



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA



Desarrollo de un sistema configurable para la medición de Flicker y Fluctuaciones de Tensión

MEMORIA DE PROYECTO PRESENTADA A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA POR

Anaclara Rodriguez Canzani, Juan Carlos Pizzani Salao

EN CUMPLIMIENTO PARCIAL DE LOS REQUERIMIENTOS
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRICISTA.

TUTOR

Andrés Cardozo..... Universidad de la República

TRIBUNAL

Virginia Echinope..... Universidad de la República
Mario Vignolo Universidad de la República
Pablo Toscano Universidad de la República
Andrés Cardozo..... Universidad de la República

Montevideo
domingo 7 julio, 2019

Desarrollo de un sistema configurable para la medición de Flicker y Fluctuaciones de Tensión, Anaclara Rodríguez Canzani, Juan Carlos Pizzani Salao.

ISSN 1688-2806

Esta tesis fue preparada en L^AT_EX usando la clase iietesis (v1.1).

Contiene un total de 149 páginas.

Compilada el domingo 7 julio, 2019.

<http://iie.fing.edu.uy/>

Agradecimientos

Muchos contribuyeron a que este proyecto llegara a buen puerto, aprovechamos este espacio para agradecer el apoyo brindado.

Queremos comenzar agradeciendo a nuestras familias y amigos que permanentemente nos brindaron su apoyo y aliento.

Al Laboratorio de Fotometría del Instituto de Ingeniería Eléctrica por la asesoría brindada y por facilitarnos el uso de sus instalaciones e instrumentos. En especial a Michael Varela y Santiago Machado.

A Martín Avas por facilitarnos el instrumento “Analog Discovery 2”.

Por último, a nuestro tutor Andrés Cardozo, por su guía y colaboración en la realización de este proyecto.

A todos ellos, gracias.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Resumen

Este proyecto se centra en la realización de un Flickermeter, el cual se pretende usar con fines de investigación. El Flickermeter es un instrumento capaz de medir un indicador de la calidad de la energía como lo es el índice P_{st} : Indicador de severidad de Flicker de corta duración.

Las señales de voltaje con fluctuaciones (dentro de un cierto rango de frecuencias y amplitudes), que alimentan ciertos equipos de iluminación, alteran su comportamiento pudiendo generar la impresión de inestabilidad visual. Se denomina parpadeo o Flicker a la impresión de inestabilidad visual en el estímulo lumínico fluctuando en el tiempo [9].

Características del sistema de medición realizado

El sistema de medición realizado, cumple con los requisitos que la norma de la Comisión de Electrotecnia Internacional IEC-61000-4-15 [12], edición 2.0 publicada en agosto del 2010 requiere para clasificar a un Flickermeter categoría F3.

Se diferencia del Flickermeter industrial por estar realizado y diseñado con fines académicos donde el usuario tiene acceso al software para una posible modificación del mismo. El cálculo de P_{st} esta dividido en distintos bloques y esta disponible para los usuarios del instrumento la representación gráfica de señal de salida de cada bloque.

Actualmente se esta realizando una revisión de la norma IEC-61000-4-15 [12], donde se están proponiendo mejoras en el bloque de procesamiento estadístico de los valores de sensación instantánea de Flicker (salida del bloque 4). El sistema de medición construido esta pensado para facilitar el testeo de cambios que se puedan introducir en el proceso de calculo de P_{st} .

La medición de valores de Flicker (mediciones de P_{st}) esta basada en el comportamiento de las lámparas incandescentes frente a fluctuaciones de tensión y en como los humanos percibimos las fluctuaciones en el color o brillo de dichas lámparas. Tiene por lo tanto gran valor tener la capacidad en el sistema de medir simultáneamente iluminancia y calcular P_{st} . El sistema de medición construido posee la capacidad de medir iluminancia (de una lámpara incandescente), logrando mediciones que se apartan tan solo 1.7% del instrumento portátil utilizado en el Laboratorio de Fotometría de referencia a nivel país, esto permitirá correlacionar los valores de Flicker con el comportamiento de las lámparas incandescentes.

El software fue desarrollado en Matlab un lenguaje ampliamente conocido por

Capítulo 0. Resumen

los usuarios finales del instrumento (Departamento de Calidad de Potencia del Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República). Se optó por un sistema con adquisición de PC, por tratarse de un instrumento con fines de investigación (priorizando la flexibilidad en el funcionamiento, frente a que sea compacto o económico), sin descuidar la funcionalidad y permitiendo un uso simple e intuitivo del sistema de medición.

Abstract

This project focuses on the development of a Flickermeter, intended to be used for research purposes. The Flickermeter is an instrument capable of measuring an indicator of the quality of the energy, as done by the index P_{st} : Short term Flicker severity.

