

Trabajo Fin de Grado

Obtención de los parámetros de flicker compatibles con
las medidas de severidad (Pst) de una instalación
fotovoltaica

Autor

Youssef Litim Larhlid

Director/es

Raúl Igual Catalán

Carlos Medrano Sánchez

Titulación del autor

Grado en Ingeniería Electrónica y Automática

Escuela Universitaria Politécnica de Teruel (EUPT)

Septiembre 2020

Resumen

Este proyecto se enmarca en el ámbito de la calidad de la energía eléctrica. En concreto, aborda el estudio de la distorsión conocida como flicker o parpadeo de la tensión en instalaciones fotovoltaicas. Su severidad se mide a través de un indicador denominado Pst (short term flicker severity) cuyo cálculo no es trivial y se basa en un modelo de filtros.

El proyecto surge para dar solución a uno de los problemas de los sistemas de clasificación automática de las distorsiones en la calidad de la energía eléctrica: la falta de señales eléctricas reales con distorsiones en el dominio del tiempo sobre las que entrenar y probar los clasificadores automáticos. Registrar estas señales en una red eléctrica real es muy costoso, por lo que prácticamente no existen bases de datos públicas de señales distorsionadas en el dominio del tiempo. Para suplir esta carencia se recurre a señales simuladas obtenidas de modelos matemáticos. Los modelos matemáticos del flicker tienen una serie de parámetros que afectan al cálculo del indicador de la severidad del flicker (Pst). Este proyecto aborda la determinación de los parámetros de la distorsión en la calidad de la energía de tipo flicker compatibles con las medidas de Pst obtenidas en instalaciones solares fotovoltaicas reales. Ajustando los parámetros del modelo matemático del flicker a los valores de Pst reales, será posible obtener señales de flicker simuladas con el modelo cercano a las señales de flicker reales presentes en las instalaciones fotovoltaicas.

Para conseguir ajustar los parámetros de la distorsión flicker de tal manera que represente fielmente al flicker presente en instalaciones fotovoltaicas reales se han tomado diversos valores del indicador Pst obtenidos de una instalación fotovoltaica real. Utilizando un modelo de Simulink de cálculo del Pst a partir de los parámetros del flicker se ha realizado una aproximación inicial de los rangos de los parámetros del flicker que representan al flicker presente en una instalación real. El problema de este modelo de Simulink es que tiene una enorme carga computacional y no resulta adecuado para realizar simulaciones masivas. Por ello se ha realizado una aproximación a un polinomio multivariable que proporciona la misma salida que la función de Simulink y puede ser evaluado con un coste computacional mínimo. Por tanto, en este proyecto, se ha recurrido a varios métodos numéricos para resolver el problema de ajuste (resolución de ecuaciones, dibujo de contornos o interpolación), realizando los cálculos de una manera eficaz y en un tiempo limitado.

Utilizando este polinomio multivariable, se han encontrado las regiones de parámetros del flicker que permitirían explicar los Pst experimentales provenientes de instalaciones fotovoltaicas reales. Esta información se presenta de manera útil.

Abstract

This project is in the field of power quality. Specifically, it addresses the study of the distortion known as flicker in photovoltaic installations. Its severity is measured using an indicator called Pst (short term flicker severity) whose calculation is not trivial and is based on a filter model.

The project aims to solve one of the problems of automatic classification systems of power quality distortions: the lack of real electrical signals with distortions in the time domain to be used for training and testing automatic classifiers. Recording these signals in real electrical grids is very difficult, so there are only a few public databases of signals with distortions in the time domain. To cover this gap, simulated signals obtained from mathematical models are used. The mathematical models of flicker have different parameters that affect the calculation of the indicator Pst. This project addresses the determination of the parameters of the flicker distortion compatible with the Pst measurements obtained in real photovoltaic solar installations. By adjusting the parameters of the flicker mathematical model to the real Pst values, it will be possible to obtain flicker signals simulated with the model close to the real flicker signals that can be found in photovoltaic installations.

In order to adjust the parameters of the flicker distortion, in such a way that the result faithfully represents the flicker of real photovoltaic installations, several values of the Pst indicator obtained from a real photovoltaic installation have been used. Using a Simulink model to calculate the Pst indicator from the flicker parameters, an initial approximation has been obtained with the ranges of the flicker parameters that represent flicker distortions of real installation. The problem with this Simulink model is that it has a huge computational load and is not suitable for performing massive simulations. For this reason, an approximation has been made to a multivariate polynomial that provides the same output as the Simulink function and can be evaluated with minimal computational cost. Therefore, in this project, several numerical methods have been used to solve the adjustment problem (solving equations, drawing contours or interpolation). The calculations have been performed in efficiently and fast.

Using this multivariate polynomial, we have obtained the value ranges of the flicker parameters that are in agreement with the experimental Pst values from the real photovoltaic installations. This information is presented graphically.

Índice

1. Motivación y objetivos del proyecto	6
1.1. Motivación	6
1.2. Objetivos.....	6
2. Instalaciones fotovoltaicas.....	7
2.1. Introducción.....	7
2.2. Efecto fotoeléctrico.....	7
2.3. Semiconductores.....	7
2.4. Tipos de instalaciones solares fotovoltaicas.....	8
2.4.1.Instalaciones autónomas.....	8
2.4.2.Instalaciones conectadas a red.....	8
2.5. Componentes de una instalación PV.....	9
2.5.1.Módulos PV.....	9
2.5.2.Inversores.....	12
2.5.3.Baterías.....	12
2.5.4.Reguladores.....	13
3. Distorsiones en la calidad de energía eléctrica.....	14
4. Flicker.....	15
4.1. Efectos del flicker.....	15
4.2. Parámetros de medida.....	17
4.3. Instrumento de medida.....	18
4.4. Clases de medidores de flicker.....	19
5. Flicker en instalaciones fotovoltaicas.....	20
5.1. Efectos de las fluctuaciones de tensión	21
6. Materiales y métodos.....	22
6.1. Estructura de los experimentos y tareas.....	22
6.2. Modelo matemático para generar ondas con flicker.....	23
6.3. Base de datos con valores de Pst reales.....	24
7. Programa para la generación y simulación de ondas con flicker.....	25
7.1. Programación y generación de ondas con flicker.....	25
7.2. Programa de simulación de onda.....	27
7.3. Diagrama de flujos.....	28
8. Aproximación inicial: polinomio monovariado.....	30
8.1. Diagrama de flujo.....	31
8.2. Aproximación monovariado del parámetro frecuencia de flicker (ff).....	31
8.3. Aproximación monovariado del parámetro λ	34
8.4. Aproximación monovariado del parámetro número de periodos distorsionados.....	35
9. Aproximación a polinomio multivariado.....	36
9.1. Error de ajuste.....	37
9.2. Gráficas.....	39
10. Cálculo de los parámetros del flicker asociados a una instalación fotovoltaica y dibujos de sus contornos.....	42
10.1. Graficas de contornos.....	44
11. Conclusión.....	46
12. Referencias.....	47

Anexo I: Base de datos Pst por ajuste polinómico.

Anexo II: CD con el código fuente.

1. Motivación y objetivos del proyecto

1.1 Motivación

Una de las distorsiones eléctricas más frecuentes en las instalaciones fotovoltaicas es el flicker o parpadeo. Es necesario identificar cuando se produce esta distorsión y clasificar su tipo de manera instantánea. Sin embargo, los inversores de las instalaciones solares no registran las ondas en el dominio del tiempo (es inviable por la cantidad de datos generada), pero sí registran algunos parámetros (Pst, short-term flicker severity y Plt, long-term flicker severity) que se obtienen a partir de esas ondas.

Para poder desarrollar sistemas de detección y clasificación instantánea del flicker es necesario disponer de señales en el dominio del tiempo que representen fielmente a la instalación real [1][2]. Como estas señales no se pueden capturar, se puede utilizar un modelo matemático que las represente. Este modelo matemático dependerá de diversos parámetros del flicker. Por tanto, para disponer de un modelo efectivo es necesario ajustar los parámetros del mismo para que sus valores de Pst y Plt asociados sean similares a los que se registran en una instalación solar fotovoltaica real. Como el Plt se calcula a partir del Pst, basta con realizar el ajuste para el parámetro Pst. Este es el objeto de este proyecto.

1.2 Objetivos

El **objetivo general** de este proyecto es obtener el rango de valores de los parámetros de un modelo matemático que modela la distorsión flicker de tal modo que este modelo con sus parámetros ajustados sea reflejo de las señales eléctricas reales con flicker que existen en las instalaciones solares fotovoltaicas.

Este objetivo general se puede desglosar en varios **objetivos específicos**:

- Ser capaz de desarrollar un programa en Matlab/Simulink que, a partir de una señal generada a través del modelo matemático del flicker, sea capaz de determinar su valor de Pst asociado.
- Obtener un polinomio que, a partir de los parámetros del flicker, sea capaz de determinar el valor de Pst asociado y se pueda ejecutar con un coste computacional bajo:
 - Realizar una primera aproximación inicial a través de un ajuste monovariante para cada parámetro del modelo matemático del flicker. Con esto se pretende obtener un “tanteo” previo que permita centrar el análisis multivariable posterior.
 - Realizar una aproximación multivariable, es decir, obtener el polinomio realizando el ajuste con todos los parámetros del modelo matemático del flicker.
- Utilizando el polinomio calculado, obtener el conjunto de valores de los parámetros del flicker que permitan obtener valores de Pst similares a los de las instalaciones fotovoltaicas. Realizar una representación gráfica en forma de contornos.

2. Instalaciones fotovoltaicas

2.1 Introducción

La electricidad es una de las formas de energía más versátiles necesaria para numerosas actividades. La tendencia actual es hacia un mundo cada vez más eléctrico lo que hace imprescindible disponer de abundante energía eléctrica.

Los sistemas tradicionales de obtención de energía tienen asociados inconvenientes como la limitación de recursos fósiles en el caso de las centrales térmicas, eliminación de residuos generados y riesgo de accidente nuclear para las centrales nucleares, etc. Por tanto, las fuentes de energía alternativas son necesarias.

Una fuente de energía alternativa es la energía solar fotovoltaica de origen renovable obtenida por la radiación solar mediante un dispositivo semiconductor denominado célula fotovoltaica [3].

2.2 Efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones de un metal cuando se hacen incidir partículas de luz, fotones, que impactan con los electrones del metal, arrancando sus átomos. El electrón que se libera, produce una corriente eléctrica en su viaje hacia otro átomo.

El efecto fotoeléctrico fue descubierto y descrito por Heinrich Hertz, en 1887, al observar que el arco que salta entre dos electrodos conectados a alta tensión alcanza distancias mayores cuando se ilumina con luz ultravioleta.

2.3 Semiconductores

Los semiconductores son materiales con coeficientes de resistividad de valores intermedios entre conductores y aislantes que se pueden clasificar en dos tipos:

- Semiconductores intrínsecos: Semiconductor puro (sin ningún tipo de impurezas) que se comporta como un aislante.
- Semiconductores extrínsecos: Son semiconductores intrínsecos a los que les agregan impurezas para doparlos (proceso que se lleva a cabo para modificar las propiedades eléctricas de un semiconductor) [3].

Dependiendo del tipo de impureza se distinguen:

- Semiconductores tipo P ("figura 1"): la impureza se obtiene mediante elementos trivalentes (3 electrones de valencia), como el Boro (B), como dopantes. Al no aportar suficientes electrones para completar la capa de valencia, la red cristalina presenta un defecto de electrones que da lugar a la aparición de un hueco y por lo tanto acepta el paso de electrones que no pertenecen a la red cristalina.
- Semiconductores tipo N ("figura 2"): las impurezas son elementos pentavalentes (5 electrones de valencia) como el Fósforo (p), Arsénico (As) etc. Cuatro electrones se enlazan completando la red cristalina y el electrón sobrante se mueve fácilmente por la red aumentando su conductividad.

De los semiconductores más utilizados se encuentran el germanio (Ge) y el silicio (Si), siendo el silicio el más empleado por su abundancia y por la capacidad de trabajar a altas temperaturas.

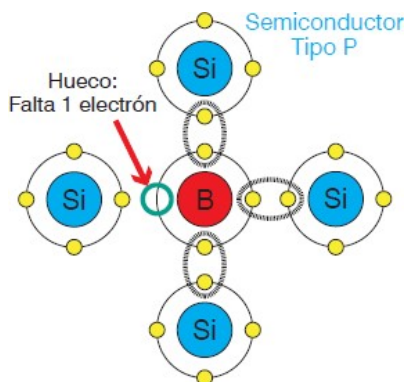


Fig.1 Semiconductor tipo P [3]

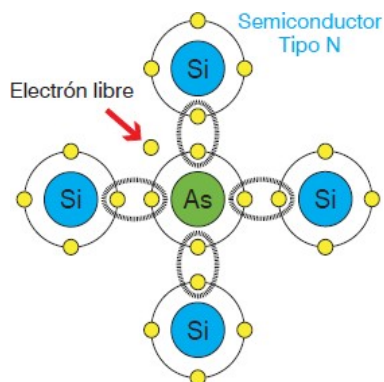


Fig.2 Semiconductor tipo N [3]

2.4 Tipos de instalaciones solares fotovoltaicas (PV)

Las instalaciones fotovoltaicas se pueden clasificar en función de la aplicación a la que van destinadas. Así, se distinguen instalaciones autónomas e instalaciones conectadas a red.

2.4.1 Instalaciones autónomas.

La energía producida no está vinculada a la red eléctrica de manera que dicha energía se consume en el lugar donde se ha generado. Existen diferentes aplicaciones para este tipo de instalaciones, entre las cuales se encuentran:

- Electrificación en zonas rurales y/o aisladas, muy a menudo se pueden encontrar paneles solares en casas rurales, granjas, etc. ya sea por la falta de acceso a la red o simplemente por ahorro energético.
- Señalización (señales de tráfico luminosas), alumbrado público al que resulta complicado enlazar una red eléctrica convencional [3][4].

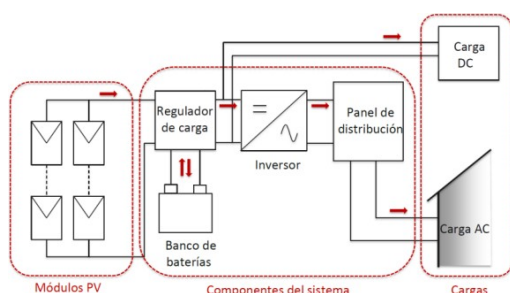


Fig.3 Instalación aislada[5]

2.4.2 Instalaciones conectadas a la red.

En esta modalidad el productor vierte la energía producida a la red eléctrica. Una entidad de comercialización de la energía del país compra o compensa dicha energía. Una de las principales ventajas de este tipo de instalación es que la energía se vierte directamente a la red y, por lo tanto, no es necesario su almacenaje en baterías.

Por otro lado, la generación de electricidad se realiza precisamente de día cuando la

demanda de electricidad aumenta considerablemente.

Esta es la configuración de las centrales fotovoltaicas, huertas solares, etc., amplios recintos con instalaciones fotovoltaicas que pueden pertenecer a más de un propietario que posibilita mejoras en el mantenimiento, vigilancia, pólizas de seguros, etc. También cabe destacar que instalaciones domésticas pueden también disponer de esta modalidad [3][4].

