

DISEÑO DE UN GENERADOR Y CLASIFICADOR DE FLICKER

EDWARD ALEXANDER ANTOLINEZ CEPEDA

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURAS



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

PAMPLONA. 28-03 de 2021

DISEÑO DE UN GENERADOR Y CLASIFICADOR DE FLICKER

EDWARD ALEXANDER ANTOLINEZ CEPEDA

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

Director: EDISON ANDRÉS CAICEDO
MSc. Ing. Eléctrico

Co-director: Luis David Pabón Fernández
MSc. Ing. Eléctrico

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURAS
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

Pamplona. 28-03-2021

“A mi madre, quien me ha apoyado incondicionalmente desde el principio, mi motivación, mi alegría, la razón de todo en mi vida”.

-Edward Alexander Antolinez Cepeda

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, en especial a mi madre Carmenza Cepeda por su apoyo y su paciencia a lo largo de este camino, a mis compañeros que me han apoyado desde el principio en esta etapa tan importante de mi vida, tantas noches, tantos amaneceres, tanto apoyo, todos siguiendo el mismo objetivo, la misma ilusión, a mis docentes por inculcarme el amor a la Ingeniería, el amor por esta increíble profesión, por desarrollar en mi la capacidad de razonar a diferentes problemas y ofrecerme las herramientas necesarias para solventar con éxito mi etapa universitaria, pero en especial un sentido agradecimiento al profesor Edison Andrés Caicedo por su constancia y entrega a la docencia, por la capacidad natural que tiene de transmitir el conocimiento, por su ayuda desde el primer semestre de mi experiencia universitaria, después de tantos años se ha convertido en uno de mis referentes más importantes, gracias por la paciencia que ha tenido a lo largo de este proyecto frente a mis constantes incoherencias y descuidos, por último gracias a la vida, al destino, a Dios, por encajar las piezas.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	13
2	PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	19
3	DELIMITACIÓN.....	20
3.1	Objetivos	20
3.1.1	Objetivo general.....	20
3.1.1	Objetivos específicos	20
3.2	Acotaciones	20
4	MARCO TEÓRICO.....	21
4.1	Calidad de la energía eléctrica.....	21
4.2	Importancia de la calidad de la energía	22
4.3	Problemas que acarrea la omisión de la calidad de la energía	23
4.4	Eventos de la calidad de la energía.....	25
4.4.1	Transitorios	26
4.4.2	Variaciones rms de corta duración.....	27
4.4.3	Variaciones rms de larga duración.....	28
4.4.4	Desequilibrio de tensión.....	29
4.4.5	Distorsión de la forma de onda	29
4.4.6	Fluctuaciones de tensión	32

4.4.7	Variaciones de la frecuencia de Potencia.....	32
4.5	FLICKER	33
4.5.1	Características	34
4.5.2	Causas	34
4.5.3	Efectos.....	35
4.5.4	Soluciones	35
4.5.5	Factor Flicker	36
4.5.6	Índices de severidad de Flicker (Pst - Plt).....	36
4.5.7	Explicación matemática del Flicker	¡Error! Marcador no definido.
5	RESULTADOS.....	39
5.1	Metodología para la generación y clasificación de Flicker:.....	39
5.1.1	Descripción general.....	39
5.1.2	Descripción individual de cada uno de los bloques:	41
5.2	Algoritmos para la generación de <i>Flicker</i>	63
5.3	Interfaz Gráfica del simulador.....	64
5.4	Verificación del generador y clasificador de Flicker	73
5.4.1	Pruebas de P.instantáneo:.....	73
5.4.2	Pruebas de Pst:	82
6	Conclusiones y trabajos a futuro	86

6.1 Conclusiones 86

6.2 Trabajos a futuro 88

7 Bibliografía 89

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1. Caracterizaciones fenómenos electromagnéticos. [13].....	25
Ilustración 2. Transitorio impulsivo – oscilatorio. Fuente:[17]	26
Ilustración 3. Caída de voltaje instantánea causada por falla SLG. Fuente: [13].	27
Ilustración 4. Swell. Fuente: [18].	28
Ilustración 5. Offset de CD. Fuente:[1].....	29
Ilustración 6. Presencia de armónicos. Fuente:[20].	30
Ilustración 7. Notching. Fuente:[13].	31
Ilustración 8. Alimentación de horno de arco. Fuente: [1].	35
Ilustración 9. Curva Pst = 1. Fuente:[25].	37
Ilustración 10. Diagrama vectorial representativo. Fuente:[23]; Error! Marcador no definido.	
Ilustración 11. Diagrama de bloques Flickermeter. Fuente:[26].....	39
Ilustración 12. Señal con modulación sinusoidal. Fuente: Autor.....	42
Ilustración 13. Señal con modulación rectangular. Fuente: Autor.....	43
Ilustración 14. Señal de entrada normalizada. Fuente: Autor.	44
Ilustración 15. Señal sinusoidal demodulada. Fuente: Autor.....	46
Ilustración 16. Señal rectangular demodulada. Fuente: Autor.....	46
Ilustración 17. Respuesta filtro pasa alto, señal sinusoidal. Fuente: Autor.....	47
Ilustración 18. Respuesta filtro pasa bajo, señal sinusoidal. Fuente: Autor.....	48
Ilustración 19. Respuesta filtro pasa alto, señal rectangular. Fuente: Autor.....	48
Ilustración 20. Respuesta filtro pasa bajo, señal rectangular. Fuente: Autor.....	48

Ilustración 21. Parámetros de las variables de filtro de ponderación. Fuente: [30].....	49
Ilustración 22. Respuesta en frecuencia, filtro de ponderación. Fuente:[30].....	50
Ilustración 23. Respuesta filtro de ponderación, salida del bloque 3. Fuente: Autor.	51
Ilustración 24. Factor de ponderación, bloque 4. Fuente: [27]	52
Ilustración 25. a) Transitorio de Pinst. b) Pinst, salida del bloque 4. Fuente: Autor.	53
Ilustración 26. Pasos 1 y 2, cálculo de Pst y Plt. Fuente: Autor.	55
Ilustración 27. Pasos 3 y 4, cálculo de Pst y Plt. Fuente: Autor.	56
Ilustración 28. a) Función de densidad de probabilidad. b) Probabilidad acumulada. Fuente: Autor.	57
Ilustración 29. Interfaz gráfica generado y clasificador de Flicker. Fuente: Autor.	64
Ilustración 30. Variables ideales. Fuente: Autor.	65
Ilustración 31. Calculo normal PST. Fuente: Autor.....	67
Ilustración 32. Visualización deseada. Fuente: Autor.....	68
Ilustración 33. Señal con Flicker. Fuente: Autor.	68
Ilustración 34. Salida del bloque 1. Fuente: Autor.....	69
Ilustración 35. Salida del bloque 2. Fuente: Autor.....	69
Ilustración 36. Salida del bloque 3. Fuente: Autor.....	70
Ilustración 37.Salida del bloque 4. Fuente: Autor.....	70
Ilustración 38. Frecuencia absoluta. Fuente: Autor.	71
Ilustración 39. Frecuencia acumulada. Fuente: Autor.	71
Ilustración 41. Prueba de clasificación de Flicker, Pst =1. Fuente: Autor.	85

Tabla de tablas

Tabla 1. Coeficientes de ponderación para el cálculo de PST. Fuente:[26]	37
Tabla 2. Niveles aceptables de Flicker. Fuente:[21]	38
Tabla 3. Datos agrupados, cálculo de percentiles. Fuente: Autor	59
Tabla 4. Ejemplo cálculo de percentiles. Fuente: Autor.	60
Tabla 5. Pruebas IEC 61000-4-15 - señal sinusoidal 120Vrms.Fuente:[26].....	74
Tabla 6. Pruebas IEC 61000-4-15 - señal sinusoidal 230Vrms.Fuente:[26].....	75
Tabla 7. Pruebas IEC 61000-4-15 - señal rectangular 120Vrms.Fuente:[26].....	76
Tabla 8. Pruebas IEC 61000-4-15 - señal rectangular 230Vrms.Fuente:[26].....	77
Tabla 9. Resultado prueba P.instantáneo, señal sinusoidal 120Vrms. Fuente: Autor.....	78
Tabla 10. Resultado prueba P.instantáneo, señal sinusoidal 230Vrms. Fuente: Autor.....	79
Tabla 11. Resultado prueba P.instantáneo, señal rectangular 120Vrms. Fuente: Autor.	80
Tabla 12.Resultado prueba P.instantáneo, señal rectangular 230Vrms. Fuente: Autor.....	81
Tabla 13. Valores de cpm y fluctuación de tensión para un PST cercano a 1.Fuente:[26]..	82
Tabla 14. Evaluación valores PST=1. Fuente: Autor.....	82
Tabla 15. Comparación con el medidor de la calidad de la energía Hiwoki. Fuente: Autor.	83
Tabla 16. Prueba de efectividad basada en la curva Pst = 1. Fuente: Autor.	84

Tabla de ecuaciones

Ecuación 1. Factor Flicker [1].....	36
Ecuación 2. Calculo PST. Fuente:[21]	36
Ecuación 3. Calculo Plt. Fuente:[21]	38
Ecuación 4. Ecuación matemática Flicker. Fuente: [24].....	41
Ecuación 5. Representación del Flicker sinusoidal. Fuente: [24]	41
Ecuación 6. Representación del Flicker rectangular. Fuente: [24]	42
Ecuación 7. Normalización de la señal fundamental.	43
Ecuación 8. Factor de ganancia. Fuente: [27]	45
Ecuación 9. Factor de ganancia. Fuente:[27]	45
Ecuación 10. Filtro de ponderación. Fuente: [26].....	49
Ecuación 11. Filtro de primer orden bloque 4. Fuente: [27].....	52
Ecuación 12. Cálculo de amplitud para cada clase. Fuente: Autor.	55
Ecuación 13. Cálculo de tiempo en cada clase. Fuente: Autor.	56
Ecuación 14. Función de probabilidad acumulada para cada clase. Fuente: Autor.	58
Ecuación 15. Función de densidad acumulada. Fuente: Autor.	58
Ecuación 16. Calculo para el percentil Pn.....	59
Ecuación 17. Percentil 1s. Fuente: [27]	61
Ecuación 18. Percentil 3s. Fuente: [27]	62
Ecuación 19. Percentil 10s. Fuente:[27]	62
Ecuación 20. Percentil 50s. Fuente:[27]	62

Resumen

En el presente trabajo de investigación se planteó el diseño de un generador y clasificador del fenómeno de calidad de la energía *Flicker* tomando como referencia la norma IEC 61000-4-15. Para ello y teniendo en cuenta el vasto campo de aplicación y estudio de este evento, se decidió respaldar este trabajo de investigación tomando como referencia diferentes fuentes bibliográficas, esto con el fin de conocer y determinar las estrategias correspondientes para llevar a cabo la metodología adecuada, posteriormente se desarrollaron los algoritmos necesarios para llevar a cabo una interfaz gráfica que permita la generación y clasificación de dicho fenómeno utilizando el software *MATLAB* apoyado en el entorno de desarrollo de interfaz gráfica *App Designer*, por último se verificó el correcto funcionamiento del sistema comparando los valores aquí obtenidos con diferentes trabajos de grado y resultados ya estipulados por la norma IEC 61000-4-15.

1 INTRODUCCIÓN

A lo largo de las últimas décadas la electrónica y las telecomunicaciones se han afianzado de manera considerable en nuestras vidas, en este nuevo siglo la importancia de mantener un mundo conectado ha llevado a que se modifique la naturaleza de las cargas en el suministro eléctrico, como resultado de esto han aparecido problemas relacionados a la calidad de la energía que antes existían, pero que no eran considerados como un problema trascendental en los sistemas eléctricos, hoy en día se reconoce la magnitud e incidencia negativa que tienen estos eventos que derivan en la distorsión de la forma de onda del voltaje/corriente, que no solo afectan a los consumidores o usuarios finales, sino que también acarrea costos y problemas a las empresas encargadas del suministro eléctrico. [1]

De acuerdo a lo anterior se hace indispensable utilizar herramientas que hagan posible la adquisición e identificación de estos eventos que consecuentemente sirvan de apoyo para desarrollar estrategias con el único fin de disminuir o mitigar los impactos nefastos que estos disturbios ocasionan al suministro eléctrico.[1][2]

Por tanto, conocer las características del evento permite tomar medidas de contención, en consecuencia, la propuesta de este trabajo de grado consiste en diseñar un generador y clasificador de *Flicker*, considerando diferentes técnicas de análisis matemáticos utilizadas en el procesamiento de señales, proporcionando así, mayor información con respecto a este disturbio de la calidad de la energía que permita su comprensión y análisis de la manera más adecuada.[3]

Debido a la importancia que ha tenido la inclusión de la calidad de la energía en los sistemas eléctricos a lo largo de este siglo XXI, se han incrementado el número de publicaciones e investigaciones encaminadas a identificar los aspectos más relevantes con respecto a la normativa, consecuencias y estrategias que mitiguen los problemas ocasionados por la distorsión de la forma de onda en el suministro eléctrico, uno de los disturbios responsables de generar esta distorsión es categorizado como *“Fluctuaciones de voltaje”*, cuyo efecto cíclico o intermitente desencadena en el fenómeno conocido como *“Flicker”*.

A continuación, se consideran algunos artículos que son contemplados en el presente documento con el fin de aportar diferentes herramientas teóricas, así como diferentes metodologías para agrupar los conceptos más relevantes con respecto a este evento.

Jayasree T. Devaraj D. y Sukanesh R. *“Power quality disturbance classification using Hilbert transform and RBF networks”*(2010). En este artículo se planteó la Clasificación de perturbaciones de la calidad de la energía utilizando 2 herramientas; la transformada Hilbert y una red neuronal artificial (ANN). Una herramienta complementa a la otra, los datos de entrada para la red neuronal (ANN) fueron extraídos aplicando la transformada Hilbert (HT), estos datos de entrada surgen a partir de la envolvente de la señal perturbada, después de normalizar la señal se asignó a la red neuronal, el entrenamiento de la red neuronal se generó a partir de la simulación de varias fallas en un sistema de prueba. Los resultados que se obtuvieron denotan la eficacia del método propuesto para la clasificación de los eventos.[4]

Khetarpal Poras y Tripathi Madan Mohan. *“A critical and comprehensive review on power quality disturbance detection and classification”* (2020). Este artículo de revisión recopila las investigaciones realizadas en el campo de la detección y clasificación de

perturbaciones de la calidad de la energía, las diferentes técnicas de procesamiento de señales tales como la transformada de Fourier (FT), sus variantes (STFT,DFT,FFT), la transformada S (ST), la transformada Hilbert Huang (HHT), transformada Wavelet (WT), junto con el uso de redes neuronales (NN), aprendizaje difuso y demás son revisadas y analizadas exhaustivamente, al igual se presenta una comparación entre estas diferentes técnicas de procesamiento y técnicas de aprendizaje automático, todo con el fin de agrupar en un solo documento los aspectos más relevantes de la detección y clasificación de eventos de la calidad de la energía.[5]

Ozgonenel Okan, Yalcin Turgay, Guney Irfan y Kurt Unal. “*A new classification for power quality events in distribution systems*” (2020). Este artículo de investigación presenta una evaluación acerca de los métodos de clasificación para el monitoreo de la calidad de la energía junto con el uso de una máquina de soporte vectorial (SVM), como objetivo principal plantea investigar mediante comparación el rendimiento del método conocido como descomposición en modo empírico por conjuntos (EEMD) y el método de descomposición en modo empírico (EMD), las características son extraídas de las señales de potencia utilizando la Transformada Hilbert Huang (HHT), la cual es una combinación entre EEMD y la transformada de Hilbert (HT), las salidas de la transformada Hilbert Huang son funciones de modo intrínseco (IMF), frecuencia instantánea (IF) y amplitud instantánea (IA), se calculan los máximos y mínimos a partir de la media, la desviación estándar y los valores singulares, tomando los primeros IMF, FI e IA.[6]

Sahani Mrutyunjaya, Dash P. K. y Samal Debashisa. “*A real-time power quality events recognition using variational mode decomposition and online-sequential extreme learning*”

machine” (2020). En este artículo los autores integran dos métodos, descomposición en modo variacional (VMD junto con la máquina de aprendizaje secuencial (OSELM), todo con el fin de clasificar eventos de calidad de la energía (PQE) en tiempo real, para descomponer en funciones de modo intrínseco (IMF) las señales de calidad de energía se utiliza la transformada empírica Wavelet (EWT), la descomposición en modo empírico (EMD) y la descomposición en modo variacional (VMD), enseguida se aplica la Transformada de Hilbert (HT) para extraer 4 características provenientes de las PQE descompuestas, finalmente se desarrolla una interfaz de PC para verificar la dinámica y respuesta del método propuesto.[7]

Kapoor Rajiv, Gupta Rashmi, Son Le Hoang, Jha Sudan y Kumar Raghvendra. “*Boosting performance of power quality event identification with KL Divergence measure and standard deviation*” (2018). Este artículo basa su metodología en 2 premisas fundamentales que plasma como 2 subproblemas respecto a la identificación de eventos de la calidad de la energía; detección y clasificación respectivamente. Para la detección de perturbaciones se utilizan algoritmos de reconocimiento, el siguiente paso consiste en clasificar estas perturbaciones en grupos mediante el método de aprendizaje automático, de tal modo se utiliza la divergencia KL y la desviación estándar apoyados de una máquina vectorial *Support Vector Machine* para detectar y clasificar estas perturbaciones, se toman como referencia 12 eventos, por último se calcula la precisión de este método que alcanza un 94,02%. [8]

Sansheng Shi, Liming Gao, Lei Ma, Zhuoya Chen y Yuxiao Zhang. “*Research on Flicker Measurement Algorithm Based on FFT*” (2012). Este artículo de investigación se fundamenta en el estudio del fenómeno de la calidad de la energía conocido como *Flicker* y

los algoritmos encargados de su medición basados en la transformada rápida de Fourier (FFT). Se utiliza lenguaje de programación C y el instrumento virtual LabWindows/CVI, se proporciona un diagrama de flujo con instrucciones detalladas, se verifica el funcionamiento del programa y se realiza un análisis de posibles errores, por último se concluye que el algoritmo es confiable y consistente con los estándares IEC.[9]

Wicznyński Grzegorz. “*Determining location of voltage fluctuation source in radial power grid*” (2019). Este artículo presenta estrategias para identificar la ubicación de diferentes fuentes de fluctuaciones de voltaje en una red eléctrica radial, para ello se utilizan diferentes métodos, uno de ellos llamado *índices de fluctuación de voltaje*, consiste en una medición que permite evaluar la gravedad del parpadeo, además se reflejan diferentes ejemplos de aplicación, uno de ellos en tres diferentes puntos de la red eléctrica, las diferentes variaciones de voltaje indican que las cargas perturbadoras tienen influencia en estas ubicaciones particulares.[10]

Abulanwar S., Ghanem Abdelhady, Rizk Mohammad y Hu Weihao. “*A proposed flicker mitigation scheme of DFIG in weak distribution networks*” (2019). El presente artículo describe un esquema de mitigación de Flicker en redes de distribución débiles, mediante cambios entre la potencia activa y potencia reactiva para un generador eólico. Se utiliza el software MATLAB/SIMULINK para desarrollar un sistema con el fin de explorar el rendimiento del mismo teniendo en cuenta la velocidad del viento.[2]

Soliman S. A. y El-Hawary M. E. “*Measurement of power systems voltage and flicker levels for power quality analysis: A static LAV state estimation based algorithm*” (2000). Este artículo se basa en desarrollar una nueva aplicación del algoritmo conocido como:

algoritmo de estimación de estado de valor mínimo absoluto (LAV) con el fin de medir la magnitud del *Flicker*, del mismo modo la magnitud de voltaje, posteriormente se investigan los diferentes efectos que se presentan dependiendo la ventana de datos escogida, frecuencia de muestreo y el número de datos seleccionado para la evaluación.[11]

2 PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

En la actualidad la calidad de la energía se presenta como un nuevo problema tanto para los proveedores del suministro eléctrico, así como para los usuarios finales, ya no es suficiente solo con ofrecer el servicio de manera ininterrumpida, como se explicó anteriormente los avances tecnológicos han generado que las cargas cambien su naturaleza con respecto a la no linealidad del voltaje/corriente que requieren, los equipos altamente sensitivos tales como los monitores de hospital, telecomunicaciones, equipos de robótica y automatización entre otros requieren un suministro de alta calidad, ahora es fundamental que la forma de onda del voltaje y/o corriente presente la menor distorsión posible, todo esto con un único fin; evitar problemas técnicos, pérdidas económicas y daños en la integridad física de las personas. [1][12]

Si bien existe mucha información con respecto a la evaluación de los fenómenos de la calidad de la energía, como que los produce, que consecuencias conllevan y como mitigarlos, en un ámbito académico el uso de simuladores que permitan la identificación y comprensión de estos disturbios es limitada, por ello este proyecto plantea el diseño de un generador y clasificador del fenómeno conocido como “*Flicker*” mediante simulación.

