electrónicos, incluidos los convertidores, son causantes de la distorsión de la

onda, pero a su vez padecen fallos debidos a la misma. A continuación, se enumeran algunos:

- Los altos valores de la variación de tensión e intensidad en el tiempo dan lugar a fallos en los semiconductores que componen los convertidores.
- Pueden darse fallos en el comportamiento de las cargas alimentadas por convertidores debido a la transmisión de armónicos a través del filtro de salida de estos.
- Aparecen fallos en los equipos magnéticos y periféricos de los ordenadores.
- La lógica de control de muchos equipos electrónicos y de convertidores se basa en los pasos por cero de la tensión de entrada, por lo cual su distorsión da lugar a fallos de operación.
- Algunos equipos electrónicos basan su alimentación en mantener cargado un condensador al valor de pico de la tensión exterior, por lo cual armónicos que disminuyan el pico de tensión dan lugar a tensiones de alimentación a las tarjetas menores que la nominal.
- Relés de protección. Dada la gran variedad de tipos de relés y funciones que implementan, los fallos de operación a que puede dar lugar la distorsión armónica son muy variados. En las referencias pueden encontrarse algunos artículos que tratan este tema en mayor detalle.
- Sistemas de comunicaciones de onda portadora pueden operar de forma errónea en presencia de armónicos.
- Transformadores de medida, principalmente los de tensión, pueden dar lugar a errores de medida.
- Los armónicos de secuencia homopolar pueden requerir un aumento de las secciones de los conductores de neutro y de tierra.
- Los televisores son muy sensibles a armónicos fraccionales, produciéndose distorsiones en las imágenes debidos a estos.
- Pueden darse aumentos de ruidos e incluso descargas en transductores de tensión de tipo capacitivo.
- El ruido electromagnético producido por los armónicos puede dar lugar a fallos de operación en sistemas de control.
- Los armónicos en las líneas de potencia dan lugar a interferencias con las líneas de comunicaciones

2.6. SERIES DE FOURIER

En todo estudio armónico es importante tener en cuenta la descomposición en series de Fourier de una función periódica de período conocido, ya que este camino es la base del estudio de la distorsión armónica. La descomposición en series de Fourier permite calcular las componentes de frecuencias múltiples de la fundamental de una onda periódica.

Esta metodología se estableció cuando el matemático Jean Batiste Joseph Fourier postuló que toda función repetitiva y continua en el intervalo T , puede ser representada por la suma de una componente senoidal fundamental y una serie de componentes armónicas que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.

La serie armónica que resulta es la denominada Serie de Fourier, la cual establece una relación entre la función expresada en el dominio del tiempo y su expresión correspondiente en el dominio de la frecuencia.

En la vida real, la información se obtiene tomando muestras de amplitud a intervalos fijos de tiempo. Cuando la información se obtiene de esa forma, la Transformada de Fourier se convierte en la Transformada Discreta de Fourier y su solución eficaz por ordenador se entiende como la Transformada Rápida de Fourier.

La mayoría de las formas de onda no senoidales se pueden expresar como una suma de componentes senoidales, cada una con distinta frecuencia, amplitud y desplazamiento de fase. Excepto en casos especiales, es necesario teóricamente un número infinito de componentes. Sin embargo, en la práctica suelen resultar suficientes unos cuantos términos para conseguir una aproximación razonable a la onda senoidal deseada. Puesto que se sabe cómo obtener la respuesta particular de cualquier sistema lineal a una fuente senoidal única, se puede utilizar el principio de superposición para hallar primero la respuesta del sistema a cada una de las componentes senoidales, y después, sumar todas estas respuestas. Así la serie de Fourier proporciona un método para descomponer una forma de onda periódica complicada en un número de simples sinusoides, con las que ya se sabe cómo operar. El principio de superposición permite sumar todas estas respuestas para obtener la respuesta particular a la entrada no senoidal.

Suponiendo que se tiene una función periódica del tiempo $f(t)$ y que se quiere desarrollar la serie de Fourier, los coeficientes correspondientes se calculan de la siguiente forma:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos w_0 t + b_1 \operatorname{sen} w_0 t + a_2 \cos 2w_0 t + b_2 \operatorname{sen} 2w_0 t \\ + a_3 \cos 3w_0 t + b_3 \operatorname{sen} 3w_0 t + \dots$$

donde:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) * dt$$

$$a_k = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) * \cos(kw_0 t) * dt$$

$$b_k = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) * \operatorname{sen}(kw_0 t) * dt$$

3. GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

3. GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

La energía fotovoltaica es la transformación directa de la radiación solar en electricidad. Esta transformación se produce en unos dispositivos denominados paneles fotovoltaicos. En los paneles fotovoltaicos, la radiación solar excita los electrones de un dispositivo semiconductor generando una pequeña diferencia de potencial. La conexión en serie de estos dispositivos permite obtener diferencias de potencial mayores.

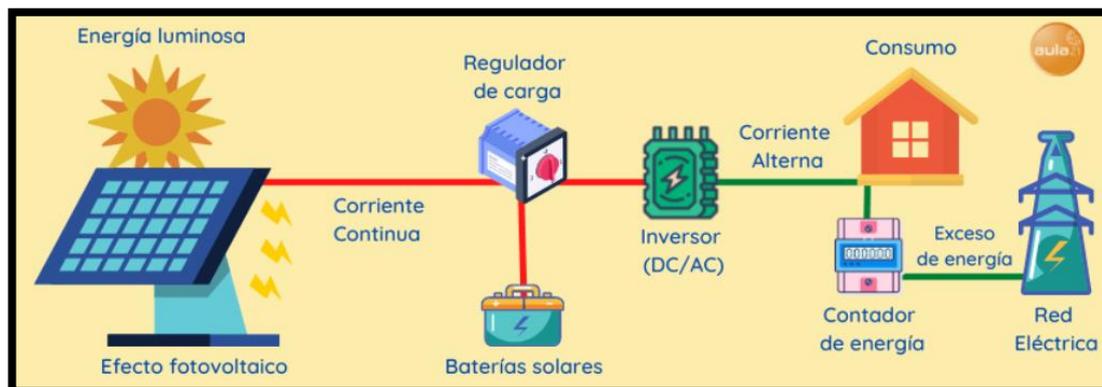


Figura 8 - Ejemplo de instalación de energía solar fotovoltaica de autoconsumo. Fuente: [18]

- Instalación fotovoltaica aislada, o autónoma: es una instalación que no está conectada a la red general de distribución eléctrica, por lo tanto, toda la energía que se consume está producida «in situ» por los paneles solares, aunque en algunos casos, se pueden introducir otras fuentes alternativas como un generador eólico, o un generador eléctrico Diesel o de gasolina. Son por lo general, instalaciones de menor tamaño que las conectadas a red, y se dimensionan de forma precisa para cubrir la demanda existente, ya que un sobredimensionamiento, supone un coste más elevado de una instalación que no se va a aprovechar al 100%, mientras que un dimensionamiento a la baja implica que en algunas situaciones, no se disponga de la energía necesaria.

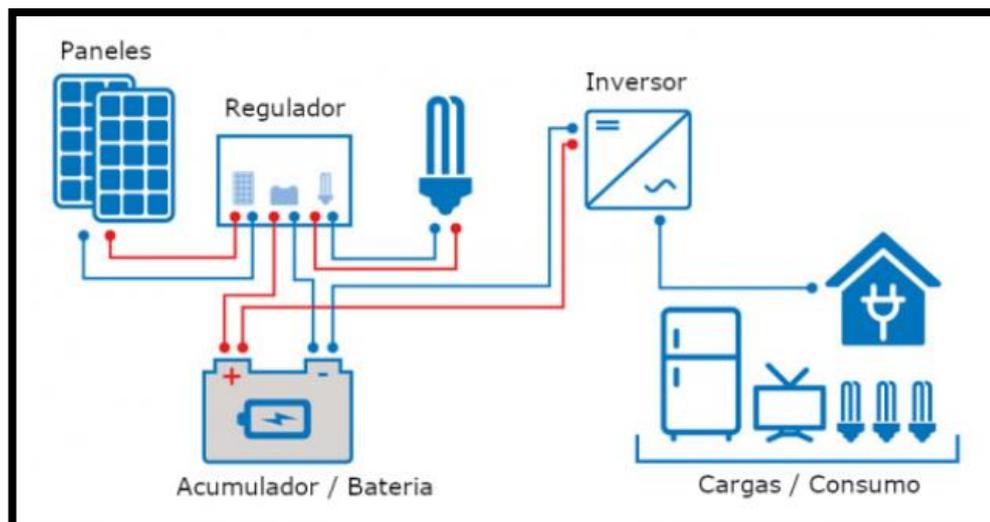


Figura 9 - Esquema general de una instalación fotovoltaica aislada. Fuente: [21]

- Instalación fotovoltaica solar conectada a red: precisa de un suministro eléctrico para poder funcionar. Por tanto, las instalaciones fotovoltaicas conectadas a una red eléctrica funcionan como un generador. Es decir, esta instalación fotovoltaica es una central de producción de electricidad, la cual aporta energía a una red eléctrica. De esta forma, en el caso de que un edificio adopte esta instalación, pasará a tener dos instalaciones eléctricas diferentes. Por una parte, tendrá la red de suministro habitual, y por otra, la instalación solar fotovoltaica.

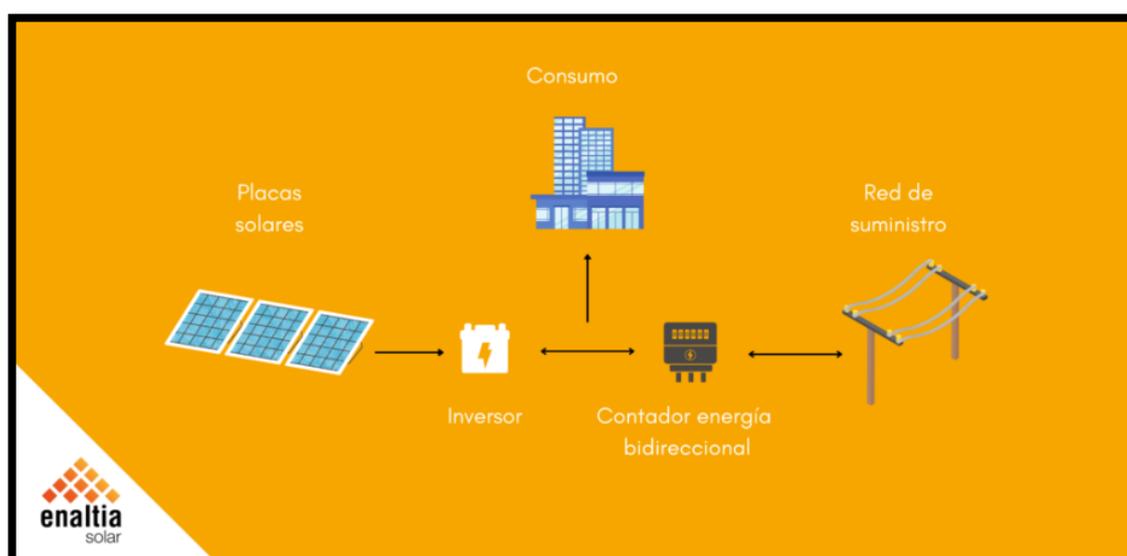


Figura 10 - Esquema de interconexión entre producción, distribución y consumo Fuente: [22]

- Ventajas de la Energía Solar Fotovoltaica (ESF)
 - Combustible: luz.
 - Independencia importaciones energéticas.
 - Limpieza.
 - Escaso tiempo para su montaje.
 - Modularidad.
 - Versatilidad.
 - Producción neta de energía.
 - Disminución en el precio.
 - Fuente de energía autóctona, segura y renovable.
 - Producción máxima al medio día.
 - Suministro eléctrico áreas remotas o rurales.
 - Fuente de energía descentralizada
 - Creación depuestos de trabajo
 - Fuente de energía competitiva económicamente
 - Gran potencial
 - Nula ocupación extra de terreno
 - Facilidad de integración en edificios
 - Mantenimiento: sencillo y poco costoso
 - Alta fiabilidad
 - Biodiversidad
- Desventajas de la ESF
 - Fuente de energía cara
 - Rendimientos bajos (12-18%)
 - Inmadura técnica y económicamente
 - Coste inicial elevado
 - Pequeño impacto medio ambiental
 - Obtención materias primas
 - Fabricación, transporte e instalación
 - Reciclaje
 - Ecoetiquetas

3.1. ARMONICOS EN LAS INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS SOLARES

En las plantas fotovoltaicas, los inversores son dispositivos clave que convierten la energía solar en electricidad utilizable. Sin embargo, este proceso de conversión es lo que puede generar armónicos, añadiendo “ondas extra”, que suponen deformaciones a la forma de onda de la corriente eléctrica fundamental.

3.1.1. SOLUCIONES PARA DISMINUIR EL EFECTO DE LOS ARMÓNICOS

La solución al problema de los armónicos es eliminar los síntomas y no el origen, ya que los aparatos que crean los armónicos generalmente constituyen una pequeña parte de la carga y eliminar su uso no es posible, además de que modificar esos equipos para que no causen armónicos tampoco es factible. Lo que queda es reducir los síntomas incrementando la tolerancia del equipo y del sistema a los armónicos o modificar los circuitos y los sistemas para reducir su impacto, y atrapar o bloquear los armónicos con filtros. En casos de sobrecarga, daño de equipo o diseño inapropiado, estas causas que generan armónicos pueden ser corregidas, modificando o reemplazando dichos equipos. Lo primero que se recomienda en caso de problemas de armónicos es la inspección del equipo y del circuito eléctrico. Estos problemas son originados por cargas desequilibradas, mala conexión a tierra, problemas con el conductor de neutro o con el equipo y por uso inapropiado. Los problemas de puesta a tierra contribuyen de un 33 a un 40% en los problemas relacionados con la calidad de energía. A continuación, se describen diferentes soluciones electrotécnicas con las cuales se pueden atenuar o evitar que los armónicos sigan causando serios problemas y para prevenir que no los causen en el futuro.