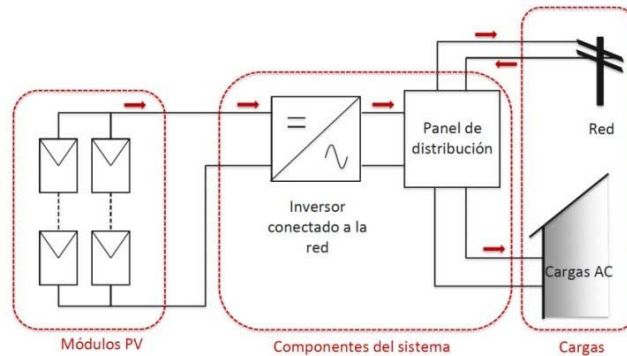


Fig.4 Instalación conectada a la red [5]

2.5 Componentes de una instalación PV.

Tal y como se muestra en las "figuras 3 y 4", una instalación fotovoltaica dispone de varios componentes: módulos, inversores, baterías y reguladores de carga.

2.5.1 Módulos PV

Un módulo fotovoltaico o panel solar está formado por un conjunto de células unidas eléctricamente y encapsuladas. Es el elemento principal de toda instalación de energía solar, se caracteriza por convertir los fotones provenientes de la luz del sol en electricidad, cuyo funcionamiento se debe al efecto fotoeléctrico comentado anteriormente.

La célula fotovoltaica eléctricamente se comporta como un diodo con una extensa superficie de manera que cuando sobre ella incide la radiación solar esta se manifiesta como un generador de corriente (Fig. 6).

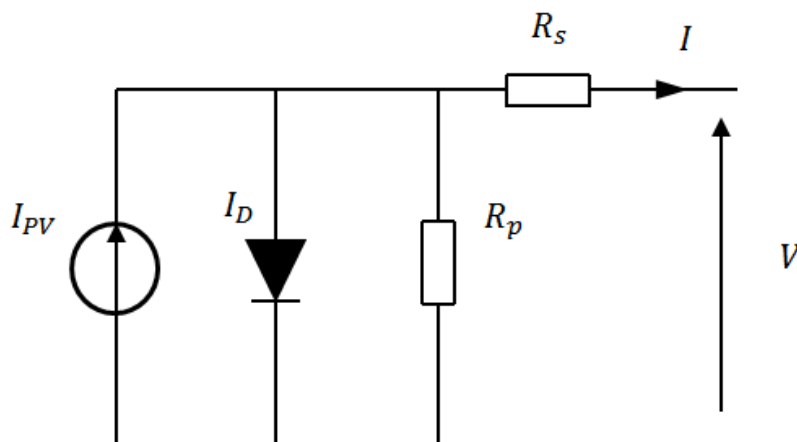


Fig.5 célula fotovoltaica circuito eléctrico [6]

Atendiendo a la tecnología de fabricación de las células fotovoltaicas podemos diferenciar entre monocristalinas, policristalinas o amorfas [3] (Tabla 1).

Silicio	Características	Ventajas	Inconvenientes
Monocristalino	Silicio fundido que solidifica formando un único cristal de grandes dimensiones de color azul uniforme	<ul style="list-style-type: none"> • Mejor rendimiento (15-18%) • Buena relación potencia-superficie • Mayor cantidad de fabricantes 	Coste elevado
Policristalino	Se forman varios cristales de aspecto azulado no uniforme.	<ul style="list-style-type: none"> • Células cuadradas con buen funcionamiento en un modulo • Eficiencia de conversión óptima 	Bajo rendimiento para una iluminación baja (12-14%)
Amorfo	Para su fabricación se deposita en forma de vapor una película de silicio sobre superficie de acero	<ul style="list-style-type: none"> • Coste bajo con respecto a otras tecnologías • Admite soporte rígido o flexible 	Bajo rendimiento (<10%)

Tabla1. Células fotovoltaicas

Parámetros fundamentales:

- **Tensión de circuito abierto (V_{oc}):** máxima tensión entre los bornes del módulo para una intensidad nula.
- **Corriente de cortocircuito (I_{sc}):** corriente máxima que puede circular por el módulo solar. Tiene lugar cuando sus terminales se encuentran cortocircuitados.
- **Temperatura de operación nominal de la célula.**
- **Factor de forma (FF):** relación entre la potencia máxima y el producto de I_{sc} y V_{oc} , será mayor cuanto más eficaz sea la célula fotovoltaica. Un valor bajo de FF está asociado a una pérdida de eficiencia en el dispositivo.

La eficiencia se mide en porcentaje y relaciona la potencia eléctrica que entrega el módulo y la potencia de la radiación que incide en él.

Curvas características

La curva característica de los módulos fotovoltaicos varía dependiendo de la temperatura del módulo y de la irradiación solar.

La producción de un módulo fotovoltaico es prácticamente proporcional a la radiación solar incidente, es decir, cuanto mayor sea la radiación mayor será la potencia de salida del módulo. Sin embargo, ocurre lo contrario con la temperatura, la potencia de salida disminuye

con la temperatura.

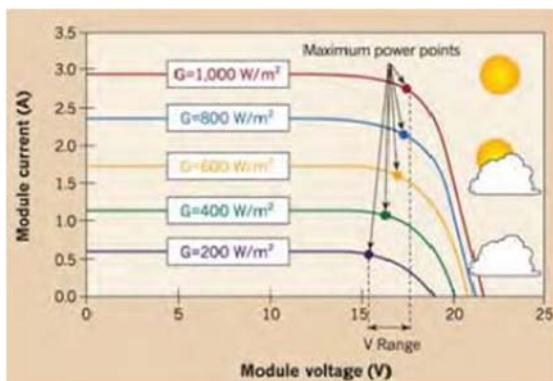


Fig.6 Variación curva V-I con la radiación[3]

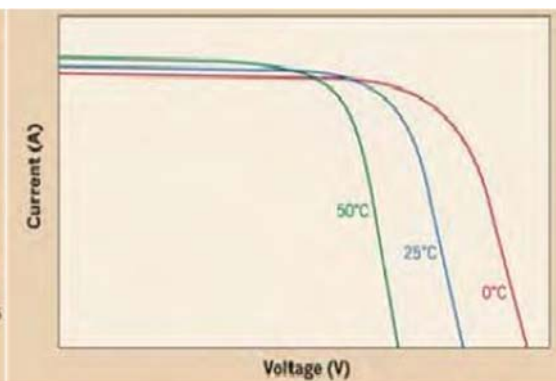


Fig.7 Variación curva V-I con la Tª[3]

Así, dependiendo de las condiciones de trabajo, el módulo operará en una curva diferente y en un punto específico de la curva correspondiente. Cabe destacar, el punto de máxima potencia (PMPP) que es el punto donde se genera la máxima energía posible.

Para asegurar el funcionamiento del módulo en el punto de máxima potencia se debe forzar externamente a trabajar a una tensión o corriente determinadas. Sin embargo, el punto de interés cambia debido a la dependencia de la curva con la temperatura y la irradiación. Para asegurar el funcionamiento en el punto de máxima potencia se suelen utilizar dispositivos denominados **MPP Trackers**, que se encargan de buscar el punto de máxima potencia y forzar al módulo a trabajar en dicho punto [3].

Conexión de módulos.

En el diseño de una instalación fotovoltaica normalmente es necesario más de un módulo solar para suministrar la potencia requerida. Este hecho conlleva la utilización de más de un módulo. La conexión de módulos puede ser en paralelo o en serie. En la práctica se combinan ambas conexiones para adaptar la corriente y/o tensión que admite el inversor o regulador.

- **Conexión serie:** consiste en conectar el terminal positivo de un módulo al terminal negativo del módulo siguiente hasta alcanzar el último módulo. La salida del string será el terminal positivo del primer módulo y el negativo del último. La tensión resultante es la suma de las tensiones de los módulos, mientras que la corriente se mantiene constante y es la misma que atraviesa cada uno de los paneles.
- **Conexión en paralelo:** se conectan los terminales positivos de cada uno de los módulos y por otro lado los terminales negativos. La salida del string será entre el terminal positivo y negativo de cualquier módulo. En este caso se mantiene la tensión del conjunto que será igual que la tensión de uno de ellos, mientras que la intensidad final es equivalente a la suma de las intensidades de todos los módulos conectados[3].

2.5.2 Inversores

Los inversores, también denominados convertidores, son dispositivos que se encargan de convertir la corriente continua de la instalación en corriente alterna. El objetivo del inversor en instalaciones de autoconsumo es proporcionar corriente alterna similar a la de la red eléctrica, con el fin de ser utilizada para aquellos dispositivos que funcionan con corriente alterna.

Por otro lado, el inversor conectado a la red eléctrica debe proporcionar corriente con las mismas características que la red eléctrica, tanto en forma (sinusoidal) como en valor eficaz y frecuencia para evitar perturbaciones.

Características de un inversor:

- Potencia nominal con la que trabaja, tensión nominal de entrada y frecuencia de salida, que debe ser compatible con la de la red eléctrica correspondiente.
- Eficiencia energética o rendimiento del convertidor
- Capacidad de sobrecarga y protección térmica: capacidad de los inversores para aguantar durante un tiempo determinado potencias superiores a la nominal.
- Baja distorsión armónica: la distorsión armónica es un parámetro que se relaciona con la calidad de la onda generada.
- Buen comportamiento con la variación de la temperatura.
- Arranque automático y estado en espera. Permite el arranque del convertidor cuando este detecte demanda energética por encima de un umbral previamente fijado y su desconexión cuando no existe demanda energética.

2.5.3 Baterías

Las baterías son componentes electro-químicos capaces de almacenar energía eléctrica. En las instalaciones autónomas parte de la energía producida durante las horas de radiación solar se almacena en baterías para ser utilizada en otro momento.

En función de su composición química se distinguen diferentes tipos: plomo-ácido, las más utilizadas en las instalaciones fotovoltaicas, y alcalinas (níquel-cadmio) [3] [4].

Las principales características de una batería son:

- **Tensión nominal:** voltaje de operación de la batería. Algunos valores típicos son: 12, 24 ó 48v.
- **Capacidad:** cantidad de carga eléctrica que la batería puede suministrar a la tensión nominal. La capacidad se obtiene mediante el producto entre la intensidad de descarga por el tiempo que tarda y su unidad de medida es el amperio-hora (Ah).
- **C-rate:** parámetro que indica la velocidad de descarga de la batería.

- **Rendimiento:** relación entre la energía de salida (descarga) y la energía de entrada (carga).
- **Tiempo de vida:** número de ciclos de carga y descarga que la batería puede soportar hasta que la capacidad adquiere un valor inferior al 80% del valor nominal.

2.5.4 Reguladores

Dispositivo presente en las instalaciones fotovoltaicas que requieran uso de baterías. Su principal misión consiste en asegurar durante la carga y descarga el trabajo en condiciones correctas, respetando los límites de tensión y corriente. Es un elemento indispensable ya que las instalaciones solares suelen estar diseñadas para una tensión mayor que la tensión final conectada a la batería. Existen reguladores que incorporan *MPP trackers* que determinan el punto de operación óptimo de los módulos [3].

Algunas funciones características del regulador son:

- Cortar la alimentación a la batería cuando se encuentra cargada
- Cuando no existe suministro de energía por parte de los módulos, evitar que la batería se descargue en exceso
- Controlar la temperatura de la batería y adaptar el voltaje de la batería.

3. Distorsiones en la calidad de la energía eléctrica

Una instalación solar fotovoltaica debería ser capaz de proporcionar energía en condiciones óptimas. Esto implica que la forma de onda generada debería ser sinusoidal. No obstante, en todo sistema eléctrico de potencia puede haber distorsiones en la forma de onda generada siendo las más habituales los huecos de tensión, sobretensiones, interrupciones, oscilatorios de tipo transitorio, armónicos, flicker (parpadeo) y muescas de tensión. Es común que haya distorsiones que sean una combinación de dos o más tipos de distorsiones simples.

En este TFG nos vamos a centrar en una distorsión muy habitual en los sistemas de producción de energía solar fotovoltaica: el flicker.

Algunas de las distorsiones más comunes en la calidad la energía eléctrica podemos encontrar las siguientes ("figura 8"):

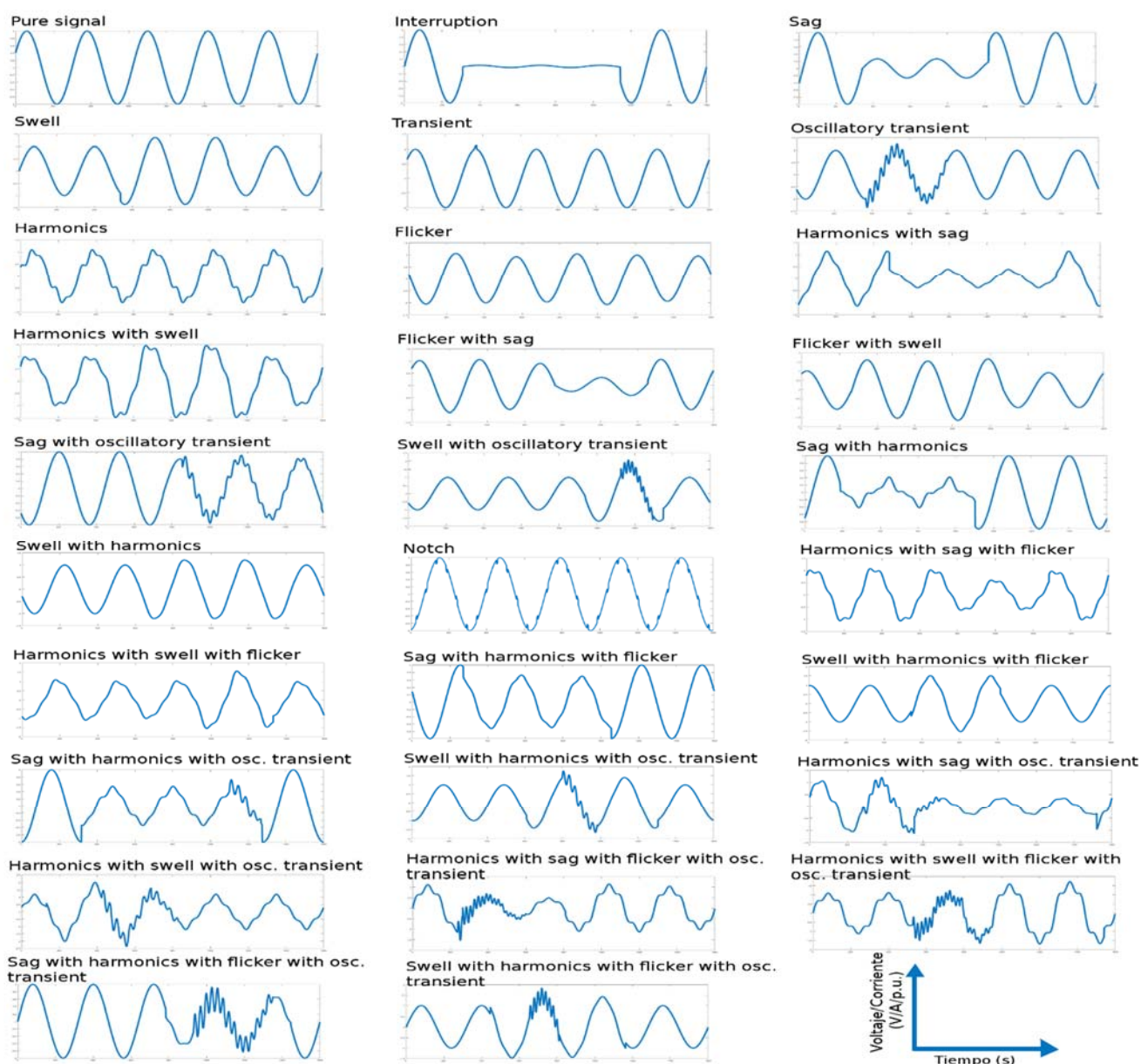


Fig.8 Distorsiones en la calidad de la energía [7]

4. Flicker

El parpadeo o flicker es un fenómeno que puede ser causado durante el proceso de generación, transporte y distribución de la energía eléctrica, aunque generalmente son las grandes cargas fluctuantes, aquellas cargas cuya demanda de potencia reactiva o activa varía rápidamente, las causantes de esta distorsión. El flicker consiste en una variación de tensión y se manifiesta en un cambio visible y repetitivo en la intensidad de la luz.