Voltage fluctuations within a range of frequencies and amplitudes that feed certain lighting equipment alter their behavior and may generate the impression of visual unsteadiness. Flicker is the impression unsteadiness of visual sensation in the light stimulus fluctuating in time [9].

Characteristics of the measurement system developed

The measurement system developed meets the requirements of the International Electrotechnical Commission standard: IEC-61000-4-15 [12], edition 2.0 published in August 2010, qualifying it as a category F3 Flickermeter.

It differs from the industrial Flickermeter because it is made and designed for academic purposes where the user has access to the software for a possible modification of it. The P_{st} calculation is divided into different blocks and the output signal of each block is available to the users, unlike a commercial Flickermeter.

Currently, a revision of the standard IEC-61000-4-15 [12] is being carried out, where improvements are being proposed in the statistical processing block of the Flicker's instantaneous sensation values (output of block 4). The measurement system built is designed to facilitate the testing of changes that can be introduced in the P_{st} calculation process.

The measurement of Flicker values (P_{st}) is based on the behavior of incandescent lamps when exposed to voltage fluctuations, and how humans perceive the fluctuations in the brightness of these lamps. It is of great value to have the ability to simultaneously measure illuminance and calculate P_{st} . The built-in measuring system has the ability to measure illuminance (from incandescent lamps), diverging only 1.7% from the portable instrument used in the Photometric Laboratory of reference in the country. This will allow users to correlate the measured values of the Flicker with the behavior of the incandescent lamps.

The software was developed in Matlab, a very well known language for the final users of the instrument (Department of Power Quality of the Electrical Engineering Institute of the Faculty of Engineering, Universidad de la República). A system with PC acquisition was preferred, given that the instrument was built for research

Capítulo 0. Abstract

purposes (prioritizing the flexibility in operation, as opposed to being compact or economic).

Tabla de contenidos

Agradecimientos	I
Resumen	III
Abstract	V
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Cuestionamientos Actuales al Flickermeter.	5
1.4. Estructura del Proyecto	8
1.5. Estructura del Documento	9
2. Flicker	11
2.1. Introducción	11
2.2. Causas del Flicker	12
2.3. Descripción de las fluctuaciones de tensión	13
2.4. Lámparas incandescentes	16
2.5. Percepción del Flicker	22
2.6. Curva de Flicker	23
3. Flickermeter según la norma IEC 61000-4-15	25
3.1. Introducción	25
3.2. Arquitectura del Flickermeter	26
3.3. Presentación de los bloques	28
3.3.1. Bloque 1: Adaptador de la tensión de entrada	28
3.3.2. Bloque 2: Demodulador cuadrático	28
3.3.3. Bloque 3: Filtros de ponderación-simulación del ojo humano.	28
3.3.4. Bloque 4: Encuadrar y suavizar - modelo del cerebro	31
3.3.5. Bloque 5: Análisis estadístico	31
3.4. Análisis teórico del procesamiento de la señal de los bloques 2, 3 y 4	33
3.5. Ensayos al Flickermeter	35
3.5.1. Introducción	35
3.5.2. Ensayo 1: Variaciones de tensión sinusoidales y rectangulares	36
3.5.3. Ensayo 2: Cambios de tensión rectangulares	39
3.5.4. Ensayo 3: Cambios de frecuencia y voltaje combinados	39

Tabla de contenidos

3.5.5.	Ensayo 4: Tensión distorsionada con múltiples cruces por cero	40
3.5.6.	Ensayo 5: Análisis del ancho de banda utilizando modulación de banda lateral armónica e inter-armónica	40
3.5.7.	Ensayo 6: Saltos de fase	41
3.5.8.	Ensayo 7: Cambios de voltaje rectangulares con un ciclo de trabajo del 20 %	41
4.	Sistema de medida construido: Hardware	43
4.1.	Placa conversora analógico-digital	43
4.2.	Acondicionamiento de la señal de voltaje para la entrada de la Placa CAD	44
4.3.	Circuito sensor óptico	49
4.3.1.	Fotodiodo	50
4.3.2.	Diseño del circuito	51
4.3.3.	Elección de los componentes del circuito	52
4.3.4.	Diseño final del circuito	54
4.4.	Caracterización del sensor OSD60-E	55
4.4.1.	Ensayo 1: Caracterización del sensor	55
4.4.2.	Ensayo 2: Calculo de Iluminancia	59
5.	Sistema de medida construido: Software	61
5.1.	Introducción	61
5.2.	Diseño del Software	63
5.3.	Banco de señales	64
5.4.	Cálculo de P_{st}	65
5.4.1.	Bloque 1: Normalización de la señal	65
5.4.2.	Bloque 2: Demodulación cuadrática	66
5.4.3.	Bloque 3: Filtros de ponderación	67
5.4.4.	Bloque 4: Multiplicador cuadrático	73
5.4.5.	Bloque 5: Análisis Estadístico	74
5.4.6.	Ejemplo de calculo de P_{st}	75
5.5.	Medida de Iluminancia	78
5.6.	Rutina Adquisición de Datos	79
6.	Ensayos	81
6.1.	Ensayos de verificación del software según la norma IEC 61000-4-15 con señales del banco de señales.	81
6.2.	Ensayos de verificación del instrumento de medida según la norma IEC 61000-4-15 con señales generadas con la fuente programable.	85
6.2.1.	Verificación ensayo 1	85
6.2.2.	Verificación ensayo 2	87
6.3.	Ensayos adicionales al instrumento de medida	88
6.3.1.	Ensayos de correlación con respecto al Medidor de Calidad de Energía Hioki PW3198	88