1. Sobredimensionamiento

En una instalación donde la presencia de armónicos es relativamente importante, si el transformador trabaja en límites próximos al 75% de su potencia nominal, se pueden presentar síntomas de notable relevancia, como consecuencia de las cargas deformantes, pudiendo apreciar manifestaciones tales como vibraciones y ruidos, sobrecalentamientos y disfunciones en los elementos de protección (magnetotérmicos y diferenciales). Estos fenómenos acaban afectando principalmente a la calidad de la tensión, provocando una distorsión armónica total de tensión elevada. Al tener una mala calidad de tensión, los mismos armónicos de la instalación se comportan incrementando sus tasas de distorsión y se llega a unos términos en los que hay que tomar soluciones, ya que una tensión distorsionada puede provocar el anómalo funcionamiento de determinados receptores. Con fuentes de mayor potencia y pletinas y cables de mayor sección, se consigue que el efecto de los armónicos en las instalaciones provoque menos incidencias y tarde más en manifestarse. Al tener mayor potencia de fuente, la distorsión de tensión será menor (la calidad de la tensión será mejor) ya que la relación de la potencia armónica respecto a la potencia de la fuente es menor. De esta manera la impedancia de la instalación es más baja gracias al sobredimensionamiento de la fuente. Si los armónicos tienen una sección mayor de cable o de pletina por donde circular, el efecto piel tendrá menor incidencia provocando un menor

calentamiento de los conductores y de las protecciones. En resumen, como consecuencia de este sobredimensionamiento la impedancia total de la instalación disminuye, evitando que aumenten las pérdidas por efecto Joule ocasionadas por los armónicos al ofrecer una sección mayor en cables y pletinas.

2. Transformadores

Los transformadores generalmente utilizados como elementos de adaptación de tensión, en ocasiones se utilizan para cambiar el régimen de neutro de la instalación o para generar un aislamiento galvánico entre elementos de electrónica de potencia o como medida suplementaria de seguridad contra contactos directos.

Hoy en día los transformadores también tienen su aplicación en el campo de los armónicos, precisamente gracias a la propiedad de poder aislar las cargas de la fuente y añadiéndole las distintas posibilidades de sus configuraciones de conexión y de construcción.

Estos transformadores permiten poder tener una determinada carga o conjunto de cargas, susceptibles de causar problemas a otros equipos, controladas en una zona concreta de la instalación, para que no perjudiquen al resto. En sistemas trifásicos compensados, la corriente fundamental y las de los armónicos 5°, 7°, etc. se anulan mutuamente, mientras que las corrientes monofásicas del tercer armónico tienen el mismo decalaje de fase y, por consiguiente, se acumulan en el conductor neutro, retornando una corriente igual a tres veces las de las fases. La circulación de corrientes importantes por el neutro debidas al armónico tercero y los múltiplos de tres, generan un desprendimiento de calor significativo debido al efecto Joule. Otro inconveniente de esta circulación es debido generalmente a su capacidad de deformar la tensión, haciéndola perder su carácter senoidal. Los transformadores utilizados específicamente para el confinamiento y control de los armónicos en una determinada zona de la instalación se construyen con unos materiales y características especiales para este fin, ya que han de estar preparados para poder soportar en permanencia los efectos de los armónicos, con la misión de mantener unas prestaciones mínimas de calidad de tensión. Los transformadores más utilizados en caso de cargas monofásicas son los de triángulo-estrella, que retienen los armónicos de orden tres y sus múltiplos. Si las cargas son trifásicas, es más adecuado utilizar transformadores de doble secundario para conseguir un desfase de 30° en las tensiones de sus dos salidas.

3. Filtros pasivos

Los filtros pasivos son los más simples y económicos, pero menos flexibles y efectivos para filtrar armónicos. Los filtros anti armónicos suelen ser del tipo LC. Este filtro dispone de una bobina serie y, en paralelo, la que sintoniza con el armónico a eliminar, cerrando las bobinas con unos condensadores entre fases. Son elementos puramente pasivos, usados como circuitos en paralelo en la entrada de los servicios con problemas de generación de armónicas, evitando de esta manera que entren al sistema de distribución. También los filtros pueden instalarse directamente en un equipo particular donde existe un grave problema de generación de armónicas, evitando de esta manera que circulen en la propia instalación eléctrica del usuario. El comportamiento de los filtros pasivos es ser sensitivos a la impedancia del sistema para los cuales han sido ajustados. Para aplicaciones en las que la impedancia del sistema puede cambiar a lo largo del tiempo, se corre el riesgo de que quede obsoleto ya que, con toda probabilidad, habrá cambiado el espectro armónico de las cargas o el de la instalación. Los filtros pasivos con frecuencia no proporcionan un comportamiento satisfactorio, bajo ciertas circunstancias pueden causar problemas de resonancia sobre el sistema donde están conectados. La atenuación serie (intercalar una inductancia serie entre la fuente y la carga) es una solución que se ha adoptado recientemente para proteger las baterías de condensadores, utilizadas en la compensación de la energía reactiva, cuya impedancia disminuye de manera importante como consecuencia de los armónicos, ya que éstos circulan por el punto donde menor resistencia les ofrece y acaban pasando por el interior de los condensadores, pudiendo llegar a destruirlos.

4. Filtros activos

Los filtros activos analizan cada una de las fases de manera permanente, teniendo en cuenta la forma de la corriente de carga. De este análisis se extrae el espectro armónico, que está constituido por la suma de la intensidad fundamental y la de todos u cada uno de los armónicos. El filtro genera una señal de corriente que es igual a la diferencia entre la corriente de carga y la intensidad fundamental. Esta diferencia que es la suma de las corrientes armónicas desfasada 180° , se inyecta a la carga de tal manera que la resultante será una corriente senoidal igual a la intensidad fundamental de la fuente.

El filtro activo se intercala en paralelo entre la fuente y la carga, teniendo que dimensionarse exclusivamente para las corrientes armónicas y no para la corriente total. El principio de la compensación activa, que consiste en utilizar la electrónica de potencia para poder generar las componentes armónicas que anulen a las de las cargas no lineales, reinyectando esta corriente en sentido

contrario a través de su propio puerto de alimentación, consiguiendo así anular en el punto de inserción los armónicos que provienen de la carga.

5. Dispositivos diferenciales

Con el incremento de los armónicos en las instalaciones, algunos dispositivos de protección se ven afectados, produciéndose disparos de alguna de las protecciones diferenciales ante situaciones en las que no debería haberse producido este fenómeno, teniendo en cuenta las características técnicas de los equipos de protección. Las causas más comunes de disparos de los diferenciales son como consecuencia de: sobrecargas transitorias, circulación de corrientes de cortocircuito, corriente de arranque de motores, corriente de arranque de fluorescencias, cierre sobre cargas capacitivas, descargas electrostáticas, corrientes armónicas, disparos por simpatía y pérdidas transitorias de régimen de neutro. Se han desarrollado diferentes gamas de diferenciales para las distintas aplicaciones, por lo que se pueden describir distintos diferenciales clasificados por su tipo: tipo AC, tipo A y tipo B.

- Tipo AC: están protegidos contra disparos intempestivos debido a sobrecargas transitorias y tienen un funcionamiento correcto con corrientes de fuga a tierra perfectamente senoidales, detectando solamente fugas de corriente alterna, por tanto, son insensibles a las corrientes rectificadas, con o sin una componente continua.
- Tipo A: están protegidos contra disparos intempestivos debido a sobrecargas transitorias y han sido preparados para que funcionen correctamente con corrientes rectificadas y con una componente continua de hasta 6 mA.
- Tipo B: están protegidos contra disparos intempestivos debido a sobrecorrientes transitorias y se han diseñado para un funcionamiento correcto con cualquier componente continua.

6. Interruptor magnetotérmico

La manera en que se ve afectado el interruptor magnetotérmico, es consecuencia de la circulación de los armónicos por su interior, ya que estas protecciones están diseñadas para provocar la apertura del circuito, cuando sean atravesados por una intensidad superior a la nominal. Los interruptores magnetotérmicos disponen de una lámina bimetálica o bilámina, cuya misión es la de soportar una determinada temperatura en función de la intensidad que la atraviese. Cuando las corrientes armónicas de elevada frecuencia circulan a través de esta bilámina, se produce un aumento de su resistencia óhmica, debido al efecto piel, lo que ocasiona un calentamiento adicional por el efecto Joule, que hace disparar el interruptor a intensidades inferiores a la nominal.

7. Monitorización Continua del Sistema

Es esencial para identificar patrones de armónicos y garantizar un rendimiento óptimo. Los sistemas avanzados de supervisión pueden detectar problemas de armónicos y permitir intervenciones proactivas antes de que se produzcan daños significativos en los componentes. Esto resalta la importancia de combinar la tecnología de condensadores con un monitoreo eficiente para garantizar un rendimiento sostenible a largo plazo.

8. Selección de la Tipología del Inversor

Los inversores centrales, en lugar de los inversores Sting, tienden a generar menos armónicos debido a su capacidad para manejar mayores niveles de potencia. Esta opción puede ser más cara inicialmente, pero puede resultar en una operación más limpia y eficiente a largo plazo.

4. HOSPITAL UNIVERSITARIO RIO ORTEGA

4. HOSPITAL UNIVERSITARIO RIO ORTEGA

A continuación, pasaremos a hablar la instalación fotovoltaica previamente instalada en el hospital universitario Rio Ortega en Valladolid.

4.1. INSTALACION FOTOVOLTAICA

1. LOCALIZACION

El emplazamiento de la instalación es en las cubiertas seleccionadas de las instalaciones del HOSPITAL UNIVERSITARIO RIO HORTEGA, situadas en CALLE DULZAINA, 2 – C.P.47012 VALLADOLID (VALLADOLID).

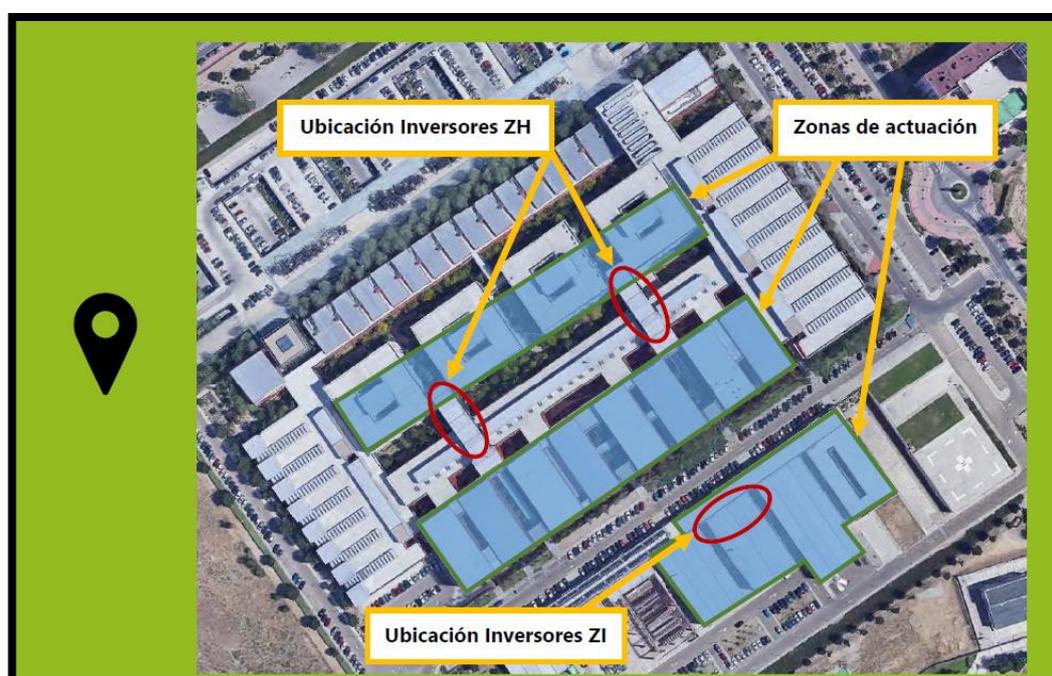


Figura 11 – Situación instalación fotovoltaica Hospital Universitario Río Ortega. Fuente: [Propia].

2. INTALACION A EJECUTAR

La instalación solar fotovoltaica tiene una potencia pico de 920 kW distribuido en 10 inversores, 7 de potencia pico de 110 kW. En el CGBT de la zona industrial se han conectado al embarrado T1-T2 4 inversores de 110 kW; en la zona hospitalaria se han instalado 3 inversores de 110kW y 1 de 50 KW al embarrado T1-T2, y 2 inversores de 50 kW al embarrado T6.

La instalación se ha diseñado para autoconsumo, habiéndose instalado en la acometida de red un sistema antivertido. Este sistema mide continuamente el balance neto de energía en la conexión a red del hospital de forma que, en

caso de que la generación fotovoltaica global superara en algún momento a la demanda total del hospital, se desconectarían los inversores.

3. CARACTERISTICAS DE LOS ELEMENTOS DE GENERACION FOTOVOLTAICA.

1. MODULOS FOTOVOLTAICOS

CARACTERISTICAS FISICAS		JAM72S20-450/MR
Fabricante	JA SOLAR TECHNOLOGY	
Nº de elementos	2.520 (2.268 + 252)	
Tecnología de la célula	Monocrystalina	
Anchura (mm)	1.052	
Altura (mm)	2.120	
Grosor (mm)	40	
Características eléctricas (STC)	450 W	
Potencia nominal (W)	450	
Tensión en circuito abierto (V)	49,70	
Corriente de cortocircuito (A)	11,36	
Tensión en punto de máxima potencia (V)	41,52	
Corriente en punto de máxima potencia (A)	10,84	
Tensión máxima del sistema (V)	1.000	

CARACTERISTICAS DE TEMPERATURA		NOCT (45±2 °C)
Coeficiente de temperatura por Pmax	-0,35 %/°C	
Coeficiente de temperatura por Voc	-0,272 %/°C	
Coeficiente de temperatura por Isc	0,044 %/°C	

2. INVERSORES

- Primer tipo de inversor

CARACTERISTICAS		SUNNY TRIPOWER CORE 2 (STP 110-60)
Fabricante	SMA SOLAR	
Nº de elementos	7	

Potencia nominal corriente alterna	110 kW	
Potencia máxima corriente alterna	110 kW (cos=1)	
Tensión continua máxima en circuito abierto	1100 V	
Rango completo de MPPT	500 - 800 V	
Corriente de entrada máxima por MPP	26 A	

Tensión nominal de CA	400 V
Número de MPPT/entradas por MPPT	12/2 (24)
Intervalo de frecuencia configurable	44-55 Hz (opcional 60 Hz)
Corriente nominal salida	159 A
Distorsión armónica	<3%
Rendimiento máximo	98,6 %
Rendimiento europeo	98,4 %
Protecciones internas	Interruptor de entrada de CC, Protección contra islas eléctricas, Protección contra sobrecorriente de salida, Protección contra la polaridad invertida de entrada, Protección contra sobretensión de CC (Tipo II), Protección contra sobretensión de CA (Tipo II), Detección de resistencia de aislamiento.
Tª de servicio	-30°C a 60°C
Modo conexión en red de comunicación	Ethernet, RS485

Por otro lado, la etapa de conversión CC/CA está compuesta por semiconductores IGBT de alto rendimiento que generan una onda sinusoidal pura de alta calidad y baja distorsión armónica, THD <3%.