En las cargas de alta potencia que requieren de una corriente notable como, por ejemplo, los hornos de arco, motores de potencia, etc., se produce una variación cíclica de voltaje a baja frecuencia con efectos negativos como el parpadeo de fuentes de luz de las que se pueden derivar molestias fisiológicas, cansancio psicológico e incluso efectos patológicos, además de los problemas en la estabilidad eléctrica de dispositivos y circuitos electrónicos [8].

El flicker es particularmente común en las instalaciones de energía solar fotovoltaica. Factores como la variación en la irradiación solar y la naturaleza de las cargas conectadas a la instalación determinan la severidad del flicker.

4.1 Efectos del flicker

Sobre fuentes de luz:

En las fuentes de luz eléctricas, la variación de tensión por muy pequeña que sea, provoca una alteración de su flujo luminoso. Una forma sencilla para cuantificar el efecto en las fuentes de luz, se obtiene a partir del “factor de ganancia” que relaciona la variación de flujo con la variación de tensión:

$$F . G = \frac{\Delta\varphi}{\Delta V} \quad (1)$$

- φ : flujo luminoso
- V : tensión eficaz

En función de la lámpara, se obtiene un factor de ganancia diferente:

- Lámparas fluorescentes: $FG=1$
- Lámparas incandescentes: $FG=3,8$
- Lámparas de vapor de sodio alta presión: $F.G=3,3$

A continuación (“figura 9”), se muestra la variación de flujo de una bombilla incandescente. Como cabe esperar, una pequeña variación de voltaje produce una variación de flujo luminoso apreciable.

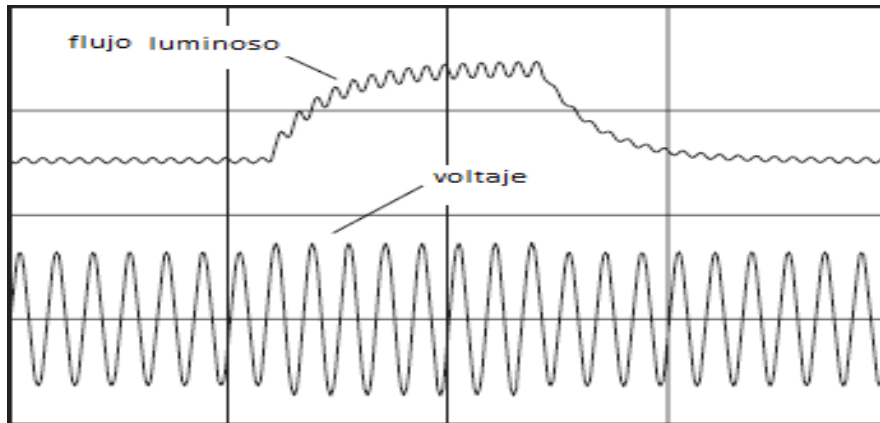


Fig.9 Variación del flujo luminoso por flicker de bombilla incandescente [9][10]

Fisiológicos

Uno de los efectos más importantes del flicker es el efecto fisiológico que afecta de forma negativa al bienestar de las personas, provocando fatiga y baja concentración, por ejemplo, en la ergonomía de un entorno de producción. Los efectos fisiológicos dependen de la magnitud de la variación de amplitud del flujo luminoso, de la duración de la perturbación y del espectro de frecuencia.

La respuesta al parpadeo varía dependiendo de la persona. Para su cuantificación se utiliza un instrumento normalizado electrónico que modela la respuesta humana así como el comportamiento de la fuente de luz. El modelo toma como referencia una lámpara incandescente de 60W alimentada con 230V.

La "figura 10" representa dos umbrales de sensibilidad que reflejan la percepción del parpadeo para sendas tensiones nominales. En el eje de ordenadas se define la variación de tensión, mientras que en el eje de abscisas se posiciona la frecuencia.

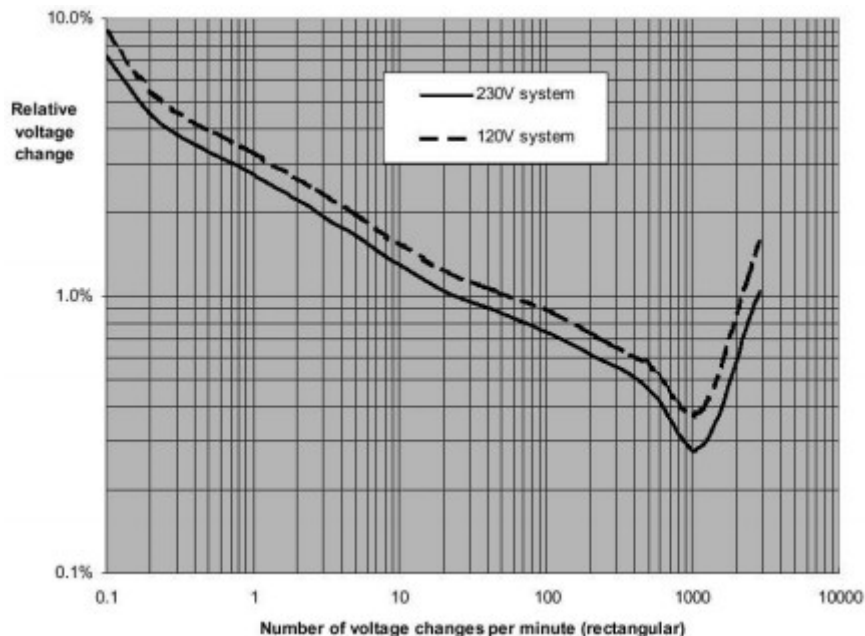


Fig. 10 Curva de sensibilidad ante cambios de voltaje en función de la frecuencia [10]

En aquellos puntos que se encuentran por debajo del umbral de sensibilidad definidos por la variación de tensión y frecuencia, el efecto resulta molesto para la mayoría de las personas. En cambio, aquellos puntos situados por encima del umbral, el parpadeo resulta imperceptible para la mayoría de las personas [10].

4.2 Parámetros de medida

La severidad del parpadeo se expresa mediante dos parámetros de medida: short-term flicker severity (P_{ST}) o mediante long-term flicker severity (P_{LT}).

Evaluación de flicker de periodo corto

Se evalúa a partir de la medición de las fluctuaciones de voltaje mediante el procesamiento de modelos de flujo luminoso frente a la reacción humana sobre dichas fluctuaciones. Se obtienen medidas instantáneas del flicker considerando un periodo de tiempo de 10 minutos ("figura11") [8].

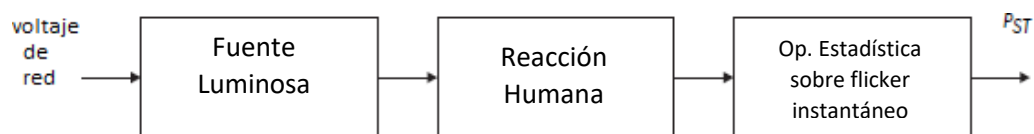


Fig.11 Diagrama de bloques sobre la determinación de la severidad del flicker

Una vez obtenidos las muestras conforme al proceso anterior y con una duración de 10 minutos, se ajustan umbrales para diferentes percentiles, es decir aquellas muestras que han excedido del valor final del P_{st} en 0,1%, 1%, 3%, 10% y 50% en el tiempo de observación predefinido. En las fórmulas utilizadas para el cálculo de percentiles se denotan como $P_{0.1s}$, P_{1s} ... El subíndice 's' indica que se ha realizado el promedio de diversos percentiles. Estos se obtienen utilizando las siguientes ecuaciones [10][11]

Fórmulas para el cálculo de percentiles:

$$P_{1s} = \frac{(P_{0.7} + P_1 + P_{1.3})}{3} \quad (2)$$

$$P_{3s} = \frac{(P_{2.2} + P_3 + P_4)}{3} \quad (3)$$

$$P_{10s} = \frac{(P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17})}{5} \quad (4)$$

$$P_{50s} = \frac{(P_{30} + P_{50} + P_{80})}{3} \quad (5)$$

Finalmente, el parámetro P_{ST} se calcula a partir de la siguiente ecuación (6):

$$P_{st} = \sqrt{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_{1.5} + 0.0657P_{3.5} + 0.28P_{10.5} + 0.08P_{50.5}} \quad (6)$$

Cuando se trata de perturbaciones provocadas por fuentes individuales con un ciclo de funcionamiento breve, se evalúa la severidad de flicker de periodo corto.

No obstante, la evaluación de flicker de periodo largo (Plt) es apropiada para perturbaciones que cuentan con ciclos de funcionamiento largos y variables (ejemplo: hornos de arco o instalaciones fotovoltaicas). El valor del Plt se obtiene a partir del flicker a corto plazo (Pst), ya que se trata del mismo fenómeno con periodos de tiempo diferentes. El Plt se obtiene a partir de la siguiente ecuación (7).

$$Plt = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N P_{sti}^3}{N}} \quad (7)$$

Donde P_{sti} , siendo $i=1,2,3,\dots$, hace referencia a los diversos valores de la severidad de periodo corto [11].

4.3 Instrumento de medida

Para obtener los parámetros del flicker es necesario utilizar un instrumento de medida. El instrumento de medida puede ser un dispositivo de implementación digital o analógica siempre que cumplan con los ensayos de conformidad y campañas de calidad de onda regulada por la norma UNE-EN 61000-4-15 CEM. (Parte 4-15: técnicas de ensayo y de medida, medidor de flicker)

En la arquitectura interna del dispositivo de medida se pueden diferenciar dos partes que realizan las siguientes tareas:

- Simulación de la respuesta humana (secuencia de lámpara-ojo-cerebro)
- Análisis estadístico en tiempo real del flicker y obtención de resultados.

El instrumento de medida, incluye, en primer lugar, un circuito para adaptar la tensión de entrada a un nivel interno de referencia. El objetivo es realizar mediciones de flicker independientemente del valor de la tensión nominal de entrada. A continuación, se adapta la señal de entrada a un nivel de referencia haciéndola pasar por un elevador de tensión recuperando la fluctuación de tensión.

Más adelante, se incluyen una serie de filtros. Un filtro-paso bajo para eliminar el rizado de doble frecuencia de la salida del demodulador, un filtro paso-alto de primer orden para eliminar la componente en continua. En el mismo bloque se incluye un filtro de ponderación que simula la

respuesta en frecuencia de la visión humana a las fluctuaciones de una lámpara de gas con filamento enrollado.

Posteriormente, en un bloque diferente, se incluye un multiplicador (elevación al cuadrado) y un filtro paso-bajo. A la salida de este bloque queda simulada la respuesta no lineal asociada a la percepción humana. Esta sensación se representa mediante el parámetro flicker instantáneo (P_{inst})

Finalmente, mediante un análisis en tiempo real del nivel de flicker, se obtiene los parámetros característicos del flicker como el P_{st} y el P_{It} [11].

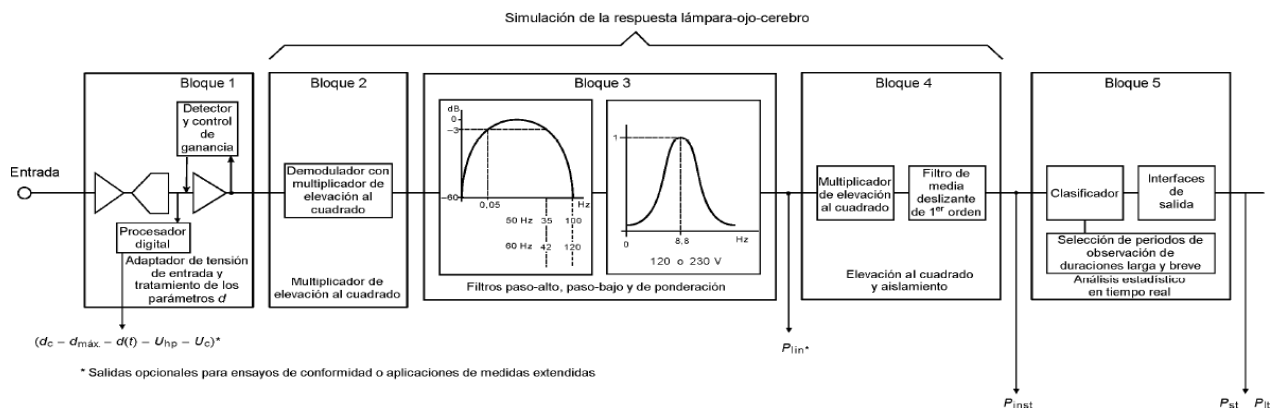


Fig. 12 Esquema funcional del medidor de flicker [11]

4.4 Clases de medidores de flicker

Se diferencian tres clases de medidores de flicker:

- Clase F1: medidores de flicker de uso general, comúnmente usados para los ensayos de conformidad y permiten un amplio rango de variaciones de tensión de entrada con variaciones de frecuencia y saltos en fase.
- Clase F2: medidores para ensayos de conformidad del producto según la norma IEC 61000-3-3 o IEC 61000-3-11. En este caso las fluctuaciones de tensión son más limitadas manteniendo en todo momento la frecuencia y fase constantes.
- Clase F3: medidor de flicker de mayor precisión, destinado a ser utilizado para campañas de calidad de onda, búsqueda faltas... Todos los medidores que cumplan con la norma [11].

5. Flicker en instalaciones fotovoltaicas

En las instalaciones fotovoltaicas la distorsión por flicker se produce como consecuencia de la radiación solar, energía mediante reacciones de fusión que se producen en el núcleo del sol. La energía se transmite en forma de radiación electromagnética y atraviesa la atmósfera en forma de radiaciones o espectros electromagnéticos con una longitud de onda de $0,15-4\mu\text{m}$.

La proporción de la radiación solar en las regiones del espectro es aproximadamente [12]:

- Ultravioleta:7%
- Luz visible:43%
- Infrarrojo:49%
- El resto:1%

El funcionamiento de un módulo fotovoltaico depende de variables como la temperatura de funcionamiento, la radiación solar, etc. Por ello, para realizar el diseño de una instalación fotovoltaica es necesario determinar la radiación solar que a su vez depende de varios factores.

El problema que presentan las instalaciones fotovoltaicas radica en la variación de la radiación solar que incide sobre los módulos fotovoltaicos. Cuando se producen variaciones momentáneas de la radiación solar, el flujo de fotones que inciden sobre las células fotovoltaicas varía y por lo tanto la tensión generada presenta variaciones que se reflejan en variaciones de amplitud en la señal de tensión a la salida del inversor.

La variación solar [13] puede ser ("figura 13"):

- **Radiación directa:** radiación recibida directamente del sol, sin sufrir desviación a través de la atmosfera.
- **Radiación difusa:** radiación que sufre desviaciones en la atmosfera principalmente de reflexión y difusión (ejemplo: las nubes como medio difusor).
- **Albedo:** radiación directa y difusa que es reflejada por el suelo u otras superficies.

La radiación global es la suma de todas las radiaciones y por tanto es la que interesa calcular y tener en cuenta.