Tabla de contenidos

6.3.2. Ensayo con señales propuestas en el artículo “Evaluating Alternatives to Voltage Fluctuation and Flicker measurements Based on IEC Standard 61000-4-15” [14]	88
6.4. Ensayo circuito óptico	91
7. Conclusiones y trabajos a futuro	95
7.1. Conclusiones	95
7.2. Trabajos a futuro	96
Apéndices	98
A. Conceptos de Luminotecnia	99
A.1. Flujo Luminoso	99
A.2. Iluminación	100
B. Guia de Usuario	101
C. Descripción de los equipos utilizados	125
C.1. Equipos para la generación de señales	125
C.1.1. Fuente programable de tensión AC/DC APS-1102A	125
C.1.2. Analog Discovery 2	126
C.2. Equipos utilizados para correlacionar resultados	127
C.2.1. Analizador de Calidad de Energía Hioki PW3198	127
C.2.2. Luxómetro LMT Pocket	127
Referencias	129
Índice de tablas	131
Índice de figuras	133

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Calidad de la Energía o Calidad de la Potencia es una rama de la ingeniería eléctrica que centra su estudio en las características que presenta la electricidad en un punto dado del sistema eléctrico. Estas características son evaluadas contra un conjunto de parámetros técnicos de referencia y pueden estar vinculados a la compatibilidad entre la electricidad suministrada y las cargas conectadas [10]. Desde el punto de vista del consumidor, una buena calidad de la energía es tal, que le permita alimentar su equipamiento y que el mismo funcione en sus condiciones de diseño (condiciones nominales de operación), procurando que la vida útil de los equipos sea la nominal [22]. Cualquier apartamiento respecto a los valores nominales de la red (magnitud y frecuencia) pueden categorizarse como un problema vinculado a la Calidad de la Energía.

La calidad de la Energía es importante para muchos actores:

- Los distribuidores de Energía.
- Los consumidores finales.
- Los entes reguladores de los servicios eléctricos.
- Los fabricantes de equipamiento de uso final.

El operador de la red es el responsable de garantizar el cumplimiento de ciertos estándares de calidad de la red que proporciona. Los entes reguladores son quienes deben monitorear y cuantificar la calidad de la energía. La buena calidad de la energía garantiza un buen funcionamiento del equipamiento y la duración normal del mismo, lo que es de sumo interés para el cliente final y para los fabricantes de equipamiento de uso final.

Dentro de los problemas vinculados a la calidad de la energía que presentan las redes eléctricas se encuentra el fenómeno de Flicker: es la impresión de inestabilidad en la sensación visual, debido a un estímulo luminoso cuya luminosidad

Capítulo 1. Introducción

fluctúa en el tiempo. Cuando una red eléctrica sufre un apartamiento de sus condiciones nominales, producido por modulaciones en la amplitud de la tensión, con una frecuencia de modulación que varía entre 0,5 Hz y la frecuencia de fusión de imágenes,¹ y estos fenómenos se prolongan en el tiempo con una duración suficiente para permitir la visualización del cambio de la intensidad luminosa, estamos en presencia de un fenómeno de Flicker.

La percepción de parpadeo de un individuo depende del entorno en el que el sujeto se encuentra, del ojo, del cerebro y del sistema nervioso central. Tanto la percepción de este, como el estrés que genera es subjetivo, encontrándose notorias diferencias entre diferentes sujetos pese a que se encuentren sometidos a las mismas condiciones. La necesidad de una medición objetiva y cuantitativa motivó el desarrollo del Flickermeter, instrumento de medición que simula el efecto que tienen las variaciones de tensión en la lámpara y en el individuo, desarrollándose un sistema lámpara-ojo-cerebro [22]. La unidad de medida de la sensibilidad es el P_{st} , siendo 1 el umbral de sensibilidad para el cual se considera que el 50 % de los observadores perciben la molestia [10].

A diferencia de otros problemas vinculados a la calidad de la Energía, el efecto del parpadeo tiene una consecuencia directa en las personas, lo que motivó a que comenzara a estudiarse este fenómeno tempranamente, habiendo publicaciones desde el año 1930.