- Segundo tipo de inversor:

CARACTERISTICAS	SUNNY TRIPOWER CORE 1 (STP 50-40)
Fabricante	SMA SOLAR
Nº de elementos	1+2 de mejora
Potencia nominal corriente alterna	50 kW
Potencia máxima corriente alterna	50 kW (cos=1)
Tensión continua máxima en circuito abierto	1000 V
Rango completo de MPPT	500 - 800 V
Corriente de entrada máxima por MPP	30 A
Tensión nominal de CA	230/400 V

Número de MPPT/entradas por MPPT	6/2 (12)
Intervalo de frecuencia configurable	44-55 Hz (opcional 60 Hz)
Corriente nominal salida	72,5 A
Distorsión armónica	<3%
Rendimiento máximo	98,1 %
Rendimiento europeo	97,8 %
Protecciones internas	Interruptor de entrada de CC, Protección contra islas eléctricas, Protección contra sobrecorriente de salida, Protección contra la polaridad invertida de entrada, Protección contra sobretensión de CC (Tipo II), Protección contra sobretensión de CA (Tipo II), Detección de resistencia de aislamiento.
Tª de servicio	-25°C a 60°C
Modo conexión en red de comunicación	Ethernet, RS485

4.2. PLANOS DEL HOSPITAL UNIVERSITARIO RIO ORTEGA

Emplazamiento de los paneles fotovoltaicos:



Figura 12 - Situación instalación fotovoltaica Hospital Universitario Río Ortega. Fuente: [Propia].

- Planta de la situación de los paneles fotovoltaicos:

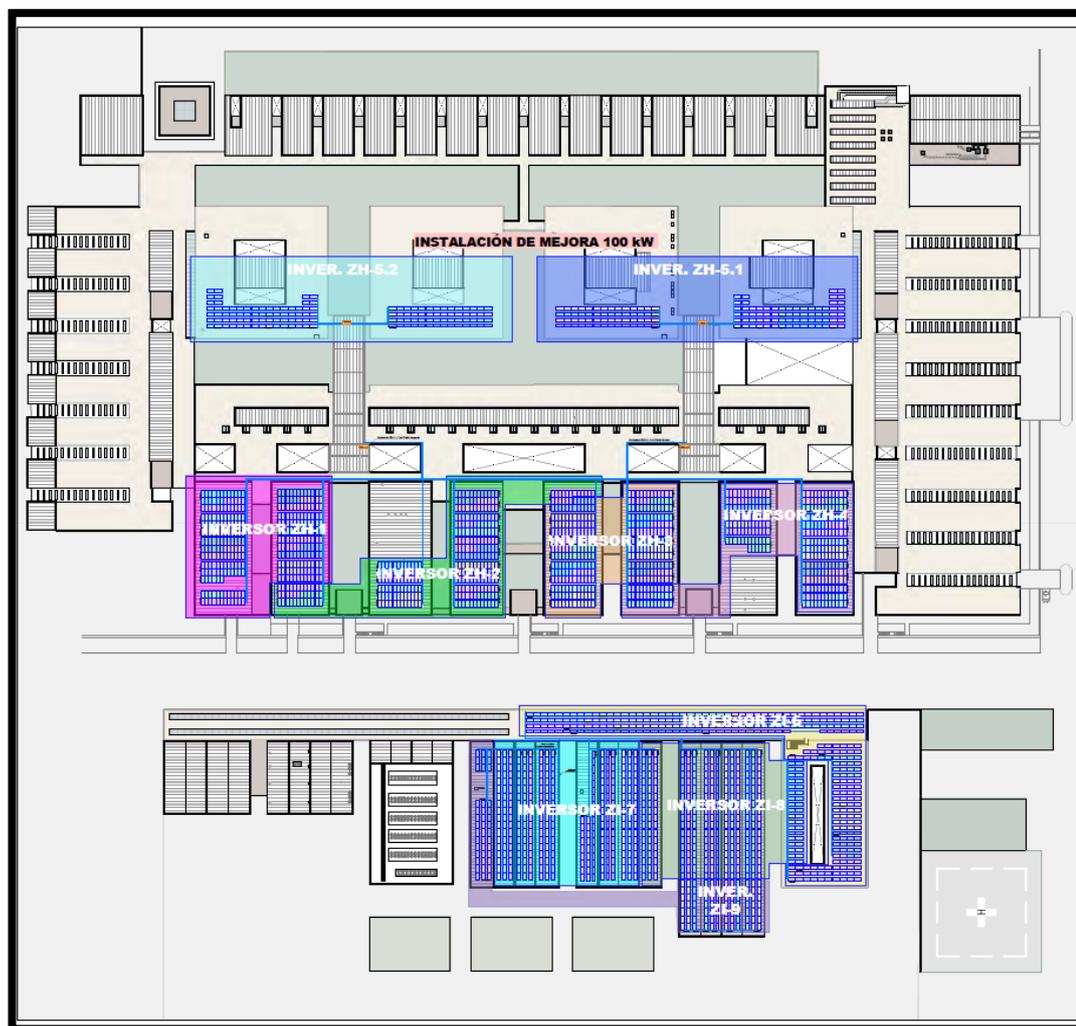


Figura 13- Distribución en planta de los inversores en función de los paneles.
Fuente: [Propia]

- Conexión de los strings con cada inversor:



Figura 14- Índice de color según conexasión. Fuente: [Propia]

5. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS EN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA.

5. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS EN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA.

En este capítulo se va a analizar si existe alguna influencia de las condiciones atmosféricas especialmente la irradiancia sobre la calidad de la energía eléctrica producida por la instalación fotovoltaica. En concreto y como aspectos más relevantes se analizará la producción de contenido armónico y de flicker, tomando como representativos de estos aspectos los índices, THD tensión y de intensidad, Plt y Pst.

Para poder llevar a cabo este estudio se instalaron diversos equipos de medida, propiedad del departamento de ingeniería eléctrica de la Universidad de Valladolid, en las instalaciones del Hospital Universitario Río Hortega. A este efecto, se utilizaron dos analizadores de redes de la marca Fluke, un 434 y un 435-II, instalándolos en diferentes embarrados de los cuadros generales de baja tensión del hospital en los cuales se iba a producir el vertido de la producción fotovoltaica, así como en algunas líneas individuales, en concreto en una de las líneas que alimenta a los laboratorios y otra línea que alimenta la zona de hospitalización.

Además de estos analizadores comerciales, también se utilizaron dos analizadores de diseño propio desarrollados por la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) en colaboración con la Universidad de Valladolid. Estos equipos son sistemas de medida con 4 canales de Tensión (máximo de 850Vac) y 4 canales de corriente. Almacenan hasta 40 días de medidas de la forma de onda a una tasa de 8kSps, sincronizadas con GPS y comunicación Bluetooth para enlace con el móvil. Los datos se almacenan en una tarjeta microSD para luego descargarlos y procesarlos fuera de línea

Las medidas se empezaron a realizar semanas antes de que se realizara la conexión de la instalación fotovoltaica para así poder tener caracterizada la instalación y poder observar la influencia de dicha generación sobre la calidad de la energía eléctrica en el hospital.

Los analizadores comerciales generan unos ficheros en formato propio que pueden ser exportados a ficheros Excel. Las medidas se recabaron en periodos de 10 minutos. Los analizadores de diseño propio recogen la onda completa tanto de corriente como de tensión en las tres fases, las cuales pueden ser tratadas posteriormente agrupándolas en el periodo deseado. En los dos casos se utilizó el software Matlab para analizar las señales capturadas, realizando las transformaciones y agrupaciones necesarias y obteniendo las gráficas correspondientes.

5.1 MEDIDAS REALIZADAS ANTES DE LA CONEXIÓN DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA

Tal como se ha comentado, y para poder ver el posible impacto de la generación fotovoltaica en la calidad de onda, se realizaron medidas previas a la conexión de dicha generación.

A continuación, se muestran las gráficas correspondientes a algunos de los parámetros eléctricos más representativos, para medidas realizadas en el centro de transformación de la zona industrial del hospital.

En las siguientes figuras se pueden apreciar los THD.

- Armónicos de tensión antes de la instalación:

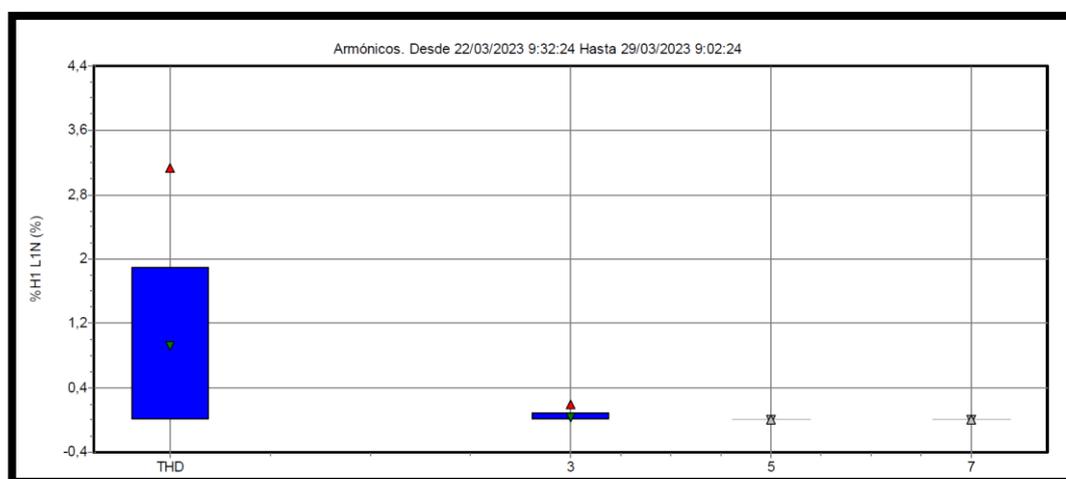


Figura 15: Armónico de tensión antes de la instalación fotovoltaica. Fuente: [Propia]

Según la norma UNE EN 50160, el THD de la tensión no debe sobrepasar el 8%, aunque en instalaciones sensibles, y así debería considerarse un hospital, se considera que el THD no debería superar el 5%. En cualquier caso, el valor registrado está por debajo de ambos valores. El de corriente, mostrado en la siguiente figura puede ser más elevado, pero para esta instalación no debería ser superior al 30%.

- Armónicos de corriente antes de la instalación:

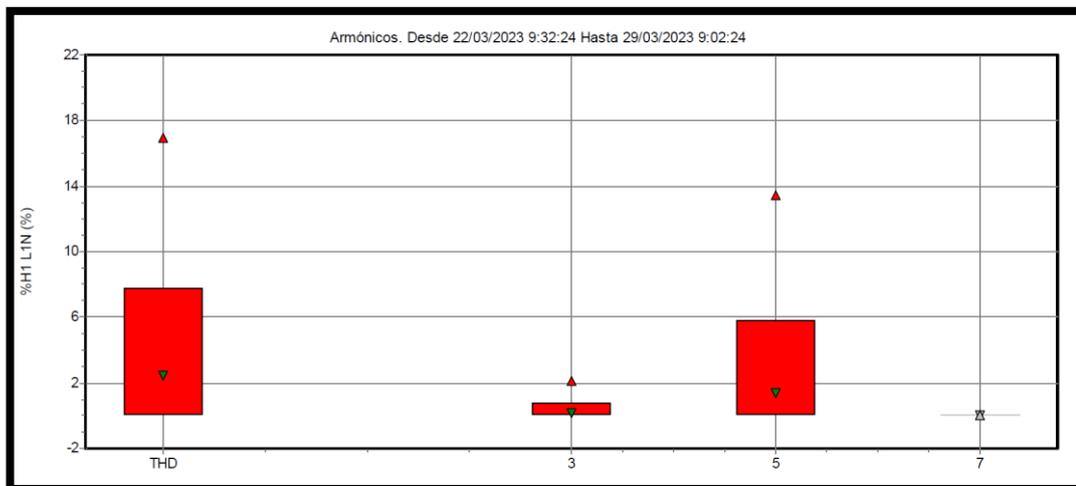


Figura 16: Armónico de corriente antes de la instalación fotovoltaica. Fuente: [Propia]

En la siguiente gráfica se muestra el índice Plt que mide la severidad del Flicker de duración larga. Según la UNE EN-50160, el nivel de severidad del Flicker de larga duración no debe superar el valor de 1, aspecto que se cumple en esta secuencia de registros:

- Flicker antes:

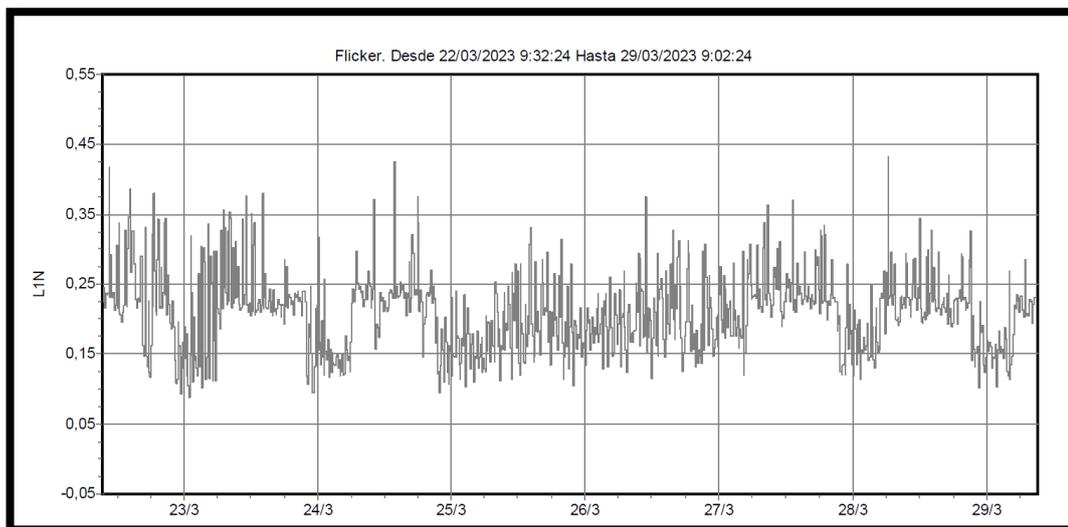


Figura 17: Flicker antes de la instalación fotovoltaica. Fuente: [Propia]

5.2 MEDIDAS REALIZADAS DESPUÉS DE LA CONEXIÓN DE LA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA

Una vez conectada la instalación fotovoltaica se siguió el mismo procedimiento y se tomaron sucesivas medidas en los mismos puntos de conexión comentados en el apartado previo. A continuación, y a modo de resumen, se muestran las gráficas correspondientes a los parámetros eléctricos analizados.