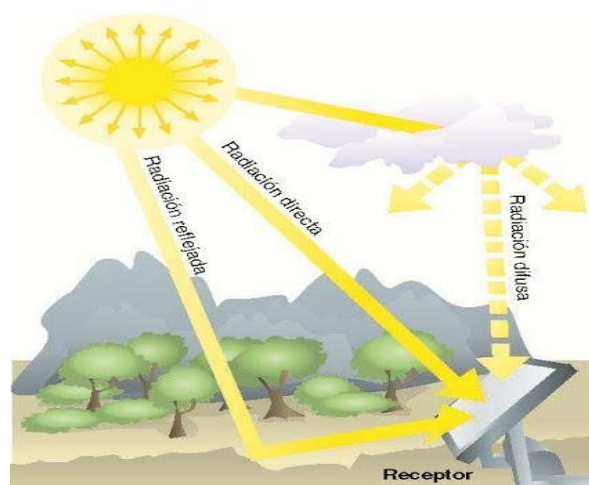


Fig. 13 Tipo de radiación incidente [13]

El flicker ocasiona un efecto análogo al de las bombillas incandescentes comentado en el apartado anterior: la variación de voltaje producía una variación del flujo luminoso que se manifiesta mediante la variación de la percepción del brillo luminoso. En el caso de las plantas fotovoltaicas, la variación de la radiación solar produce fluctuaciones en el voltaje de salida.

5.1 Efectos de las fluctuaciones de tensión

La energía producida por un módulo fotovoltaico (una vez convertida a corriente continua) se distribuye para ser consumida. Por ello, la calidad de la energía es importante para evitar daños en los equipos o dispositivos que consumen esa energía. Además de los efectos fisiológicos, el parpadeo en la tensión que altera negativamente la calidad de la energía, ocasiona efectos adversos sobre equipos y procesos productivos como [11]:

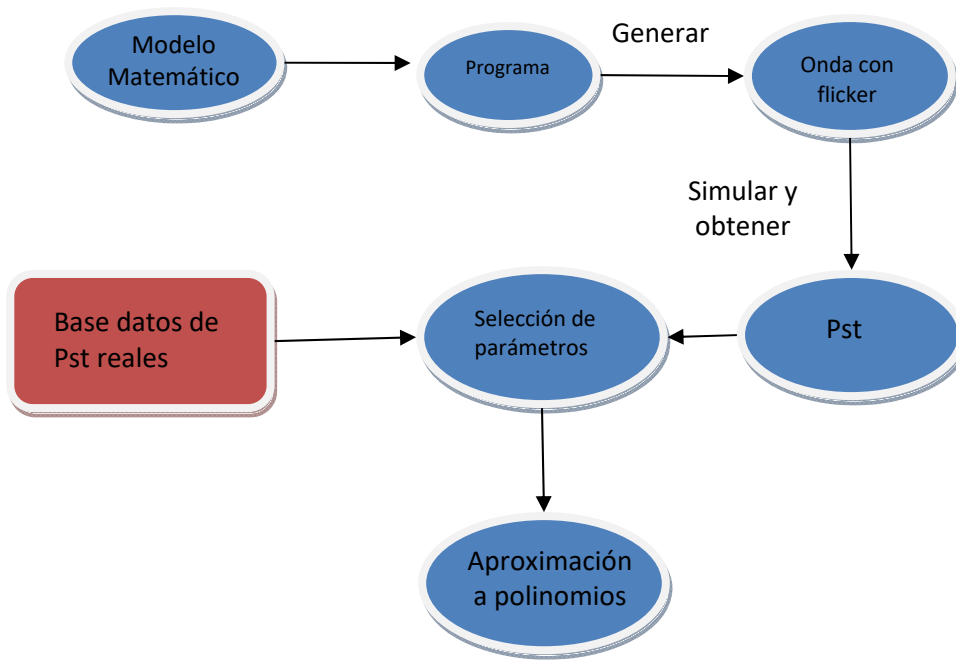
- Efectos en máquinas eléctricas: una fluctuación en la entrada de un motor eléctrico produce cambios en la velocidad y en el par, lo que conlleva a una variación inesperada del proceso de producción. También pueden ocasionar excesivas vibraciones que afectan a la resistencia mecánica del motor, así como a su vida útil.
- En motores sincrónicos originan oscilaciones de los rotores que provocan su desgaste e incrementan las pérdidas en el rendimiento.
- Errores en ordenadores y equipos informáticos
- Daños o funcionamiento erróneo de sistemas de control, daños en tarjetas de entradas y salidas, etc.
- Fallos en el funcionamiento de equipos de protección.
- Disminución de la vida útil de los equipos.

6. Materiales y métodos

6.1 Estructura de los experimentos y tareas

Siguiendo los objetivos propuestos en la sección 1, la secuenciación de tareas y experimentos realizados han sido los siguientes:

- **Modelo matemático para generar ondas con flicker**(sección 7.2): programación de un modelo matemático que ondas con la distorsión de flicker dependiente de tres parámetros (λ , ff y número de periodos permite generar que dura la distorsión).
- **Base de datos con valores de Pst reales** (sección 7.3): obtenidos de una instalación fotovoltaica real.
- **Programa para la generación y simulación de ondas con flicker** (sección 7): implementación en Matlab de un programa que permite generar ondas con la distorsión flicker, haciendo un barrido por los posibles valores de cada uno de sus parámetros, y que permite obtener el valor de Pst asociado a la onda distorsionada a través de una función de Simulink.
- **Aproximación inicial con polinomio monovariante**(sección 8): con el objetivo de acotar los posibles valores de los parámetros del flicker(λ , ff y número de periodos que dura la distorsión) que pueden llegar a producir valores de Pst similares a los de una instalación fotovoltaica real (0,9-2,7) se ha realizado un “tanteo” inicial utilizando un ajuste monovariante que relaciona la variación en cada uno de los parámetros del flicker (de manera independiente, dejando los otros dos parámetros en un valor intermedio) con los valores de Pst obtenidos con esos parámetros. Para obtener los datos para realizar el ajuste se han realizado diversas simulaciones previas con el programa de Matlab anterior. Posteriormente, se ha utilizado una función de ajuste de Matlab. Como resultado de este ajuste inicial, se han identificado los rangos aproximados de trabajo de cada uno de los parámetros del flicker.
- **Aproximación a polinomio multivariable**(sección 9): como resultado del punto anterior se pudo constatar que la función de Simulink que se utiliza para calcular el Pst (sección 8.2) tiene una carga computacional muy elevada. Esto hacía inviable la realización de simulaciones masivas. Por este motivo, se constató la necesidad de disponer de un polinomio que permitiera, a partir de los parámetros del flicker (λ , ff y número de periodos que dura la distorsión), obtener el valor de Pst asociado sin utilizar la función de Simulink. Para ello se realizó una aproximación a un polinomio multivariable. Para obtener los datos para realizar el ajuste se han realizado diversas simulaciones con el programa de Matlab anterior. Posteriormente se ha utilizado una función de ajuste de Matlab. Se cuantificó el error asociado a este polinomio que permite calcular el Pst en el rango habitual de las instalaciones fotovoltaicas sin necesidad de usar la compleja función de Simulink.
- **Cálculo de los parámetros del flicker asociados a una instalación fotovoltaica y dibujo de sus contornos**: con el polinomio del ajuste multivariable (sin necesidad ya de utilizar la función costosa de Simulink) se pudo obtener la rejilla de valores de todas las combinaciones de los tres parámetros del flicker(λ , ff y número de periodos que dura la distorsión) que proporcionan valores de Pst similares a los de una instalación fotovoltaica real. Se dibujaron diferentes contornos en 2D representando parte de los resultados obtenidos. Este fue el resultado del proyecto que viene a dar respuesta al objetivo planteado.



“Fig. 14” Diagrama de estructura de experimentos y tareas

6.2 Modelo matemático para generar ondas con flicker

En la práctica, resulta difícil registrar las ondas en el dominio del tiempo causadas por el flicker ya que esto llevaría al almacenamiento de una cantidad ingente de datos, inviable en las instalaciones. Sin embargo, los dispositivos de medida de los parámetros del flicker pueden calcular y almacenar tanto el Pst o como el Plt.

Para poder simular el comportamiento de la distorsión, se puede utilizar un modelo matemático (ecuación 8) para generar ondas con flicker sobre las que posteriormente obtener el parámetro característico Pst [7]

$$V(t) = A[1 + \lambda(W_f t)](W_f t - \varphi) \quad (8)$$

$$W_f = 2\pi f_f \quad (9)$$

Como puede observarse de la ecuación característica de la distorsión, esta depende de diferentes parámetros: λ , frecuencia del flicker (f_f) y el número de periodos que dura la distorsión.

Este modelo matemático permite un amplio rango de combinaciones de parámetros (λ , f_f y número de periodos que dura la distorsión) que permiten obtener valores de Pst similares. El rango de los parámetros es: f_f (8-25), λ (0.05-0.1), y número de periodos que dura la distorsión (0-140) [7].

6.3 Base de datos con valores de Pst reales

Para determinar aquellas combinaciones de parámetros (λ , f_r y número de periodos que dura la distorsión) que mejor se ajustan al flicker presente en las instalaciones solares fotovoltaicas se han utilizado valores reales de Pst (“figura 16”) extraídos de un inversor de una instalación fotovoltaica localizada en la Universitatea Valahia din Targoviste (Rumania).



Fig. 15 Universitatea Valahia din Targoviste (Rumania)[12]

La “figura 16” muestra algunos valores de Pst y Plt del flicker registrados en cada una de las tres fases del sistema fotovoltaico trifásico real de Targoviste.

Pst1	Pst2	Pst3	Plt1	Plt2	Plt3	Pst1	Pst2	Pst3	Plt1	Plt2	Plt3
2,74	1,5	1,64	1,31	1	1,1	1,61	1,53	1,57	1,23	1,15	1,22
1,35	1,35	1,54	1,31	1	1,09	1,41	1,39	1,49	1,2	1,11	1,18
1,32	1,31	1,46	1,31	0,99	1,09	1,4	1,39	1,48	1,2	1,11	1,17
1,27	1,26	1,41	1,31	0,98	1,08	1,33	1,34	1,39	1,15	1,08	1,13
1,26	1,25	1,41	1,3	0,96	1,06	1,32	1,3	1,36	1,13	1,04	1,12
1,24	1,25	1,39	1,3	0,96	1,06	1,32	1,29	1,33	1,1	1,03	1,09
1,22	1,24	1,35	1,3	0,96	1,06	1,32	1,28	1,3	1,1	1,03	1,08
1,18	1,24	1,35	1,3	0,96	1,06	1,3	1,24	1,28	1,1	1,03	1,08
1,18	1,22	1,31	1,3	0,95	1,06	1,22	1,22	1,27	1,09	1,02	1,08
1,18	1,22	1,3	1,3	0,95	1,05	1,22	1,19	1,27	1,09	1,01	1,07
1,17	1,18	1,3	1,3	0,95	1,05	1,2	1,18	1,25	1,05	1	1,05
1,17	1,18	1,29	1,3	0,95	1,05	1,19	1,18	1,24	1,03	0,97	1,04
1,16	1,17	1,29	0,96	0,95	1,04	1,15	1,16	1,24	1,02	0,97	1,03
1,15	1,16	1,28	0,96	0,95	1,04	1,15	1,14	1,22	1,02	0,95	1,03
1,15	1,16	1,28	0,95	0,95	1,04	1,15	1,14	1,22	1,01	0,95	1,01
1,15	1,14	1,28	0,95	0,95	1,03	1,12	1,14	1,2	1	0,94	1,01
1,14	1,13	1,26	0,94	0,95	1,03	1,12	1,13	1,19	0,99	0,94	1,01
1,13	1,12	1,26	0,94	0,94	1,03	1,11	1,13	1,18	0,98	0,93	1,01
1,12	1,12	1,25	0,94	0,94	1,03	1,11	1,13	1,16	0,96	0,93	1,01
1,12	1,1	1,24	0,93	0,94	1,02	1,1	1,12	1,16	0,96	0,93	1
1,12	1,1	1,24	0,93	0,94	1,02	1,1	1,12	1,15	0,95	0,93	1
1,12	1,1	1,24	0,92	0,94	1,01	1,1	1,11	1,15	0,94	0,92	0,97
1,11	1,09	1,23	0,92	0,93	1,01	1,1	1,11	1,15	0,94	0,92	0,97
1,1	1,09	1,23	0,92	0,93	1,01	1,09	1,11	1,15	0,93	0,91	0,97
1,1	1,09	1,22	0,92	0,93	1,01	1,08	1,09	1,13	0,93	0,91	0,97
1,1	1,09	1,22	0,92	0,93	1,01	1,08	1,08	1,13	0,93	0,91	0,96
1,1	1,09	1,2	0,92	0,93	1,01	1,08	1,08	1,13	0,93	0,9	0,96

Fig. 16 Valores de Pst y Plt reales

7. Programa para la generación y simulación de ondas con flicker

La generación de ondas con distorsión de flicker se ha realizado mediante el uso de la ecuación 8. Con un script de *Matlab* programable obtenemos tantas ondas como se desee, es decir, combinando los diferentes parámetros.

Para un estudio más detallado de este fenómeno, se requiere de la simulación de multitud de ondas para analizar los diferentes comportamientos de la onda al variar cada uno de sus parámetros, así como su parámetro característico, Pst.

El script programado básicamente se compone de dos partes: una primera parte que corresponde a la generación de la onda, donde se definen los parámetros que componen la ecuación característica de la onda; por otro lado, la simulación de la onda en un medidor de flicker que permite obtener el parámetro característico de la distorsión, Pst.

7.1 Programación y generación de ondas con flicker

La “figura 20” muestra el diagrama de flujo del programa para generar ondas con flicker según la ecuación 8. La “figura 17” muestra las primeras líneas de código del programa que comienza definiendo los parámetros del script: se define el desfase mínimo y máximo (afecta levemente al cálculo del Pst, prácticamente despreciable), frecuencia fundamental de la onda de 50 Hz, ‘fs’ frecuencia de muestreo del sistema, número de ciclos de onda a simular y amplitud nominal. A continuación se establecen se fijan los rangos de cada uno de los tres parámetros: ff(8-25), λ (0.05-0.1) y periodo(0.5-200.) A partir de estos elementos se calcula el número de puntos por onda de señal que se simulará.

```
14 %General
15 - phi_min=-pi;
16 - phi_max=pi;
17 - f=50;%fundamental
18 - fs=1000;%sampling frequency (ojo hay que cambiarla también en el modelo de Simulink)
19 - n=32500; %32500 ciclos de onda (equivale a 650 segundos)
20 - A=1;%amplitude
21 - PointsPerSignal=(fs/f)*n;
22
23 %Flicker related
24 - ff_min=8;
25 - ff_max=25;
26 - lambda_min=0.05;
27 - lambda_max=0.1;
28 - periodMin=0.5;
29 - periodMax=200;
```

Fig. 17. Script de definición de parámetros.

La “figura 18” muestra la continuación de este programa. Se define el eje de tiempo con el tiempo de muestreo fijado anteriormente que comienza en $t=0$ y avanza con un periodo de muestreo. Los primeros 50 segundos no se tienen en cuenta en el análisis de la onda para evitar el tramo transitorio de la señal.

Por una parte, “pointt1” es el punto inicial de la muestra tomada de la señal distorsionada, es decir, se toma un periodo de la señal distorsionada y se analizan los puntos comprendidos entre el punto inicial “pointt1” y el punto final “point1t2”.

Por otro lado, se crea una rejilla, “gridMatrixDim”, recorriendo tres bucles (uno por parámetro de la ecuación $-\lambda$, ff y número de periodos que dura la distorsión-). En cada ciclo de programa se guardan los valores en un vector, “flicker.parameters”. Mediante el vector “u” se hallan aquellos puntos distorsionados que se encuentran en el tramo que se analiza y que comprende un periodo de la onda generada.