1.2. Antecedentes

En la presente sección se realiza una breve reseña histórica de la evolución de los estudios sobre la incidencia del fenómeno de flicker y la medición de P_{st} , basada en lo documentado en el libro “Calidad de Potencia para usuarios y empresas eléctricas” de Juan Carlos Gómez Targarona [22] y el artículo “Electric Utility Flicker Limitations” publicado en IEEE Transactions on Industry Applications [23]

A principio del siglo XX, la iluminación era el uso mayoritario que se le daba a la electricidad. En este contexto, la calidad del “producto electricidad” estaba ligado a que las lámparas emitieran un flujo luminoso constante (no parpadearan). Con la incorporación a gran escala de motores en la red eléctrica los fenómenos de parpadeo aumentaron y en consecuencia motivaron la investigación en torno a dicho fenómeno que comenzó en la década de 1920.²

¹A partir de esta frecuencia (entre 40 y 56Hz) desaparece la percepción del parpadeo, ya que las intermitencias de luminosidad dejan de ser percibidas por los humanos.

²En esta época otros problemas vinculados a la calidad de la energía no se podían cuantificar fácilmente como los huecos o transitorios, y otros prácticamente no tenían lugar en la red eléctrica como los armónicos, ya que aun no existía la electrónica de potencia (que se desarrolló en la segunda mitad del siglo XX) y solo ocurría dicho fenómeno por saturación de núcleos magnéticos.

1.2. Antecedentes

Alrededor de 1930 la empresa General Electric en Estados Unidos realizó un estudio de parpadeo relacionado a fluctuaciones de tensión que permitió definir fronteras de visibilidad e irritación. Este estudio se incluyó en el libro: General Electric's Distribution Data Book (GET-1008L) [3] y ha sido ampliamente adoptado por las empresas eléctricas. Uno de sus aportes es el uso de la variación en voltaje normalizada, presentando el peso de la modulación en por ciento. Ésta sigue siendo la forma en la que se presentan el peso de las modulaciones respecto a la señal fundamental, en las publicaciones actuales:

$$\frac{\text{valor } r.m.s. \text{ de la señal } \textit{distorsionada}}{\text{valor } r.m.s. \text{ de la señal } \textit{fundamental}} * 100$$

Utilities Coordinated Research Inc. publicó en 1937 un informe titulado “La percepción visual y la tolerancia del parpadeo” [21]. Este era un completo resumen de las investigaciones sobre parpadeos realizadas hasta la fecha al cual le adicionaron investigaciones y conocimiento propio. Los ensayos consistían en alimentar una lámpara incandescente variando su voltaje para hacer que las lámparas parpadearan, y distintos individuos evaluaban el comportamiento de las mismas. Si bien se apreciaba diferencias en la sensibilidad de los individuos frente a la misma fluctuación de la luz, se pudieron establecer umbrales mínimos de percepción. Algunas de las conclusiones importantes son [23]:

- En frecuencias más altas que 1 Hz se puede clasificar como molesto todo parpadeo perceptible, pero a medida que baja la frecuencia de las fluctuaciones de tensión el umbral de tolerancia se vuelve más subjetivo y es influenciado por el entorno, el tamaño de la lámpara, la duración del parpadeo y su intensidad, la actividad que este desarrollando el observador, etc.
- Todos estos factores que influyen en el observador dificultan replicar el ambiente doméstico en el laboratorio, especialmente para parpadeos que se producen con frecuencias menores a una vez por hora.

En 1958 Consolidated Edison presentó nuevas curvas del umbral de parpadeo que son más permisivas que las presentadas por General Electric, sin embargo estas curvas se limitan a servicios radiales secundarios y a las redes de distribución subterráneas (servicios que van desde una única residencia a pequeñas industrias con cargas mayores a 100kW). Para las líneas de distribución primarias, el umbral que presenta Consolidated Edison se vuelve mucho más restrictivo quedando más próximo a la curva de General Electric.