- Armónicos de tensión después de la instalación

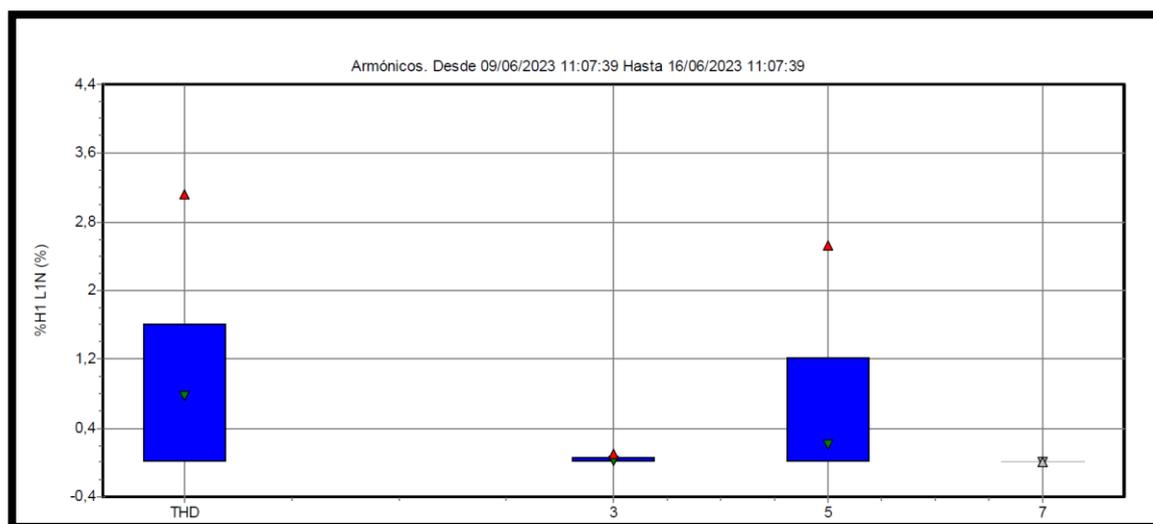


Figura 18: Armónico de tensión después de la instalación fotovoltaica.
Fuente: [Propia]

- Armónicos de corriente después de la instalación:

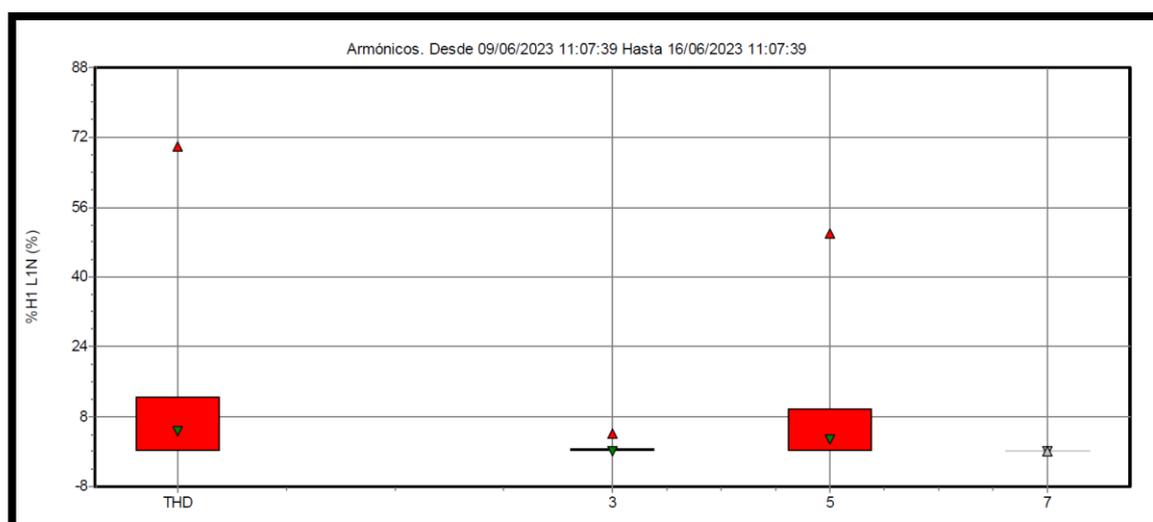


Figura 19: Armónico de corriente después de la instalación fotovoltaica.
Fuente: [Propia]

- Flicker después

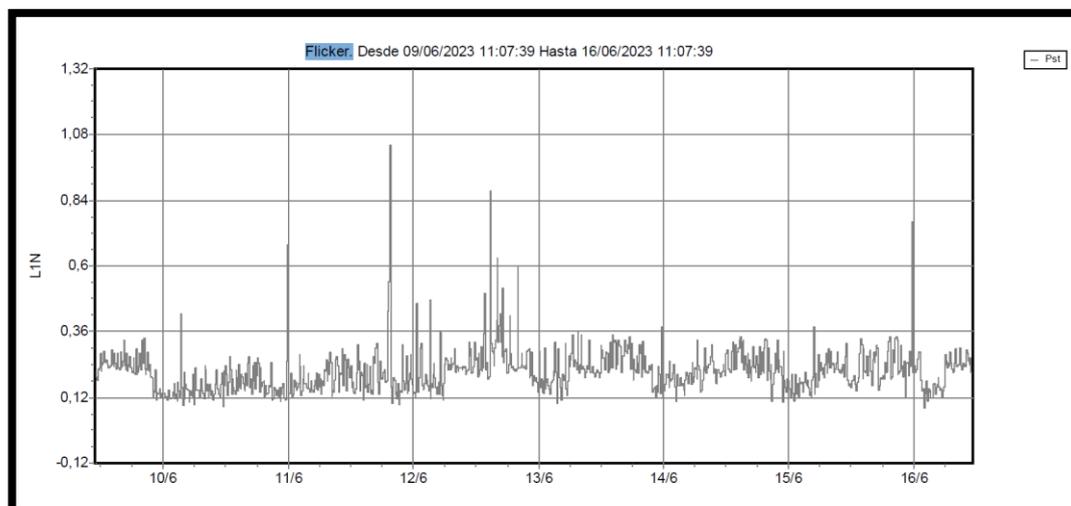


Figura 20: Flicker después de la instalación fotovoltaica. Fuente: [Propia]

Comparando estas gráficas con las obtenidas antes de la conexión de la instalación fotovoltaica se puede apreciar un ligero incremento del contenido armónico, especialmente del 51 armónico y de flicker, aunque manteniéndose dentro de los límites establecido por las normas.

5.3 INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS EN LA CALIDAD DE LA ENERGÍA PRODUCIDA

En este apartado se va a analizar la influencia que las condiciones atmosféricas puedan tener en la calidad de la energía eléctrica producida por la instalación fotovoltaica. En concreto como parámetro representativo de tales condiciones se va a utilizar la irradiancia solar definida como la potencia por unidad de área recibida del sol en forma de radiación electromagnética y medida en W/m^2 .

Para determinar la influencia que pueda tener la irradiancia sobre los diferentes parámetros de calidad eléctrica se realizará un análisis de correlación, apreciando dicha influencia a través del coeficiente de correlación que es un valor sin unidades entre -1 y 1. Cuanto más se aproxima a cero, más débil es la relación lineal. Los valores positivos indican una correlación positiva, en la que los valores de ambas variables tienden a incrementarse juntos. Los valores negativos indican una correlación negativa, en la que los valores de una variable tienden a incrementarse mientras que los valores de la otra variable descienden. Los valores 1 y -1 representan una correlación "perfecta" positiva y negativa, respectivamente

Como primer ejemplo de la relación entre variables se muestra la potencia activa a la salida de los inversores de la zona industrial del hospital y la irradiancia para un día concreto (27/10/2023) y las correlaciones obtenidas:

- Coeficiente correlación Irradiancia - P mínima = 0.9114

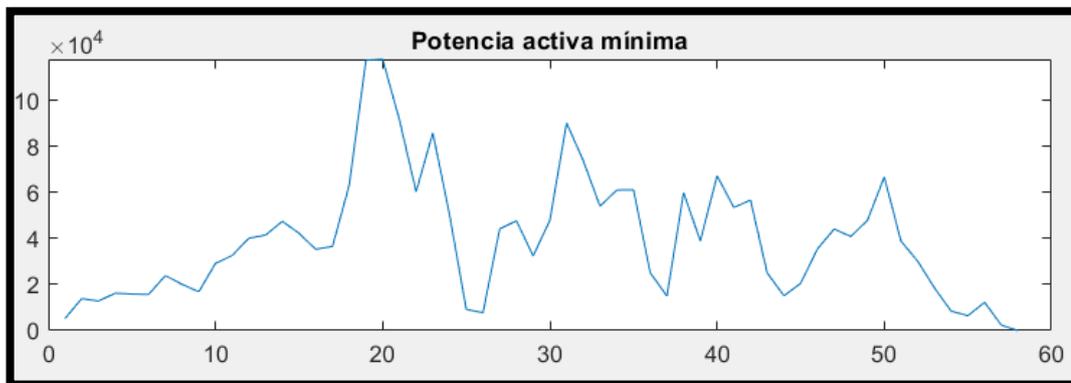


Figura 21 - Valor de potencia activa mínima 27 de octubre. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación Irradiancia - P media = 0.9912

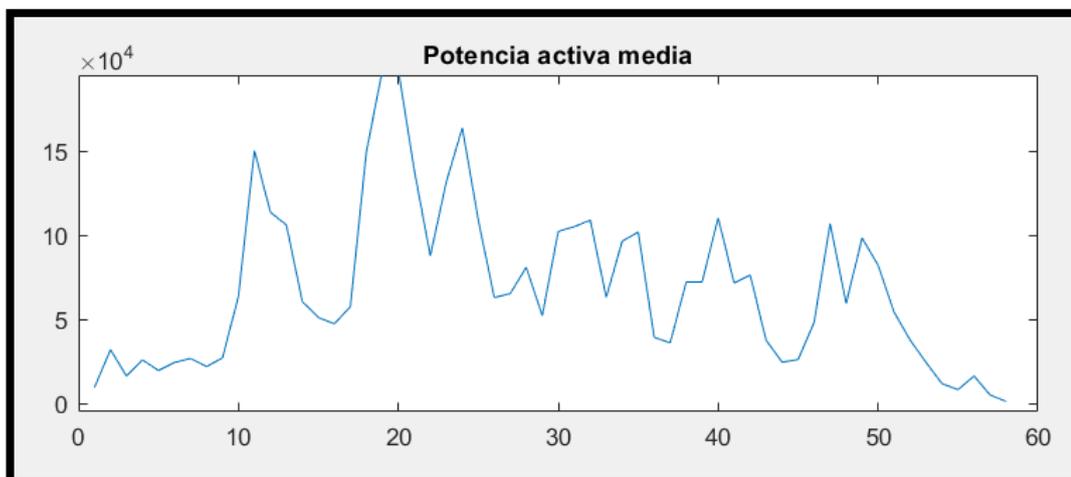


Figura 22 - Valor de potencia activa media 27 de octubre. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación Irradiancia – P máxima = 0.9491

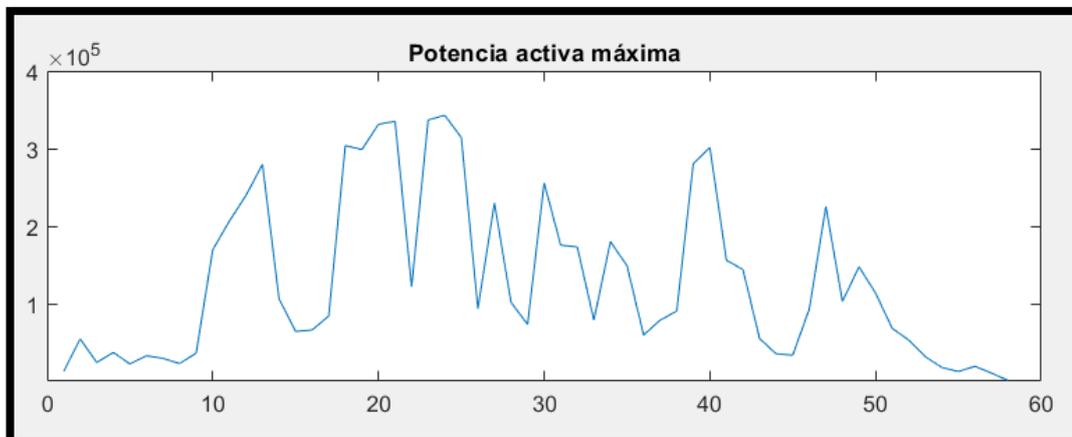


Figura 23 - Valor de potencia activa máxima 27 de octubre. Fuente: [Propia]

Como era esperable la correlación entre la potencia activa media (promediada en periodos de 10 minutos) medida en el punto de conexión de los inversores de la zona industrial y la irradiancia es muy próxima a 1. Este coeficiente valida las medidas realizadas pues si dicho coeficiente fuera menor, no se corresponderían cronológicamente las medidas eléctricas realizadas con la adquisición de datos de irradiancia.

Relaciones similares se obtienen para la potencia reactiva

- Coeficiente correlación Irradiancia – Q mínima = 0.9497

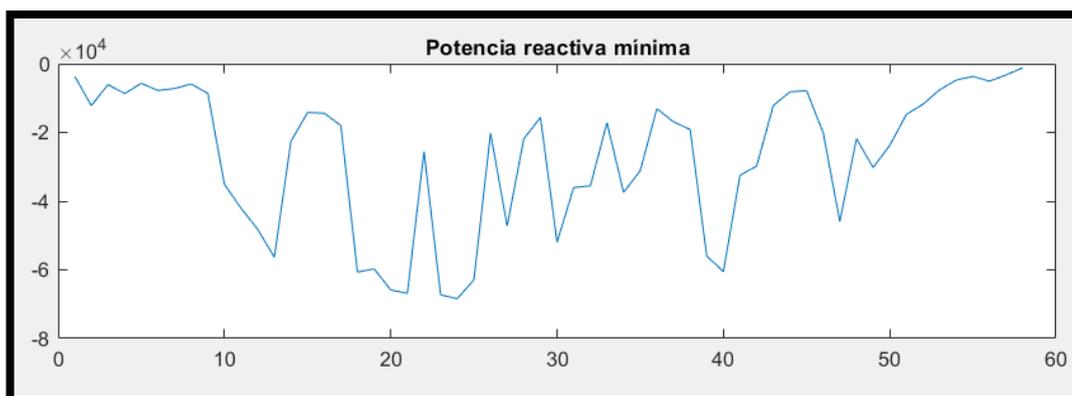


Figura 24 - Valor de potencia reactiva mínima 27 de octubre. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación Irradiancia – Q media = -0.9900