Esto permitirá a las personas interesadas en la investigación sobre este campo tener mayores herramientas para la interpretación y estudio de este fenómeno, dado que se podrá generar el disturbio y posteriormente clasificarlo, además que podría ser utilizado en implementaciones futuras para validar el funcionamiento de dispositivos que se encargan de medir dicho fenómeno y las afectaciones que este conlleva.

3 DELIMITACIÓN

3.1 Objetivos

3.1.1 Objetivo general

Diseñar un generador y clasificador del fenómeno de la calidad de la energía “*Flicker*”, estipulado en el estándar IEEE 1159 de 1995.

3.1.1 Objetivos específicos

- Determinar la metodología para la generación y clasificación de *Flicker*.
- Desarrollar los algoritmos que permitan la generación de *Flicker*.
- Diseñar la interfaz gráfica del simulador.
- Verificar el funcionamiento del simulador de eventos de la calidad de la energía.

3.2 Acotaciones

El desarrollo de la interfaz gráfica se realizará utilizando el software Matlab.

4 MARCO TEÓRICO

Dado que el presente trabajo de investigación se centra en desarrollar un generador y clasificador de *Flicker*, es muy importante conocer algunas definiciones y conceptos con el fin de encaminar el proyecto a los objetivos planteados.

4.1 Calidad de la energía eléctrica

A continuación, se presentan algunas de las definiciones más relevantes:

Según la norma IEEE Std 1159-1995: *“El término calidad de la energía se refiere a una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan el voltaje y la corriente en un momento dado y en una ubicación determinada del sistema de energía”*[13].

La resolución de la CREG 024 de 2005 establece que: *“Para efectos de la resolución CREG 024 de 2005, se define como el conjunto de calificadores de fenómenos inherentes a la forma de onda de la tensión, que permiten juzgar el valor de las desviaciones de la tensión instantánea con respecto a su forma y frecuencia estándar, así como el efecto que dichas desviaciones pueden tener sobre los equipos eléctricos u otro”*[14].

La IEC 61000-4-30 define la calidad de la energía como: *“Características de la electricidad en un punto dado de un sistema eléctrico, evaluado frente a un conjunto de parámetros técnicos de referencia”*[15].

Como se puede observar no existe una definición general para este término en particular, en este documento el termino calidad de la energía hace referencia al conjunto de

fenómenos electromagnéticos que distorsionan la forma de onda del voltaje/corriente del suministro eléctrico.

4.2 Importancia de la calidad de la energía

Como bien ya se ha expresado a lo largo de todo este documento, ya no es suficiente solo con ofrecer el servicio eléctrico de manera ininterrumpida, ahora es fundamental que este suministro sea de calidad. Si bien antes de la década de los 90 se habían publicado artículos e investigaciones relacionadas a cuestiones acerca de la calidad de la energía, no obstante, después del año 1995 el aumento de artículos que tratan sobre este tema han aumentado de manera exponencial, lo cual denota la importancia que conlleva este tema a lo largo del nuevo siglo.[12]

En la industria la energía eléctrica es considerada la materia prima más versátil, utilizada y sencilla, toda persona o empresa que manipula equipos sensibles desean un suministro eléctrico idóneo, “perfecto”, libre de fluctuaciones, el uso de estos equipos sensibles ha generado que se monitoree constantemente los sistemas de potencia, este monitoreo se hace por parte tanto del usuario que utiliza equipos sensibles para encontrar la fuente de los problemas que puedan ocurrir así como también las compañías que suministran la energía eléctrica las cuales utilizan el monitoreo para poder mantener los rangos de voltaje/corriente dentro de los estándares permitidos.[1]

La importancia de tener una buena calidad de la energía conlleva a la reducción de costos no solo para las empresas encargadas del suministro eléctrico, sino también para los

usuarios finales, por ende, las estrategias en pro de mitigar estos eventos perjudiciales para el suministro eléctrico deben ser abordadas por ambas partes, dada la interacción que existe entre el suministro de energía y la carga.

4.3 Problemas que acarrea la omisión de la calidad de la energía

Frecuentemente cuando existe algún tipo de problema relacionado con la calidad de la energía, se suele atribuir el problema a una responsabilidad arraigada a la compañía suministradora, pero en muchos de los casos la fuente del problema es la pobre contribución de los usuarios al suministro eléctrico mediante el uso de equipos que generan armónicos, equipos con un pobre factor de potencia, puesta tierra inadecuada en las instalaciones, entre otras.[1]

La afectación de un equipo sensible puede desencadenar en la generación de algún tipo de disturbio que afecte a los demás equipos conectados en la misma instalación, dado el aumento de equipamiento electrónico vinculado al control de procesos, la penetración de un disturbio podría desencadenar en un mal funcionamiento de los equipos, activación de protecciones, pérdidas de información o adquisición de información errónea, lo cual desencadenaría en problemas técnicos y sobrecostos para la empresa.[12]

Estos problemas de la calidad de la energía pueden ser tratados y clasificados de la siguiente manera para mayor facilidad en su interpretación:[1][16]

- Fuentes
- Causas

- Efectos

Según la localización de la fuente con respecto al equipo de medición de la energía, estas fuentes pueden ser divididas en 2 categorías:[1]

- Maniobras de conmutación, fallas en la red eléctrica, descargas atmosféricas, todo ello en el lado del suministro de energía.
- Cargas no lineales, puesto a tierra inadecuada, interferencia electromagnética, todo ello en el lado del usuario.

4.4 Eventos de la calidad de la energía

El estándar IEEE 1159 de 1995 agrupa los eventos de la calidad de la energía en 7 categorías diferentes como se observa en la ilustración 5.1:

Categories	Typical spectral content	Typical duration	Typical voltage magnitude
1.0 Transients			
1.1 Impulsive			
1.1.1 Nanosecond	5 ns rise	< 50 ns	
1.1.2 Microsecond	1 μ s rise	50 ns – 1 ms	
1.1.3 Millisecond	0.1 ms rise	> 1 ms	
1.2 Oscillatory			
1.2.1 Low frequency	< 5 kHz	0.3–50 ms	0–4 pu ^a
1.2.2 Medium frequency	5–500 kHz	20 μ s	0–8 pu
1.2.3 High frequency	0.5–5 MHz	5 μ s	0–4 pu
2.0 Short-duration root-mean-square (rms) variations			
2.1 Instantaneous			
2.1.1 Sag		0.5–30 cycles	0.1–0.9 pu
2.1.2 Swell		0.5–30 cycles	1.1–1.8 pu
2.2 Momentary			
2.2.1 Interruption		0.5 cycles – 3 s	< 0.1 pu
2.2.2 Sag		30 cycles – 3 s	0.1–0.9 pu
2.2.3 Swell		30 cycles – 3 s	1.1–1.4 pu
2.3 Temporary			
2.3.1 Interruption		>3 s – 1 min	< 0.1 pu
2.3.2 Sag		>3 s – 1 min	0.1–0.9 pu
2.3.3 Swell		>3 s – 1 min	1.1–1.2 pu
3.0 Long duration rms variations			
3.1 Interruption, sustained		> 1 min	0.0 pu
3.2 Undervoltages		> 1 min	0.8–0.9 pu
3.3 Overvoltages		> 1 min	1.1–1.2 pu
3.4 Current overload		> 1 min	
4.0 Imbalance			
4.1 Voltage		steady state	0.5–2%
4.2 Current		steady state	1.0–30%
5.0 Waveform distortion			
5.1 DC offset		steady state	0–0.1%
5.2 Harmonics	0–9 kHz	steady state	0–20%
5.3 Interharmonics	0–9 kHz	steady state	0–2%
5.4 Notching		steady state	
5.5 Noise	broadband	steady state	0–1%
6.0 Voltage fluctuations	< 25 Hz	intermittent	0.1–7% 0.2–2 P _{it} ^b
7.0 Power frequency variations		< 10 s	\pm 0.10 Hz

Ilustración 1. Caracterizaciones fenómenos electromagnéticos. [13]

A continuación, se describen los fenómenos descritos en la ilustración 5.1:

4.4.1 Transitorios

Descrito como un disturbio subcíclico presente en la forma de onda de CA, se caracteriza ya sea por tener la misma o diferente polaridad con respecto a la forma de onda nominal, está presente cuando ocurre un cambio repentino en el voltaje/corriente de la red eléctrica. Puede ser clasificado a su vez en dos categorías. [1][13]

- **Transitorio impulsivo:** Cambio de frecuencia repentino, unidireccional en polaridad, estos se caracterizan por sus tiempos de subida y bajada.[13]
- **Transitorio Oscilatorio:** Cambio de frecuencia repentino en la condición de voltaje, corriente o ambos, que incluye valores bipolares.[13]

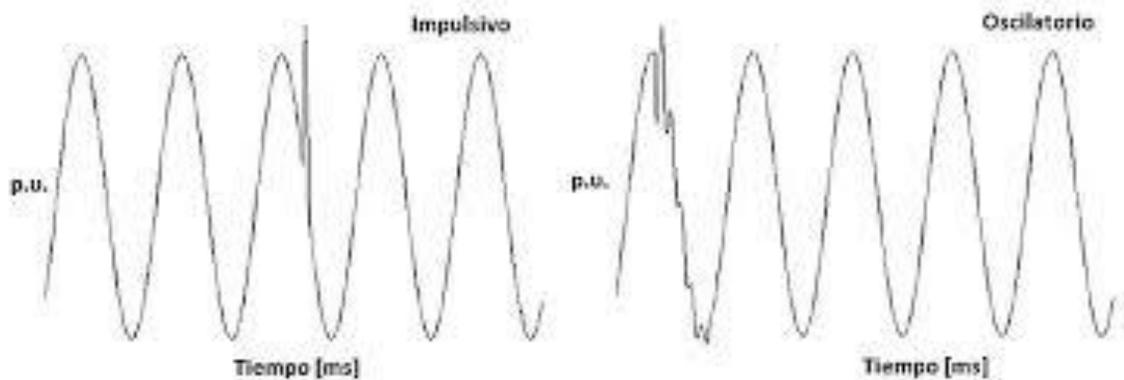


Ilustración 2. Transitorio impulsivo – oscilatorio. Fuente:[17]

4.4.2 Variaciones rms de corta duración

Este tipo de variaciones en su mayoría son causadas por condiciones de falla, energización de cargas que requieren una demanda alta de corriente y/o conexiones sueltas en el cableado de alimentación, dependiendo en gran medida la ubicación de la falla, esta puede causar aumentos temporales de voltaje (swells), caídas de voltaje (sags) o ausencia completa de voltaje (interrupciones).[1][13]

- **Depresión de voltaje (sags):** Este término se utiliza para describir la disminución de voltaje rms comprendida entre 0.1 pu y 0.9 pu, durante medio ciclo a 1 minuto.[13]

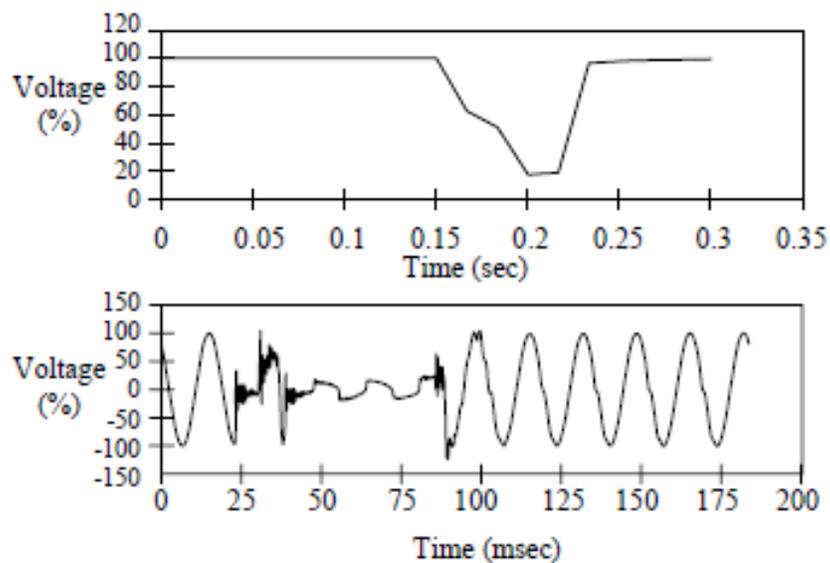


Ilustración 3. Caída de voltaje instantánea causada por falla SLG. Fuente: [13].

- **Elevación de voltaje (Swells):** Aumento del voltaje rms por encima de 1.1 pu durante periodos de medio ciclo a 1 minuto.

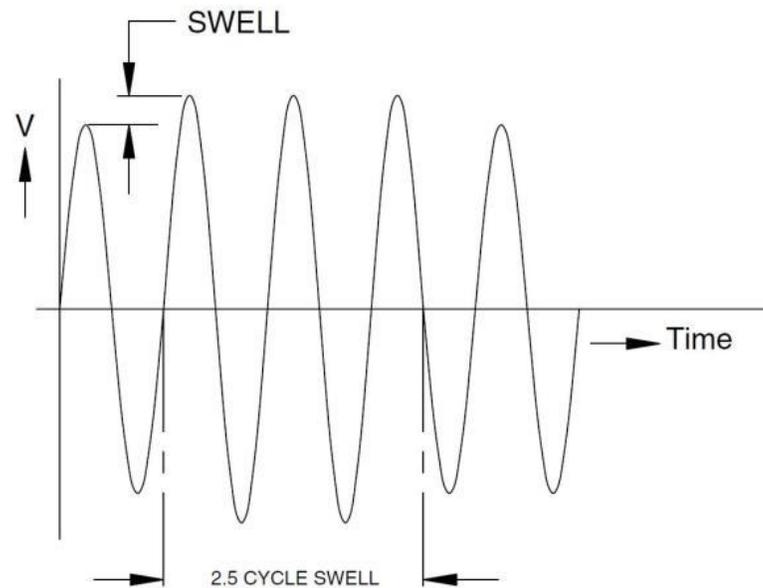


Ilustración 4.Swell. Fuente: [18].

4.4.3 Variaciones rms de larga duración

Comprenden las desviaciones rms a frecuencia de potencia (60 Hz) por un intervalo de tiempo superior a 1 minuto, entre las variaciones de larga duración se encuentran sobrevoltajes (overvoltages) o bajos voltajes (undervoltages), en general estas variaciones son originadas por cambios en la carga o accionamiento de interruptores.[1][13]

- **Sobrevoltaje (Overvoltage):** Aumento rms superior a 1.1pu superior a 1 minuto.[13]
- **Bajo voltaje (Undervoltage):** Disminución en la tensión rms inferior a 0.9pu en un intervalo de tiempo superior a 1 minuto.[13]
- **Interrupciones sostenidas:** Disminución de la tensión inferior al 10% de la nominal, en un intervalo de tiempo superior a 1 minuto, estas interrupciones suelen ser permanentes y requieren una intervención manual para su restauración.[13]

4.4.4 Desequilibrio de tensión

Un sistema trifásico desequilibrado, desbalanceado o asimétrico se presenta cuando los voltajes y las corrientes tienen diferente amplitud, y un desplazamiento diferente de 120° entre ellos.

4.4.5 Distorsión de la forma de onda

Se define como una deformación en la forma de onda en estado estable a frecuencia de potencia ideal, caracterizado por la presencia del contenido espectral de la desviación, a continuación se describen los 5 disturbios principales de distorsión de la forma de onda.[17]

- **DC offset:** Se denomina offset de DC, a la presencia de tensión o corriente continua en un sistema de potencia de CA, ocurre debido a perturbaciones geomagnéticas, uso de rectificadores de media onda entre otras. Los efectos indeseables se relacionan al polarizar núcleos de transformadores dado que pueden saturarse en operación normal, reduciendo drásticamente la vida útil del transformador.[1][13]

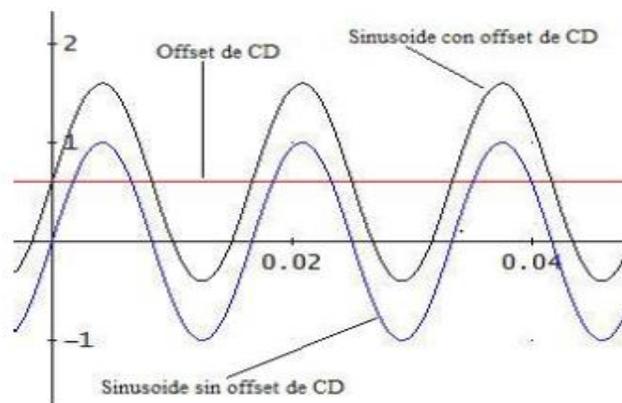


Ilustración 5. Offset de CD. Fuente:[1].

- **Armónicos:** Se denominan armónicos a la tensión y corrientes sinusoidales cuya frecuencia son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental, la distorsión armónica se produce cuando estos armónicos se combinan con la tensión/corriente fundamental, se produce debido a la existencia de cargas no lineales en el sistema de energía.[13]

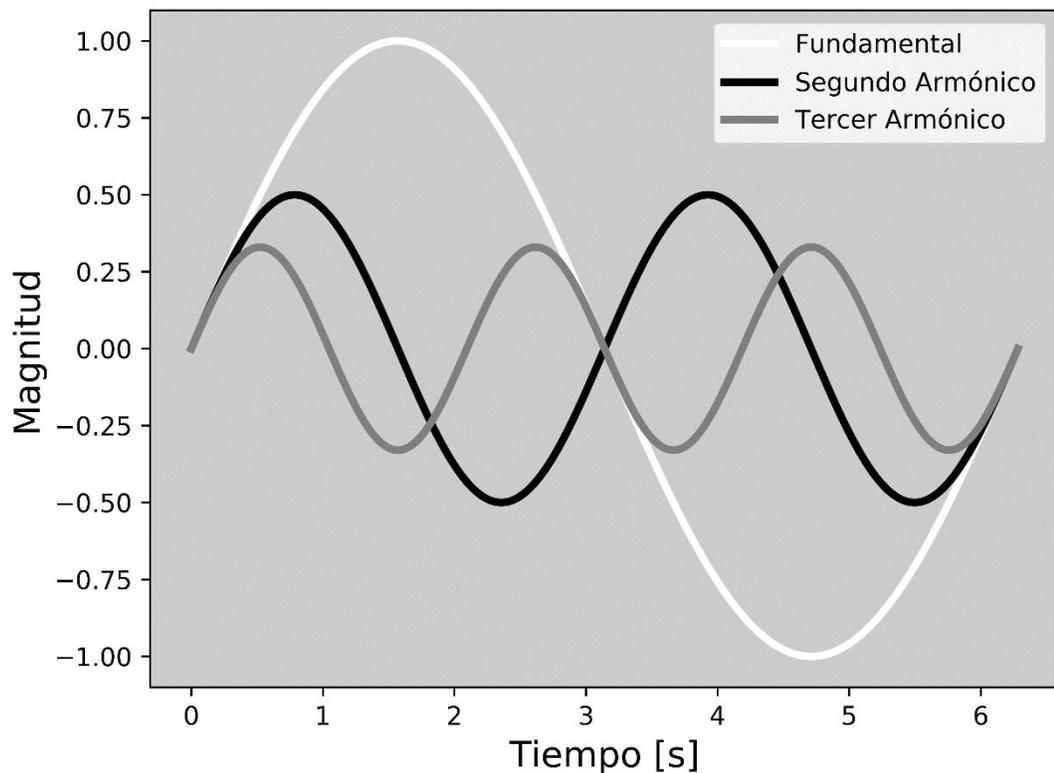


Ilustración 6. Presencia de armónicos. Fuente:[20].