Por último, se genera la onda introduciendo los parámetros que varían para cada ciclo de programa, obteniendo una onda con flicker que será posteriormente introducida (siguiente sección) al medidor de Pst (simulador).

```

31 %Time axis
32 - t=0:(1/fs):(1/f)*n-(1/fs);
33 - pointsRemoved=fs*50;%the first 50 seconds are removed from the anaysis, thus the first fs*50 points
34
35 - pointt1=round(15000*(fs/f)) %Initial point of the disturbase for instance in the cycle 15000 (5 min)
36 - ul=zeros(1,pointt1) ones(1,PointsPerSignal-pointt1)]; %Step funcion, translated pointt1 points to the right
37
38 - gridMatrixDim=3
39
40 %Compute flicker
41 - phi=phi_min;
42 - for i = 1:gridMatrixDim
43 -     i
44 -     ff=((ff_max-ff_min)/10)*i+ff_min;
45 -     for jj = 1:gridMatrixDim
46 -         jj
47 -         lambda=((lambda_max-lambda_min)/10)*jj+lambda_min;
48 -         for kk = 1:gridMatrixDim
49 -
50 -             flicker.parameters(kk+gridMatrixDim*(jj-1)+gridMatrixDim*gridMatrixDim*(i-1),1)=ff;
51 -             flicker.parameters(kk+gridMatrixDim*(jj-1)+gridMatrixDim*gridMatrixDim*(i-1),2)=lambda;
52 -             tlt2=((periodMax-periodMin)/10)*kk+periodMin;
53 -             flicker.parameters(kk+gridMatrixDim*(jj-1)+gridMatrixDim*gridMatrixDim*(i-1),3)=tlt2;
54
55
56
57 - pointstlt2=round(tlt2*(fs/f)); %The period is converted into points
58
59
60
61 - u2=[zeros(1,pointt1+pointstlt2) ones(1,PointsPerSignal-(pointt1+pointstlt2))]; %Step funcni
62 - u=u1-u2; %Difference function, 0 all except the interval (pointt1,pointt1+pointstlt2)
63
64 - generate signal
65 - d=A*sin(2*pi*f*t-phi).*(1+lambda*sin(2*pi*ff*t)).*u);
66 - %put it in the c variable. The c variable is read by the Simulink model
67 - b=[t;d];
68 - c=b';
69 - simOut = sim('power_KALFlicker');

```

Fig.18 Script con la parte de generación de onda con flicker

7.2 Programa de simulación de onda

La onda generada se introduce como parámetro de entrada al bloque de función propio de la plataforma "Simulink" llamada "FlickermeterStatisticalAnalysis Module" ("figura 19"). Dicho bloque realiza los cálculos pertinentes para obtener el flicker instantáneo "S5" que nos permite más adelante calcular el flicker de corto y largo periodo. Este módulo no ha sido programado por nosotros, sino que se ha obtenido de la página oficial de Matlab. Ese módulo implementa los diversos bloques y filtros para obtener el valor de flicker instantáneo introducidos en la Sección 5.

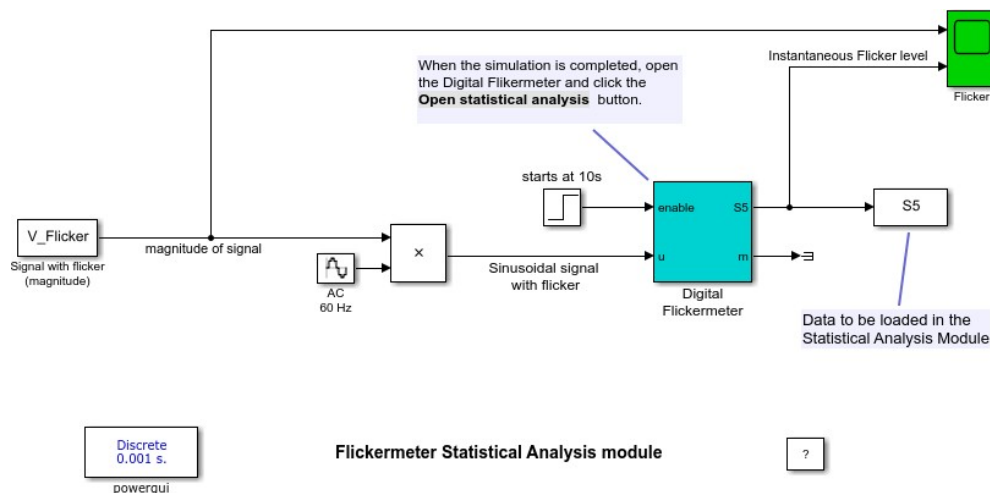


Fig. 19 "Flickermeter Statistical Analysis Module" [13]

El método de simulación permite obtener el valor de S5, un valor que me permite calcular los valores de los percentiles P0s, P1s, P3s, P10s y P50s que corresponden a los niveles de flicker excedidos 0.1%, 3%, 10% y 50% [11].

Como parámetro de entrada al módulo, se introduce la señal distorsionada en el dominio del tiempo, que se ha generado previamente, mediante la ecuación 8 (ecuación del flicker).

El "núcleo" del simulador es un bloque denominado Digital flickermeter (bloque azul, Fig.15), implementa el medidor de flicker descrito en IEC 61000-4-15 standard y cuyos parámetros de entrada y salida son:

- **Enable:** '1' para habilitar la medición del flicker. La habilitación de la medida, suele tener un pequeño retardo con el fin de que la señal de entrada se estabilice
- **U:** entrada de la señal a analizar (señal distorsionada)
- **S5:** salida de la medida de la sensación del flicker instantáneo, mediante la cual se obtiene el Pst aplicando los percentiles.
- **m:** salida que contiene las siguientes medidas:
 - Output 1: voltaje normalizado rms en medio ciclo
 - Output 2: anchura de la fluctuación del voltaje
 - Output 3: raíz cuadrada de la sensación del flicker instantáneo
 - Output 4: datos de un minuto de percepción instantánea
 - Output 5: sensación del flicker instantáneo (Output S5)
- **u:** señal analizada
- **init:** inicialización del periodo.

7.3 Diagrama de flujos

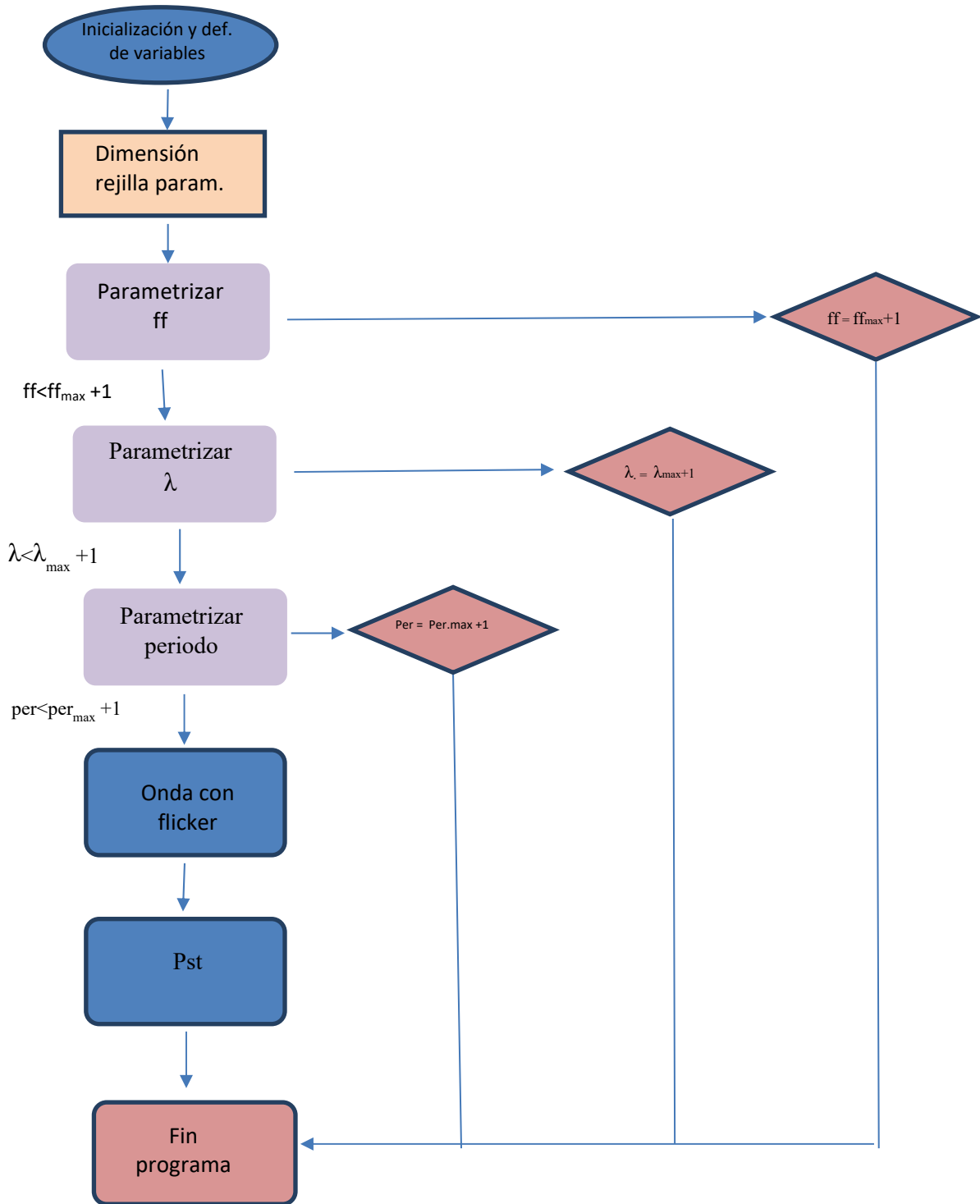


Fig.19 Diagrama de flujo. Generación y simulación de onda con flicker

A efectos de ejemplo, el coste computacional para hallar 30 valores de Pst es de 6 minutos 53 segundos, coste notorio que ralentiza el análisis del estudio de la distorsión y lo cual conlleva buscar alternativas para su cálculo como se estudia en los siguientes capítulos. El programa se ha ejecutado con un ordenador portátil que cuenta con las siguientes características:

- Procesador: Intel (R) Core (TM) i3-2348M CPU @2.30GHz
- Memoria instalada (RAM): 6GB
- Tipo de sistema: sistema operativo de 64 bits, procesador x64

8. Aproximación inicial: polinomio monovariante

En primer lugar, se realizó una aproximación consistente en analizar la influencia de cada parámetro del flicker por separado (ff , λ , y número de periodos que dura la distorsión) en el valor de Pst . Esta aproximación inicial pretende ser un mero “tanteo” para que, de manera aproximada, ver en qué rango de valores el valor de Pst es similar al que ofrece una instalación fotovoltaica real.

La aproximación a un polinomio monovariante se realiza ajustando las curvas de flicker obtenidas mediante el simulador de flicker a un polinomio de grado n . Es importante remarcar que este no es el objetivo final que se quiere alcanzar en este TFG, ya que la aproximación a un polinomio monovariante solo permite obtener la curva a partir de un parámetro dejando los dos restantes como constantes.

No obstante, resulta interesante obtener el polinomio monovariante para poder estudiar el comportamiento de la curva dependiendo del valor del parámetro variable y así analizar las tendencias de forma individual, ya que resulta más complicado identificar el/los parámetros responsables de la tendencia si se varían los tres a la vez. Por ello, y siendo conscientes de las limitaciones de este método, se analiza cada uno de los parámetros por separado (ff , λ , y número de periodos que dura la distorsión).

La función utilizada para este ajuste está implementada en Matlab:

$$P(x) = \text{polyfit}(x, y, n) \quad (10)$$

Donde:

- ‘ x ’ e ‘ y ’ son las variables de entrada, ‘ y ’ será en todo momento la salida esperada del ajuste (Pst) y ‘ x ’ será el parámetro variable.
- n : es el grado del polinomio

A continuación, se van a presentar los resultados del ajuste a un polinomio monovariante para cada uno de los tres parámetros del flicker (ff , λ , y número de periodos que dura la distorsión).

8.1 diagrama de flujo

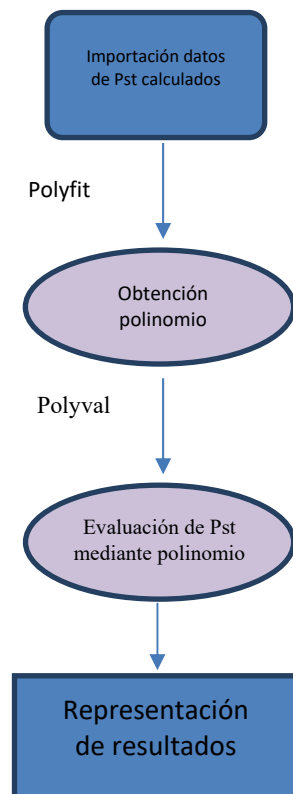


Fig.22 Diagrama de flujo. Aproximación monovariable

8.2 Aproximación monovariable del parámetro frecuencia de flicker (ff)

Se ha programado un script (captura de pantalla en la “figura 20” y diagrama de flujo en la “figura 21”) donde se aplica la función de *Matlab* para calcular los coeficientes del polinomio y representarlos sobre la curva original

```
1 %polinomios lineales de una variable
2 - datos=xlsread ('tabla_parametr.xlsx','hojal','A3:D37'); %exportamos datos de excel
3 - x=datos(:,1);
4 - y=d_freq1(:,4);
5 - coef=polyfit(x,y,4) %obtencion de coeficientes
6 - pst=polyval(p,x); %evaluamos para los pto que queremos
7 %representacion
8 - figure
9 - plot(x,y,'o') %curva original
10 - hold on
11 - plot(x,pst) %curva del polinomio
12
13 |
```

Fig. 21 Script de ajuste de polinomio monovariable

El mismo script(“figura 21”) se aplica para los diferentes parámetros cambiando los datos y variando el grado del polinomio para ajustar el polinomio a la curva original.

Curva 1

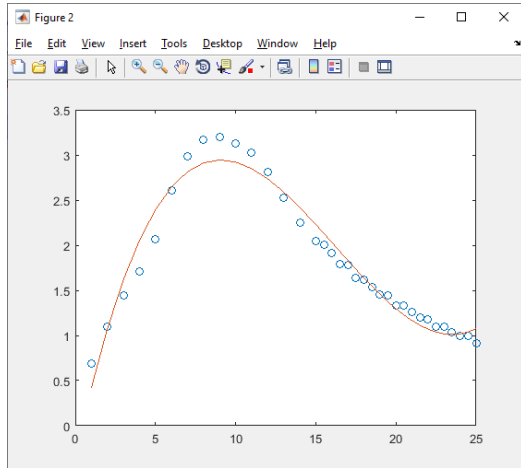


Fig.23 Polinomio grado 4 ($\lambda=0,05$, periodo=20,45)

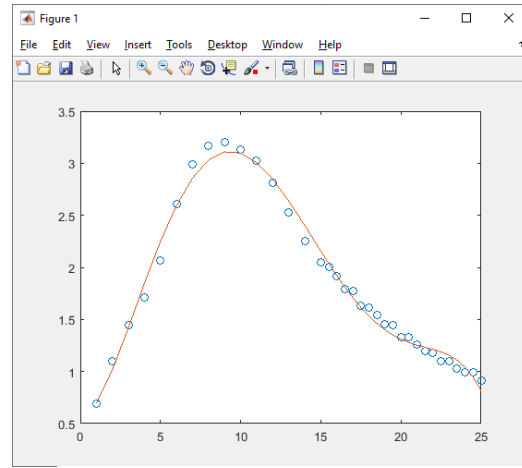


Fig.24 Polinomio grado 4 ($\lambda=0,05$, periodo=20,45)

En las “figuras 23 y 24” se puede observar como varía el ajuste del polinomio al cambiar el grado de este para la variación de un parámetro del flicker a modo de ejemplo. Como cabría esperar el polinomio de mayor grado obtiene un ajuste más preciso.