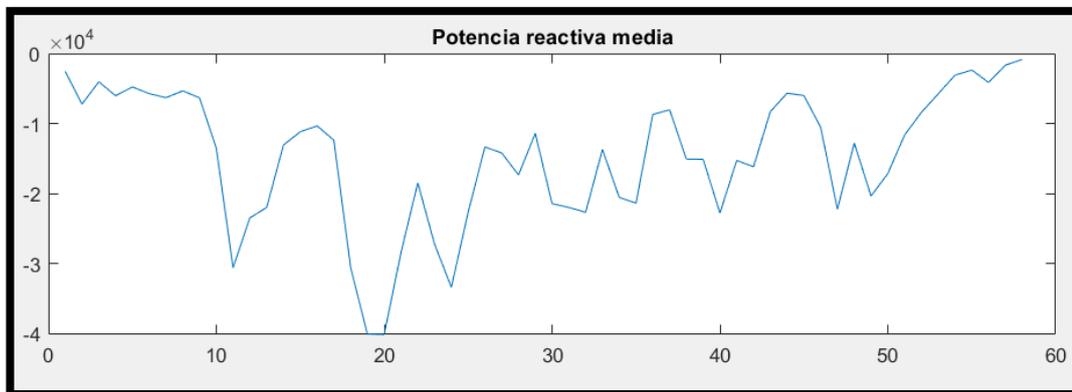


Figura 25 - Valor de potencia reactiva media 27 de octubre. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación Irradiancia – Q máxima = -0.9059

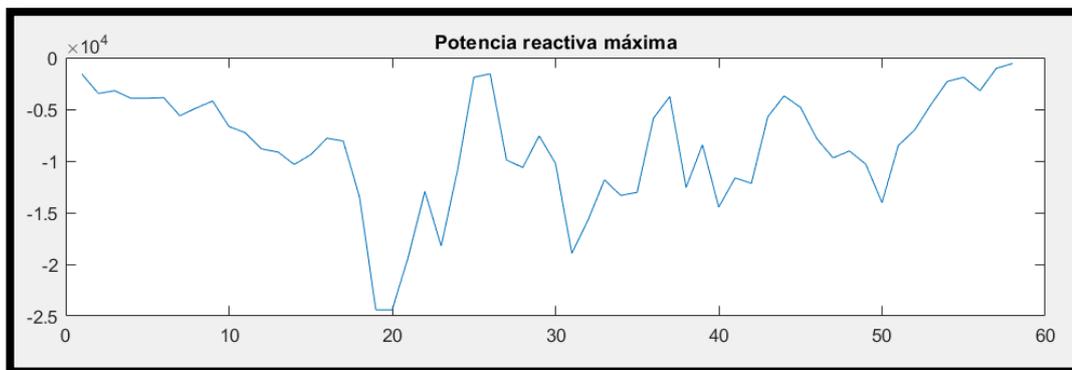


Figura 26 - Valor de potencia reactiva máxima 27 de octubre. Fuente: [Propia]

También se ha analizado la frecuencia, no encontrándose relación con la irradiancia.

- Coeficiente correlación Irradiancia –frecuencia = -0.0249

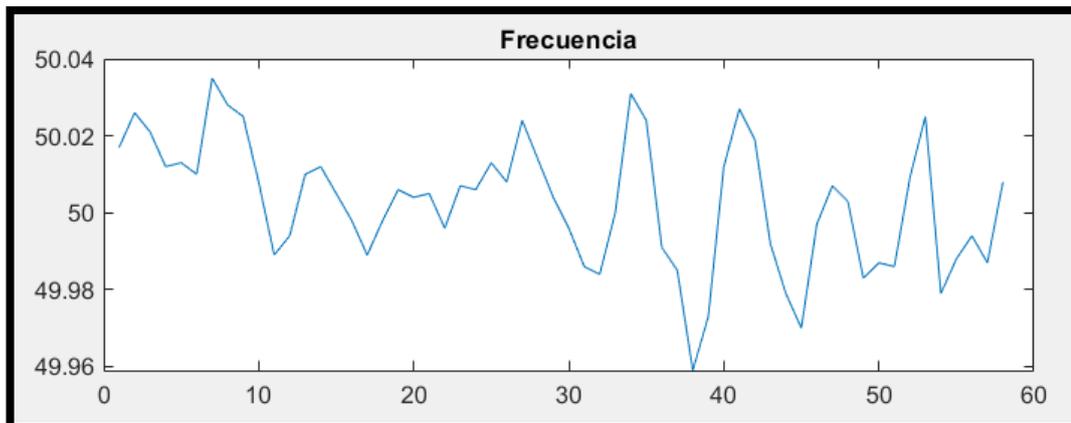


Figura 27 - Valor de frecuencia 27 de octubre. Fuente: [Propia]

Mostrado este análisis previo, a continuación se muestra el realizado para los parámetros de calidad representativos de contenido armónico y de flicker. En concreto:

- THDV: THD de tensión
- THDI: THD de corriente
- Plt; flicker de larga duración
- Pst; flicker de corta duración

De estos parámetros se ha obtenido el valor mínimo, medio y máximo, trabajando en todos los casos con periodos de agrupación de 10 minutos.

Con el objetivo de abarcar periodos de diferente temperatura ambiente y radiación solar, se ha realizado el análisis tanto en verano como en otoño.

En primer lugar, se ha realizado el análisis en época de verano, en concreto, de los días 4 a 20 de julio de 2023.

- Irradiancia (W/m²):

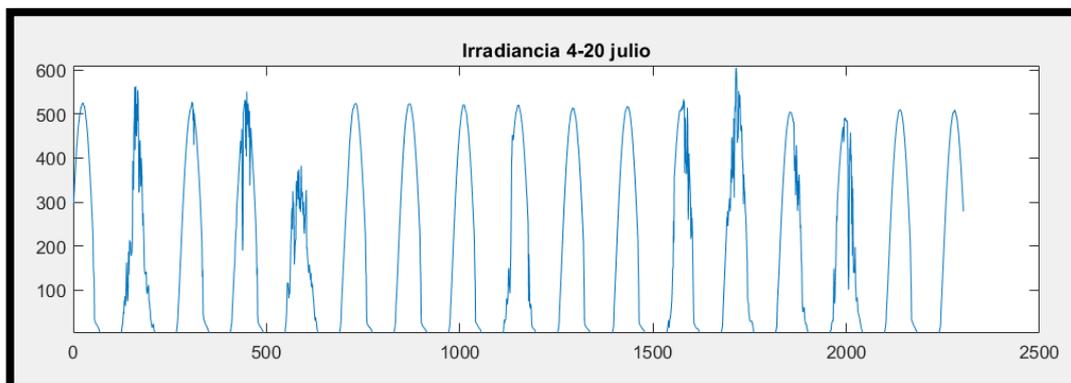


Figura 28- Valor de Irradiancia 4-20 de julio. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación Irradiancia –THDVmin = 0.3693

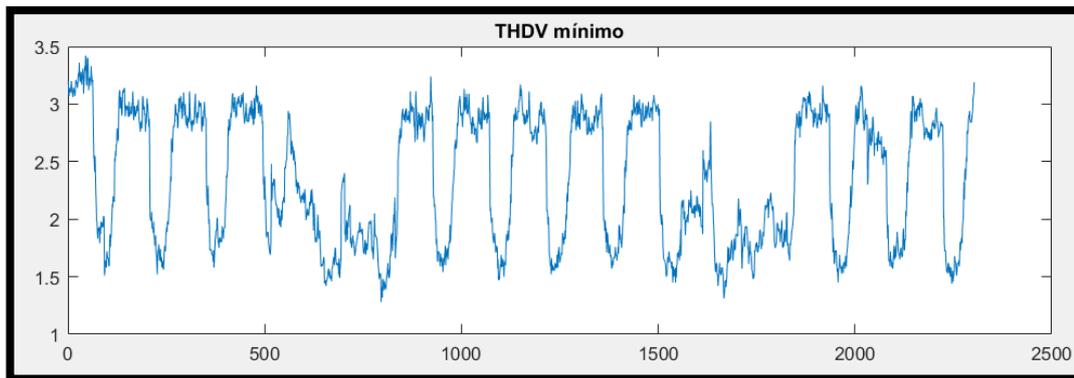


Figura 29 - Valor de tasa de distorsión armónica mínima de tensión 4-20 de julio. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación Irradiancia –THDVm = 0.3654

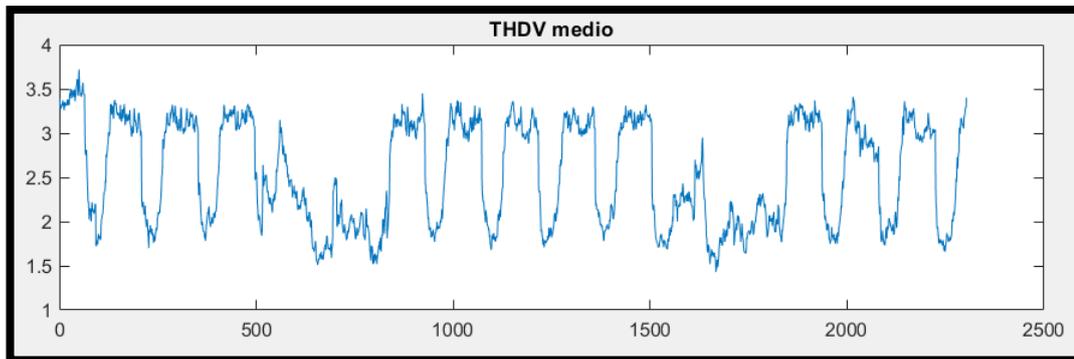


Figura 30 - Valor de tasa de distorsión armónica media de tensión 4-20 de julio. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación Irradiancia –THDVmx = 0.3502

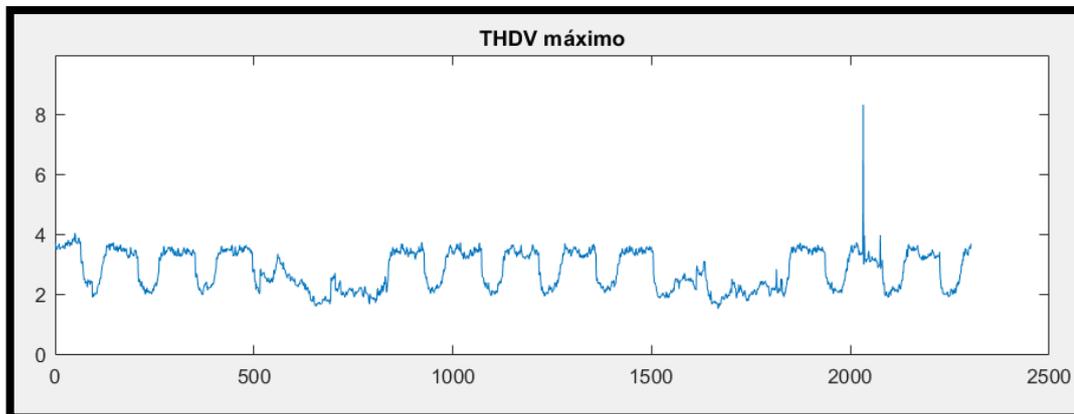


Figura 31 - Valor de tasa de distorsión armónica máxima de tensión 4-20 de julio. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación Irradiancia – THDI_{min} = 0.1737

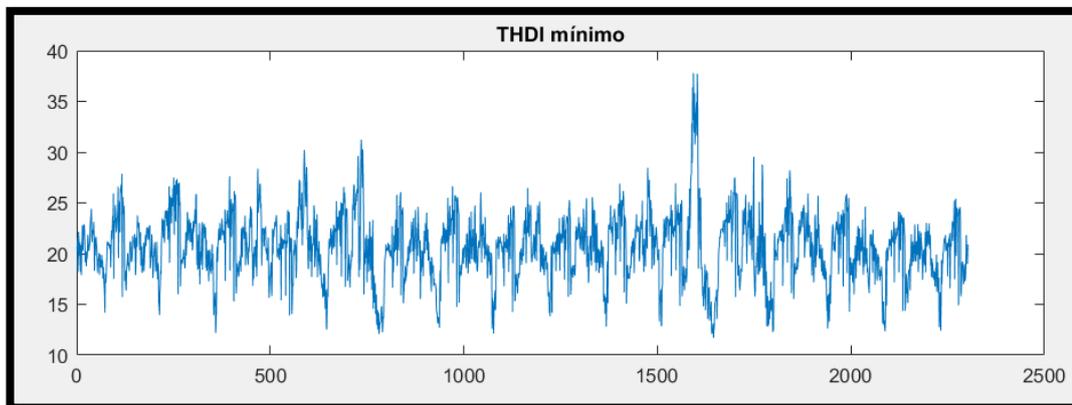


Figura 32 - Valor de tasa de distorsión armónica mínima de intensidad 4-20 de julio. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación Irradiancia – THDI_m = 0.1800

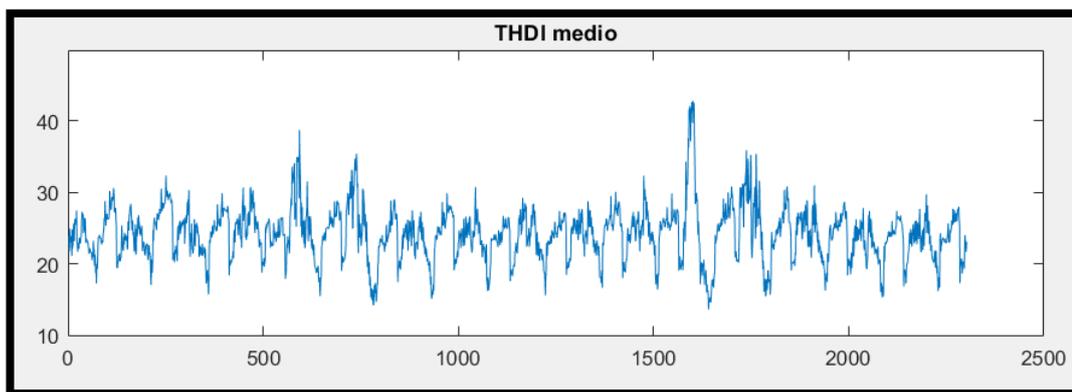


Figura 33 - Valor de tasa de distorsión armónica media de intensidad 4-20 de julio. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación Irradiancia – THDI_{mx} = 0.1742

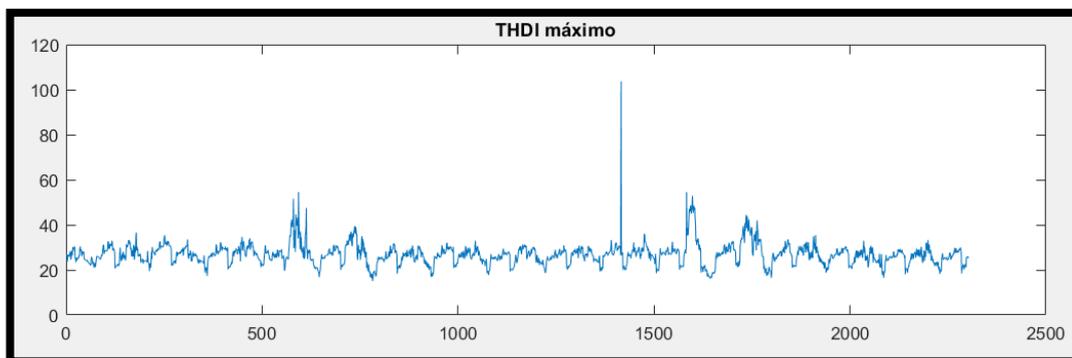


Figura 34 - Valor de tasa de distorsión armónica máximo de intensidad 4-20 de julio. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación Irradiancia – Pst = 0.0856