- **Interarmónicos:** Se definen como componentes de una tensión/corriente cuya frecuencia no es múltiplo entero de la fundamental, se originan debido al uso de convertidores que inyectan potencia a la red, se presentan como frecuencias discretas o como un espectro de banda ancha.[13][18]

- **Muecas (Notching):** Se define como un disturbio en la forma de onda de voltaje con duración inferior a medio ciclo, tiene la particularidad de que su polaridad es opuesta a la forma de onda, estas muescas pueden conllevar a errores de frecuencia o tiempo en dispositivos basados en electrónica de potencia.[1]

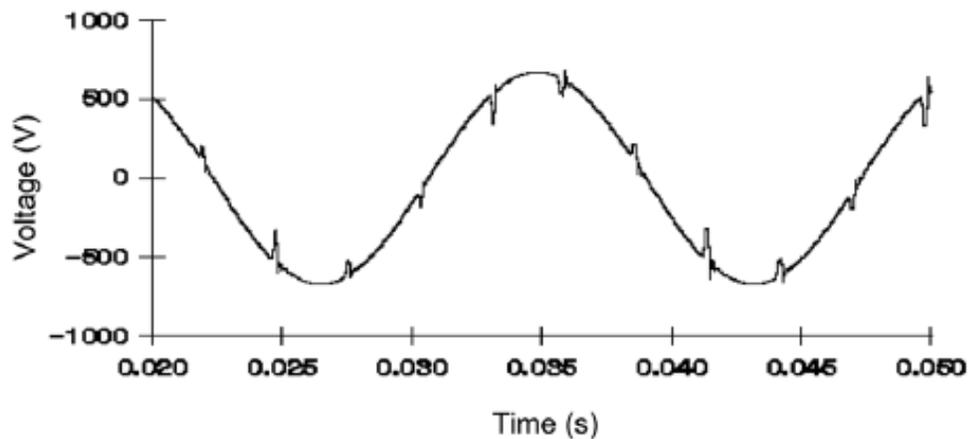


Ilustración 7. Notching. Fuente:[13].

- **Ruido (Noise):** Son señales eléctricas no deseadas cuyo contenido espectral suele ser inferior a 200kHz, consiste en cualquier distorsión que no se puede clasificar como distorsión armónica o transitoria. Este ruido puede ser producido por circuitos de control, cargas con rectificadores de estado sólido, fuentes de alimentación conmutada entre otras, este ruido muy comúnmente se relaciona a una conexión de tierra incorrecta.[1]

4.4.6 Fluctuaciones de tensión

Se consideran fluctuaciones de tensión a las variaciones en la envolvente de voltaje, estas variaciones pueden ser sistemáticas o una serie de cambios, su magnitud está comprendida entre los rangos de tensión de 0.95pu a 1.05pu.[13]

4.4.7 Variaciones de la frecuencia de Potencia

Se denomina variación de frecuencia a la desviación de la frecuencia fundamental de su valor nominal (50Hz -60Hz). La velocidad angular de los generadores que alimentan al sistema de potencia están relacionados con la frecuencia del mismo, se desarrollan pequeños cambios de frecuencia a medida que el equilibrio entre la generación y la carga va cambiando, la magnitud y el tiempo de estos cambios se relacionan directamente con la carga y la respuesta del sistema de control encargado de la relación entre carga-frecuencia de los generadores.[1][13]

4.5 FLICKER

Una consecuencia y/o efecto de las fluctuaciones de voltaje es el fenómeno conocido como *flicker*. A continuación, se presentan algunas definiciones para este fenómeno:

“El término *flicker* se deriva del impacto de la fluctuación de voltaje en la intensidad de la iluminación. La fluctuación de voltaje es un fenómeno electromagnético y el *flicker* es un resultado indeseable de ese fenómeno”. (std IEEE, 1995, p.22).[13]

“El *flicker* es en realidad una consecuencia de las fluctuaciones de tensión, consecuencia que se manifiesta básicamente en forma de fluctuaciones de intensidad luminosa (parpadeo) del alumbrado”. (Balcells Josep, Autonell Jordi, Barra Vicente, Brossa Joan, Fornieles Francesc, García Bernat, Ros Joan, Serra Jordi, 2016, p.137).[18]

“Variación del voltaje de entrada, suficiente en duración, para permitir la observación visual de un cambio en la intensidad de una fuente luminosa”. (Sánchez Miguel Angel, 2009, p.19).[1]

“Impresión de inestabilidad de la sensación visual inducida por un estímulo de luz cuya luminancia o distribución espectral fluctúa con el tiempo”. (IEC 60050-161,1990).[19]

Como ya se describió anteriormente el termino *Flicker* hace alusión a un fenómeno perceptible al ojo humano a frecuencias de 6Hz a 8Hz mediante las lámparas luminosas, este efecto es consecuencia directa de las fluctuaciones de voltaje, a continuación, se describen los aspectos más relevantes de este fenómeno:

4.5.1 Características

Comúnmente el *Flicker* se produce al energizar cargas que requieren grandes corrientes de arranque, si dichos arranques son de manera frecuente o la corriente que demanda la carga fluctúa en cada ciclo de operación, los efectos del *Flicker* serán más notorios. El *Flicker* se considera un fenómeno de baja frecuencia entre los rangos de 0.05Hz a 35Hz a una frecuencia fundamental de 50Hz o entre los rangos de 0.05Hz a 42Hz a una frecuencia fundamental de 60Hz, se caracteriza por cambios rápidos en el voltaje, los rangos permitidos oscilan entre 0.9pu a 1.1pu con una duración inferior a 1 hora, el *Flicker* puede ser cíclico o no cíclico dependiendo de las fluctuaciones, si es periódico se considera cíclico, si es ocasional se considera no cíclico.[1][20]

4.5.2 Causas

Elevadores, hornos de arco, soldaduras de arco, motores de inducción con grandes corrientes reactivas de arranque, generalmente se presentan en sistemas débiles, dichos sistemas son insuficientes para suplir la potencia que demanda la carga. Por otra parte, los interarmónicos en muchos casos son una fuente explícita de *Flicker*, por tanto, es correcto agrupar al conjunto de convertidores estáticos de frecuencia y ciclo convertidores entre las causas más comunes que pueden desencadenar en la generación de *Flicker*. A continuación se ilustra el comportamiento del voltaje de alimentación de un horno de arco a frecuencia de 3Hz.[1][13][20]

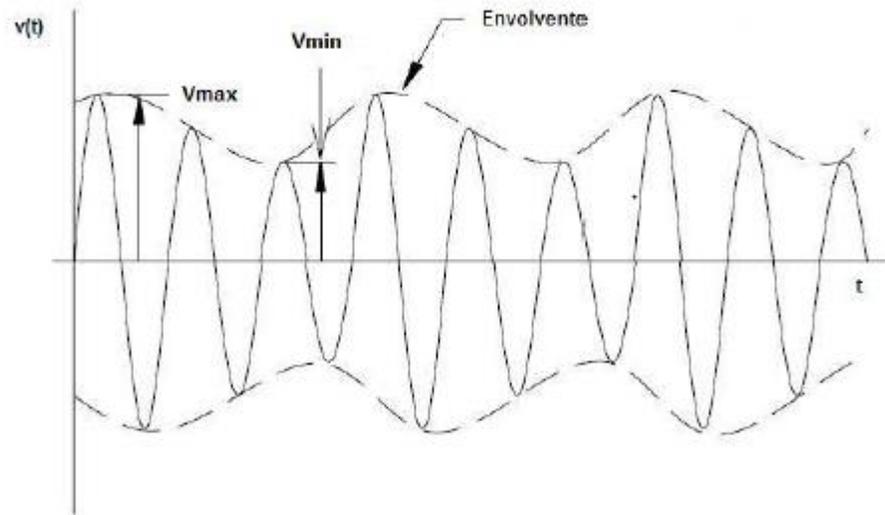


Ilustración 8. Alimentación de horno de arco. Fuente: [1].

4.5.3 Efectos

Debido a que este fenómeno se presenta en forma de parpadeo en la iluminación, puede derivar en dolores de cabeza, irritabilidad y estrés, además técnicamente podría detonar en daños a equipos altamente sensitivos, afectando su rendimiento.[1]

4.5.4 Soluciones

Existen diferentes estrategias de mitigación, como capacitores estáticos, la utilización de equipos de conmutación basados en electrónica de potencia, en el caso del horno de arco es oportuno utilizar un compensador estático de VAR, dado que permite controlar la frecuencia de la fluctuación mediante el control de la potencia reactiva, por último el método más sencillo de todos consiste en ampliar la capacidad del sistema para que así este pueda suplir correctamente la demanda de la carga.[1]

4.5.5 Factor Flicker

Puede ser expresado en porcentaje como la relación entre la diferencia de la fluctuación de voltaje y el voltaje fundamental, todo expresado en términos de porcentaje, la ecuación 1 ilustra dicha relación:[1]

$$fv = \frac{\Delta V}{V_n} \times 100 = \frac{V_{max} - V_{min}}{V_n} \times 100$$

Ecuación 1. Factor Flicker [1]

4.5.6 Índices de severidad de Flicker (Pst - Plt)

Según la norma española CEI-868, el *flicker* se puede medir utilizando 2 parámetros: el Pst (corta duración) y el Plt (larga duración), estos dos índices de severidad son adimensionales dado que son unidades de medida.[20][21]

- **Definición del Pst:**

Se define como el nivel de severidad de parpadeo en un periodo corto, en intervalos de medición de 10 minutos, la siguiente expresión denota la ecuación para PST:

$$Pst = [K_{0.1}P_{0.1} + K_1P_1 + K_3P_3 + K_{10}P_{10} + K_{50}P_{50}]^{1/2}$$

Ecuación 2. Calculo PST. Fuente:[21]

Donde:

P_{st} = Nivel de severidad de parpadeo en un periodo corto.

$P_{0.1}, P_1, P_3, P_{10}, P_{50}$ = Nivel de efecto *Flicker*

K_n = Coeficientes de ponderación.

La norma establece los valores fijos asignados para coeficientes de ponderación para el cálculo de PST.

	$K_{0.1}$	K_1	K_3	K_{10}	K_{50}
Valor	0.031	0.052	0.065	0.28	0.08

Tabla 1. Coeficientes de ponderación para el cálculo de PST. Fuente:[21]

La siguiente ilustración refleja la curva conocida como: “*curva PST = 1*”, cabe resaltar que si el rendimiento de un equipo especificado se encuentra por debajo de esta curva, se considera que la perturbación de *Flicker* es aceptable a corto plazo.[22]

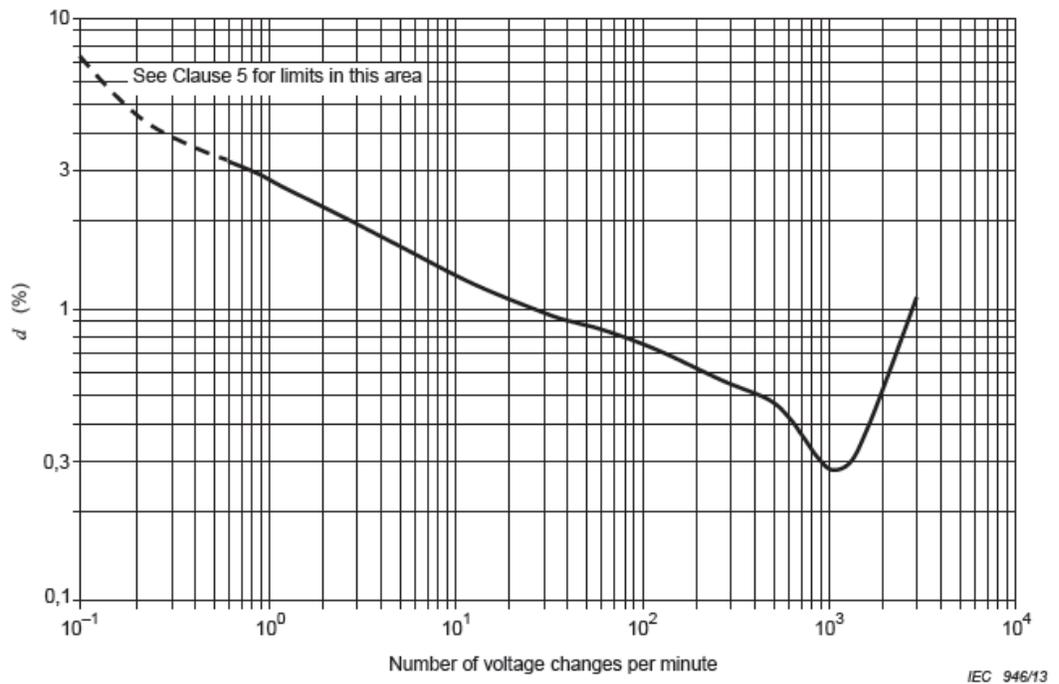


Ilustración 9. Curva Pst = 1. Fuente:[25].

- **Definición de Plt**

De acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Plt = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N Pst_i^3}{N}}$$

Ecuación 3. Calculo Plt. Fuente:[21]

El Plt se calcula en base a los valores obtenidos del Pst, en un periodo de tiempo igual o superior a 2 horas, tiempo en el que la percepción es representativa a un observador. En la siguiente tabla se plasman los límites de Pst y Plt dependiendo la tensión nominal del sistema de acuerdo a las normas CEI-868 – CEI-1000-2-2.

	Límites aceptables de <i>Flicker</i>	Niveles de compatibilidad para planificación	
	BT	MT	AT
Pst	1.00	1.00	0.79
Plt	0.74	0.74	0.58

Tabla 2. Niveles aceptables de Flicker. Fuente:[21]

5 RESULTADOS

5.1 Metodología para la generación y clasificación de Flicker:

Como ya se estableció anteriormente, el fenómeno *Flicker* se caracteriza por la variación en la forma de onda del voltaje en un rango inferior al 10% (0.1pu) de su valor nominal, lo que desencadena en un flujo luminoso en las lámparas incandescentes. A continuación, de acuerdo al estándar IEC-61000-4-15 se detalla la metodología correspondiente para la generación y posterior clasificación de *Flicker*.

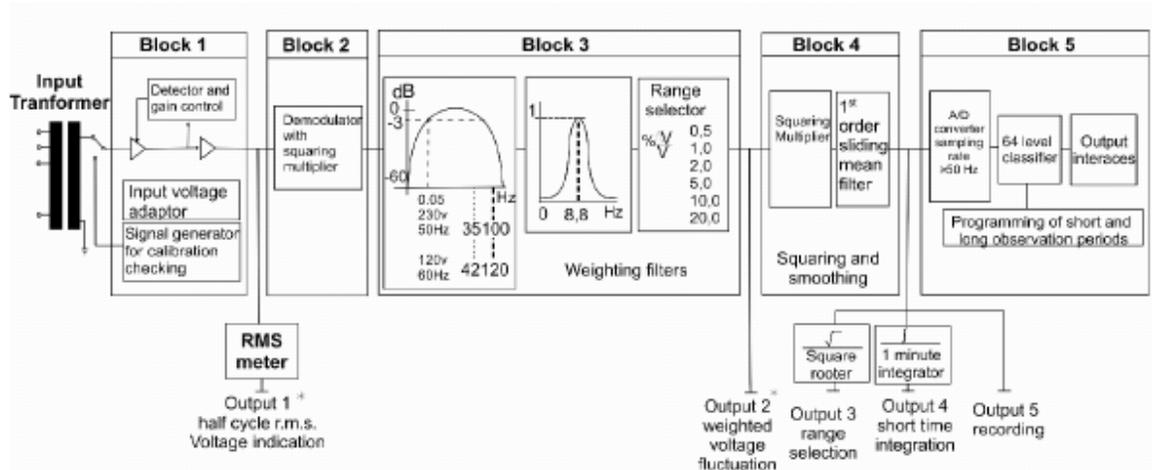


Ilustración 10. Diagrama de bloques Flickermeter. Fuente:[26].

5.1.1 Descripción general

Bloque 1: Esta etapa consiste en calibrar y controlar la ganancia de voltaje a la entrada, como lo especifica la norma IEC 61000-4-15 la señal se debe caracterizar a un nivel de referencia dado, de esta manera el valor eficaz se da en valores porcentuales.[23][24][25]

Bloque 2: Este bloque se encarga de recuperar la fluctuación de tensión, elevando al cuadrado la tensión de salida del bloque 1, simulando el comportamiento de una lámpara. [23][24][25]

Bloque 3: Se basa en la aplicación de 3 filtros, un retenedor y un amplificador. Los primeros 2 filtros se encargan de eliminar la componente DC y la componente al doble de la frecuencia de alimentación, el tercer filtro simula la respuesta en frecuencia a las fluctuaciones sinusoidales. [23][24][25]

Bloque 4: Este bloque se encarga de simular la percepción visual ojo-cerebro, utilizando un filtro promediador, la salida de este es una medida de los cambios de voltaje resultado de la sensibilidad del sistema lámpara-ojo-cerebro (bloque 2, bloque 3, bloque 4), representando la sensación instantánea de *Flicker*. [23][24][25]

Bloque 5: En este bloque se realiza un análisis estadístico basado en el muestreo de la sensación instantánea (salida del bloque 4), a una frecuencia de muestreo dada, por tanto se obtienen x muestras que corresponden a un tiempo de 10 minutos, posteriormente se realiza un histograma de 64 clases, el cual permite desarrollar una función de distribución acumulativa de cada una de dichas clases, la distribución acumulativa junto con el uso de la interpolación lineal permite calcular los percentiles aislados ($P_{0.1}, P_1, P_3, P_{10}, P_{50}$), estos percentiles indican los niveles de *Flicker* excedidos en el 0.1, 1, 3, 10, 50% del tiempo de medición, con estos percentiles se realiza el cálculo del *PST* mediante la ecuación 2. [23][24][25]

5.1.2 Descripción individual de cada uno de los bloques:

A continuación, se detallan de manera más específica cada uno de los bloques mencionados en el inciso anterior:

Bloque 1: Generación de la señal con *Flicker*, adaptador de voltaje de entrada, verificación y calibración

Debido a que este proyecto se basa en la obtención de una señal con *Flicker* mediante simulación, se hace imprescindible la utilización de una ecuación que modele dicho fenómeno como se describe a continuación:

$$v(t) = \left[1 + \frac{\Delta V}{V} \% * \frac{1}{2} * \sin (w_m t) \right]$$

Ecuación 4. Ecuación matemática Flicker. Fuente: [24]

Donde:

$\frac{\Delta V}{V} \% =$ Porcentaje de cambio de la amplitud de voltaje.

$w_m =$ Pulsación modulante en la amplitud.

Para el desarrollo de la generación de *Flicker* se utilizan dos tipos de señal modulantes, una de tipo sinusoidal y otra rectangular, como se describe a continuación:

$$v(t) = A * \sin(2\pi w_c t) * \left[1 + \frac{\Delta V}{V} \% * \frac{1}{2} * \sin (2\pi w_m t) \right]$$

Ecuación 5. Representación del Flicker sinusoidal. Fuente: [24]

$$v(t) = A * \sin(2\pi w_c t) * \left[1 + \frac{\Delta V}{V} \% * \frac{1}{2} * \text{signum}(\sin(2\pi w_m t)) \right]$$

Ecuación 6. Representación del Flicker rectangular. Fuente: [24]

Donde:

A = Voltaje máximo de la señal fundamental.

w_c = frecuencia angular de la señal fundamental.

t = tiempo de la señal.

$\frac{\Delta V}{V} \%$ = cambio de amplitud de voltaje.

A continuación, se ilustran las formas de onda correspondientes a una señal con *Flicker* con modulación sinusoidal y rectangular, con amplitud de 230V, frecuencia fundamental de 50Hz, cambios de frecuencia a 8.8Hz y $\Delta V/V = 10\%$.