Capítulo 1. Introducción

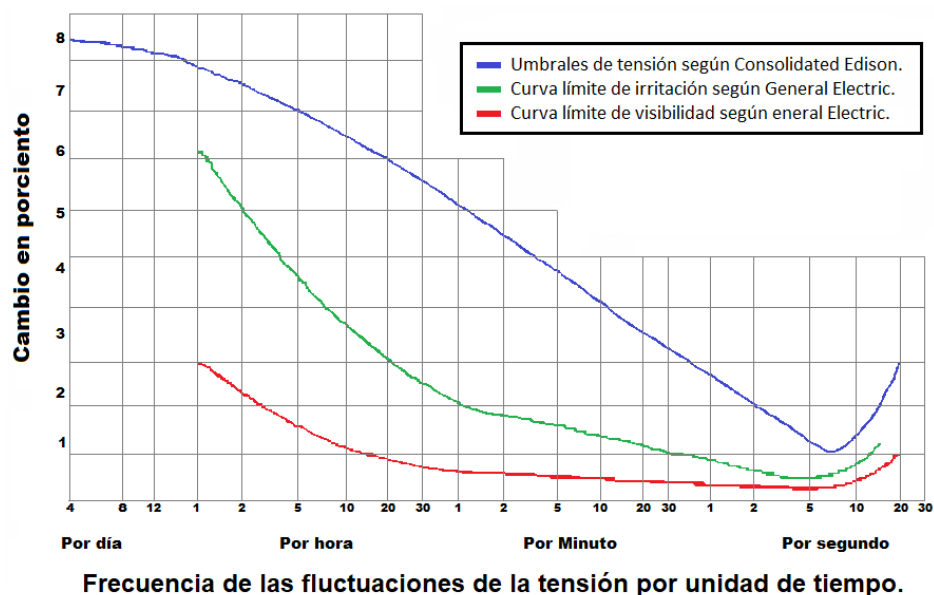


Figura 1.1: Comparación de los estudios de percepción del Flicker realizados por General Electric y Consolidated Edison [23].

En 1959 Westinghouse, en su libro de referencia de ingeniería de servicios eléctricos y servicios públicos, volumen 3, publicó un estudio sobre los límites de parpadeo y normas usadas por las empresas eléctricas que alimentaban a más de un millón de usuarios. La conclusión del autor manifestaba que las normas de las empresas eran probablemente demasiado conservadoras. También manifestaba que los límites razonables de fluctuación deben de caer próximo a la curva de parpadeo objetable desarrollada por la empresa Consolidated Edison, que se muestra en azul en la figura 1.1. Dicha curva fue incluida posteriormente en la norma IEEE 141-1969 (“Práctica recomendada para la distribución de energía eléctrica para plantas industriales”).

En 1979 en Estados Unidos se realizó un estudio que involucró a más de 100 empresas eléctricas indicando qué pautas utilizaban para medir la calidad de la energía respecto al fenómeno de Flicker. También presentaron en el mismo estudio un análisis del sistema eléctrico que permitió juzgar el efecto que tendrían en el sistema eléctrico nuevas cargas, con el fin de determinar si el aumento de la carga es aceptable en ese contexto.

En una conferencia realizada por la IEEE en 1982, “Sources and Effects of Power System Disturbances” se presentó un estudio realizado en Inglaterra sobre la percepción de Flicker de frecuencia única. El resultado fue de una sensibilidad más baja que la curva de la General Electric, dicha curva se la denominó “UIE Internacional”. Ambas gráficas son muy parecidas y la diferencia está dada por el ambiente en el que se realizó la prueba. Esto permitió concluir que el Flicker depende de frecuencias múltiples.

1.3. Cuestionamientos Actuales al Flickermeter.

En 1985 se presentó un estudio que comparaba las curvas de Flicker de 85 compañías eléctricas de América del Norte, generándose una curva promedio con las mismas. El resultado fue que la curva resultante coincidía con la curva de General Electric para frecuencias mayores a un ciclo por minuto.

1.3. Cuestionamientos Actuales al Flickermeter.

En esta sección se pretende profundizar en los cuestionamientos actuales sobre la medición de P_{st} y la relación entre la medición de P_{st} y los niveles de flicker de las lámparas. Esto trae como consecuencia que se esté investigando sobre cambios a proponerse para la norma IEC-61000-4-15 [12] y sobre los Flickermeters. Es por este proceso de revisión sobre la medición de P_{st} y sobre la norma que es relevante tener un instrumento con fines académicos, que permita acceder al software en su totalidad y poder alterarlo, que sea capaz de relacionar mediciones de P_{st} y de iluminancia.

Actualmente existe poca correlación entre la medición de altos valores de flicker (mediciones con altos valores de P_{st}) y el volumen de quejas de los clientes [6]. En la presente sección se abordarán algunas hipótesis que pretenden explicar este fenómeno contenidas en el informe de CIGRE: “Review of flicker objectives for LV, MV and HV systems” [6] y en el paper “Evaluating alternatives to voltage fluctuation and flicker measurements based on IEC standard 61000-4-15” presentado en “2016 10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)” [14].

Una de las razones que pueden explicar este comportamiento es el cambio tecnológico en las lámparas, ya que los modelos incandescentes han perdido su cuota de mercado frente a lámparas más modernas. La medida de Flicker esta basada en el comportamiento de una lámpara incandescente frente a variaciones de la tensión que la alimenta (en la sección 3.2 se detalla la estructura del bloque 4 donde se modela su comportamiento frente a estas fluctuaciones). Las lámparas modernas responden distinto a las fluctuaciones de tensión, de hecho hay distintos modelos responden de distinta forma: los sistemas de iluminación (LEDS y LFC³) con dimmers pueden ser más sensibles que una lámpara incandescente, mientras que otras lámparas modernas son del orden de 6 a 8 veces menos sensibles a las fluctuaciones de tensión. En la figura 1.2 se muestra las curvas del umbral de molestia ($P_{ST} = 1$) de distintas lámparas que ejemplifican lo expuesto anteriormente.