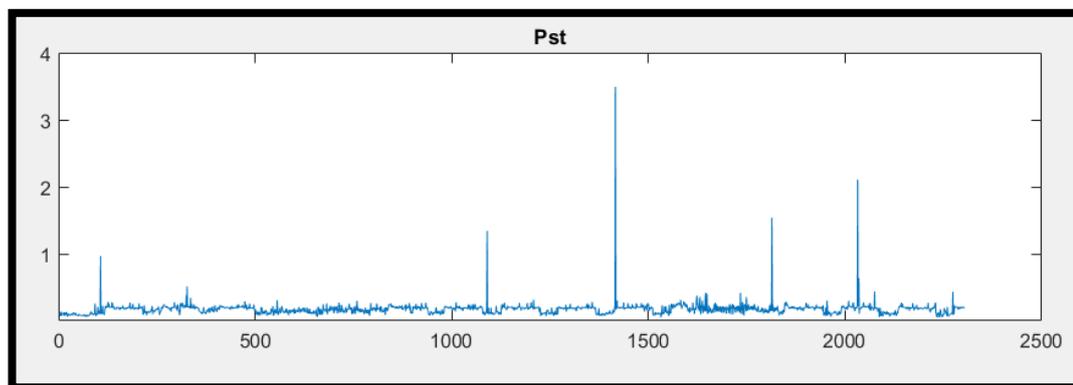


Figura 35 - Valor de Pst 4-20 de julio. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación Irradiancia – Plt = 0.0435

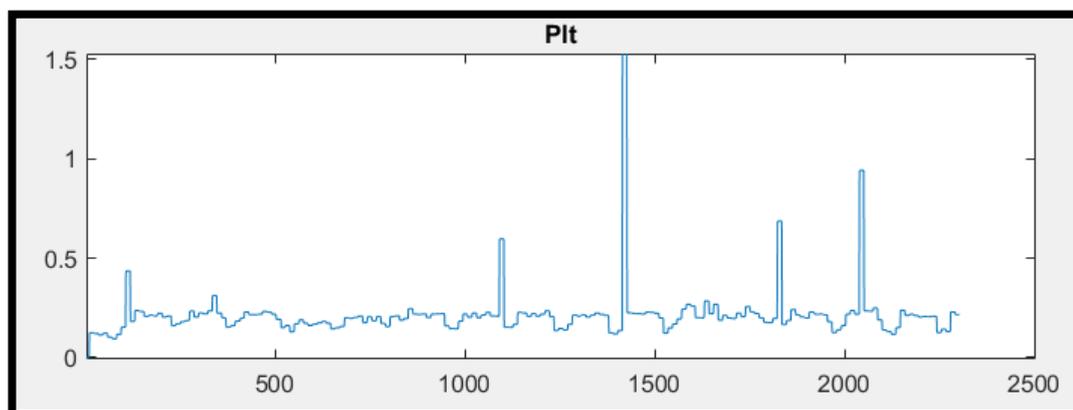


Figura 36 - Valor de Plt 4-20 de julio. Fuente: [Propia]

Como representativos del otoño, se han analizado las medidas de los días 27 y 29 de octubre

27 de octubre

- Irradiancia (W/m^2):

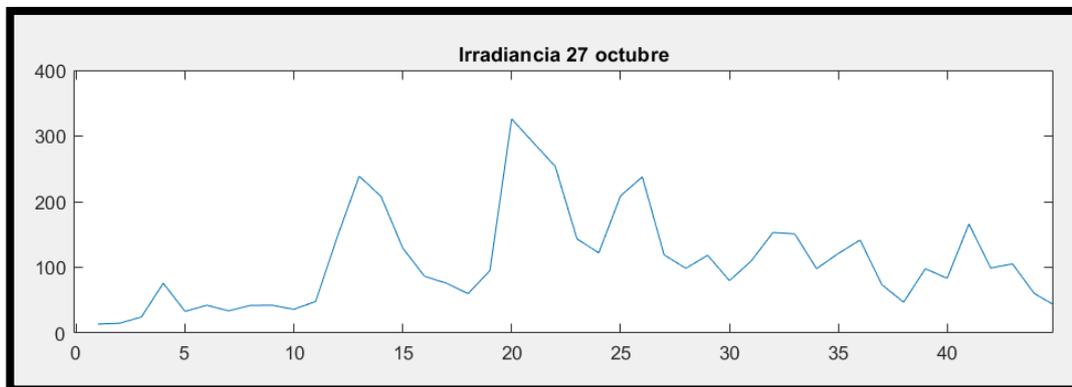


Figura 37 - Valor de Irradiancia 27 de octubre. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación Irradiancia - THDVmin = 0.3073

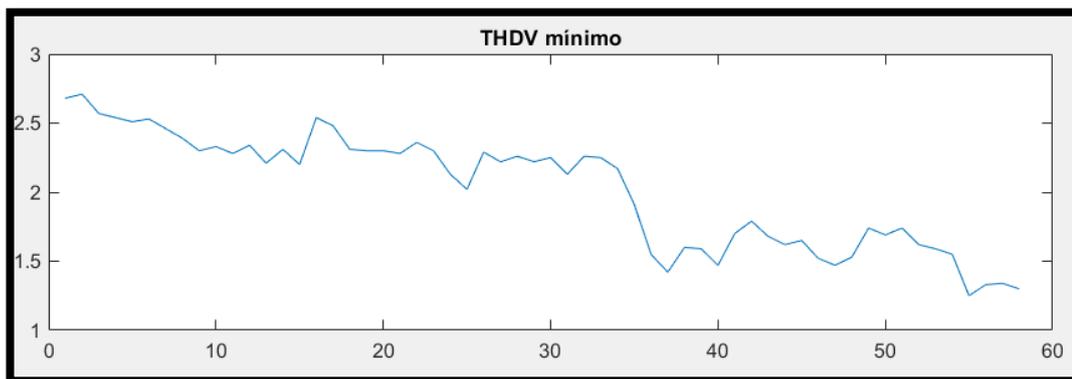


Figura 38 - Valor de tasa de distorsión armónica mínima de tensión 27 de octubre. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación Irradiancia - THDVm = 0.3516

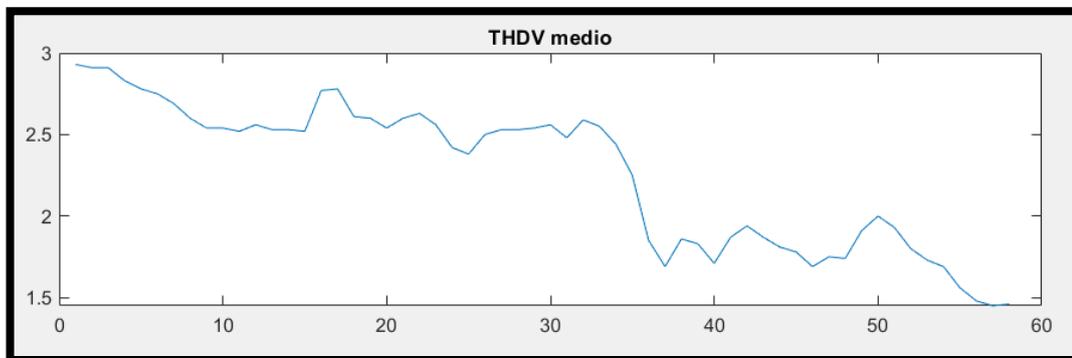


Figura 39 - Valor de tasa de distorsión armónica media de tensión 27 de octubre. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación Irradiancia - THDVmx = 0.2854

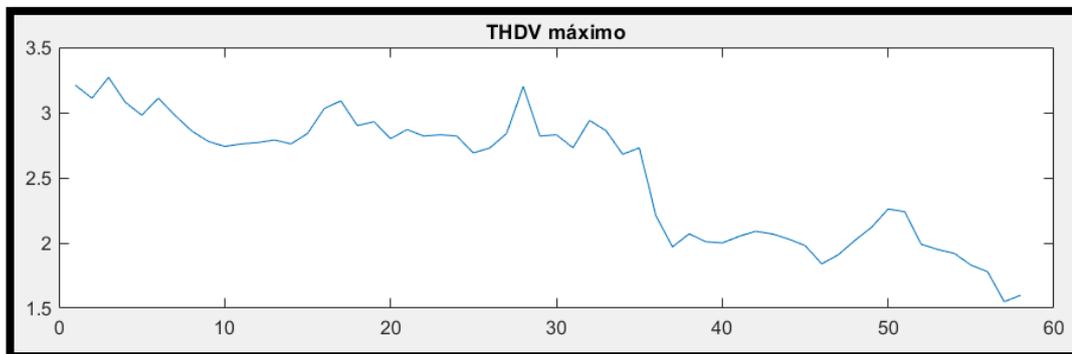


Figura 40 - Valor de tasa de distorsión armónica máxima de tensión 27 de octubre. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación Irradiancia - THDImin = -0.3613

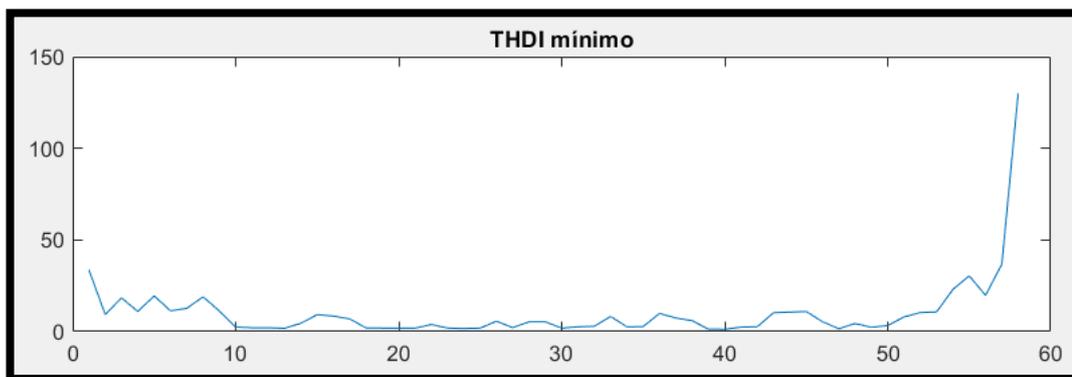


Figura 41 - Valor de tasa de distorsión armónica mínima de intensidad 27 de octubre. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación Irradiancia - THDI_m = -0.4140

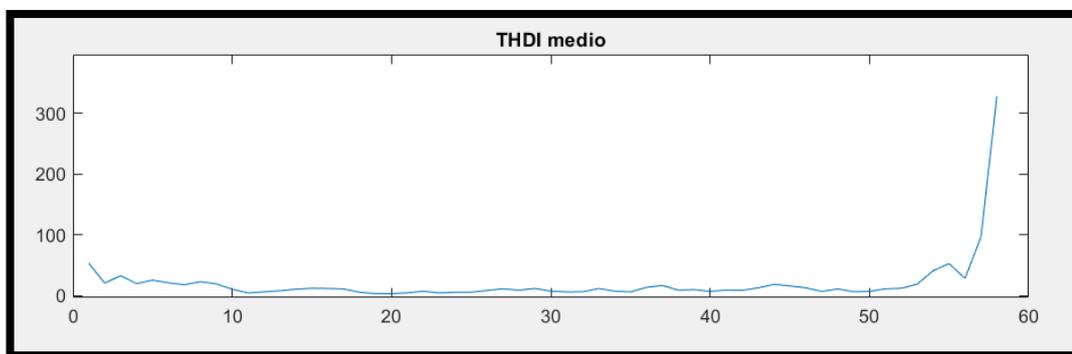


Figura 42 - Valor de tasa de distorsión armónica media de intensidad 27 de octubre. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación Irradiancia – THDI_{mx} = 0.3814

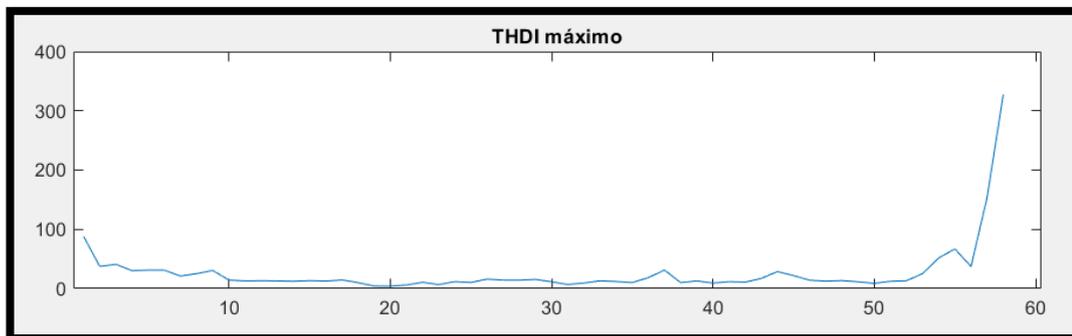


Figura 43 - Valor de tasa de distorsión armónica máximo de intensidad 27 de octubre. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación Irradiancia – Pst = 0.2701

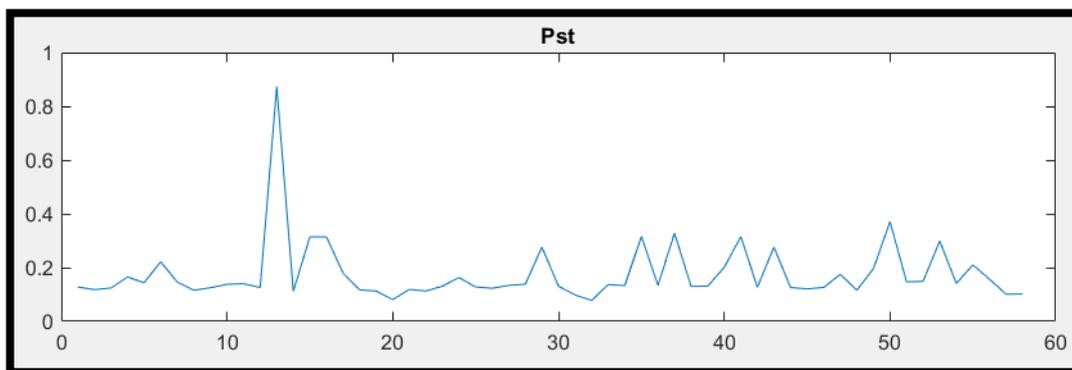


Figura 44 - Valor de Pst 27 de octubre. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación Irradiancia – Plt = 0.2623