Los coeficientes obtenidos están en potencias descendentes y su longitud es $n+1$:

- $n=4$: 0 0,0014 -0,065 0,8409 -0,3578
- $n=5$: 0 0,0008 -0,0172 0,1266 0,0501 0,5355

Curva 2

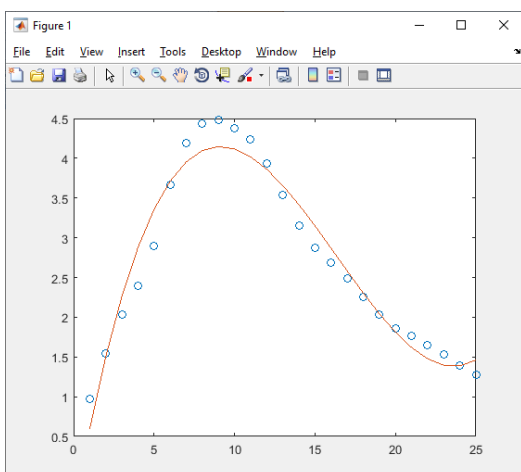


Fig.25 Polinomio grado 3 ($\lambda=0,05$, periodo=25,45)

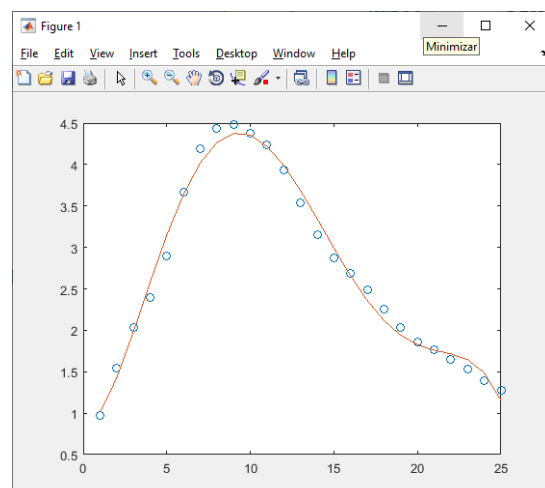


Fig.26 Polinomio grado 5 ($\lambda=0,05$, periodo=25,45)

Coeficientes:

- $n=3$: 0,0018 -0,0889 1,1687- 1,4911
- $n=5$: 0.0012 -0.026 0.1962 -0.00350.8356

Curva 3

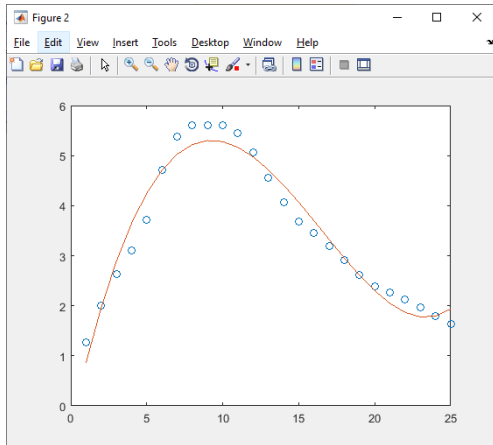


Fig.27 Polinomiogrado4($\lambda=0,09$, periodo=20,45)

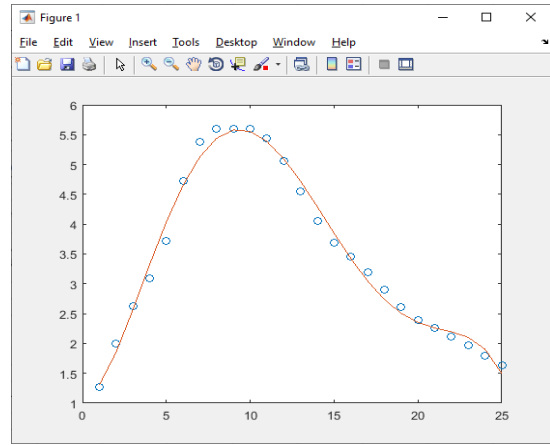


Fig.28 Polinomio grado 5($\lambda=0,09$, periodo=20,45)

Coefficientes:

- $n=4$: 0 0,0013 -0,0962 1,3809 -0,4271
- $n=5$: 0 0,0014 -0,0318 0,2371 0,0404 1,0534

Curva 4

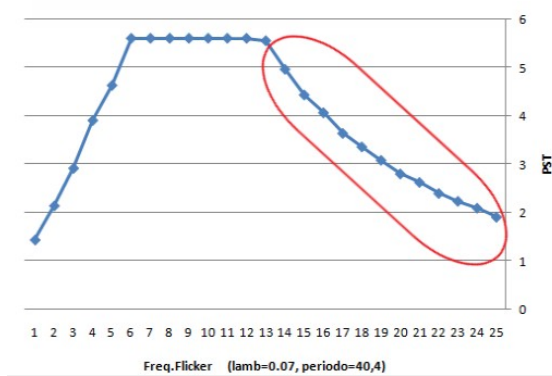


Fig.29 Curva 4 ($\lambda=0,07$, periodo=40,4)

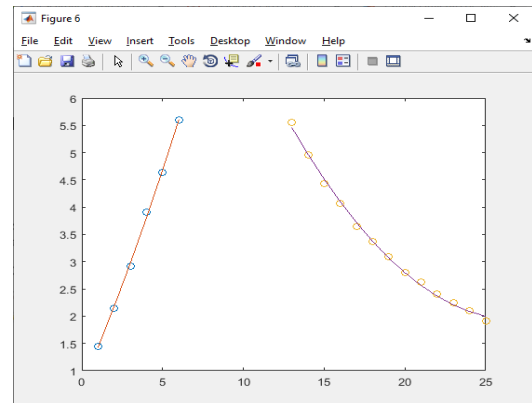


Fig.30 Polinomio grado 2($\lambda=0,07$, periodo=40,4)

Para aproximar la curva se han utilizado dos polinomios debido al tramo constante donde se satura la salida al valor de 5,6.

Coefficientes:

- $n=2$: 0,0203 0,6936 0,7083 (curva izquierda)
- $n=2$: 0,0184 -0,9885 15,198 (curva derecha)

Tras analizar los datos obtenidos para una frecuencia de flicker variable, se observa una mayor similitud con los valores de la instalación real para valores de λ cercanos a 0,05, en cuyo caso el Pst obtenido es inferior a 2. Sin embargo el periodo influye en menor proporción a la variación de Pst.

	Curva 1	Curva 2	Curva 3	Curva 3
λ	0,05	0,07	0,09	0,07
periodo	20,45	25,45	20,45	40,4

Tabla 2 Parámetros. f_f variable

8.3 Aproximación monovariable del parámetro λ

Para el ajuste del parámetro λ se ha obtenido un polinomio de grado 1, excepto para una de las curvas (cuando f_f es 8) donde se aproxima a una función constante "figura 33".

Curva 5

Curva 6

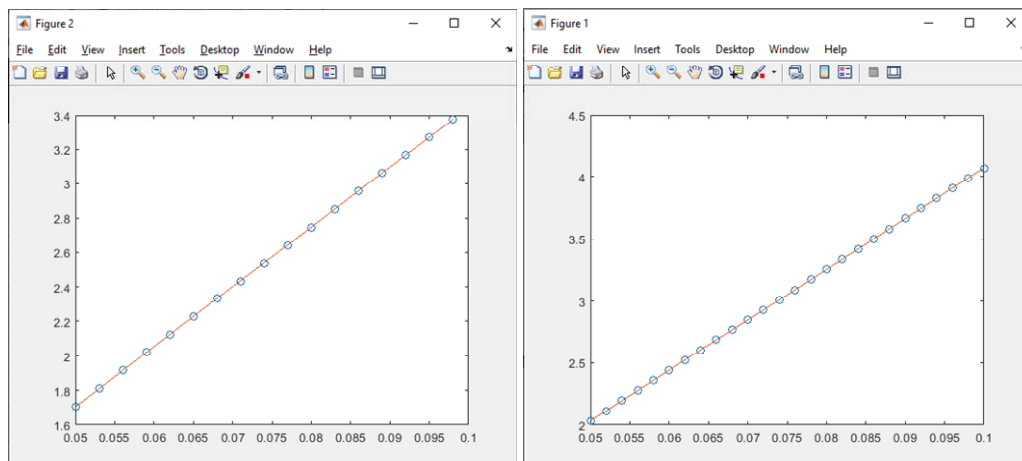
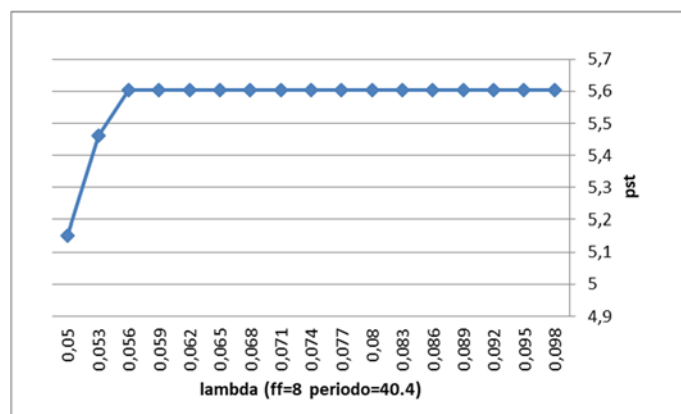


Fig.3 Polinomio grado 1 ($f_f=4$, periodo=20,45)

"Fig.32" Polinomio grado 1 ($f_f=19,9$, periodo=40,4)

Coefficientes:

- $n=1$ (curva 5): 34.764-0.0324
- $n=1$ (curva6):40.69 -0.0005



"Fig.33" λ constante ($f_f=8$, periodo =40,4)

Ambas curvas, 5 y 6, son prácticamente lineales, lo cual se puede aproximar mediante un polinomio de grado 1.

	Curva 5	Curva 6
ff	4	19.9
periodo	20,45	40.4

“Tabla 3” Parámetros. λ variable

8.4 Aproximación monovariable del parámetro número de periodos distorsionados

Curva 7

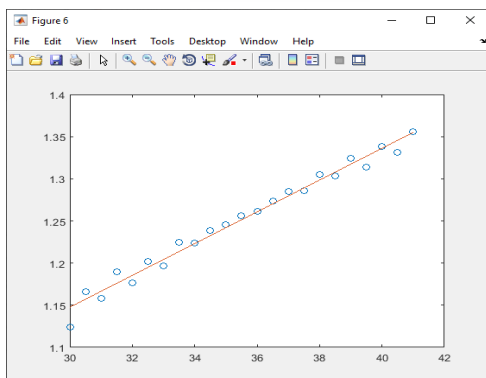


Fig.33 polinomio grado 1($\lambda=0,05ff=25,5$)

Curva 8

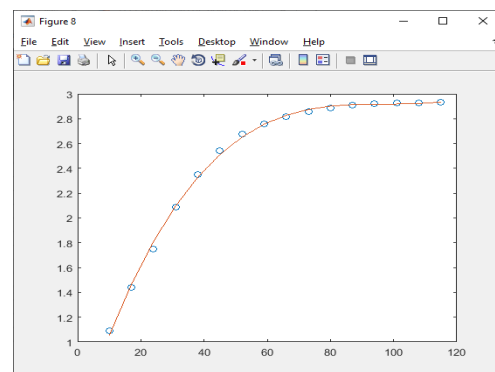


Fig.34 polinomio grado 1($\lambda=0,09ff=25,5$)

La curva asociada a la variación del parámetro número de periodos con distorsión varía de forma significativa con el parámetro λ , tal y como se aprecia en las curvas 7 y 8.

Coefficientes:

- $n=1$: 0.01551.5258
- $n=3$: 0 0.0008 0.07910.3393

	Curva 7	Curva 8
ff	4	19.9
λ	20,45	40.4

Tabla 4 Parámetros. Periodo variable

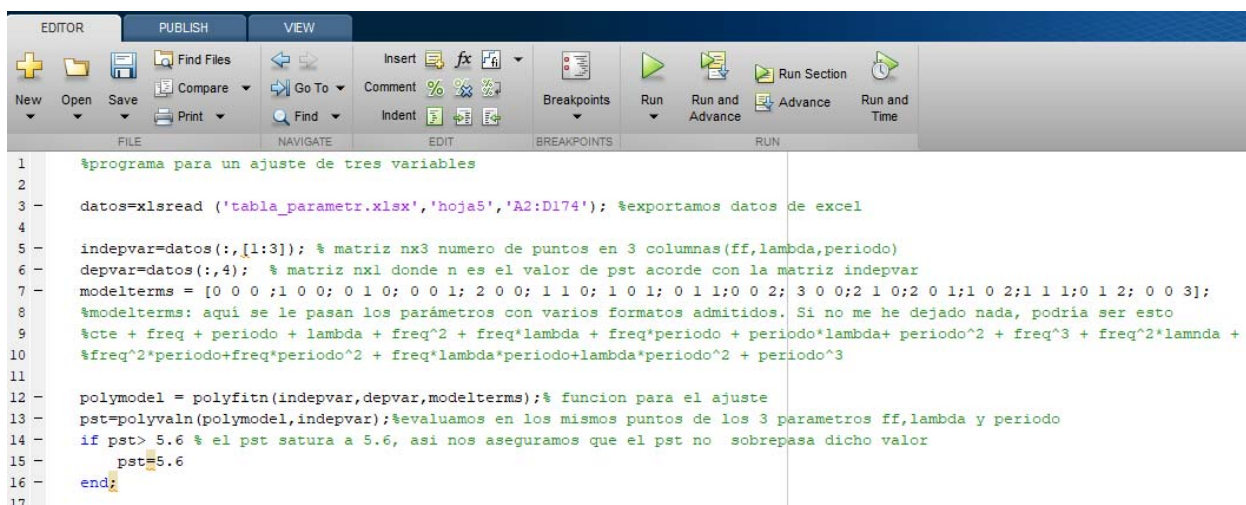
9. Aproximación a polinomio multivariable

En el apartado anterior hallamos los coeficientes del polinomio de una función monovariable para cada uno de los parámetros, lo que nos permite calcular el Pst manteniendo constantes dos de los tres parámetros (f_r , λ , número de periodos con distorsión) para cada caso. A diferencia del ajuste en el polinomio monovariable, la función mediante la que se obtiene la curva de aproximación en un enfoque multivariable depende de los tres parámetros del flicker (f_r , λ y número de periodos con distorsión).