Sin embargo, no hay información concluyente sobre la repercusión del Flicker en el resto del equipamiento de los usuarios de baja tensión (tener en cuenta que debería de estudiarse todos los equipamientos de baja tensión), aunque se sabe que los sistemas de control industriales que usan PLL (phase-locked loop) pueden ser

³Lámparas fluorescentes compactas

Capítulo 1. Introducción

sensibles a fluctuaciones de tensión debido a interarmónicas asociadas a flicker. Se entiende que es pertinente estudiar las repercusiones en el resto del equipamiento de baja tensión al estar expuesto a redes con altos valores de P_{st} antes de evaluar un cambio de limitación de niveles de flicker.

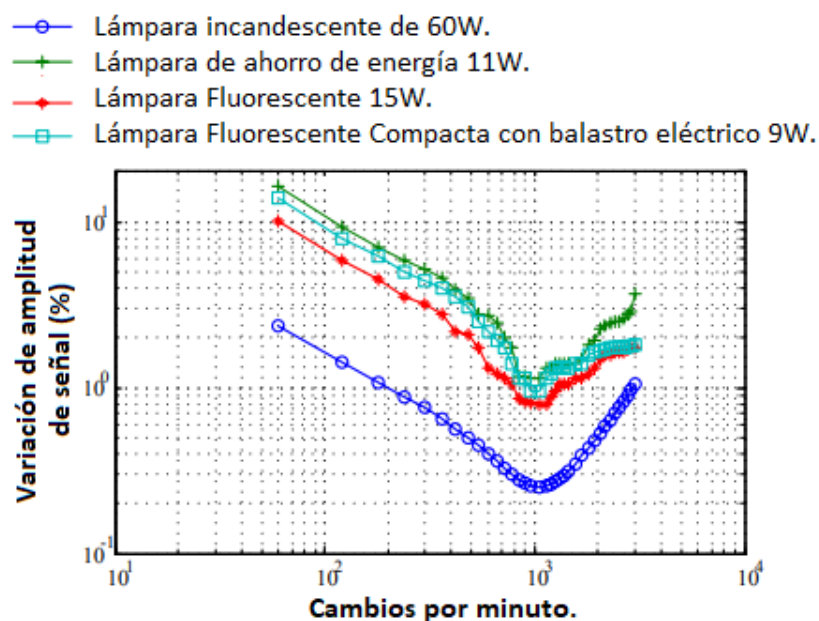


Figura 1.2: Curvas de $P_{inst}=1$ para distintos tipos de lámparas con modulaciones sinusoidales [6].

Otro de los cuestionamientos actuales tiene que ver con la etapa final de la medición que realiza el Flickermeter (más precisamente en el bloque 5 que se desarrolla en la sección 3.3.5). Las modulaciones complejas que presenta la señal de tensión no se abordan de manera suficiente mediante el algoritmo del bloque 5.

El algoritmo de procesamiento estadístico del Flickermeter (bloque 5) está diseñado de forma tal que el resultado sea $P_{st} = 1$ para los puntos que se encuentran en el umbral de molestia visual (puntos de la curva de General Electric, figura 1.1). El problema es que los puntos conocidos de molestia visual corresponden a una prueba de 10 minutos con una única modulación de magnitud y frecuencia. En realidad, las modulaciones de voltaje de la frecuencia de alimentación debido a las cargas fluctuantes son mucho más complejas, se combinan múltiples fluctuaciones con diferentes valores en magnitud y frecuencia [8]. Es de esperarse que durante la ventana de 10 minutos en la que dura la medición de P_{st} se encuentren varias modulaciones diferentes sobre la señal fundamental.

Al concatenarse distintas señales que dan $P_{st} = 1 \pm 0,05$ por el mismo período de tiempo para formar una señal de 10 minutos (ver figura 1.3) y evaluando dicha señal

1.3. Cuestionamientos Actuales al Flickermeter.

se espera que el resultado hallado sea $P_{st} = 1 \pm 0,05$ ⁴. Sin embargo el resultado no es siempre el esperado, habiendo casos en el que el mismo es considerablemente más alto que 1. Esto puede ser un motivo que explique por que razón mediciones de P_{st} alto no se relacionan con el volumen de reclamos de clientes. Estos ensayos fueron replicados con el sistema de medición construido y se encuentran detallados en la sección 6.3.2.