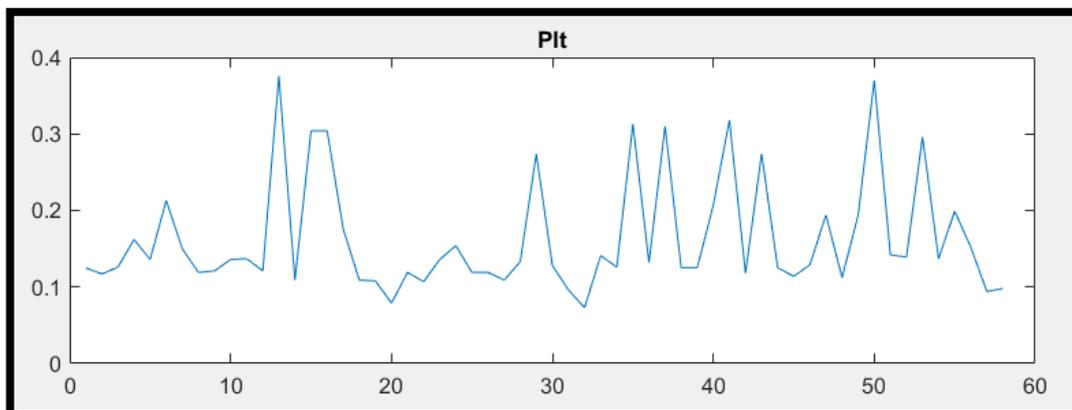


Figura 45 - Valor de Plt 27 de octubre. Fuente: [Propia]

29 de octubre

- Irradiancia (W/m^2):

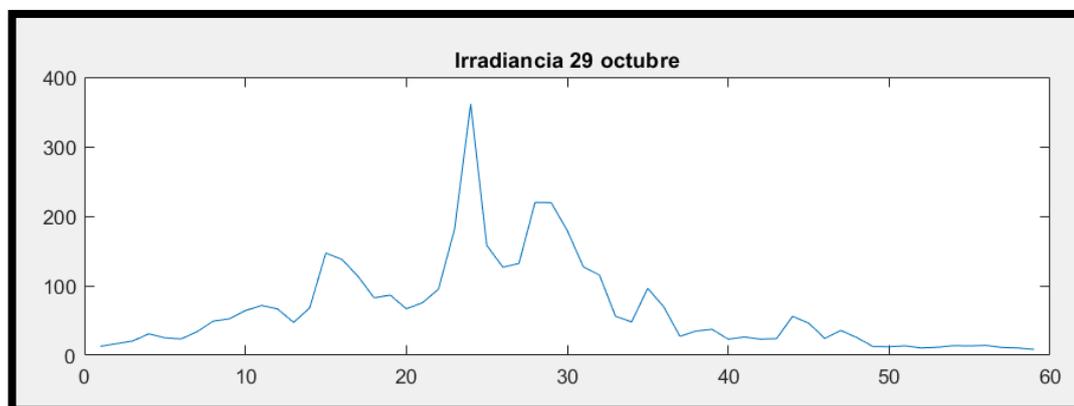


Figura 46 - Valor de Irradiancia 29 de octubre. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación Irradiancia - THDVmin = 0.4967

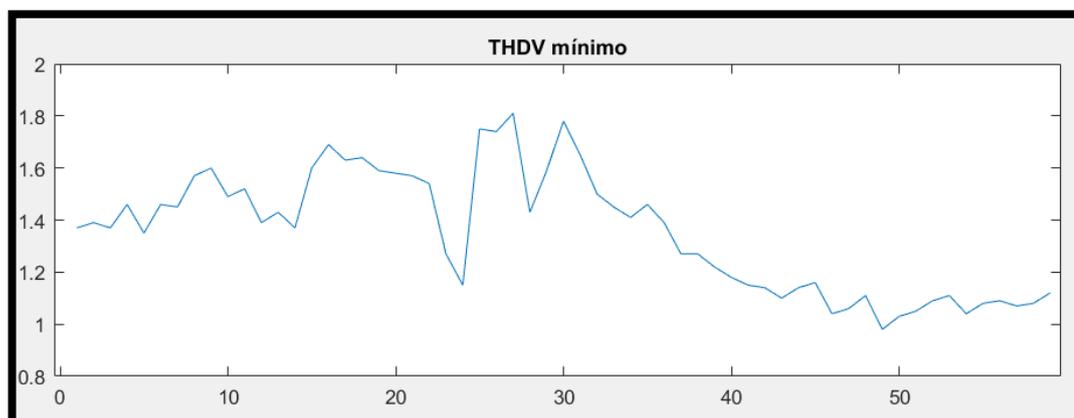


Figura 47 - Valor de tasa de distorsión armónica mínima de tensión 29 de octubre. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación Irradiancia - THD_{Vm} = 0.6785

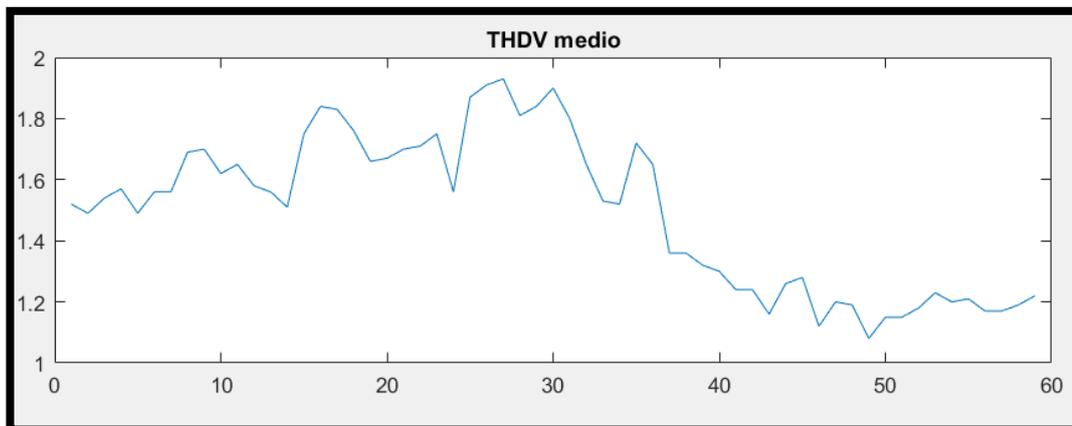


Figura 48 - Valor de tasa de distorsión armónica media de tensión 29 de octubre. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación Irradiancia - THD_{Vmx} = 0.6699

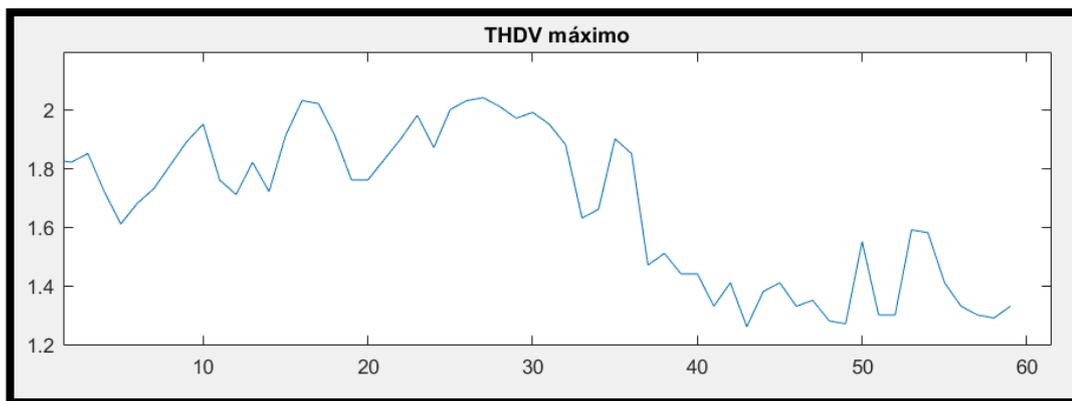


Figura 49 - Valor de tasa de distorsión armónica máxima de tensión 29 de octubre. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación Irradiancia – THDI_{min} = -0.4794

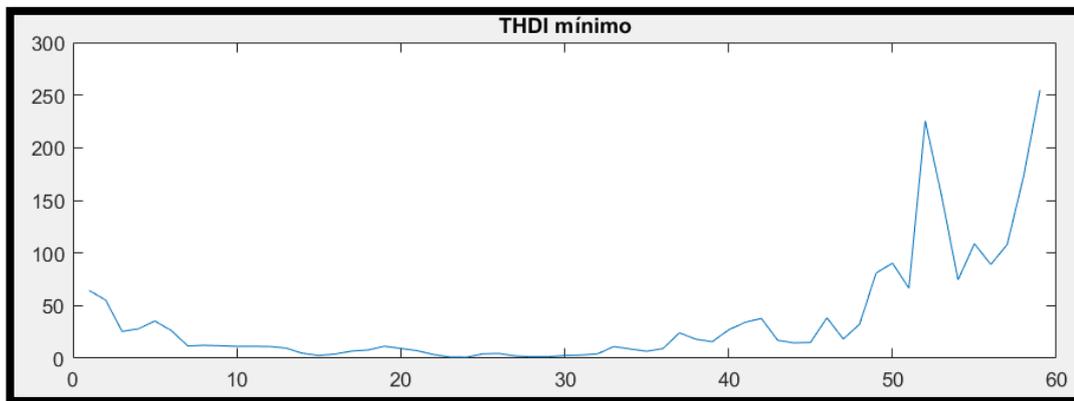


Figura 50 - Valor de tasa de distorsión armónica mínima de intensidad 29 de octubre. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación Irradiancia – THDI_m = -0.4880

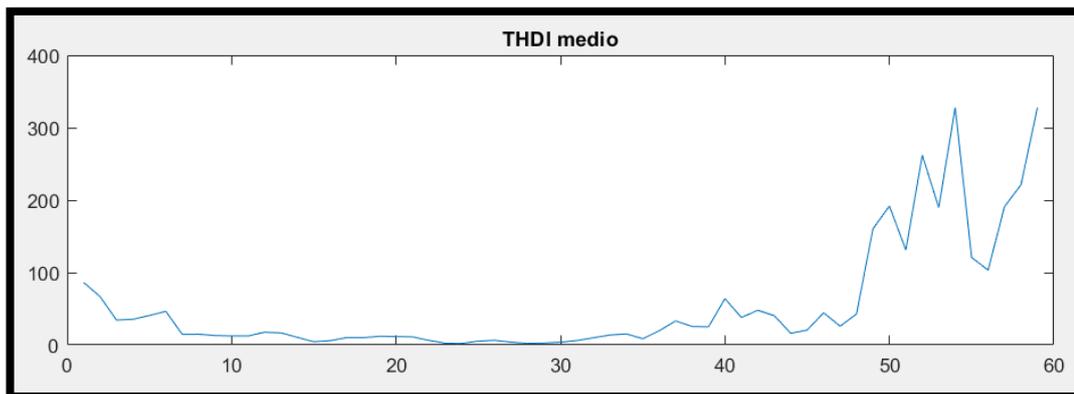


Figura 51 - Valor de tasa de distorsión armónica mínima de intensidad 29 de octubre. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación Irradiancia – THDI_{mx} = 0.4649

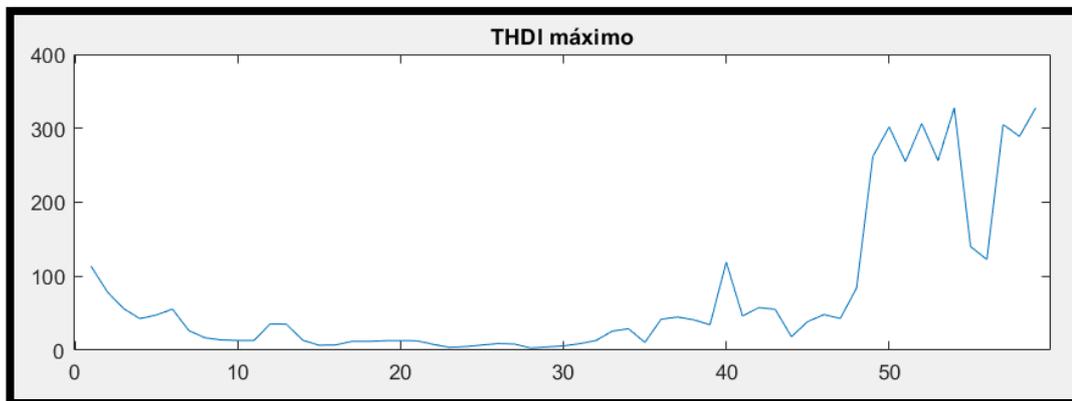


Figura 52 - Valor de tasa de distorsión armónica máxima de intensidad 29 de octubre. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación Irradiancia – Pst = 0.2346

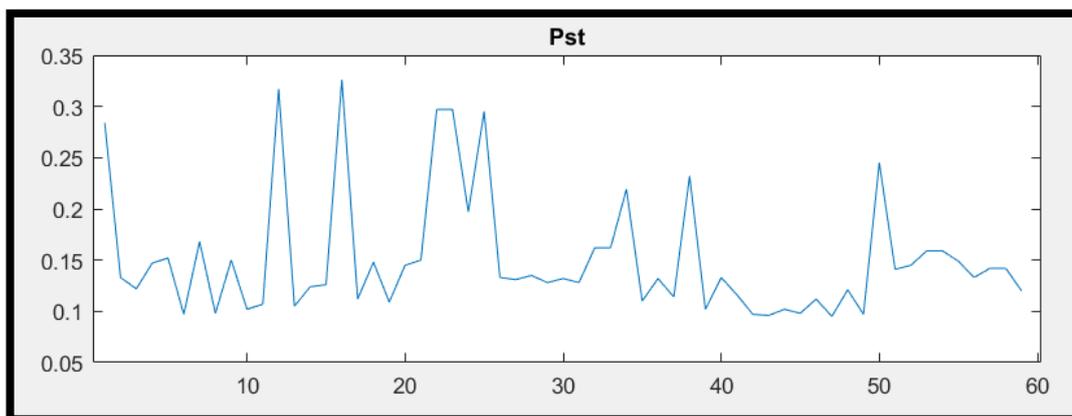


Figura 53 - Valor de Pst 29 de octubre. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación Irradiancia – Plt = 0.2065

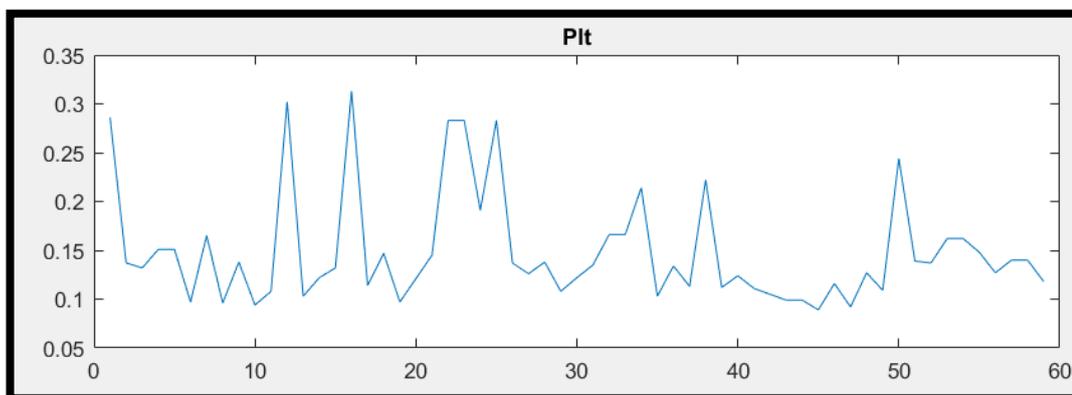


Figura 54 - Valor de Plt 29 de octubre. Fuente: [Propia]

Observando los análisis presentados se puede constatar que la influencia de la irradiancia sobre el contenido armónico de la energía eléctrica obtenida en la instalación fotovoltaica es reducida y aún menor sobre la producción de flicker.