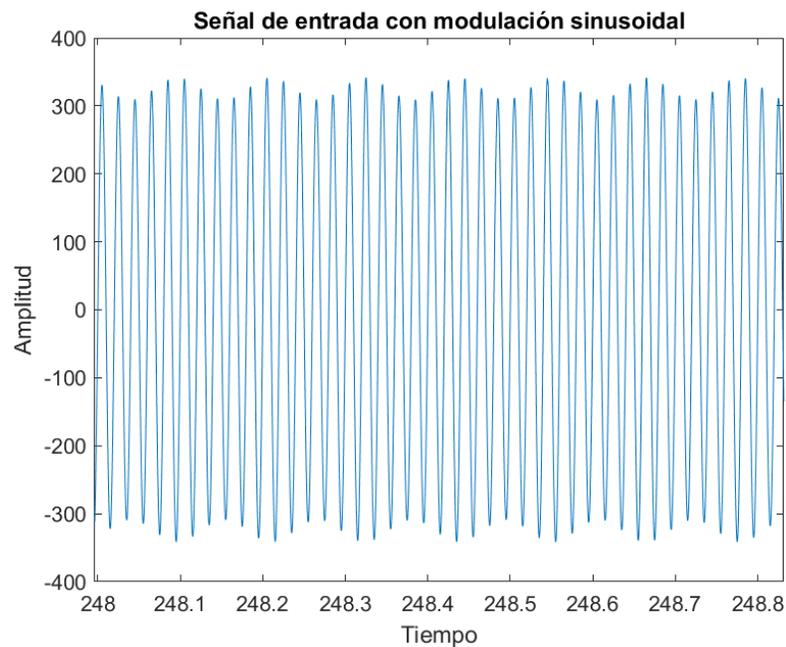


Ilustración 11. Señal con modulación sinusoidal. Fuente: Autor.

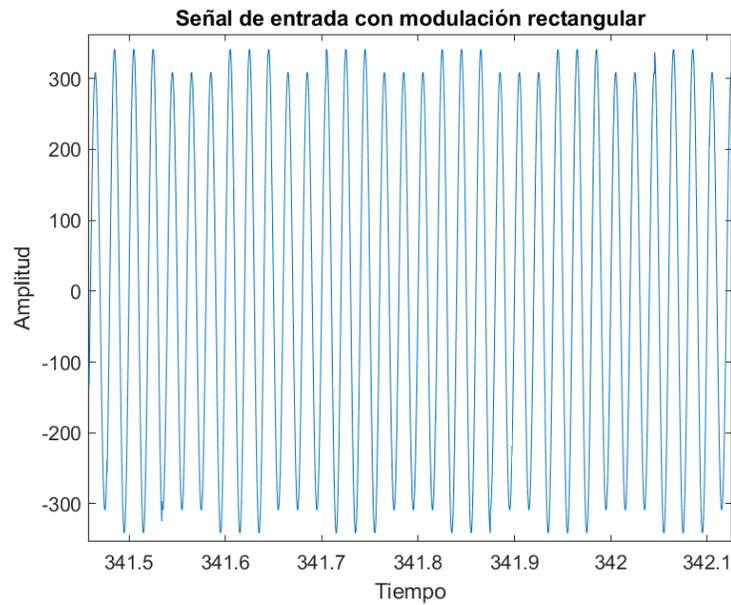


Ilustración 12. Señal con modulación rectangular. Fuente: Autor.

Dadas las ecuaciones 5 y 6 se procede a normalizar la señal de entrada con el único fin de garantizar un valor fijo máximo en por unidad (pu) independientemente de la misma, esto quiere decir que para un valor de variación de voltaje del 10% a una alimentación de 230V se obtendrá la misma salida que para una variación de 10% a un voltaje de alimentación de 120V, el procedimiento se realiza en base a la siguiente ecuación, la ilustración 14 denota el resultado de la normalización:

$$V_{pu} = \frac{\text{Señal de entrada}}{\text{Voltaje de referencia}}$$

Ecuación 7. Normalización de la señal fundamental.

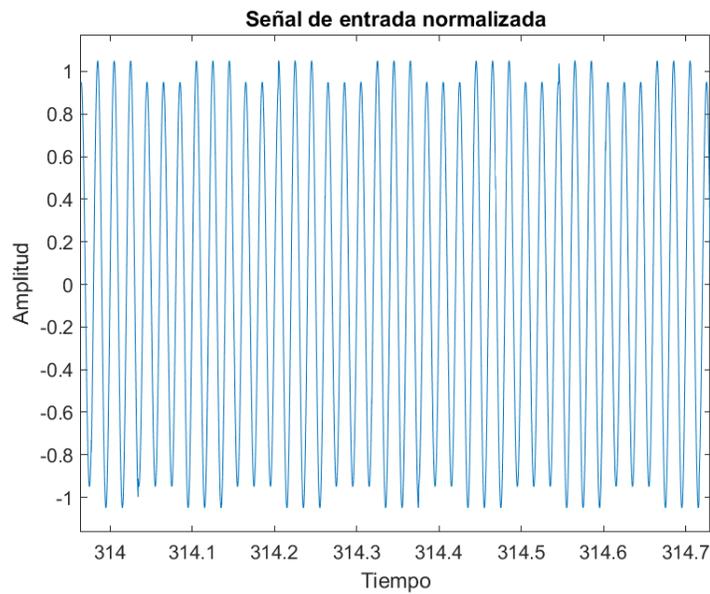


Ilustración 13. Señal de entrada normalizada. Fuente: Autor.

Bloque 2: Demodulador Cuadrático

Los bloques 2, 3 y 4 del diseño del *Flickermeter* son los encargados de simular la relación que lampara - ojo – cerebro, este bloque se encarga precisamente de simular la interacción y el parpadeo de una lampara incandescente ante las perturbaciones existentes en la señal de tensión, el procedimiento se basa en una demodulación, el método recomendado por la norma IEC 61000-4-15 basado en un demodulador cuadrático, consiste en elevar al cuadrado la señal normalizada proveniente del bloque 1, de tal manera que se logra recuperar el valor de la fluctuación de tensión de la entrada con el fin de medir las fluctuaciones de la intensidad del flujo luminoso.[26][27]

la respuesta de una lampara frente a fluctuaciones de voltaje se describe por medio de la siguiente ecuación:

$$G = \frac{\Delta R/R}{\Delta V/V}$$

Ecuación 8. Factor de ganancia. Fuente: [27]

Donde:

G = Factor de ganancia

ΔR = Fluctuación en la intensidad de luz

R = Intensidad de luz promedio

ΔV = Fluctuación en la amplitud de voltaje

V = Amplitud de voltaje promedio

Este factor de ganancia denota la relación proporcional que existe entre la luminosidad y la variación de tensión, por tanto, para una misma fluctuación de tensión, una lampara de 230V evidenciara mayores cambios de iluminación con respecto a una lampara de 120V.[27]

El factor de ganancia depende fundamentalmente de la frecuencia de la fluctuación, de tal modo que la ecuación 8 puede ser representada como:

$$G(fM) = \frac{K}{\sqrt{1 + (2\pi fMT)^2}}$$

Ecuación 9. Factor de ganancia. Fuente:[27]

Donde:

K = Factor de ganancia

T = Constante de tiempo de las lámparas

A continuación, se ilustra la salida del bloque 2, una vez aplicado el demodular cuadrático, en este caso se utilizó una señal fundamental de amplitud de 230V, frecuencia fundamental de 50Hz, cambios de frecuencia sinusoidal y rectangular a 8.8Hz y $\Delta V/V = 10\%$.

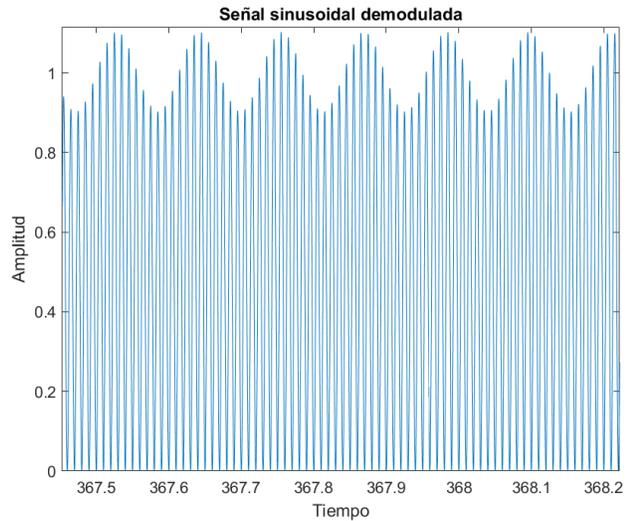


Ilustración 14. Señal sinusoidal demodulada. Fuente: Autor.

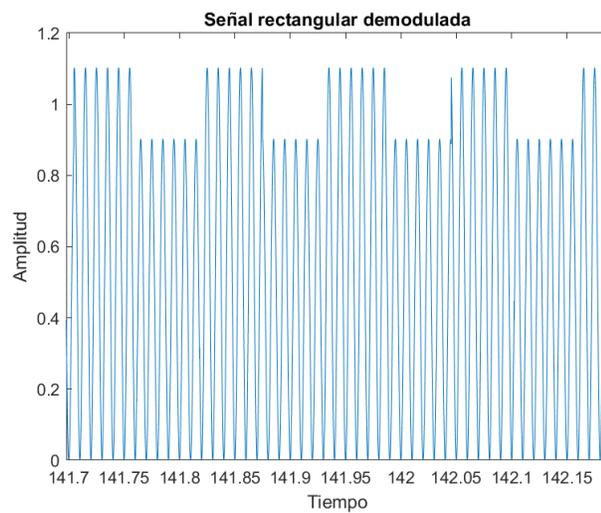


Ilustración 15. Señal rectangular demodulada. Fuente: Autor.

Bloque 3: Filtros de ponderación

Este bloque se encarga de simular la relación existente lampara – ojo humano ante fluctuaciones rápidas de voltaje, consiste en 2 filtros en cascada, un filtro pasa banda (pasa bajo, pasa alto) seguido de un filtro de ponderación.

Filtro pasa banda: Este filtro se encarga de eliminar la componente DC y el efecto de “doble frecuencia” resultado de la aplicación del bloque 2 (demodulador cuadrático), además de minorar las frecuencias no perceptibles al ojo humano, la norma IEC 61000-4-15 recomienda la aplicación de 2 filtros en cascada, el primero un filtro pasa alto de primer orden caracterizado por una frecuencia de corte de 0.05Hz y el segundo un filtro pasa bajo cuya frecuencia de corte es de 35Hz para una frecuencia fundamental de 50Hz y de frecuencia de corte de 42Hz para una frecuencia fundamental de 60Hz. La salida de este filtro pasa banda a una señal fundamental de 230V, frecuencia fundamental de 50Hz, cambios de frecuencia sinusoidal y rectangular a 8.8Hz y $\Delta V/V = 10\%$ se denota a continuación.

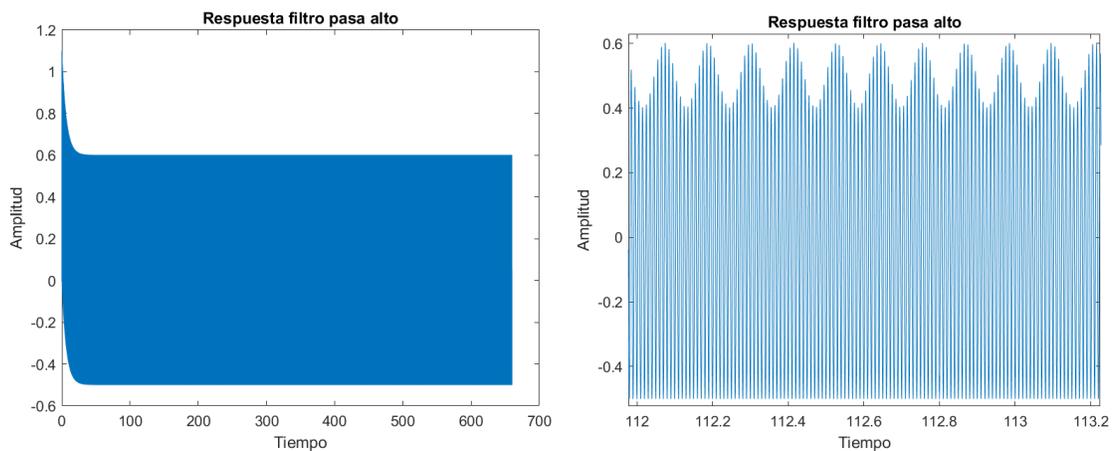


Ilustración 16. Respuesta filtro pasa alto, señal sinusoidal. Fuente: Autor.

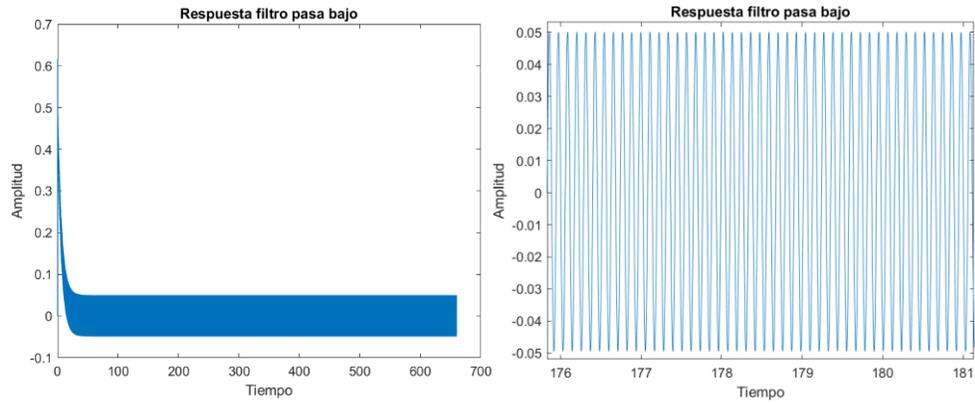


Ilustración 17. Respuesta filtro pasa bajo, señal sinusoidal. Fuente: Autor.

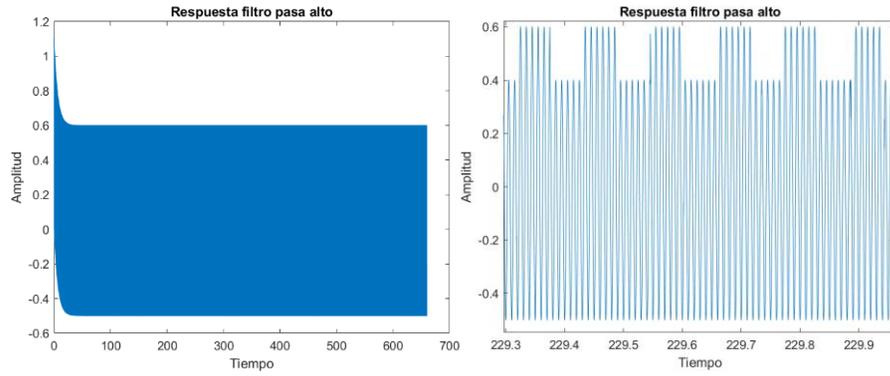


Ilustración 18. Respuesta filtro pasa alto, señal rectangular. Fuente: Autor.

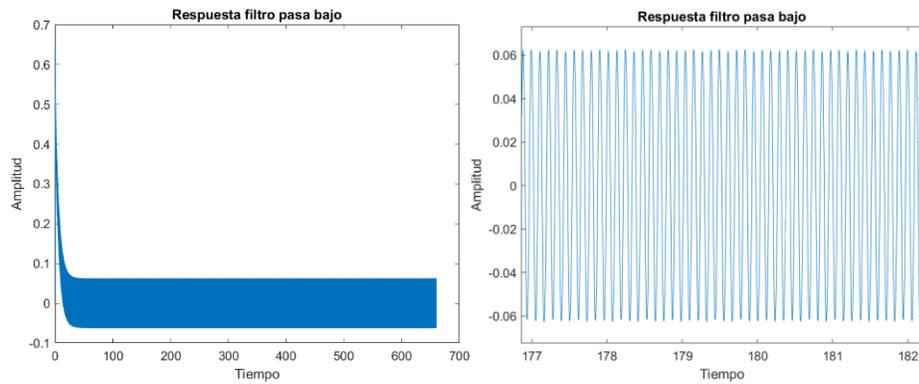


Ilustración 19. Respuesta filtro pasa bajo, señal rectangular. Fuente: Autor.

Filtro de ponderación: El segundo filtro consiste en un filtro compuesto encargado de simular la respuesta en frecuencia de la visión humana ante fluctuaciones lumínicas, como ya se explicó anteriormente la perceptibilidad de este fenómeno *Flicker* varía dependiendo la persona sometida a dicho fenómeno, la caracterización de los parámetros de este filtro surge en respuesta a pruebas experimentales donde el 50% de personas sometidas experimentaron perceptibilidad a cada cambio en la frecuencia, de acuerdo a la norma IEC 61000-4-15 se presenta la función de transferencia correspondiente junto con los valores de los parámetros de dicho filtro de ponderación.[26]

$$F(s) = \frac{kw_1s}{s^2 + 2\lambda s + w_1^2} \frac{1 + \frac{s}{w_2}}{(1 + \frac{s}{w_3})(1 + \frac{s}{w_4})}$$

Ecuación 10. Filtro de ponderación. Fuente: [26]

Variable	lámpara	
	230 V/ 60 W	120 V/ 60 W
k	1.74802	1.6357
λ	$2\pi 4,05981$	$2\pi 4,167375$
w_1	$2\pi 9,15494$	$2\pi 9,077169$
w_2	$2\pi 2,27979$	$2\pi 2,939902$
w_3	$2\pi 1,22535$	$2\pi 1,394468$
w_4	$2\pi 21,9$	$2\pi 17,31512$

Ilustración 20. Parámetros de las variables de filtro de ponderación. Fuente: [30]

A continuación, se ilustra la respuesta en frecuencia del filtro de ponderación a 230V.

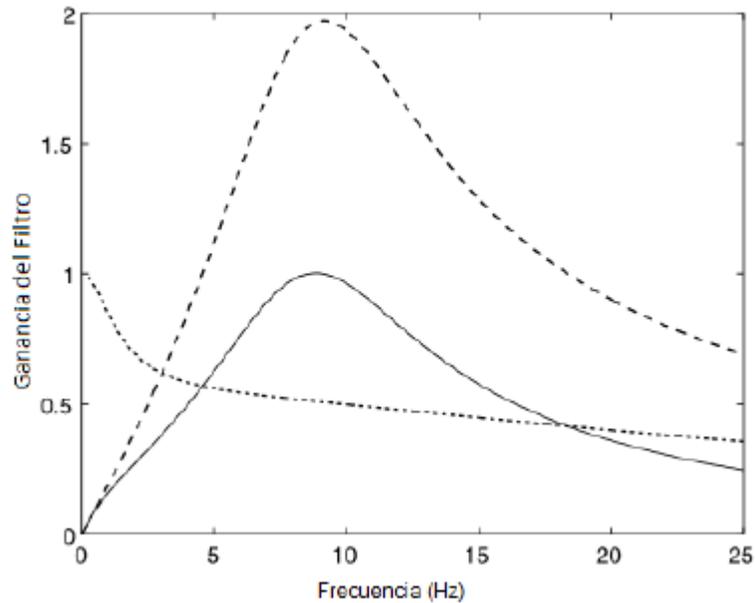


Ilustración 21. Respuesta en frecuencia, filtro de ponderación. Fuente:[30]

La curva sólida representa la respuesta absoluta de la ecuación 10, la curva punteada denota la aplicación de la contribución del primer factor de la ecuación 10, donde la ganancia máxima ocurre a una frecuencia aproximada a 10Hz, la curva con puntos denota la implicación del segundo factor de la ecuación 10, donde ocurre una caída de la ganancia original cerca a los 3Hz, después sigue decayendo, pero de manera menos abrupta. La respuesta absoluta alcanza su ganancia máxima cerca de los 8.8Hz, de ahí a que en los ensayos de efectividad del *Flickermeter* se tome como base esta frecuencia para obtener un *Flicker instantáneo* equivalente a la unidad en la salida del bloque 5.[27]

La respuesta de este filtro de ponderación se ilustra a continuación, basado en una señal fundamental sinusoidal de 230V, frecuencia fundamental de 60Hz, cambios de frecuencia sinusoidal 8.8Hz y $\Delta V/V = 10\%$.