En este apartado se hallan los coeficientes del polinomio ajustando las tres variables correspondientes a los tres parámetros que determinan el indicador característico de la distorsión (Pst). Para el cálculo de los coeficientes se ha utilizado la función que ofrece Matlab “polyfitn (indepvar, depvar, modelterms)” función que permite al usuario crear modelos con más de una variable independiente. Como parámetros de entrada se introducen:

- indepvar: variables independientes. Para nuestro caso se utiliza una matriz nx3, donde n corresponde al número de puntos (todos aquellos que queramos obtener su Pst), el número 3 es el número de parámetros (f_r , λ , número de periodos con distorsión).
- depvar: matriz nx1 que contiene los valores de Pst, introducidos en el mismo orden que indepvar, es decir, para cada columna, el Pst debe estar asociado a los parámetros correspondientes.
- modelterms: combinaciones posibles de los parámetros con sus respectivos grados

Por último se evalúa el polinomio mediante la función “polyvaln(polyfitn, indepvar)”.En la “figura 35” se muestran las líneas de programa para calcular el Pst mediante la función “polyfitn()” descrita.



```

1  %programa para un ajuste de tres variables
2
3  -  datos=xlsread ('tabla_parametr.xlsx','hoja5','A2:D174'); %exportamos datos de excel
4
5  -  indepvar=datos(:,[1:3]); % matriz nx3 numero de puntos en 3 columnas(ff,lambda,periodo)
6  -  depvar=datos(:,4); % matriz nx1 donde n es el valor de pst acorde con la matriz indepvar
7  -  modelterms = [0 0 0 ; 1 0 0 ; 0 1 0 ; 0 0 1 ; 2 0 0 ; 1 1 0 ; 1 0 1 ; 0 1 1; 0 0 2 ; 3 0 0; 2 1 0; 2 0 1; 1 0 2; 1 1 1; 0 1 2 ; 0 0 3];
8  -  %modelterms: aquí se le pasan los parámetros con varios formatos admitidos. Si no me he dejado nada, podría ser esto
9  -  %cte + freq + periodo + lambda + freq^2 + freq*lambda + freq*periodo + periodo*lambda+ periodo^2 + freq^3 + freq^2*lamnda +
10 -  %freq^2*periodo+freq*periodo^2 + freq*lambda*periodo+lambda*periodo^2 + periodo^3
11
12 -  polymodel = polyfitn(indepvar,depvar,modelterms);% funcion para el ajuste
13 -  pst=polyvaln(polymodel,indepvar);%evaluamos en los mismos puntos de los 3 parametros ff,lambda y periodo
14 -  if pst> 5.6 % el pst satura a 5.6, así nos aseguramos que el pst no sobrepasa dicho valor
15 -     pst=5.6
16 -  end;
17

```

Fig.35Script de ajuste de función multivariable

El script creado está formado de líneas de código sencillas donde se siguen básicamente los siguientes pasos:

- Exportar los datos de Excel de los parámetros, así como su Pst asociado.
- La matriz de datos se divide en indepvar (contiene los posibles valores de ff , λ y número de periodos con distorsión) y depvar (contiene los valores de Pst asociados). Configurar el parámetro modelterm (explicado en el párrafo anterior).
- Obtener los coeficientes del polinomio mediante la función polyfitn.
- Evaluar el polinomio con los mismos parámetros (indepvar), para así comparar los resultados obtenidos y calcular el error asociado.
- Por último, establecer una condición para limitar el Pst a 5,6. La condición se debe a que se ha observado que en las curvas obtenidas por la función de Simulink de cálculo del Pst este satura para el valor de 5,6.

9.1 Error de ajuste

Cabe mencionar que la finalidad del ajuste multivariable es obtener los parámetros característicos del flicker (Pst) mediante una función más sencilla, ya que la función de Simulink que ofrece "Matlab" para su cálculo conlleva bastante coste computacional. De esta forma, mediante el polinomio aproximado, se reduce drásticamente dicho coste.

Aunque el ajuste a un polinomio supone un considerable ahorro computacional, como su nombre indica es un ajuste (una aproximación) lo cual conlleva un error. El cálculo del error nos permite cuantificar la precisión de la técnica de aproximación a partir del polinomio y el medidor de flicker en Simulink. Dicho de otro modo, vamos a proporcionar un error de la regresión realizada. Se puede decir que la calidad de un modelo de regresión hace referencia a la correlación entre los valores reales y los valores previstos o estimados [14].

Se pueden clasificar los tipos de regresiones atendiendo a diferentes criterios: En función del número de variables independientes:

- Regresión simple: la variable Y depende únicamente de una variable X.
- Regresión múltiple: la variable Y depende de varias variables (X_1, X_2, \dots, X_n)

En función del tipo de función f(X):

- Regresión lineal
- Regresión no lineal

En el caso del análisis desarrollado, se ha realizado mediante una regresión lineal múltiple, ya que calculamos el Pst atendiendo a tres variables diferentes (ff , λ , número de periodos con distorsión). Concretamente se trata de una regresión polinomial, una forma de regresión lineal en la que la relación entre la variable independiente "X" y la variable dependiente "Y" es modelada como

polinomio de grado n en x [14].

Existen varios métodos de calcular el error cometido, en este caso se ha calculado mediante el error cuadrático medio (MSE) y error absoluto medio (MAE)

- **Error absoluto medio (MAE):** es una de las métricas de error más simples. Se obtiene el error para cada valor de los datos, sumando posteriormente todos los errores en valor absoluto para evitar cancelar errores negativos y positivos y, por último, se realiza el promedio dividiendo por el número de datos. A partir de la ecuación 11, se obtiene un error de MAE de 0,139 con una muestra de 173 valores.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum (y - \hat{y}) \quad (11)$$

- **Error cuadrático medio (MSE):** es uno de los criterios de evaluación más usados. Se obtiene de forma similar al error absoluto medio. En este caso, se eleva al cuadrado la diferencia antes de realizar el sumatorio de todos los errores.

El elevar al cuadrado nos permite obtener errores en todo momento positivos. Aunque el error absoluto medio también obtiene valores positivos, posee la desventaja de ser una función no derivable. Tener una función derivable hace posible el uso de algoritmos de optimización. A partir de la ecuación 12, se obtiene un error de MSE de 0,042 con una muestra de 173 valores.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum |y - \hat{y}|^2 \quad (12)$$

9.2 Gráficas:

Se puede observar de forma gráfica el ajuste realizado sobreponiendo en la misma figura ambas curvas, la curva de Pst obtenida mediante la función Simulink y mediante el polinomio calculado con la función “polyfitn” descrita anteriormente.

Se van a estudiar cuatro supuestos:

- Parámetro de frecuencia de flicker (f_f) variable y el resto constantes.
- Parámetro λ variable y el resto constantes.
- Parámetro número de periodos con distorsión flicker variable y el resto constantes.

Parámetro frecuencia de flicker (f_f) variable y el resto constantes: se representa los valores de Pst frente a la frecuencia del flicker manteniendo lambda y periodo constante en cada una de las figuras (cada figura presenta lambda y periodo diferente).

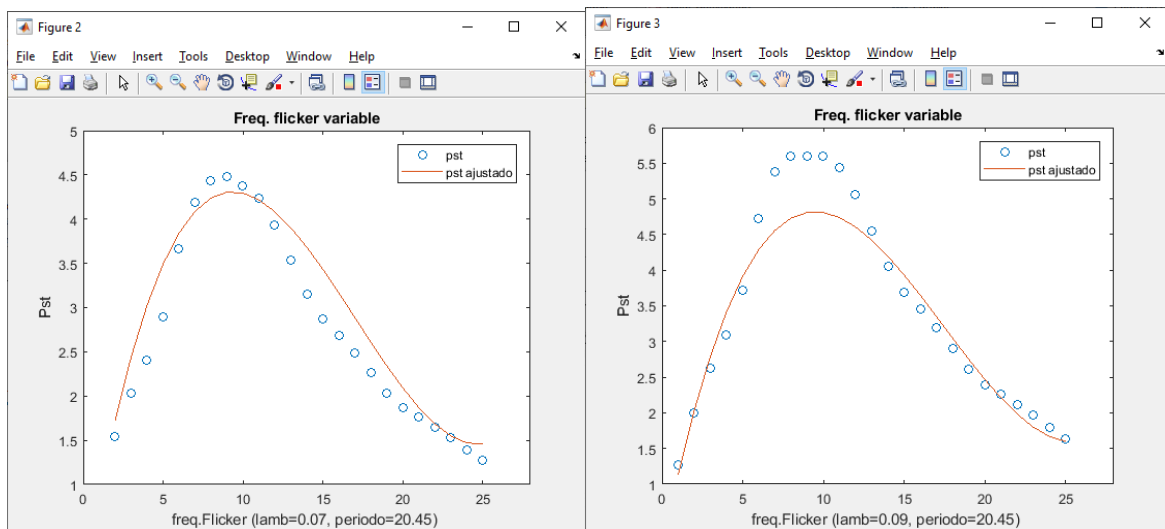


Fig. 36 Curva gráfica f_{f1}

Fig. 37 Curva gráfica f_{f2}

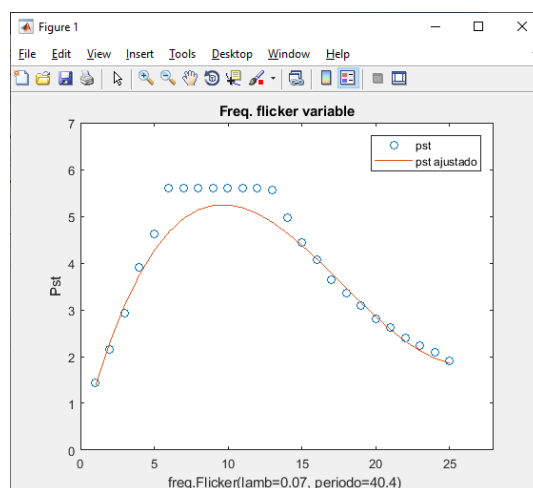


Fig.38 Curva gráfica f_{f3}

A la vista de las curvas, el ajuste es más preciso para ciertos valores de los parámetros lambda y periodo, y en general el error incrementa para el valor de saturación del Pst (Pst=5.6).

Parámetro λ variable y el resto constantes:

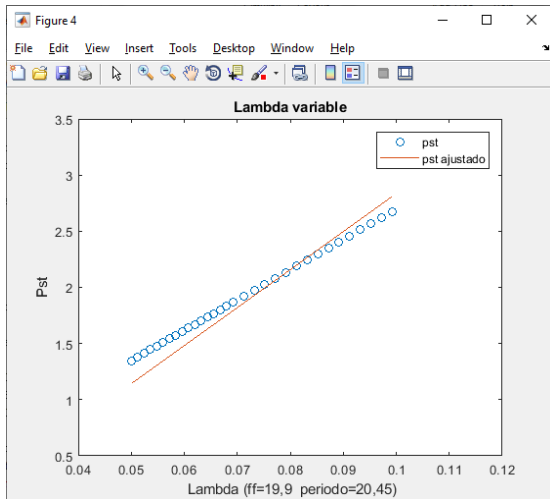


Fig. 39 Curva ajuste λ 1

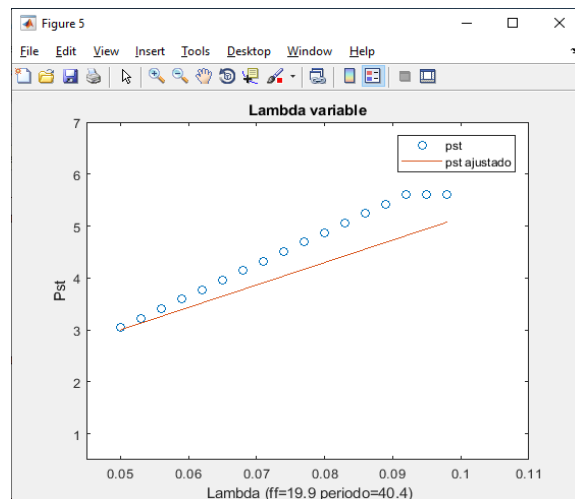


Fig. 40 Curva ajuste λ 2

En general el ajuste es bastante preciso. Se observa que el valor de Pst es creciente a medida que incrementa λ sin que pueda extraerse una conclusión clara sobre cuándo el error entre la función de "Simulink" y el polinomio ajustado es mayor.

Parámetro número de periodos con distorsión flicker variable y el resto constantes:

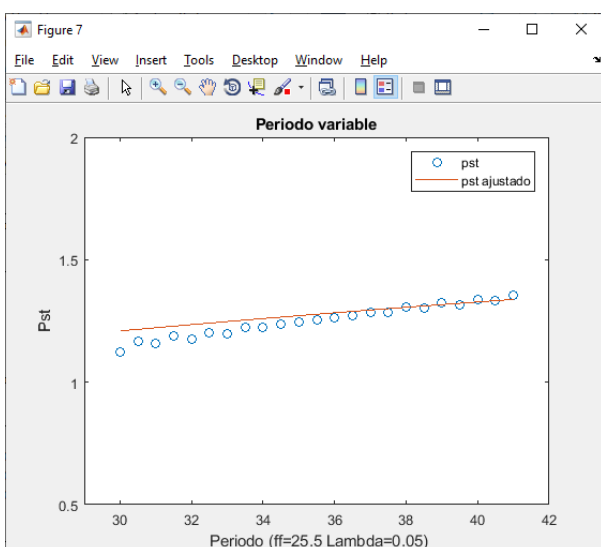


Fig. 41 Curva ajuste periodo 1

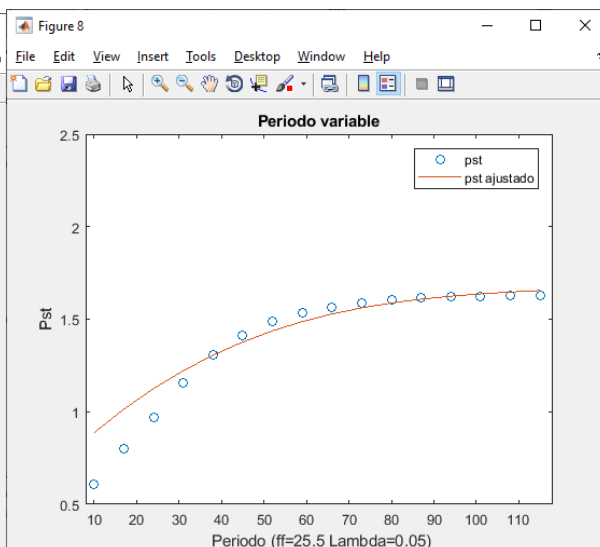


Fig. 42 Curva ajuste periodo 2

En conclusión, a pesar de ajustes menos precisos como el de la Figura 33, en general, se obtiene una buena aproximación como se puede observar en la Tabla 2. Esta tabla incluye el valor de Pst obtenido con la función original de Simulink y el valor de Pst obtenido con el ajuste del polinomio calculado. Esto se debe a que el polinomio obtenido se ha calculado en esta sección atendiendo a los tres parámetros característicos del flicker y por lo tanto el ajuste es colectivo (de los tres parámetros) y no individual como se hizo inicialmente en la Sección 8.

f_f	λ	Número periodos distorsionados	Pst (Simulink)	Pst(ajuste pol.)
13	0,09	20,45	4,54911248	4,42146901
12	0,09	20,45	5,05619854	4,60600981
11	0,09	20,45	5,44591359	4,73860896
7	0,09	20,45	5,38409376	4,56038545
6	0,09	20,45	4,72262851	4,29137368
5	0,09	20,45	3,71793324	3,91365921
4	0,09	20,45	3,09805552	3,41778185
3	0,09	20,45	2,62897701	2,79428145
2	0,09	20,45	2,00003709	2,03369782
1	0,09	20,45	1,26768018	1,12657078
6	0,09	20,45	4,72262851	4,29137368
5	0,09	20,45	3,71793324	3,91365921
4	0,09	20,45	3,09805552	3,41778185
3	0,09	20,45	2,62897701	2,79428145
2	0,09	20,45	2,00003709	2,03369782
1	0,09	20,45	1,26768018	1,12657078
25	0,07	40,4	1,91449581	1,86337966
24	0,07	40,4	2,10045849	1,96396883
19	0,09	40,4	3,9695807	3,99078808
18	0,09	40,4	4,32420933	4,32708385
17	0,09	40,4	4,68406881	4,65871775
16	0,09	40,4	5,22992163	4,9762296
25	0,09	120	3,04466787	2,86631582
24	0,09	120	3,27719341	3,20460585
25,5	0,05	101	1,62528997	1,63691894
25,5	0,05	94	1,62215993	1,62445764
25,5	0,05	87	1,61587007	1,6084611

Tabla 5 Valores de Pst obtenidos con la función original de Simulink y los obtenidos con el polinomio ajustado para diversos valores de los parámetros del flicker.