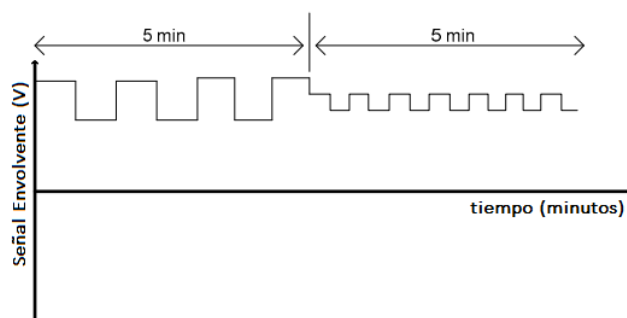


Figura 1.3: Concatenación de dos señales de 5 minutos para formar una señal de 10 minutos [14].

Otro caso de estudio actual sobre el fenómeno de Flicker tiene que ver con las consecuencias de los cambios rápidos de tensión y su inducción de sensación de malestar en los usuarios, aunque no hay parpadeo de acuerdo a la definición de Flicker en la norma IEC 61000-4-15 [12]. Este tipo de fluctuaciones no están bien definidas ni hay métodos de medición estandarizados.

Se definen los cambios rápidos de voltaje como cambios en los valores r.m.s. de medio ciclo de la señal fundamental. Son generalmente transiciones rápidas entre dos estados estacionarios (periodo que dura al menos un segundo), también podría ser de forma cíclica o repetitiva. Estos cambios se originan en instalaciones fluctuantes: instalaciones en cuya operación se realicen conmutaciones (como: arranque de motores, encendido/apagado de banco de condensadores, encendido y apagado de carga, cambios en los taps de transformadores, etc.) o por variaciones repentinas de carga y por variaciones en la salida de potencia de generadores solares o eólicos. Los cambios de voltaje pueden contribuir al parpadeo de la luz, provocar el mal funcionamiento de sistemas de control que actúan sobre el ángulo de voltaje, frenar o acelerar motores eléctricos, entre otras cosas. Relacionado específicamente con el Flicker de las fuentes lumínicas podemos afirmar que cuando la tasa de repetición es muy baja se induce cierta incomodidad psicológica que induce el sentimiento de que algo malo está sucediendo en la red, esto ocasionalmente induce a quejas (aunque no se produce Flicker según la definición de la norma IEC 61000-4-15 [12]).

⁴El concatenado se debe realizar en un cruce por cero de la señal para eliminar transitorios

1.4. Estructura del Proyecto

El Proyecto tuvo como objetivo general construir y poner a punto un sistema que mida en forma simultánea iluminancia de una fuente luminosa (entrada óptica) y P_{st} en la tensión de alimentación de dicha fuente (entrada de tensión). La medición de P_{st} debe de hacerse de acuerdo a la norma IEC 61000-4-15.

El instrumento fue solicitado por el Grupo de Calidad de la Energía del Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de la República para ser utilizado en investigaciones, en particular en la revisión de la norma IEC 61000-4-15 sobre medición de Flicker. Por esto es relevante que el sistema permita la edición del software, optándose por un lenguaje ampliamente conocido por la academia.

A diferencia de los instrumentos industriales que miden P_{st} , este sistema de medición cuenta con una interfaz óptica, la cual brinda la oportunidad de correlacionar resultados de iluminancia de una lampara incandescente y P_{st} , algo que posibilitará investigaciones con la correlación de ambas mediciones.

Otro requerimiento era la necesidad de poder descargar los ensayos realizados. En ese aspecto el sistema de medición permite descargar archivos con formato “.mat” y posteriormente volver a importarlo para su posterior análisis.

Para la realización del proyecto se contaba con un conversor Analógico Digital, que fue proporcionado. Partiendo de las características del conversor se trabajó en el circuito de adaptación de señales, el cual tiene como objetivo acondicionar la señal para que la misma pueda ser digitalizada. En particular se debía cumplir con la restricción que el conversor tenía en sus terminales analógicas, que permitía una señal con un voltaje diferencial inferior a los 11V. Además se debió procurar que la señal a medir fuera digitalizada y reconstruida con exactitud sin que la misma sufriera alteraciones introducidas por el circuito diseñado, para garantizar que el resultado obtenido refleje fielmente la señal que se quiere estudiar (manteniendo el peso que tienen las fluctuaciones sobre la señal principal).

El desarrollo del software implicó la construcción de un Flickermeter digital, siendo la entrada al software la señal digitalizada de la tensión tanto para la medición del P_{st} como para la medición de Iluminancia. El software además permite la generación de señales digitales a través de un ”banco de señales”, siendo esto de utilidad para probar los bloques de medición de P_{st} .

Como resultado, el sistema de medición despliega los valores de P_{st} , da la posibilidad de observar gráficamente P_{inst} en función del tiempo y de visualizar la gráfica de iluminancia en función del tiempo cuando la misma es capturada.