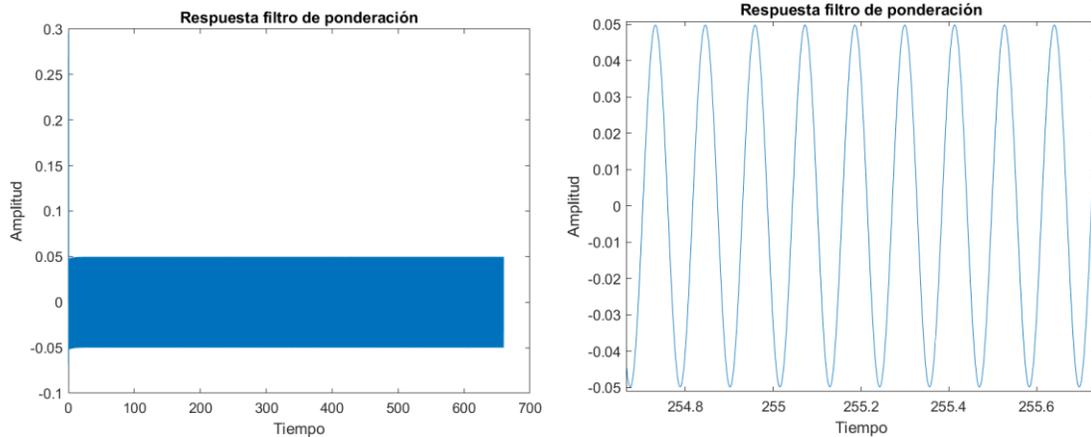


Ilustración 22. Respuesta filtro de ponderación, salida del bloque 3. Fuente: Autor.

Bloque 4: Multiplicador cuadrático y aislamiento (modelo del cerebro)

Este bloque simula la relación ojo-cerebro, primero se realiza la multiplicación cuadrática de la señal para expresar el comportamiento no lineal de la percepción conjunta ojo-cerebro, enseguida se realiza un filtro de primer orden que modela el efecto de la memoria del cerebro, es importante recalcar que el resultado a la salida de este bloque es considerado como *nivel de Flicker instantáneo* (IFL/Pinst.), el cual se define como la percepción inmediata de *Flicker*. [24][25]

Filtro de primer orden: Este filtro de primer orden tiene una constante de tiempo de 300ms, tiempo que tarda en transmitirse la información recolectada por el ojo al cerebro, la función de transferencia de acuerdo a la norma se expresa a continuación:

$$F(s) = \frac{1}{1 + Ts}$$

Ecuación 11. Filtro de primer orden bloque 4. Fuente: [27]

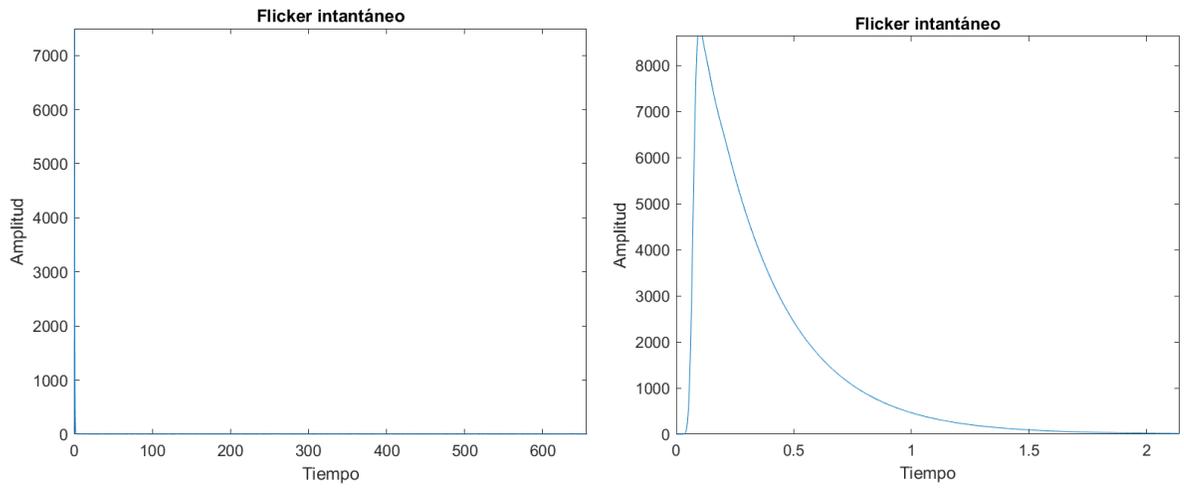
Factor de ponderación: El estándar IEC 61000-4-15 estipula dos recomendaciones importantes, la primera se enfoca en la salida del bloque 4, una vez filtrada la señal esta se debe multiplicar por una constante dependiente del valor de tensión y frecuencia de la señal fundamental, como se describe a continuación:[26]

$K_{230V,50Hz}$	$K_{230V,60Hz}$	$K_{120V,50Hz}$	$K_{120V,60Hz}$
1211002	1177504	1170233	1238298

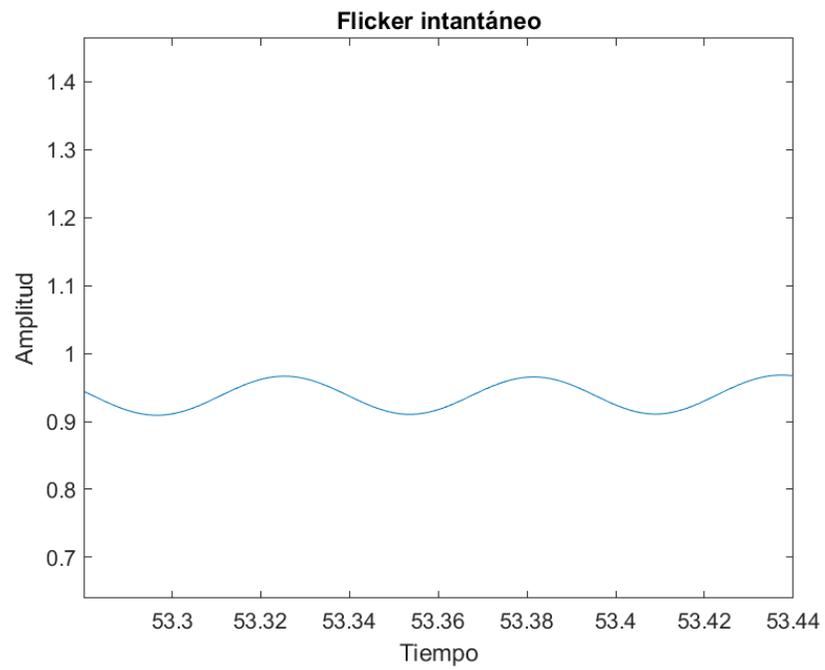
Ilustración 23. Factor de ponderación, bloque 4. Fuente: [27]

La segunda recomendación tiene que ver con la entrada de la señal al bloque 5, se recomienda omitir los primeros 50 segundos y los últimos 10 segundos de la señal de *Flicker* instantáneo para el análisis estadístico, debido a la respuesta que tiene el ultimo filtro sobre la señal, el cual presenta un transitorio en el arranque de la misma, por ello la captura de la señal se hace por un minuto más del que se desea analizar.[24]

A continuación, se ilustra la señal resultante del bloque 4, con respuesta normalizada a un *Pinstantaneo* aproximado a la unidad, con valores asignados por tabla: señal fundamental de 230V, frecuencia fundamental de 50 Hz, cambios rectangulares a frecuencia de 8.8Hz, $\Delta V/V = 0.196\%$.



a)



b)

Ilustración 24. a) Transitorio de Pinst. b) Pinst, salida del bloque 4. Fuente: Autor.

Bloque 5: Análisis estadístico (cálculo de Pst - Plt):

Como ya se ha expresado a lo largo de este documento, la sensación de *Flicker* depende en gran medida de la persona que es sometida al mismo, los primeros 4 bloques son los encargados de generar y simular la relación existente entre lampara, ojo, cerebro. Posteriormente este bloque es el encargado de realizar un análisis estadístico sobre el *Flicker* instantáneo (*P.instantáneo*) proveniente de la salida del bloque 4.

A continuación se detallan los pasos a seguir, la rutina de código fue escrita en el software Matlab.[24]

Paso 1: Iniciar la toma de datos a partir de los primeros 50 segundos, y hasta 10 segundos antes de la duración total de la señal, recordemos que el análisis para calcular el PST consiste en dividir el tiempo total de la señal en intervalos de tiempo de 10 minutos, en realidad para un solo análisis se tomarían 11 minutos.

Paso 2: Muestrear la señal de *Flicker instantáneo*, calcular la amplitud máxima y mínima de la señal resultante. Para este caso se realizó un muestreo de 10kHz obteniendo más de 6 millones de muestras, en este paso se fundamenta la importancia del paso 1 (omitir los primeros 50 segundos de la señal), debido a que a la salida del bloque 4 se genera un armónico de magnitud importante, lo cual podría repercutir en errores al calcular la amplitud máxima de la señal de *P.instantáneo* y posteriormente incidir en la obtención de parámetros erróneos para el cálculo de PST.

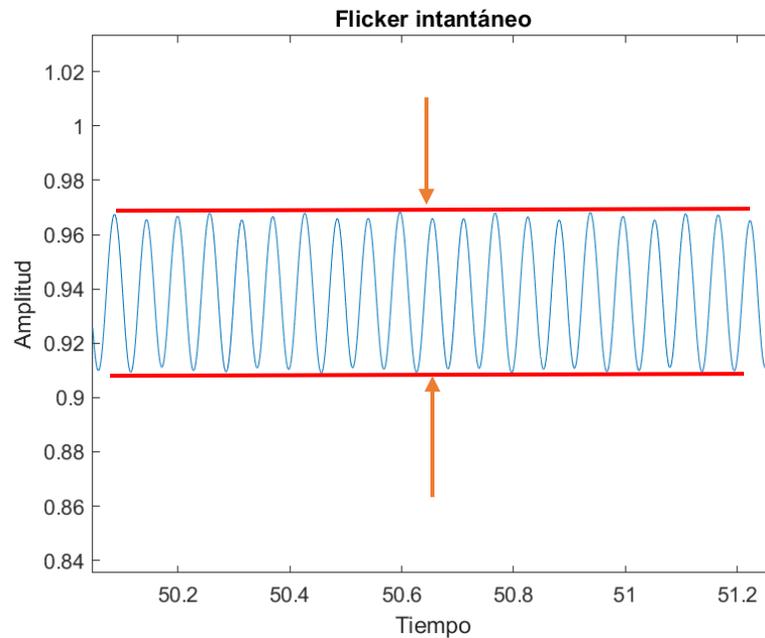


Ilustración 25. Pasos 1 y 2, cálculo de Pst y Plt. Fuente: Autor.

Paso 3: Calcular la diferencia entre la amplitud máxima y mínima de la señal resultante, posteriormente esta diferencia se divide en el número total de clases que se desee analizar, la norma establece como mínimo un total de 64 clases, a cada una de estas clases se le debe asignar un valor de amplitud establecido dependiendo el rango, con el fin de garantizar de que todas las clases tengan la misma amplitud como se explica a continuación:

$$\text{Amplitud de clase} = \frac{\text{Amplitud máxima de la señal} - \text{Amplitud mínima de la señal}}{\text{Número de clases}}$$

Ecuación 12. Cálculo de amplitud para cada clase. Fuente: Autor.

Paso 4: Calcular el intervalo de tiempo total para cada una de las clases con respecto a la amplitud, enseguida con estos datos se obtiene la función de densidad de probabilidad y la función de probabilidad acumulada.

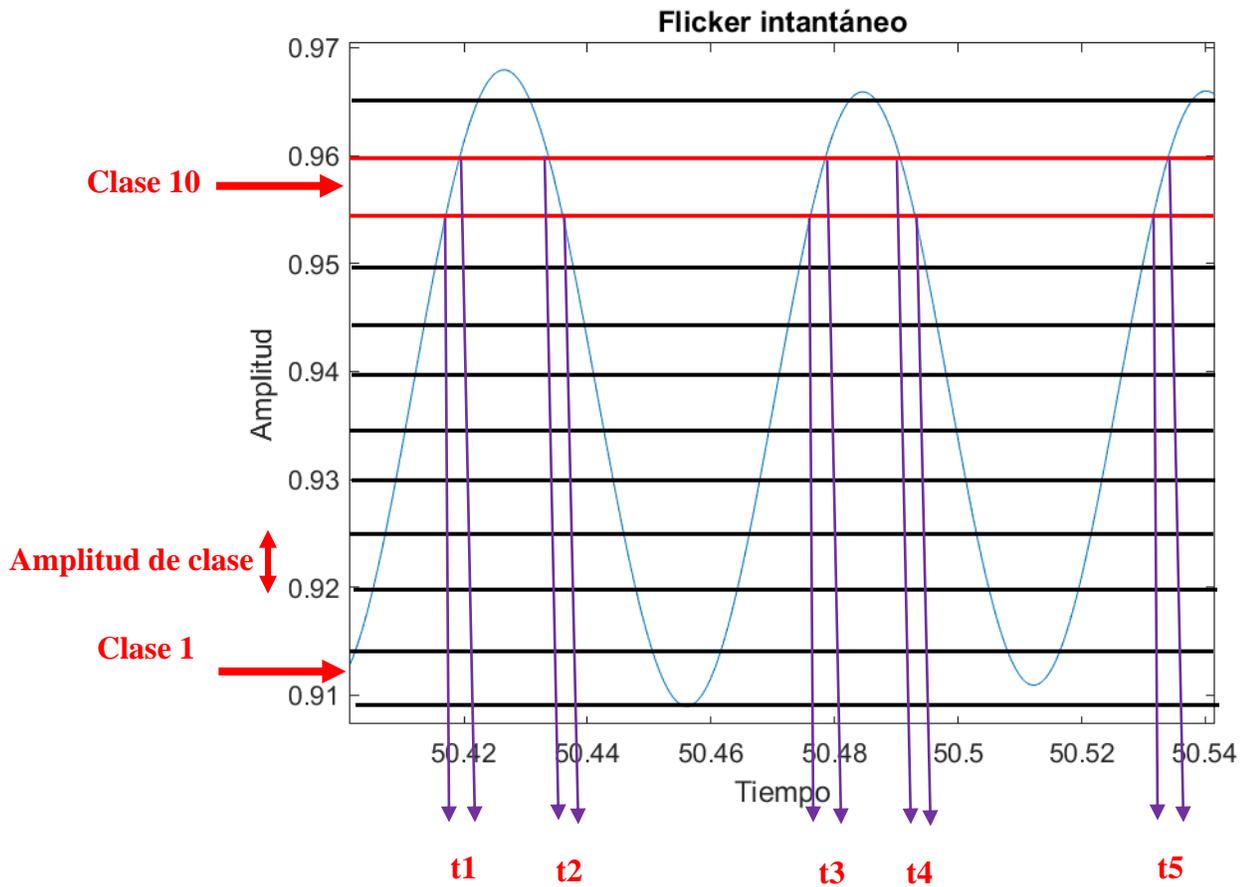


Ilustración 26. Pasos 3 y 4, cálculo de Pst y Plt. Fuente: Autor.

La ilustración anterior es un ejemplo práctico de los pasos 3 y 4, la densidad de probabilidad de cada clase ($D.P. clase_i$) se calcula en porcentaje de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$D.P. clase_i = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{tiempo\ total} * 100$$

Ecuación 13. Cálculo de tiempo en cada clase. Fuente: Autor.

Para establecer la función de densidad de probabilidad y la probabilidad acumulada, en este caso se toman los siguientes datos que reflejan un valor de $P_{st} = 1$ dado por tabla. Señal sinusoidal de 230V, frecuencia fundamental 50Hz, cambios rectangulares a frecuencia de 0.325Hz, $\Delta V/V = 0.894\%$.

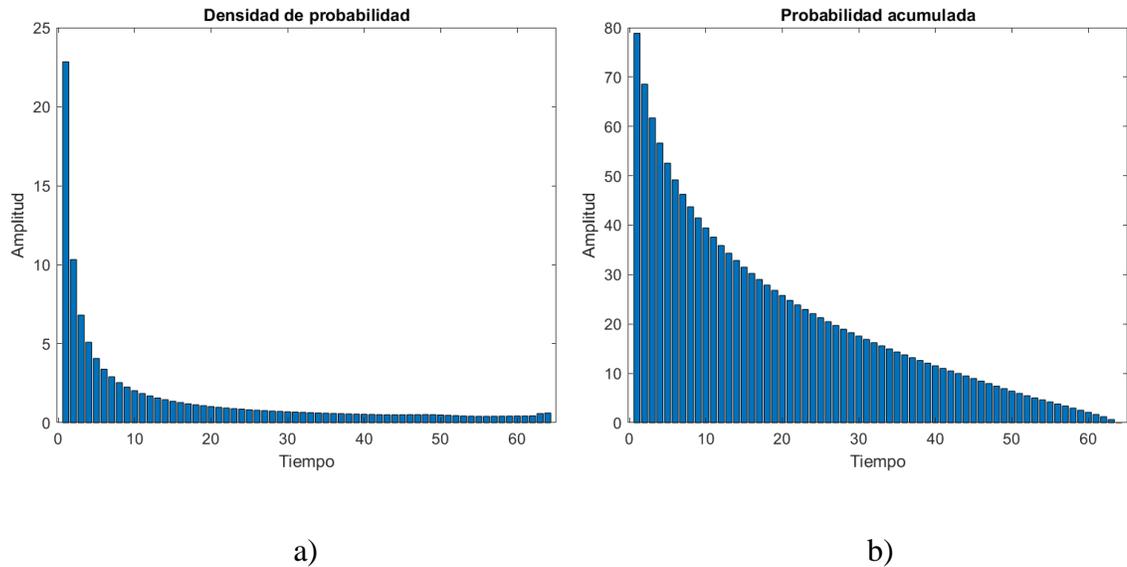


Ilustración 27. a) Función de densidad de probabilidad. b) Probabilidad acumulada. Fuente: Autor.

La función de densidad de probabilidad denotada en la ilustración anterior (a), describe la probabilidad relativa según la cual dicha variable tomara un valor en específico. En este caso se puede observar que la primera clase contiene aproximadamente el 23% del tiempo total de la señal, la segunda clase contiene aproximadamente el 10% del tiempo total de la señal y de ese modo sucesivamente con todas las clases.

La función de probabilidad acumulada denotada en la ilustración anterior (b), calcula la probabilidad acumulada de un valor dado de cada clase, el proceso se ilustra a continuación:

$$CPF\ clase_i = 100 - CDF_i$$

Ecuación 14. Función de probabilidad acumulada para cada clase. Fuente: Autor.

Donde:

$CPF\ clase_i$ = Función de probabilidad acumulada para cada clase

CDF_i = Función de densidad acumulada

Por lo tanto, la función de densidad acumulada se obtiene de acuerdo a:

$$CDF_i = D.P.\ clase_i + CDF_{i-1}$$

Ecuación 15. Función de densidad acumulada. Fuente: Autor.

Donde:

CDF_i = Función de densidad acumulada para cada clase

$D.P.\ clase_i$ = Densidad de probabilidad de cada clase

CDF_{i-1} = Función de densidad acumulada para la clase i-1

De esta manera se obtiene la función de probabilidad acumulada (CPF) para cada clase, esta función es imprescindible para realizar el cálculo de los percentiles correspondientes para cuantificar el PST.

Paso 5: Enseguida para el cálculo de los percentiles 0.1,1,3,10,50, se deben tomar en cuenta el número de muestras totales que coinciden con el intervalo de tiempo asignado a cada clase, organizando todo en una tabla de datos agrupados donde se refleje la cantidad de muestras por cada clase (frecuencia) y la cantidad de muestras acumuladas (frecuencia acumulada).