Análisis de variación de irradiancia.

En los análisis previos, se ha considerado el valor absoluto de la irradiancia, sin embargo, otra posibilidad es que la calidad de la onda producida por la instalación fotovoltaica se vea perjudicada por las variaciones, debidas fundamentalmente al paso de nubes.

Por ello, para los días de julio y octubre analizados, se ha planteado determinar la relación entre las variaciones de las variables en vez de sus valores absolutos

4-6 de Julio

- Coeficiente correlación variaciones de Irradiancia y THD_{Vm} = 0.0227

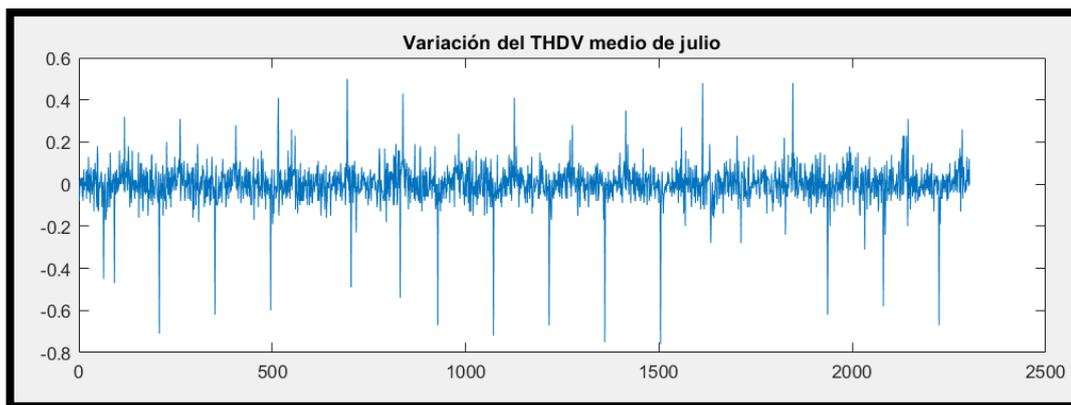


Figura 55 - Valor de variación del THDV 4-20 de julio. Fuente: [Propia]

- Coeficiente variaciones de Irradiancia y THDI medio = 0.0104

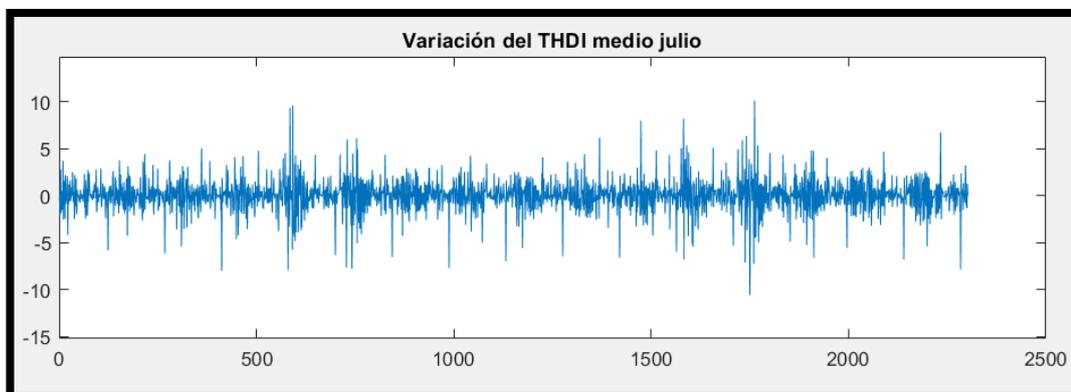


Figura 56 - Valor de variación del THDI 4-20 de julio. Fuente: [Propia]

27 de octubre

- Coeficiente correlación variaciones de Irradiancia y THDVm = 0.1224

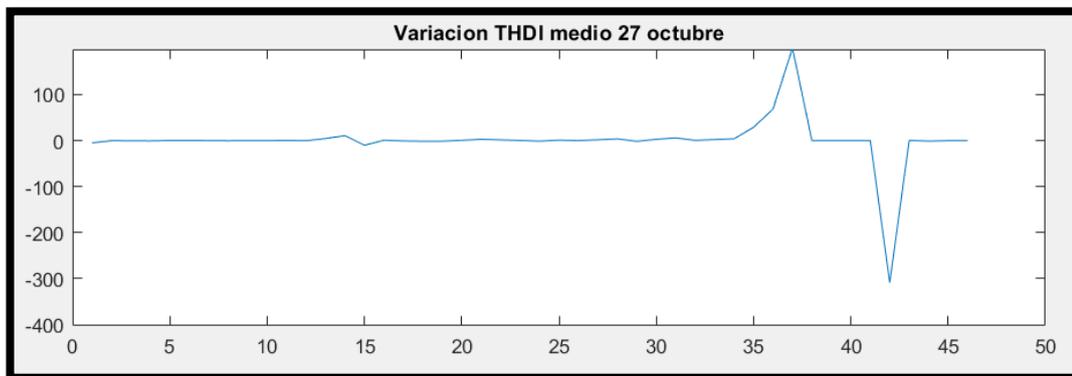


Figura 57 - Valor de variación del THDI 27 de octubre. Fuente: [Propia]

- Coeficiente correlación variaciones de Irradiancia y THDI = 0.0310

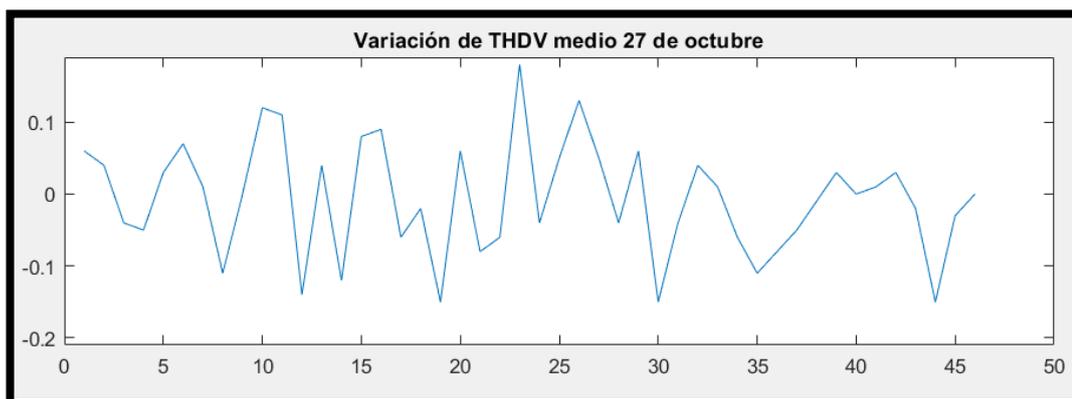


Figura 58 - Valor de variación del THDV 27 de octubre. Fuente: [Propia]

En este caso las conclusiones son similares a las obtenidas previamente, no apreciándose una clara influencia entre variaciones de la irradiancia y los parámetros de calidad de la instalación eléctrica.

6. CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se han realizado mediciones en la instalación eléctrica de una instalación hospitalaria con producción fotovoltaica. Se capturaron las ondas de tensión y corriente y se obtuvieron parámetros representativos de su calidad en los cuadros generales de baja y en los puntos de conexión de la instalación fotovoltaica a los mismos. También se midió la irradiancia como parámetro representativo de las condiciones atmosféricas que influyen sobre la producción fotovoltaica.

En primer lugar, para determinar el posible deterioro de la calidad eléctrica en la instalación como consecuencia de la inyección de la instalación fotovoltaica se realizaron medidas antes y después de su conexión. Se ha observado que el contenido armónico y de flicker aumenta ligeramente manteniéndose, no obstante, siempre dentro de los límites marcados por las normas.

En segundo lugar, se ha observado, mediante análisis de correlación, la posible influencia de la irradiancia solar sobre la calidad de la onda, concluyéndose que la relación en ningún caso es muy significativa.

Para la frecuencia, todos los días el índice de correlación entre la frecuencia es casi 0, por tanto, la irradiancia no tiene nada que ver con los cambios de frecuencia.

En el caso del contenido armónico, cuantificado a través del índice THD, se observa que, para el caso de la onda de tensión, el signo de correlación es positivo, por tanto, hay cierta evidencia de que los dos parámetros (irradiancia y THDV) son proporcionales, unos días más que otros, por ejemplo, en el día 29 de octubre hubo un 0,67 de correlación (2/3 partes están de correlacionados) por otra parte, en el día 28 de octubre se obtuvo un 0,18 de correlación.

Para la onda de corriente se obtiene una correlación negativa, por tanto, la irradiancia es inversamente proporcional al THDI, y se puede ver perfectamente en todas las gráficas que en el transcurso del día hay poca tasa de distorsión armónica, exceptuando cuando se está acabando el día y baja drásticamente la producción de los paneles, es en ese momento donde podemos observar un aumento de la tasa.

Por otra parte, la correlación entre la irradiancia y el flicker es positiva por tanto si hay relación entre ellos, aunque hay que decir que esa correlación no es muy grande.

Finalmente, reseñar que en un estudio previo [Referencia 26] sí que se observó una mayor relación entre la irradiancia y sobre todo sus variaciones y el contenido armónico de la energía eléctrica producida por una instalación

fotovoltaica. Aunque el contexto era distinto, pues la instalación analizada se trataba de un parque fotovoltaico conectado a la red de Alta Tensión. No obstante, la razón de la diferencia en las conclusiones puede estar en la tecnología de los inversores empelados en cada caso, pues en el caso del Hospital Río Ortega se trata de inversores de última generación, mientras que en el caso referenciado en la bibliografía son inversores de 20 años de antigüedad.

7. BIBLIOGRAFÍA

7. BIBLIOGRAFÍA

1. <https://www.donsion.org/calidad/documentacion/C3-v-frecuencia.pdf>
Fecha de consulta: (14/2/2024)
2. Tema 1.- Los sistemas de energía eléctrica (2023_24), Centrales eléctricas. Fecha de consulta: (2/10/2023)
3. <https://www.donsion.org/calidad/documentacion/C4-v-tension.pdf>
Fecha de consulta: (4/2/2024)
4. <https://www.donsion.org/calidad/documentacion/guia-calidad.pdf>
Fecha de consulta: (1/2/2024)
5. Fluctuaciones (flickers) de iluminación y tensión: importancia, efectos y medición | Sonel S.A. Fecha de consulta: (10/3/2024)
6. III Calidad de Servicio.pdf Mantenimiento de instalaciones eléctricas, Grado en Ingeniería Eléctrica, 2022-2023 Fecha de consulta: (20/9/2023)
7. Joaquim Meléndez Frigola, Sergio Herraiz Jaramillo, Joan Colomer Llinás “Calidad de onda en el servicio eléctrico” Automática e instrumentación, Marzo 2005 / n.º 360.
8. <https://www.pqs.com.co/post/powerquality-importancia-de-tener-una-buena-calidad-de-la-energia> Fecha de consulta: (4/2/2024)
9. https://www.andi.hn/wp-content/uploads/2014/11/3-Calidad-de-la-Energ+%C2%A1a_sn.pdf Fecha de consulta: (7/2/2024)
10. <https://www.secovi.com/blog/6/por-que-es-importante-la-calidad-de-energia> , Fecha de consulta: (7/2/2024)
11. <https://www.donsion.org/calidad/documentacion/C6-huecos.pdf>
Fecha de consulta: (20/2/2024)
12. Armónicos eléctricos - CIRCUTOR Fecha de consulta: (10/3/2024)
13. https://www.youtube.com/watch?v=LhaE_rLDjAQ Fecha de consulta: (23/2/2024)
14. <https://circuitor.com/soporte/formacion/notebooks/armonicos-electricos/> Fecha de consulta: (23/2/2024)
15. M^a Inmaculada Zamora Belver, Valentín Macho Stadler, “Estudio bibliográfico sobre: distorsión armónica producida por convertidores estáticos “ Iberdrola, 1997.
16. Manuel Pérez Donsión, “Calidad de la energía eléctrica”, Universidad de Vigo 2016.)
17. <https://www.youtube.com/watch?v=aelUs9BS2ko> Fecha de consulta: (6/3/2024)
18. Energía Solar Fotovoltaica: qué es, para que sirve y cómo funciona (cursosaula21.com) Fecha de consulta: (5/4/2024)
19. <https://www.appa.es/appa-fotovoltaica/que-es-la-energia-fotovoltaica/> Fecha de consulta: (6/4/2024)
20. <https://endef.com/tipos-instalaciones-solares-fotovoltaicas/> Fecha de consulta: (6/4/2024)
21. <https://www.helioesfera.com/instalacion-fotovoltaica-aislada/> Fecha de consulta: (6/4/2024)

22. <https://enaltiasolar.es/esquema-de-una-instalacion-fotovoltaica-conectada-a-red/> Fecha de consulta: (6/4/2024)
23. Iyo Horikoshi, "Análisis de las componentes armónicas de los inversores fotovoltaicos de conexión a red", Proyecto Fin de Carrera 2009, Escuela Politécnica Superior, Universidad Carlos III.
24. <https://www.opengy.com/los-desafios-de-los-armonicos-en-plantas-fotovoltaicas-una-explicacion-sencilla-a-un-problema-recurrente/> Fecha de consulta: (3/4/2024)
25. https://www.jmp.com/es_es/statistics-knowledge-portal/what-is-correlation/correlation-coefficient.html Fecha de consulta: (20/5/2024)
26. D.A. Elvira-Ortiz et al., "Study of the harmonic and interharmonic content in electrical signals from photovoltaic generation and their relationship with environmental factors", J. Renewable Sustainable Energy 11, 043502 (2019), <https://doi.org/10.1063/1.5094038>.