10. Cálculo de los parámetros del flicker asociados a una instalación fotovoltaica y dibujo de sus contornos

El polinomio multivariable obtenido en la sección anterior permite dotar al sistema de cálculo del Pst a partir de los parámetros del flicker de velocidad con un error en el cálculo asumible. De este modo, es posible de manera rápida, realizar un barrido por numerosas combinaciones de los parámetros f_f , λ y número de periodos distorsionados. De este modo, se ha realizado una rejilla (matriz) donde se han obtenido valores de Pst en el rango de los presentes en una instalación fotovoltaica con numerosas combinaciones de los parámetros del flicker. Esta extensa rejilla se incluye en el Anexo I.

Una manera cómoda de visualizar esta rejilla de cálculo de Pst en función de los parámetros del flicker es a través de contornos que muestran isolíneas que conectan los puntos en los que el Pst tiene un mismo para diversas combinaciones de parámetros el flicker[15]. Por lo tanto, nos permitirá, de forma gráfica, conocer las diferentes combinaciones de parámetros para un Pst determinado.

Se han representado las curvas de nivel mediante un gráfico bidimensional (eje Y: número de periodos distorsionados, eje X: f_f) dejando constante el parámetro λ para cada gráfica de contorno representado, variando el valor de este último parámetro para obtener una nueva gráfica de contorno con diferente valor de λ .

```
function func_contornos(psts)
close all; %cierra todas las figuras abiertas
load polymodel; % cargo la funcion por si es la primera vez que se usa
for n=1:10
    lambda=0.05+ n*0.005;
    Z = zeros(100,100); %vector donde se almacena los valores de pst evaluados
    %rejilla linspace(val_min, val_max, tamaño), el tamaño debe ser igual en
    %ambos e igual al tamaño de Z
    x = linspace(8, 30, 100);
    y = linspace(1, 200, 100);
    [X,Y] = meshgrid(x,y);

    %bucle para recorrer las combinaciones posibles de parametros
    for i=1:1:100
        for j=1:1:100
            freq = X(i,j);
            periodo = Y(i,j);
            Z(i,j)=polyvaln(polymodel,[freq, lambda, periodo]);
        end
    end
    figure
    contour(X, Y, Z,psts,'ShowText','on');
    title(['lambda =',num2str(lambda)]);
    xlabel('freq.Flicker ');
    ylabel('periodo');
end
end
```

Fig.43 Script generación de contornos

Los contornos se han representado haciendo uso del software “*Matlab*” mediante un *script* programado (“figura 43”). Función que se le introduce un parámetro de entrada (vector de valores de Pst que se quieren observar en los contornos), en la función se realiza:

- Cargar el polinomio ajustado para obtener el parámetro característico de la distorsión (Pst).
- Se inicia el bucle principal para representar tantos contornos como valores de λ se quiera mostrar (se dibuja un gráfico de contorno para cada valor de λ ya que la representación es bidimensional). ‘n’ determina el número de contornos y λ toma ‘n’ valores equidistantes entre el valor mínimo y máximo(0.05-0.1).
- Se define el vector **Z** donde se almacenarán los valores de Pst evaluados. A continuación, se crea una rejilla con “*linspace*” en la que se especifican los valores máximos y mínimos de λ y f_r en los rangos permitidos así como el tamaño (tamaño de los parámetros que evidentemente debe coincidir con el tamaño del vector **Z**).
- Mediante dos bucles adicionales se recorren los parámetros f_r y número de periodos distorsionados y se evalúan, en cada paso, ambos parámetros junto con el tercer parámetro inicial, λ .
- Finalmente utilizando la función “*contour(X, Y, Z, psts)*” se dibujan los contornos, donde ‘X’, ‘Y’ son los valores de f_r y número de periodos distorsionados en formato de rejilla, **Z** el vector de Pst evaluado, y *psts* vector de valores que queremos visualizar.

El vector **Z** contiene todos los valores de Pst evaluados. Sin embargo se pueden mostrar únicamente aquellos valores que nos interesen, en cuyo caso se introduce como parámetro de entrada el vector de *psts* que interese. *psts* debe ser un vector creciente. Para mostrar una sola línea de contorno es necesario definir *psts* como un vector de dos elementos de igual valor al nivel del contorno deseado

10.1 Graficas de contornos

A continuación, se muestra una serie de contornos para diferentes valores de Pst (Figuras de 44 a 48). Cada gráfica de contornos se muestra para los parámetros f_f y número de periodos distorsionados. Pese a la similitud de las isóneas de las diferentes figuras de contornos, cada figura está realizada con un valor de λ diferente.

Al ser curvas muy similares se ha seleccionado mediante un cursor un punto de una isónea en cada gráfica, de esta forma se puede observar cómo cambia uno de los parámetros (número de periodos distorsionados) manteniendo los demás restantes en cada figura.

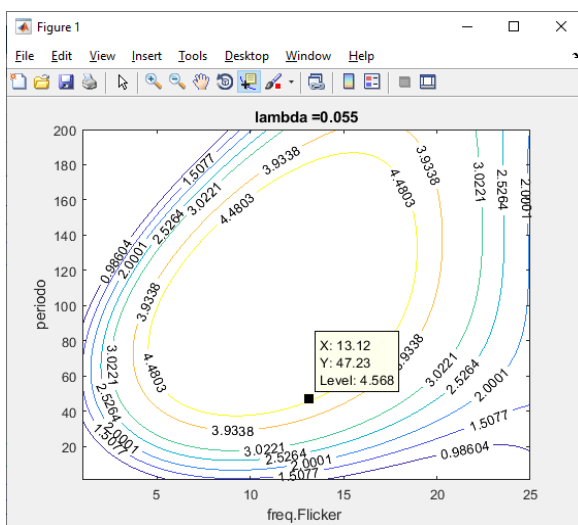


Fig.44Contorno1

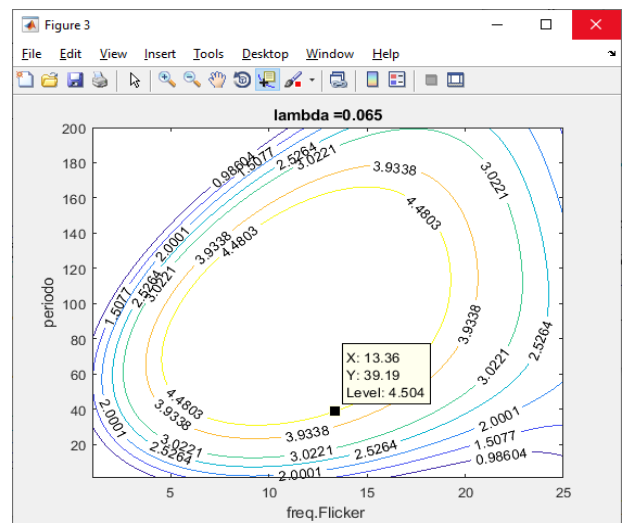


Fig.45 Contorno 2

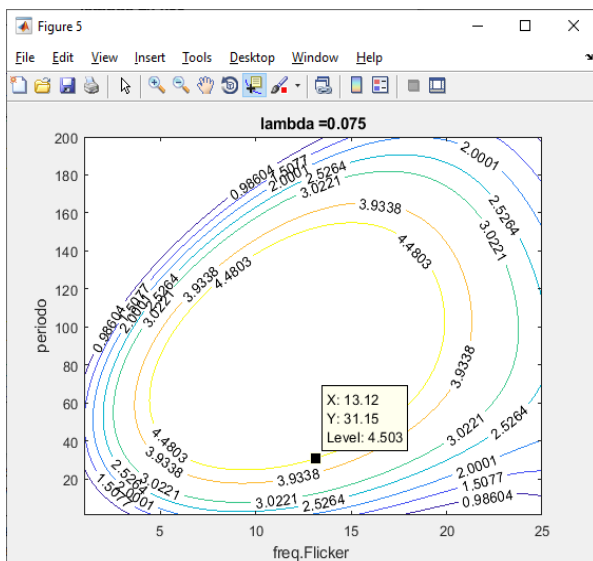


Fig.46Contorno3

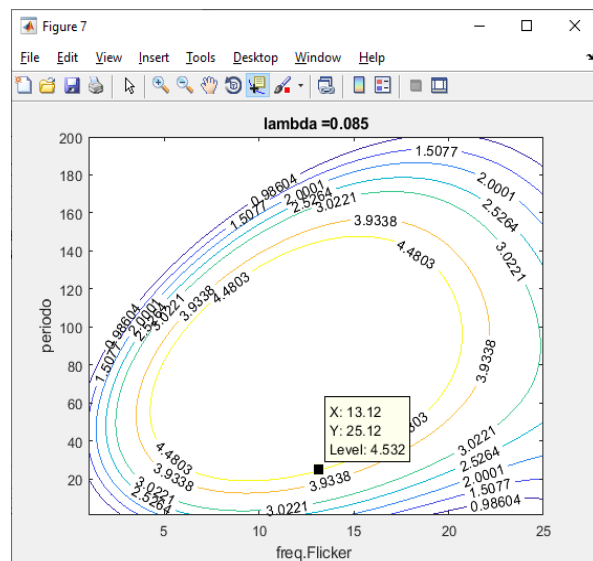


Fig.47Contorno 4

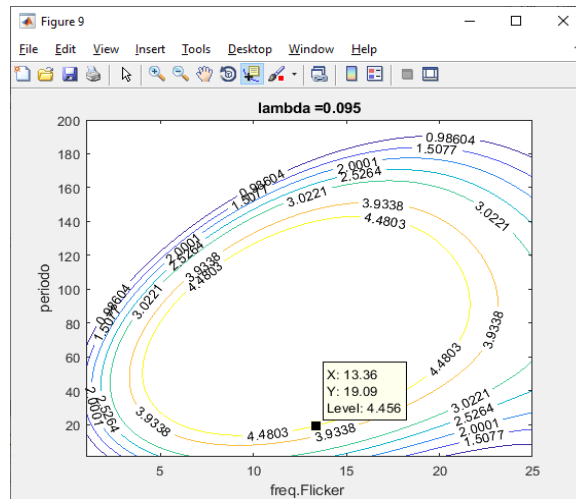


Fig.48 Contorno 5

Estas gráficas de contorno muestran de manera visual qué combinaciones de parámetros del flicker son posibles para obtener valores de Pst característicos de instalaciones fotovoltaicas reales. De este modo, es posible emular matemáticamente señales eléctricas en el dominio del tiempo con la distorsión flicker sin tener que capturar señales reales en este tipo de instalaciones, favoreciendo el estudio de esta distorsión.

11. Conclusión

Como cabría esperar, hallar los parámetros que caracterizan al tipo de distorsión en la calidad de la energía flicker, que se encuentra en las instalaciones fotovoltaicas no es una operación trivial. Para ello se ha fraccionado el estudio en diversas partes como hallar la ecuación que representa la distorsión, utilizar un modelo de Simulink para obtener el Pst a partir de los parámetros del flicker en el dominio del tiempo, ajustar el cálculo del Pst que realiza el modelo a una función polinómica que nos permite hallarlo de una forma mucho más rápida y obtener cómodamente con esta función polinómica una rejilla de valores de combinaciones de los parámetros del flicker que permiten obtener valores de Pst similares a los de las instalaciones fotovoltaicas, representando los resultados en forma de contornos. Los valores concretos de esta rejilla pueden encontrarse en el Anexo I.

Como resumen general, se obtienen valores de Pst aproximados a los valores de una instalación real, para valores del parámetro f_f próximos a 23-25, del parámetro λ próximos a 0,05 y del parámetro número de periodos con distorsión entre 10-45. No obstante, los rangos varían con las diferentes combinaciones entre parámetros.

Cabe destacar también que, para valores de f_f próximos a 8, se observan comportamientos indeseados en las curvas como la saturación de Pst al valor 5,6. Para estos valores de f_f con λ variable se obtienen valores de Pst prácticamente invariantes.

Como trabajo futuro, resultaría interesante acotar el error obtenido en la aproximación polinomial mediante, por ejemplo, la recopilación de un mayor número de datos, es decir, valores de parámetros y Pst asociados obtenidos por el modelo Simulink en el rango deseado. Esto es costoso por el coste computacional de esta función. Otra posible solución consistiría en buscar otro tipo de función que permita un mejor ajuste, mediante splines para más de una variable, etc. Una vez obtenido un polinomio acotando el error en la medida de lo posible, se podría utilizar para seguir estudiando distorsiones reales de flicker con el propósito de minimizar el efecto de una mala calidad de la energía procedente de las instalaciones fotovoltaicas.

Obtener un resultado satisfactorio en este punto es de suma importancia en este tipo de energía, la energía solar fotovoltaica, cuyo crecimiento en las últimas décadas sigue una curva exponencial y ha evolucionado desde un pequeño mercado hasta convertirse en una fuente relevante de electricidad.

12. Referencias:

- [1] Mahela, O. P., Shaik, A. G., & Gupta, N. (2015). A critical review of detection and classification of power quality events. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 495-505.
- [2] Igual, R., & Medrano, C. (2020). Research challenges in real-time classification of power quality disturbances applicable to microgrids: A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 132, 110050.
- [3] Gómez, G. P. (2019). Libro Blanco de las Energías Renovables: Solar Fotovoltaica, Solar Térmica, Aerotermia, Biomasa, Vehículo Eléctrico, Microgeneración, Eficiencia Energética y CTE (18.1) (1.a ed.). Salvador Escoda S.A.
- [4] Corcobado, R. C. T. D. (2020). *LA - INSTALACIONES SOLARES FOTOVOLTAICAS. LIBRO ALUMNO*. (1.ª ed., Vol. 1). Mc Graw Hill Interamericana.
- [5] Solar Energy | TU Delft Online. (2020, 15 diciembre). TU Delft Online Learning. <https://online-learning.tudelft.nl/courses/solar-energy/>
- [6] González, F & González, D & Montserrat, D & Dieste-Velasco, M & Alonso-Tristán, C. (2015). Estudio sobre la distribución óptima de termo-generadores acoplados a paneles fotovoltaicos.
- [7] Igual, R., Medrano, C., Arcega, F. J., & Mantescu, G. (2018, May). Integral mathematical model of power quality disturbances. In *2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)* (pp. 1-6). IEEE.
- [8] Ferreyra, D., Gudiño, D. A., & Sada, M. A. (2013). Calidad de energía: Medición de parpadeo (flicker) en una instalación urban.
- [9] Guide to Quality of Electrical Supply for Industrial Installations, Part 5, Flicker and Voltage Fluctuations, Power Quality Working Group WG2, 2000.
- [10] Hanzelka, Z., & Bien, A. (2005). Voltage disturbances. Flicker measurement. *Power Quality Application Guide, copper development association*, 1-12.
- [11] IEC 61000-4-15:1997, Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4: Testing and Measurement Techniques Section 15: Flicker meter – Functional and Design Specifications
- [12] Oprescu, L. (2016, 10 febrero). Director nou la Institutul de Cercetare Științifică și Tehnologică Multidisciplinară al Universității Valahia. *Gazeta Dambovitei*. <https://www.gazetadambovitei.ro/educatie/director-nou-la-institutul-de-cercetare-stiintifica-si-tehnologica-multidisciplinara-al-universitatii-valahia/> Accesible: 09/09/2020
- [13] *Flicker meter Statistical Analysis Module - MATLAB & Simulink - MathWorks España*. (2015, 10 julio). MathWorks. <https://es.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/flicker-meter-statistical-analysis-module.html>: Accesible: 09/08/2020
- [14] Pascual, C. (2020, 21 abril). *Tutorial: Understanding Regression Error Metrics in Python*. Dataquest. <https://www.dataquest.io/blog/understanding-regression-error-metrics/>
- [15] colaboradores de Wikipedia. (2020, 12 junio). Isolnea. Wikipedia, la enciclopedia libre. <https://es.wikipedia.org/wiki/Isol%C3%ADnea>