Clase	Frecuencia	Frecuencia acumulada
	f	F
1	$f1 = \frac{\text{Tiempo total clase 1}}{\text{Periodo de muestreo}}$	$f1$
2	$f2 = \frac{\text{Tiempo total clase 2}}{\text{Periodo de muestreo}}$	$f1+f2$
n	$fn = \frac{\text{Tiempo total clase n}}{\text{Periodo de muestreo}}$	$f1+f2...+fn$

Tabla 3. Datos agrupados, cálculo de percentiles. Fuente: Autor

Paso 6: Una vez obtenida la tabla de datos agrupados, se procede a calcular los percentiles teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$Pn = Li + A \left(\frac{\frac{kn}{100} - F_{i-1}}{F_i - F_{i-1}} \right)$$

Ecuación 16. Cáculo para el percentil Pn.

Donde:

Pn = Valor del percentil calculado

Li = Rango superior de la clase en la posición i

A = Rango de la clase

k = 100-percentil a encontrar

n = Número total de datos

F(i-1) = Frecuencia acumulada en la posición i-1

F_i = Frecuencia acumulada en la posición i .

A modo de ejemplo, se tomará una señal sinusoidal de 120V, a una frecuencia fundamental de 60Hz, con una duración de 11 minutos, frecuencia de muestreo de 10kHz, con un total de muestras de 6100000, frecuencia modulante de 15Hz a un *Factor Flicker* de 0.592% con cambios rectangulares. De acuerdo a los pasos anteriores se obtiene la siguiente tabla de datos agrupados.

Clase	Frecuencia	Frecuencia acumulada
	f	F
1	491960	491960
2	221650	713610
.	.	.
.	.	.
.	.	.
63	200840	5660100
64	439800	6100000

Tabla 4. Ejemplo cálculo de percentiles. Fuente: Autor.

Para el cálculo del percentil 0.01 se obtiene lo siguiente:

$$\text{Posición del percentil} = \frac{kn}{100} = \frac{(100 - 0.01) * 6100000}{100} = 6099390$$

Este valor se compara con la columna de frecuencia acumulada, de manera que se logre establecer entre que rango se encuentra dicho valor calculado. En este caso el valor se encuentra entre la clase

63 y 64. Se toma la clase menor (63) para asignar ese valor de frecuencia acumulada a la variable F_{i-1} . Posteriormente se toma la clase mayor (64) para asignar ese valor de frecuencia acumulada a la variable F_i . El valor de la clase inferior (63) equivalente a la amplitud, se asigna a la variable Li . De modo que:

$$F_{i-1} = 5660100$$

$$F_i = 6100000$$

$$Li = 1.6787$$

El rango está definido por la diferencia entre la amplitud máxima y mínima del *Flicker instantáneo* dividido entre el número de clases. Para este caso el número de clases es de 64, la amplitud máxima es de 1.6805 y la amplitud mínima es de 1.6229, por tanto, el rango calculado es aproximadamente de 0.00089966. Reemplazando estos valores en la ecuación 16 obtenemos:

$$P_{0.01} \approx 1.6787 + 0.00089966 * \left(\frac{6099390 - 5660100}{6100000 - 5660100} \right) \approx 1.6796$$

De este modo tendríamos el valor del percentil 0.01, para el cálculo de los percentiles faltantes 1,3,10,50 es importante considerar que la norma establece que se realice un proceso de suavizado previo para obtener una mayor exactitud en los resultados, el proceso se ilustra a continuación:

$$P_{1s} = \frac{P_{0.1} + P_1 + P_{1.5}}{3}$$

Ecuación 17. Percentil 1s. Fuente: [27]

$$P3s = \frac{P2.2 + P3 + P4}{3}$$

Ecuación 18. Percentil 3s. Fuente: [27]

$$P10s = \frac{P6 + P8 + P10 + P13 + P17}{5}$$

Ecuación 19. Percentil 10s. Fuente: [27]

$$P50s = \frac{P30 + P50 + P80}{3}$$

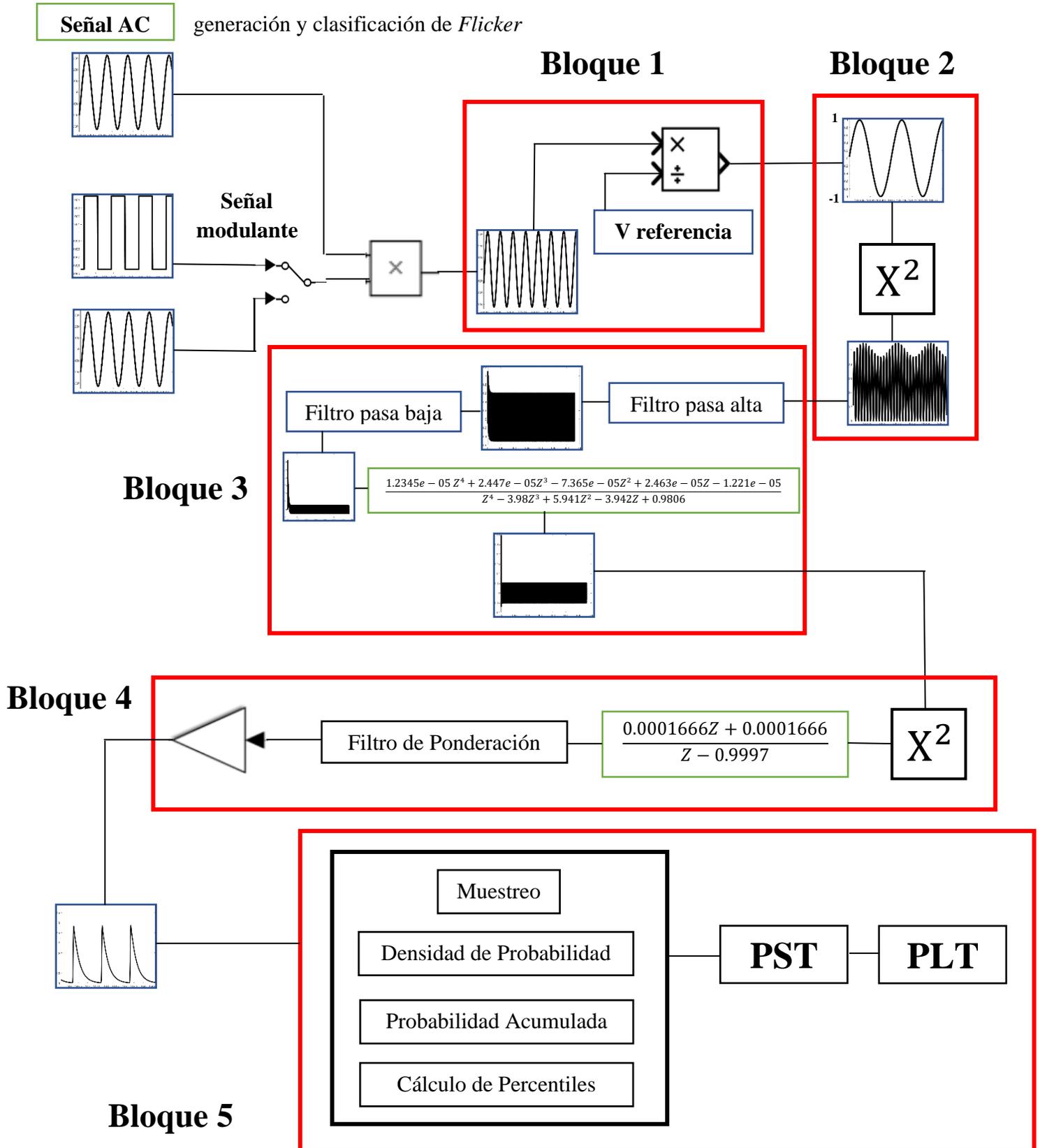
Ecuación 20. Percentil 50s. Fuente: [27]

Una vez obtenidos los percentiles, se utiliza la ecuación 2 y 3 descritas en este documento, así mismo los factores de ponderación plasmados en la tabla 1, para determinar el PST y de acuerdo a ello el PLT.

5.2 Algoritmos para la generación de *Flicker*

En este inciso se presentan los bloques pertinentes para realizar el proceso de

generación y clasificación de *Flicker*



5.3 Interfaz Gráfica del simulador

Como ya se estipuló al principio de este documento, la interfaz gráfica se realizó en el software Matlab utilizando la herramienta *App designer*, este entorno resulta más sencillo de utilizar comparado con el desarrollador *GUIDE* del mismo software, dado que permite configurar variables locales como variables globales con solo un código de extensión (*app.nombre*). A continuación, se ilustra el funcionamiento de esta interfaz.

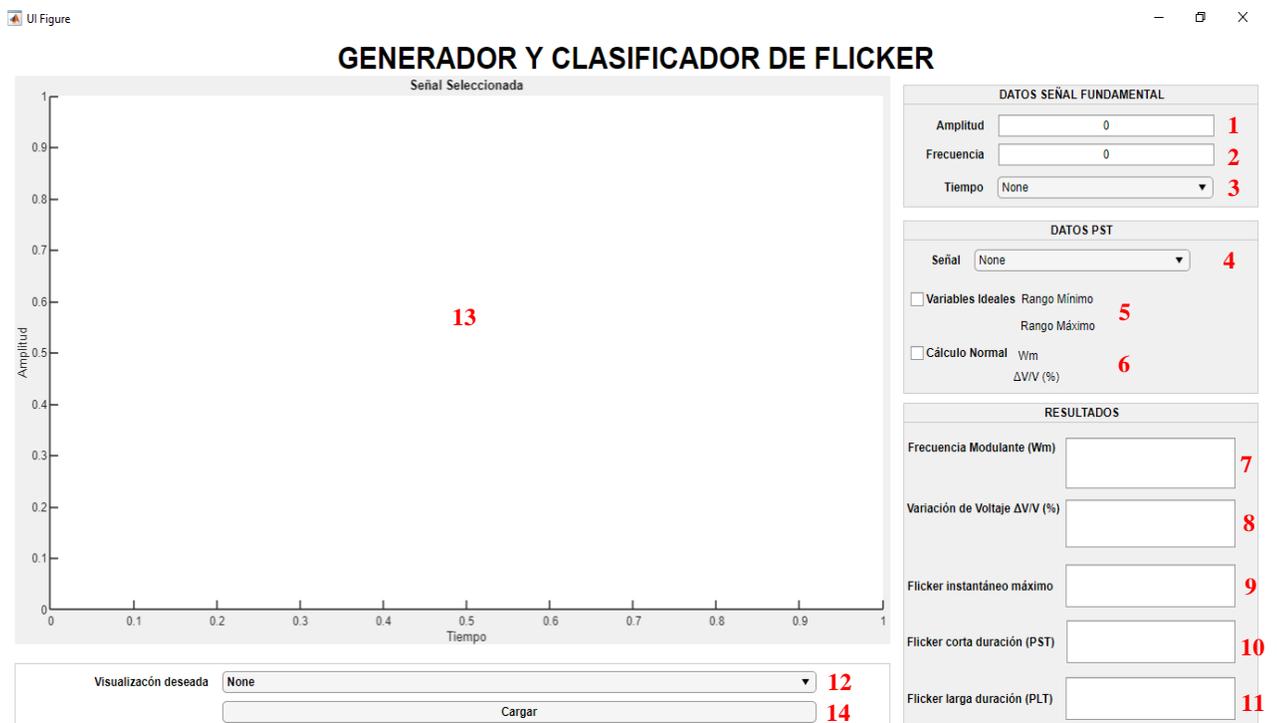


Ilustración 28. Interfaz gráfica generador y clasificador de Flicker. Fuente: Autor.

1. Amplitud de la señal fundamental
2. Frecuencia de la señal fundamental
3. Tiempo total de la señal

4. Tipo de señal modulante: Esta opción desplegable consiste en seleccionar que tipo de señal modulante deseamos para generar el *Flicker* (sinusoidal, rectangular).

5. Variables ideales: al seleccionar esta opción se habilitan las ventanas *Rango mínimo*, *Rango máximo*.

DATOS SEÑAL FUNDAMENTAL	
Amplitud	120
Frecuencia	60
Tiempo	11

DATOS PST	
Señal	Rectangular
<input checked="" type="checkbox"/> Variables Ideales	Rango Mínimo 1.95
	Rango Máximo 2.05
<input type="checkbox"/> Cálculo Normal	Wm
	$\Delta V/V$ (%)

RESULTADOS	
Frecuencia Modulante (Wm)	11.291
Variación de Voltaje $\Delta V/V$ (%)	0.83821
Flicker instantáneo máximo	7.7581
Flicker corta duración (PST)	1.9771
Flicker larga duración (PLT)	1.9771

Ilustración 29. Variables ideales. Fuente: Autor.

Al seleccionar esta opción se habilitarán 2 ventanas para escoger el rango mínimo y máximo en el cual se encontrarán las variables ideales para w_m (frecuencia de la señal modulante) y $\Delta V/V$ (%) (Variaciones de tensión) para un valor de PST comprendido en dicho rango, en este ejemplo el rango mínimo escogido es 1.95 y el máximo 2.05, al oprimir el botón

“cargar” el programa busca las variables ideales para generar un *Flicker* con un PST comprendido en este rango, para este caso el programa calculo una frecuencia fundamental (ω_m) = 11.291Hz, variaciones de voltaje ($\Delta V/V$ (%)) = 0.83821% para un valor de PST de 1.9771, se puede evidenciar que el resultado de PST está comprendido en el rango estipulado anteriormente, además se obtiene el cálculo de *Pinstantáneo* máximo que es de 7.7581, en este ejemplo el valor de PST y PLT son iguales debido a que el tipo de señal escogida es constante en toda la señal.

6. Calculo normal: Al seleccionar esta pestaña se activan 2 ventanas, frecuencia modulante (ω_m) y variaciones de voltaje ($\Delta V/V$ (%)), a diferencia del caso anterior el programa no buscara las variables ideales para generar un *Flicker* de acuerdo al rango de PST deseado, por el contrario, calculara el PST de acuerdo a las variables de entrada (ω_m , $\Delta V/V$ (%)) que para este caso son 0.325Hz y 0.894% respectivamente, el resultado fue un PST de 0.8526 y un *Flicker instantáneo* de 2.1732.

DATOS SEÑAL FUNDAMENTAL	
Amplitud	120
Frecuencia	60
Tiempo	11

DATOS PST	
Señal	Rectangular
<input type="checkbox"/> Variables Ideales	Rango Mínimo
	Rango Máximo
<input checked="" type="checkbox"/> Cálculo Normal	Wm
	0.325
	$\Delta V/V$ (%)
	0.894

RESULTADOS	
Frecuencia Modulante (Wm)	0.325
Variación de Voltaje $\Delta V/V$ (%)	0.894
Flicker instantáneo máximo	2.1732
Flicker corta duración (PST)	0.8526
Flicker larga duración (PLT)	0.8526

Ilustración 30. Cálculo normal PST. Fuente: Autor.

Es importante aclarar que solo puede ser escogida una opción para trabajar, ya sea la opción *Variables ideales* o *Cálculo Normal*.

7. Resultado de la frecuencia de la señal modulante.

8. Resultado de *Factor Flicker*

9. Resultado *P.instantáneo*.

10. Resultado PST.

11. Resultado PLT.

12. Visualización deseada: Esta opción permite seleccionar la señal que se desee visualizar en el *axes*.

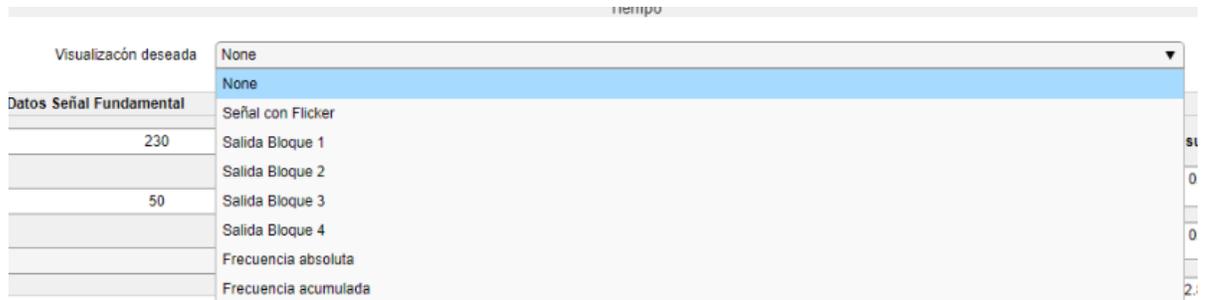


Ilustración 31. Visualización deseada. Fuente: Autor.

13. Axes: En este espacio se podrá observar la señal escogida en la ventana desplegable *Visualización deseada*.

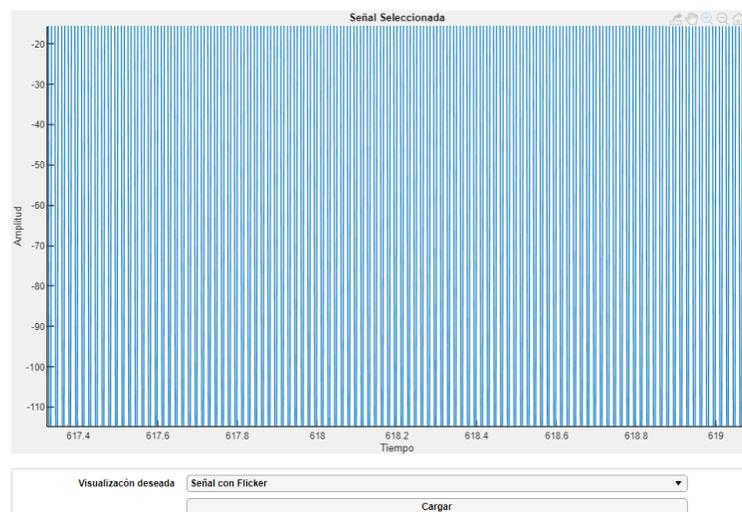


Ilustración 32. Señal con Flicker. Fuente: Autor.

La anterior imagen corresponde a una señal con *Flicker* basado en una señal fundamental de 120V a 60Hz, con cambios rectangulares a frecuencia modulante de 0.325Hz y variaciones de voltaje $\Delta V/V = 0.894$.

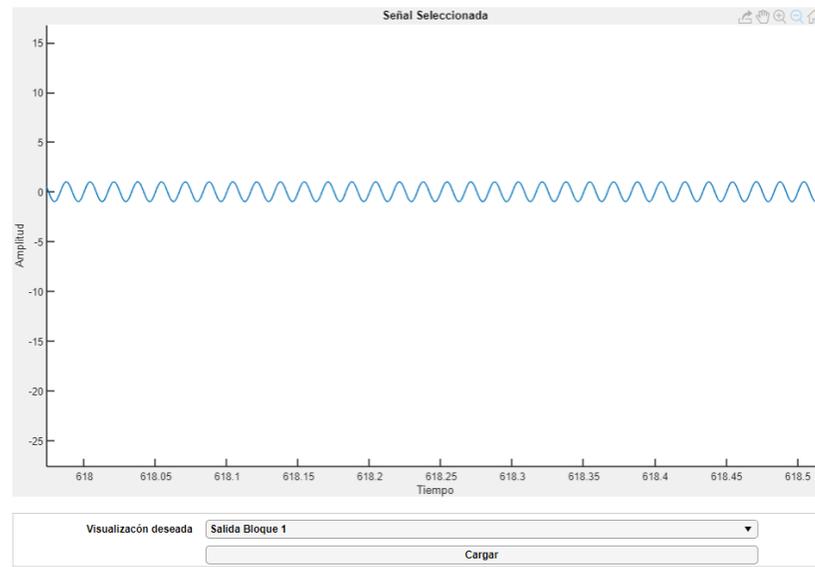


Ilustración 33. Salida del bloque 1. Fuente: Autor.

La anterior imagen corresponde a la señal correspondiente a la salida del bloque 1 basado en una señal fundamental de 120V a 60Hz, con cambios rectangulares a frecuencia modulante de 0.325Hz y variaciones de voltaje $\Delta V/V = 0.894$.

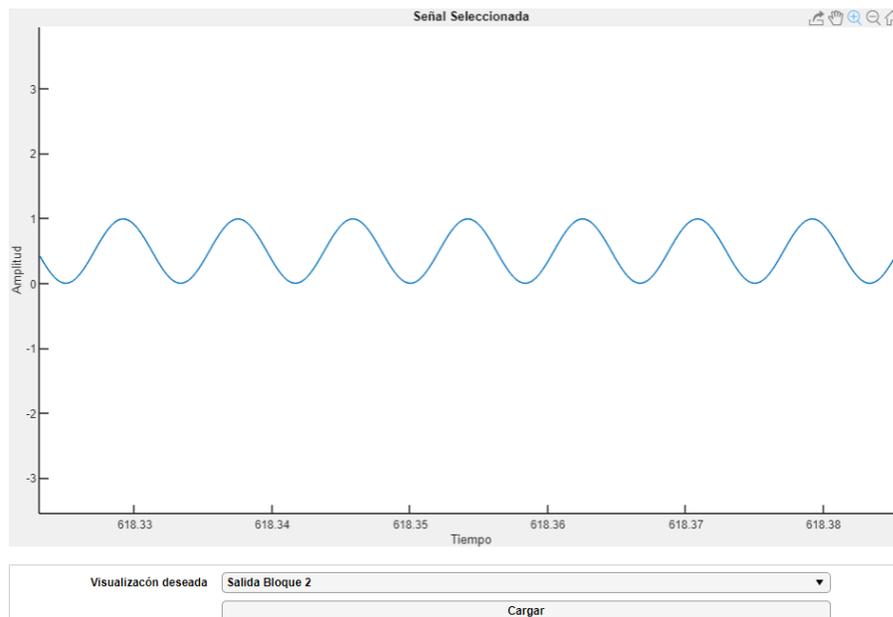


Ilustración 34. Salida del bloque 2. Fuente: Autor.

La anterior imagen corresponde a la señal correspondiente a la salida del bloque 2 basado en una señal fundamental de 120V a 60Hz, con cambios rectangulares a frecuencia modulante de 0.325Hz y variaciones de voltaje $\Delta V/V = 0.894$.

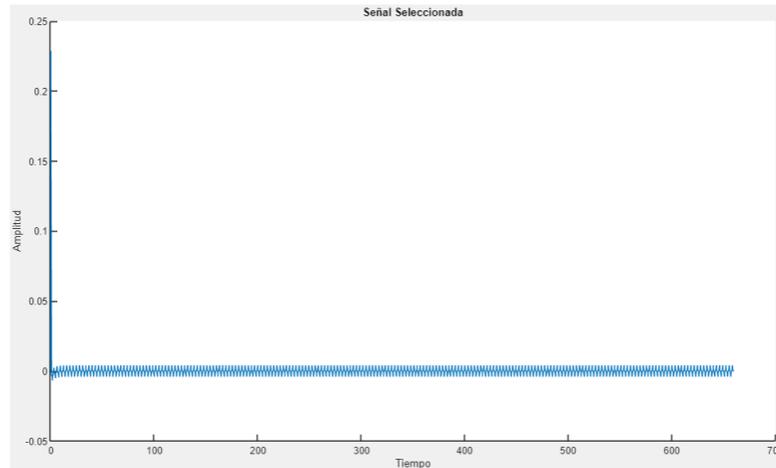


Ilustración 35. Salida del bloque 3. Fuente: Autor.

La anterior imagen corresponde a la señal correspondiente a la salida del bloque 3 basado en una señal fundamental de 120V a 60Hz, con cambios rectangulares a frecuencia modulante de 0.325Hz y variaciones de voltaje $\Delta V/V = 0.894$.

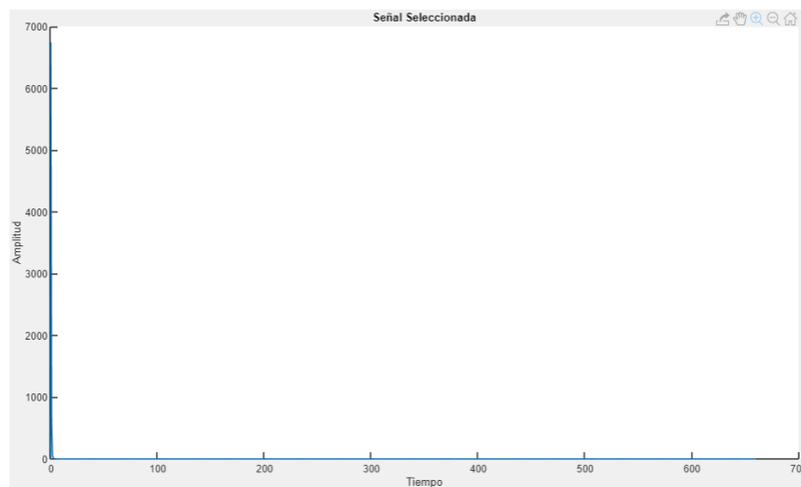


Ilustración 36. Salida del bloque 4. Fuente: Autor.

La anterior imagen corresponde a la señal correspondiente a la salida del bloque 3 basado en una señal fundamental de 120V a 60Hz, con cambios rectangulares a frecuencia modulante de 0.325Hz y variaciones de voltaje $\Delta V/V = 0.894$.

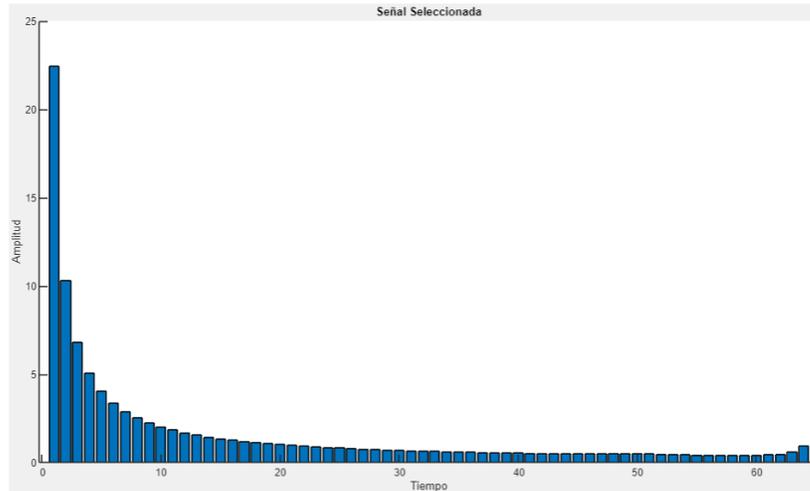


Ilustración 37. Frecuencia absoluta. Fuente: Autor.

La anterior imagen corresponde a la señal correspondiente a la curva de Frecuencias absolutas, basado en una señal fundamental de 120V a 60Hz, con cambios rectangulares a frecuencia modulante de 0.325Hz y variaciones de voltaje $\Delta V/V = 0.894$.

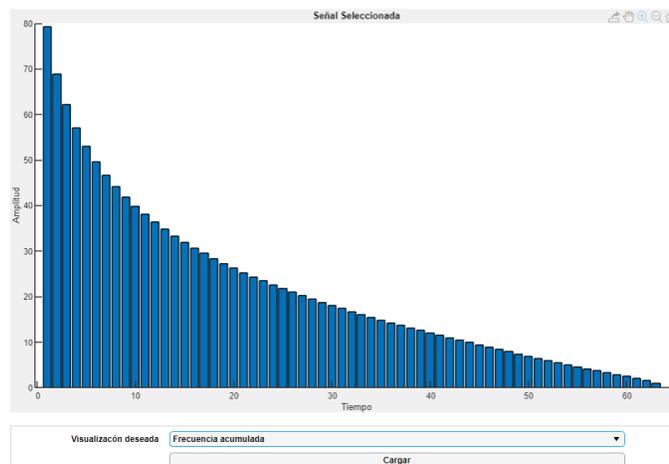


Ilustración 38. Frecuencia acumulada. Fuente: Autor.

La anterior imagen corresponde a la señal correspondiente a la curva de Frecuencia acumulada, basado en una señal fundamental de 120V a 60Hz, con cambios rectangulares a frecuencia modulante de 0.325Hz y variaciones de voltaje $\Delta V/V = 0.894$.

Es importante aclarar que el tiempo de respuesta del simulador depende en gran medida de las características técnicas del equipo de cómputo que se esté utilizando.

5.4 Verificación del generador y clasificador de Flicker

5.4.1 Pruebas de *P.instantáneo*:

El estándar IEC 61000-4-15 provee una serie de tablas que permiten calibrar el dispositivo conocido como *Flickermeter* dependiendo del valor de *Flicker instantáneo* (salida del bloque 4), del mismo modo estas tablas se pueden tomar como referencia para validar el óptimo funcionamiento de los simuladores que tienen por objeto crear y clasificar dicho fenómeno.

Las siguientes tablas se dividen dependiendo los valores de tensión fundamental, frecuencia fundamental y tipo de señal modulante (sinusoidal - rectangular), estas tablas representan las pruebas en donde se asegura un valor de *Flicker instantáneo* igual a la unidad ($P. \text{ instantáneo máximo} = 1$) con una tolerancia del 8%, dependiendo de los valores de frecuencia modulante y *Factor Flicker* ilustrados en las tablas 5,6,7 y 8.[26]

Los valores resaltados en negrilla son parámetros de prueba obligatorios que la norma recomienda realizar con objeto de validar el funcionamiento de los 4 primeros bloques del generador y clasificador de *Flicker*.

PRUEBAS IEC - 61000-4-15 <i>Pinstantáneo</i>					
Hz	Fluctuación de tensión U/U (%)		Hz	Fluctuación de tensión U/U (%)	
	120 V / 60 Hz	120 V / 50 Hz		120 V / 60 Hz	120 V / 50 Hz
0.5	2,453	2,453	10	0,341	0,341
1	1,465	1,465	10.5	0,355	0,355
1.5	1,126	1,126	11	0,373	0,373
2	0,942	0,942	11.5	0,394	0,394
2.5	0,815	0,815	12	0,417	0,417
3	0,717	0,717	13	0,469	0,469
3.5	0,637	0,637	14	0,528	0,528
4	0,57	0,57	15	0,592	0,592
4.5	0,514	0,514	16	0,66	0,66
5	0,466	0,466	17	0,734	0,734
5.5	0,426	0,426	18	0,811	0,811
6	0,393	0,393	19	0,892	0,892
6.5	0,366	0,366	20	0,977	0,978
7	0,346	0,346	21	1,067	1,068
7.5	0,332	0,332	22	1,16	1,162
8	0,323	0,323	23	1,257	1,261
8.8	0,321	0,321	24	1,359	1,365
9.5	0,329	0,329	25	1,464	1,476
			33.33	2,57	3,111
			40	4,393	

Tabla 5. Pruebas IEC 61000-4-15 - señal sinusoidal 120Vrms.Fuente:[26]

La anterior tabla hace referencia a pruebas de *P.instantáneo* (Flicker instantáneo) a cambios sinusoidales a 120Vrms, referente a la salida del bloque 4 del *Flickermeter*, los valores en negrilla son pruebas obligatorias que la norma recomienda realizar para la calibración de simuladores de *Flicker*.

PRUEBAS IEC - 61000-4-15 <i>Pinstantáneo</i>					
Hz	Fluctuación de tensión U/U (%)		Hz	Fluctuación de tensión U/U (%)	
	230 V / 60 Hz	230 V / 50 Hz		230 V / 60 Hz	230 V / 50 Hz
0.5	2,325	2,325	10	0,261	0,261
1	1,397	1,397	10.5	0,271	0,271
1.5	1,067	1,067	11	0,283	0,283
2	0,879	0,879	11.5	0,298	0,298
2.5	0,747	0,747	12	0,314	0,314
3	0,645	0,645	13	0,351	0,351
3.5	0,564	0,564	14	0,393	0,393
4	0,497	0,497	15	0,438	0,438
4.5	0,442	0,442	16	0,486	0,486
5	0,396	0,396	17	0,537	0,537
5.5	0,357	0,357	18	0,59	0,59
6	0,325	0,325	19	0,646	0,647
6.5	0,3	0,3	20	0,704	0.703
7	0,28	0,28	21	0,764	0,764
7.5	0,265	0,265	22	0,828	0,826
8	0,256	0,256	23	0,894	0,892
8.8	0,25	0,25	24	0,964	0,959
9.5	0,254	0,254	25	1,037	1,029
			33 1/3	2,128	1,758
			40	4,393	2,963

Tabla 6. Pruebas IEC 61000-4-15 - señal sinusoidal 230Vrms.Fuente:[26]

La anterior tabla hace referencia a pruebas de *P.instantáneo* (Flicker instantáneo) a cambios sinusoidales a 230Vrms, referente a la salida del bloque 4 del *Flickermeter*, los valores en negrilla son pruebas obligatorias que la norma recomienda realizar para la calibración de simuladores de *Flicker*.

PRUEBAS IEC - 61000-4-15 <i>P</i> instantáneo					
Hz	Fluctuación de tensión U/U (%)		Hz	Fluctuación de tensión U/U (%)	
	120 V / 60 Hz	120 V / 50 Hz		120 V / 60 Hz	120 V / 50 Hz
0.5	0.598	0.597	11.5	0.308	0.308
1	0.548	0.547	12	0.324	0.325
1.5	0.503	0.503	13	0.367	0.363
2	0.469	0.468	14	0.411	0.413
2.5	0.439	0.438	15	0.457	0.460
3	0.419	0.420	16	0.509	0.511
3.5	0.408	0.408	17	0.575	0.562
4	0.394	0.394	18	0.626	0.611
4.5	0.373	0.372	19	0.688	0.683
5	0.348	0.348	20	0.746	0.768
5.5	0.324	0.323	21	0.815	0.811
6	0.302	0.302	21.5	0.837	0.82
6.5	0.283	0.283	22	0.851	0.852
7	0.269	0.269	23	0.946	0.957
7.5	0.258	0.259	24	1.067	1.052
8	0.253	0.253	25	1.088	1.087
8.8	0.252	0.252	25.5	1.072	1.148
9.5	0.258	0.258	28	1.383	1.303
10	0.266	0.267	30.5	1.602	1.144
10.5	0.278	0.278	33 1/3	1.823	2.443
11	0.292	0.293	37	1.304	
			40	3.451	

Tabla 7. Pruebas IEC 61000-4-15 - señal rectangular 120Vrms.Fuente:[26]

La anterior tabla hace referencia a pruebas de *P*.instantáneo (Flicker instantáneo) a cambios rectangulares a 120Vrms, referente a la salida del bloque 4 del *Flickermeter*, los valores en negrilla son pruebas obligatorias que la norma recomienda realizar para la calibración de simuladores de *Flicker*.

PRUEBAS IEC - 61000-4-15 <i>P</i> instantáneo					
Hz	Fluctuación de tensión U/U (%)		Hz	Fluctuación de tensión U/U (%)	
	230 V / 60 Hz	230 V / 50 Hz		230 V / 60 Hz	230 V / 50 Hz
0.5	0.509	0.510	11.5	0.233	0.233
1	0.467	0.468	12	0.245	0.244
1.5	0.429	0.429	13	0.272	0.275
2	0.398	0.399	14	0.308	0.306
2.5	0.37	0.371	15	0.341	0.338
3	0.352	0.351	16	0.376	0.376
3.5	0.342	0.342	17	0.411	0.42
4	0.332	0.331	18	0.446	0.457
4.5	0.312	0.313	19	0.497	0.498
5	0.291	0.291	20	0.553	0.537
5.5	0.268	0.269	21	0.585	0.584
6	0.248	0.249	21.5	0.592	0.600
6.5	0.231	0.231	22	0.612	0.611
7	0.216	0.217	23	0.680	0.678
7.5	0.207	0.206	24	0.743	0.753
8	0.199	0.200	25	0.764	0.778
8.8	0.196	0.196	25.5	0.806	0.768
9.5	0.199	0.199	28	0.915	0.962
10	0.203	0.204	30.5	0.847	1-105
10.5	0.212	0.212	33 1/3	1.671	1.258
11	0.22	0.22	37		0.975
			40		2.327

Tabla 8. Pruebas IEC 61000-4-15 - señal rectangular 230Vrms.Fuente:[26]

A continuación las tablas 9,10,11 y 12 reflejan los resultados de *P*.instantáneo obtenidos del generador y clasificador de *Flicker* desarrollado en este proyecto, teniendo en cuenta los parámetros de *Factor Flicker* y *Frecuencia Modulante* detallados en las tablas 5,6,7 y 8.

VALIDACIÓN IEC - 61000-4-15 <i>P</i> instantáneo (sinusoidal)					
Hz	Respuesta <i>P</i> ,instantáneo		Hz	Respuesta <i>P</i> ,instantáneo	
	120 V / 60 Hz	120 V / 50 Hz		120 V / 60 Hz	120 V / 50 Hz
0,5	1,0097	0,9557	10	1,0076	0,9548
1	1,0106	0,9565	10,5	1,0027	0,9504
1,5	1,0101	0,9561	11	1,0029	0,9506
2	1,0097	0,9566	11,5	1,0043	0,9521
2,5	1,0099	0,9559	12	1,0039	0,9518
3	1,0096	0,9558	13	1,0037	0,9518
3,5	1,0093	0,9554	14	1,0053	0,9537
4	1,0085	0,9547	15	1,0052	0,9538
4,5	1,01	0,9561	16	1,0028	0,9518
5	1,0085	0,9549	17	1,0053	0,9543
5,5	1,0085	0,9549	18	1,0044	0,9537
6	1,0086	0,9551	19	1,0036	0,9531
6,5	1,0059	0,9526	20	1,0029	0,9544
7	1,0073	0,954	21	1,0044	0,9555
7,5	1,0087	0,9554	22	1,004	0,9561
8	1,0051	0,9522	23	1,0037	0,9576
8,8	1,0057	0,9528	24	1,0049	0,9592
9,5	1,0026	0,9501	25	1,0045	0,9626
			33 1/3	1,0267	0,9862
			40	1,0405	

Tabla 9. Resultado prueba *P*.instantáneo, señal sinusoidal 120Vrms. Fuente: Autor

La anterior tabla hace referencia a los resultados obtenidos mediante pruebas de *P*.instantáneo (Flicker instantáneo) a cambios sinusoidales a 120Vrms, referente a la salida del bloque 4 del *Flickermeter*, los valores en negrilla son pruebas obligatorias que la norma recomienda realizar para la calibración de simuladores de *Flicker*.

VALIDACIÓN IEC - 61000-4-15 <i>P</i> instantáneo (sinusoidal)					
Hz	Respuesta <i>P</i> instantáneo		Hz	Respuesta <i>P</i> instantáneo	
	230 V / 60 Hz	230 V / 50 Hz		230 V / 60 Hz	230 V / 50 Hz
0,5	0,9526	0,9812	10	0,9543	0,9842
1	0,9526	0,9813	10,5	0,9546	0,9846
1,5	0,9523	0,981	11	0,9513	0,9813
2	0,953	0,9818	11,5	0,9539	0,9841
2,5	0,9539	0,9825	12	0,9515	0,9817
3	0,953	0,9817	13	0,9511	0,9817
3,5	0,9545	0,9833	14	0,9533	0,9842
4	0,9534	0,9822	15	0,9526	0,9836
4,5	0,9548	0,9838	16	0,9521	0,9834
5	0,9554	0,9843	17	0,9528	0,9844
5,5	0,9524	0,9814	18	0,9518	0,9836
6	0,9503	0,9793	19	0,9528	0,9878
6,5	0,9538	0,9831	20	0,9526	0,9817
7	0,9537	0,9829	21	0,9516	0,9833
7,5	0,9512	0,9804	22	0,9544	0,981
8	0,9555	0,9851	23	0,9561	0,982
8,8	0,9527	0,9823	24	0,9607	0,9789
9,5	0,9541	0,9839	25	0,9656	0,9755
			33 1/3	1,424	0,6934
			40		0,2045

Tabla 10. Resultado prueba *P*.instantáneo, señal sinusoidal 230Vrms. Fuente: Autor.

La anterior tabla hace referencia a los resultados obtenidos mediante pruebas de *P*.instantáneo (Flicker instantáneo) a cambios sinusoidales a 230Vrms, referente a la salida del bloque 4 del *Flickermeter*, los valores en negrilla son pruebas obligatorias que la norma recomienda realizar para la calibración de simuladores de *Flicker*.

VALIDACIÓN IEC - 61000-4-15 <i>P</i> instantáneo (rectangular)					
Hz	Respuesta <i>P</i> instantáneo		Hz	Respuesta <i>P</i> instantáneo	
	120 V / 60 Hz	120 V / 50 Hz		120 V / 60 Hz	120 V / 50 Hz
0,5	1,0081	0,9543	11,5	1,0066	0,9492
1	1,0085	0,9543	12	1,0045	0,9521
1,5	1,0094	0,9565	13	1,0036	0,9532
2	1,0093	0,9545	14	1,0035	0,9518
2,5	1,0079	0,9529	15	1,0031	0,9512
3	1,0069	0,9558	16	1,0027	0,9535
3,5	1,0075	0,9549	17	1,0055	0,954
4	1,011	0,9534	18	1,004	0,9503
4,5	1,0113	0,9571	19	1,0018	0,9537
5	1,0078	0,9564	20	1,0031	0,9562
5,5	1,0082	0,9562	21	1,0047	0,9544
6	1,008	0,9563	21,5	1,0048	0,9568
6,5	1,0055	0,9513	22	1,0079	0,9509
7	1,0045	0,9578	23	1,0076	0,9568
7,5	1,0034	0,9523	24	1,0055	0,9606
8	1,0038	0,9556	25	1,0114	0,9629
8,8	1,0089	0,9549	25,5	1,0077	0,9623
9,5	1,002	0,9507	28	1,0076	0,9755
10	1,0082	0,9683	30 1/2	1,0144	0,9712
10,5	1,0031	0,9538	33 1/3	1,0244	0,9917
11	1,001	0,9549	37	1,0197	
			40	1,0584	

Tabla 11. Resultado prueba *P*.instantáneo, señal rectangular 120Vrms. Fuente: Autor.

La anterior tabla hace referencia a los resultados obtenidos mediante pruebas de *P*.instantáneo (Flicker instantáneo) a cambios rectangulares a 120Vrms, referente a la salida del bloque 4 del *Flickermeter*, los valores en negrilla son pruebas obligatorias que la norma recomienda realizar para la calibración de simuladores de *Flicker*.

VALIDACIÓN IEC - 61000-4-15 <i>Pinstantáneo (rectangulares)</i>					
Hz	Respuesta <i>Pinstantáneo</i>		Hz	Respuesta <i>Pinstantáneo</i>	
	230 V / 60 Hz	230 V / 50 Hz		230 V / 60 Hz	230 V / 50 Hz
0,5	0,9503	0,9863	11,5	0,9553	0,981
1	0,9501	0,9865	12	0,9597	0,9752
1,5	0,954	0,9833	13	0,932	1,0052
2	0,9503	0,9872	14	0,963	0,9727
2,5	0,9485	0,9859	15	0,9667	0,965
3	0,956	0,9765	16	0,9534	0,9819
3,5	0,9506	0,9802	17	0,9098	1,0255
4	0,9586	0,9767	18	0,908	1,03
4,5	0,9456	0,9858	19	0,9445	0,9866
5	0,9509	0,9823	20	1,0082	0,9305
5,5	0,9449	0,9894	21	0,9541	0,8619
6	0,9484	0,9881	21,5	0,9272	1,0118
6,5	0,955	0,9835	22	0,9574	0,9777
7	0,9432	0,9887	23	0,9572	0,9797
7,5	0,9609	0,976	24	0,9262	1,0165
8	0,9434	0,9884	25	0,9229	1,0286
8,8	0,9539	0,9829	25,5	1,0496	0,9
9,5	0,9518	0,983	28	0,8619	1,111
10	0,9493	0,985	30 1/2	0,5641	1,7061
10,5	0,9523	0,9851	33 1/3	1,7128	0,5786
11	0,9358	0,9652	37		0,6466
			40		0,7298

Tabla 12. Resultado prueba *P.instantáneo*, señal rectangular 230Vrms. Fuente: Autor.

Las tablas 9,10,11 y 12 reflejan el valor de *P.instantáneo* máximo obtenido en las pruebas realizadas con el generador y clasificador de *Flicker*, se puede evidenciar que cerca del 98% de los valores sometidos a pruebas cumplieron con los rangos límites de *Flicker instantáneo* para señales sinusoidales y rectangulares.

5.4.2 Pruebas de Pst:

La norma IEC 61000-4-15 ofrece parámetros de pruebas para la calibración de los instrumentos y simuladores de *Flicker* evaluando la salida del bloque 5, la cual corresponde a un análisis estadístico sometido al *P.instantáneo (salida del bloque 4)*, este análisis da como resultado el valor de PST. La siguiente tabla denota los valores de cambios por minuto (cpm) y fluctuación de voltaje que dan como resultado un PST cercano a 1 con una tolerancia mínima del 8%, de acuerdo a la norma IEC esta prueba es suficiente para evaluar la efectividad del clasificador de *Flicker*.

fm (CPM)	Respuesta PST salida del bloque 5			
	120V / 50Hz	120V / 60Hz	230V / 50Hz	230V / 60Hz
7	1,694	1,694	1,45	1,45
39	1,045	1,04	0,894	0,895
110	0,844	0,844	0,722	0,723
1620	0,545	0,548	0,407	0,409
4000	3,426	No requerido	2,343	No requerido
4800	No requerido	4,837	No requerido	3,263

Tabla 13. Valores de cpm y fluctuación de tensión para un PST cercano a 1. Fuente:[26]

La siguiente tabla muestra los resultados de PST obtenidos con el generador y clasificador de *Flicker* desarrollado en este proyecto tomando como base los valores estipulados en la tabla anterior para un PST=1.

fm (CPM)	Respuesta PST salida del bloque 5			
	120V / 50Hz	120V / 60Hz	230V / 50Hz	230V / 60Hz
7	0,8441	0,8702	0,9187	0,9075
39	0,9667	0,9917	0,9796	0,9688
110	0,97	1	0,983	0,9726
1620	0,971	1	0,9859	0,9735
4000	0,9896	No requerido	1,0038	No requerido
4800	No requerido	1,0221	No requerido	0,9936

Tabla 14. Evaluación valores PST=1. Fuente: Autor.

Como se observa en la tabla 14, los resultados de PST asignados varían con respecto al resultado deseado a muy bajas frecuencias, se logra obtener una mayor efectividad a partir de una frecuencia modulante de 0.1Hz alcanzando un 100% de efectividad entre los rangos comprendidos entre 0.92Hz y 13.5Hz a tensión nominal 120V / 60Hz, esto radica en el tipo de análisis estadístico que se realiza en el bloque 5, dependiendo de la cantidad de clases que se tomen para realizar el muestreo, para este proyecto se tomaron 64 clases para un conjunto total de 6100000 muestras.

A continuación, se presenta una comparación entre el clasificador de *Flicker* desarrollado en este proyecto y el medidor de la calidad de la energía Hiwoki PW3198, el parámetro a comparar es el valor PST dependiendo de la fluctuación de voltaje y la frecuencia de la señal modulante de tipo rectangular a 230V / 50Hz.[27]

Fluctuaciones rectangulares 230V / 50Hz				
Fluctuación V (%)	fm(Hz)	Pst esperado	Pst Hiwoki	Pst propio
1	0,5	1,23	1,32	1,1947
2	0,5	2,46	2,42	2,3893
1	2	1,76	1,7	1,7094
2	8	7,04	7,05	7,0207

Tabla 15. Comparación con el medidor de la calidad de la energía Hiwoki. Fuente: Autor.

Como se puede observar en la tabla anterior, los valores de PST obtenidos en este proyecto (Pst propio), son muy cercanos a los valores de PST esperados y estipulados en la norma, además de la cercanía con los resultados obtenidos por el medidor Hiwoki.

Por otra parte, se puede apreciar la influencia que tiene el aumento de la fluctuación de tensión, donde al aumentar dicha fluctuación de un valor de 1% a un valor de 2% repercute en el aumento del PST casi del doble.

A continuación, se tomará como base comparativa los valores de la curva de PST=1 con cambios rectangulares, con una señal fundamental de 120Vrms reflejada en la ilustración 9 del presente documento.[22]

Cambios por minuto	Frecuencia	Modulación	Pst
7	0,05833	1,695	0,8708
10	0,0833	1,499	0,9441
22	0,1833	1,186	0,9923
38	0,4	1	0,9953
39	0,325	1,044	0,9955
68	0,5667	0,939	0,9967
110	0,9167	0,841	0,9964
176	1,4667	0,739	0,9961
273	2,275	0,65	0,9994
375	3,125	0,594	1,0011
480	4	0,559	1,0042
585	4,875	0,501	1,0014
682	5,6833	0,445	1,0002
796	6,6333	0,393	1,0002
1020	8,5	0,35	0,9933
1055	8,7917	0,351	0,9928
1200	10	0,371	0,9947
1390	11,583	0,438	1,0023
1620	13,5	0,547	0,9982
2400	20	1,051	1,0036
2875	23,9583	1,49	0,9996

Tabla 16. Prueba de efectividad basada en la curva Pst = 1. Fuente: Autor.

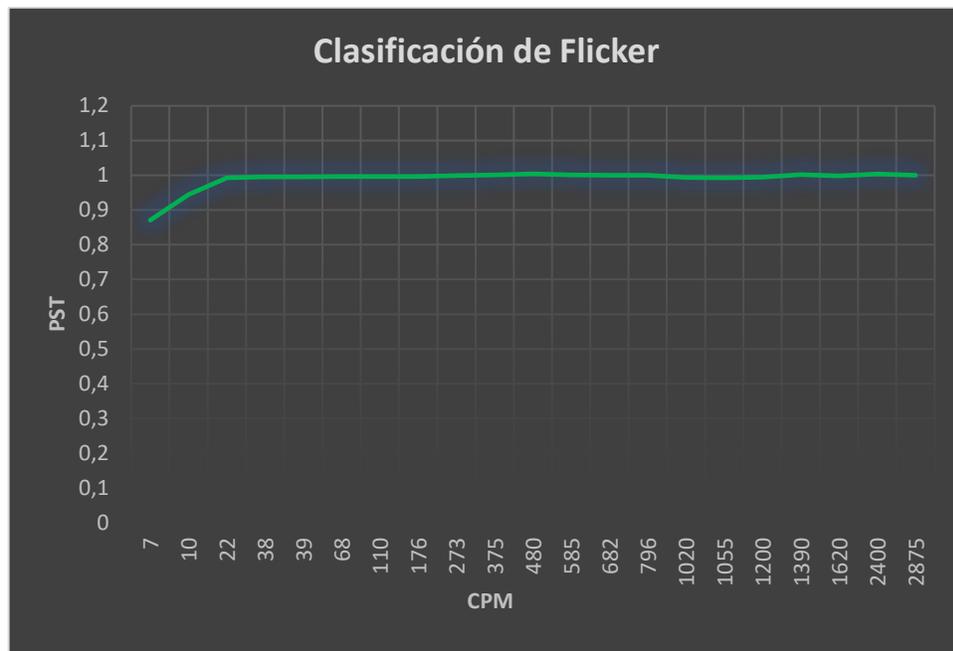


Ilustración 39. Prueba de clasificación de Flicker, Pst =1. Fuente: Autor.

La tabla 16 junto con la ilustración 40, denotan el resultado de la prueba del clasificador de *Flicker* basado en la curva $PST = 1$ desarrollado en este proyecto, como se observa el valor promedio de PST calculado corresponde a valores muy cercanos a la unidad, demostrando así la efectividad de los 5 bloques implementados,

Las pruebas de validación realizadas en este documento pueden ser evaluadas por medio de la interfaz gráfica que se desarrolló en este proyecto, donde el usuario podrá validar los resultados de estas verificaciones introduciendo los parámetros respectivos para cada prueba.

6 Conclusiones y trabajos a futuro

6.1 Conclusiones

Respecto al objetivo de este proyecto que planteaba diseñar un generador y clasificador de *Flicker*, del mismo modo crear una metodología para el desarrollo del mismo de acuerdo a las normas estipuladas y siguiendo los ensayos de comparación para *P. instantáneo* y *PST*, se logró por completo el cumplimiento del objetivo planteado.

Dependiendo del tipo de *Flickermeter* o simulador de *Flicker* que se pretenda diseñar e implementar, el número de clases escogidas en el bloque estadístico número 5, repercute en la respuesta del valor de PST, dado que al tener una cantidad de muestras tan grande es ideal tener una cantidad de clases de por lo menos 64 a 1000, aunque si bien en algunos casos se pueden presentar problemas dados a que bajo ciertos parámetros de fluctuaciones de tensión y frecuencias modulantes la respuesta del bloque 4 (*P. instantáneo*) puede llegar a ser constante y no presentar oscilaciones predominantes, esto desencadenaría en que se presenten errores en la clasificación del *Flicker* dado a que la amplitud de las oscilaciones de *P. instantáneo* sería casi nula.

El análisis expuesto a lo largo de este documento, permitió establecer y ratificar la relación existente entre el *Factor Flicker*, la frecuencia de modulación y un factor de multiplicación, que nos permite comprobar bajo un parámetro específico ya validado, el óptimo funcionamiento de nuestro sistema, este proceso consiste en garantizar una frecuencia de modulación constante, e ir cambiando el *Factor de Flicker* en base a un factor de

multiplicación, de tal modo que el valor de PST ira cambiando de manera proporcional al valor de dicho factor de multiplicación.

En consecuencia a lo planteado a lo largo de este documento es importante recalcar que la percepción de *Flicker* varía dependiendo de las características morfológicas de la persona sometida a este fenómeno, así como el tiempo de exposición, este proyecto se basó en exponer la metodología adecuada bajo variables ya establecidas, por tanto no quiere decir que los parámetros utilizados tales como fluctuación de voltaje y frecuencia modulante, tengan la misma incidencia en el mismo grado para todas las personas.

La realización de este proyecto está enfocado a la academia, por lo tanto, para ofrecer facilidades a los estudiantes interesados en este campo de investigación, se especificaron los pasos a seguir para realizar el análisis estadístico debido a que en la literatura expuesta no se encuentra información clara y pertinente de cómo realizar este proceso.

El desarrollo de los algoritmos y de la interfaz gráfica se cumplió a cabalidad teniendo en cuenta los dos tipos de señales modulantes (sinusoidal y rectangular), el factor de ganancia a la salida del bloque 4 y los filtros de acuerdo a lo recomendado por la norma.

6.2 Trabajos a futuro

A continuación, se presentan algunas líneas de investigación que pueden ser tenidas en cuenta para realizar investigaciones futuras.

En la actualidad se le está dando un enfoque más robusto al bloque estadístico de los clasificadores de *Flicker*, utilizando diferentes técnicas de reconocimiento, procesamiento de señales y extracción de patrones, por ello un futuro trabajo de investigación se podría centrar en experimentar con técnicas de procesamiento avanzado utilizando inteligencia artificial o redes neuronales.

Teniendo en cuenta el objetivo primordial del presente simulador enfocado a la academia, se espera que este dispositivo pueda llegar a ser implementado de manera física, partiendo de la base teórica aquí expuesta. Una vez realizada la implementación, se podrán realizar investigaciones relacionadas al impacto que tiene este fenómeno en diferentes tipos de lámparas y la incidencia que estas generarían en la percepción humana.

7 Bibliografía

- [1] M. Angel and S. Cortés, “Calidad de la Energía Eléctrica,” 2009.
- [2] S. Abulanwar, A. Ghanem, M. E. M. Rizk, and W. Hu, “A proposed flicker mitigation scheme of DFIG in weak distribution networks,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 58, no. 2, pp. 677–687, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.aej.2019.05.014.
- [3] J. Mauricio and S. Villamizar, “Herramienta computacional para el análisis de señales en sistemas de potencia con alta penetración de fuentes no convencionales de energía Johinner Mauricio Sanabria Villamizar,” 2020.
- [4] T. Jayasree, D. Devaraj, and R. Sukanesh, “Power quality disturbance classification using Hilbert transform and RBF networks,” *Neurocomputing*, vol. 73, no. 7–9, pp. 1451–1456, Mar. 2010, doi: 10.1016/j.neucom.2009.11.008.
- [5] P. Khetarpal and M. M. Tripathi, “A critical and comprehensive review on power quality disturbance detection and classification,” *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, vol. 28. Elsevier Inc., p. 100417, Dec. 01, 2020, doi: 10.1016/j.suscom.2020.100417.
- [6] O. Ozgonenel, T. Yalcin, I. Guney, and U. Kurt, “A new classification for power quality events in distribution systems,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 95, pp. 192–199, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.epsr.2012.09.007.
- [7] M. Sahani, P. K. Dash, and D. Samal, “A real-time power quality events recognition using variational mode decomposition and online-sequential extreme learning

- machine,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 157, p. 107597, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2020.107597.
- [8] R. Kapoor, R. Gupta, L. H. Son, S. Jha, and R. Kumar, “Boosting performance of power quality event identification with KL Divergence measure and standard deviation,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 126, pp. 134–142, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2018.05.053.
- [9] S. Sansheng, G. Liming, M. Lei, C. Zhuoya, and Z. Yuxiao, “Research on Flicker Measurement Algorithm Based on FFT,” *Energy Procedia*, vol. 14, pp. 1709–1716, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2011.12.1156.
- [10] G. Wiczyński, “Determining location of voltage fluctuation source in radial power grid,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 180, no. October 2019, p. 106069, 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2019.106069.
- [11] S. A. Soliman and M. E. El-Hawary, “Measurement of power systems voltage and flicker levels for power quality analysis: A static LAV state estimation based algorithm,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 22, no. 6, pp. 447–450, Aug. 2000, doi: 10.1016/S0142-0615(00)00003-X.
- [12] M. H. J. Bollen and I. Y. H. Gu, *Signal Processing of Power Quality Disturbances*. 2005.
- [13] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Std 1159 - IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.*, vol. 2009, no. June. 2009.
- [14] CREG. Comisión de Regulación de Energía y Gas, “Resolución CREG 024 de 2005,”

Resolución CREG-024, p. 10, 2005.

- [15] “IEC 61000-4-30:2015+AMD1:2021 CSV | IEC Webstore.”
<https://webstore.iec.ch/publication/68642> (accessed Apr. 11, 2021).
- [16] MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, “Creg 017,” *Com. Regul. Energía y Gas*, vol. CREG-017, p. 22, 2005.
- [17] M. Mohammad and E. Fuchs, *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines, Second Edition*, Segunda ed. .
- [18] J. Balcells *et al.*, *Eficiencia en el uso de la energía eléctrica.*, vol. 4, no. 3. 2016.
- [19] “IEC 60050-161:1990 | IEC Webstore | electromagnetic compatibility, EMC, smart city.” <https://webstore.iec.ch/publication/181> (accessed Apr. 13, 2021).
- [20] M. Holguin and D. Gomez, “Análisis de calidad de energía eléctrica en el nuevo campus. Universidad Politécnica Salesiana.,” Guayaquil, Mar. 2010.
- [21] O. Antecedentes, “española,” vol. 00, no. 91, 1997.
- [22] “IEC 61000-3-3:2013 | IEC Webstore | electromagnetic compatibility, EMC, smart city.” <https://webstore.iec.ch/publication/4150> (accessed Apr. 17, 2021).
- [23] D. El Montoya, “Comparison between the modeled and simulation of the Flickermeter based on the Standard IEC-61000-4-15 through the Discrete Wavelet Transform and Fast Fourier Transform Comparación entre el modelaje y simulación del flickermetro de la norma IEC-61000-4-15,” vol. 31, no. 1, pp. 31–40, 2008.
- [24] J. Cesar, R. Herrera, L. Alfonso, and V. Hidalgo, “Diseño y construcción de un

prototipo de laboratorio flickermeter IEC 61000-4-15.”

- [25] A. Montoya, E. A. Dan, and C. Regoli, “Modelado y simulación del medidor de la sensación instantánea de flicker del flickermetro de la norma iec-61000-4-15 mediante redes neuronales,” Jun. 2009. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212009000200009 (accessed May 26, 2021).
- [26] “IEC 61000-4-15:2010 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part...” <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/iec?c=4173> (accessed May 03, 2021).
- [27] A. R. Canzani, J. Carlos, and P. Salao, “Desarrollo de un sistema configurable para la medición de Flicker y Fluctuaciones de Tensión,” 2019.