1.5. Estructura del Documento

A continuación, se presenta una breve descripción del contenido de cada capítulo.

- Capítulo 2: *Conceptos de Luminotecnia*. Se introducen conceptos sobre Iluminación que se entienden necesarios para una mejor comprensión del circuito implementado, las pruebas y ensayos realizados al mismo.
- Capítulo 3: *Flicker*. Se presenta el fenómeno de Flicker y sus causas. Se realiza una introducción al fenómeno fluctuaciones de tensión, se presenta el comportamiento de las lámparas incandescentes y la flickercurve.
- Capítulo 4: *Flickermeter según la norma IEC 61000-4-15*. Se introduce la norma y como la misma expone el calculo de P_{st} . Profundizándose en el desarrollo de cada bloque y en los ensayos que el instrumento debe cumplir para satisfacer la normativa.
- Capítulo 5: *Sistema de medida construido: Hardware*. Se detalla el hardware construido y su interacción con la Placa Conversora Analógica Digital. Presentándose la adaptación de señales para la medida de P_{st} y de Iluminancia.
- Capítulo 6: *Sistema de medida construido: Software*. Se realiza una reseña del software construido resaltándose los aspectos más notorios.
- Capítulo 7: *Ensayos*. Para validar el sistema realizado fue necesario ensayarlo tal como la norma IEC 61000-4-15 establece. Se presentan los resultados encontrados para dichos ensayos, además de ensayos para la medición de iluminancia y ensayos varios para analizar el comportamiento del sistema de medición.
- Capítulo 8: *Conclusiones y trabajos a futuro*. Se presentan aquí las conclusiones extraídas del proceso de realización del sistema de medición y los posibles trabajos a futuro a realizar utilizando el sistema de medición construido, así como mejoras sobre el sistema de medición.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 2

Flicker

En el presente capítulo se profundizará en el fenómeno de Flicker y sus causas, y en las fluctuaciones de tensión. Lo aquí presentado se encuentra basado en el libro “Signal Processing of Power Quality Disturbances” de M. Bollen y I. Gu [15], por más detalle remitirse a él.

En el apéndice A se presentan distintos conceptos de iluminacion para una mejor comprensión del fenómeno Flicker.

2.1. Introducción

Las fluctuaciones de voltaje en los sistemas de energía causan una serie de efectos técnicos dañinos que resultan en fallas o en la interrupción de los procesos de producción como ser: afectar sistemas de control que actúan sobre el ángulo de la tensión, acelerar o frenar motores, deteriorar el equipo electrónico, afectar el funcionamiento de relés, etc. Sin embargo, el efecto mas importante que producen estas fluctuaciones en la intensidad del flujo luminoso, generando Flicker. Al ser un efecto fisiológico sobre la visión de las personas, este fenómeno afecta la ergonomía del entorno de producción, causando fatiga del operador y niveles de concentración reducidos.

Como fue mencionado en el capítulo introductorio, se denomina Flicker al fenómeno que implica la variación de la intensidad del flujo luminoso que afecta a la visión de las personas, generado por fluctuaciones en la tensión.

La forma en que el Flicker producido por un equipo de iluminación afecta a las personas, depende de la tensión y frecuencia de la perturbación y del propio observador. Por lo tanto, es necesario realizar estudios sobre distintos grupos de personas, para poder evaluar la molestia producida por el Flicker a un observador medio en distintas condiciones de iluminación y determinar parámetros de molestia para el Flicker. Los efectos adversos del Flicker en las personas incluyen molestia, disminución del rendimiento de la tarea, fatiga visual, dolor de cabeza,

Capítulo 2. Flicker

ataque epiléptico en personas fotosensibles, entre otras. Estos efectos son debido al cansancio prematuro en la vista e irritabilidad en las pupilas por estar en continua dilatación y contracción para ajustarse al nivel de iluminación.

2.2. Causas del Flicker

El parpadeo del flujo luminoso, se debe principalmente a las fluctuaciones en la tensión de alimentación, que puede ser causado por perturbaciones introducidas durante la generación, transmisión o distribución de energía. Sin embargo, frecuentemente estas variaciones en la tensión se producen por cambios bruscos en las cargas conectadas a la red de energía eléctrica, cargas que tienen una demanda de potencia activa y reactiva rápidamente fluctuante.

A continuación se realiza una breve reseña de las principales fuentes de perturbación de la tensión.

Horno de arco

Este es un horno que calienta por medio de un arco eléctrico. Consiste en un recipiente recubierto con material refractario, que contiene el material a fundir (trozos de metal) y tres electrodos que producen arcos eléctricos entre ellos. Aproximadamente 450 a 600 kWh de energía térmica son necesarios para procesar una tonelada de hierro y transformarlo en acero fundido utilizable.

Los ciclos de arranque y fundición del horno de arco (en funcionamiento normal) están caracterizados por variaciones aleatorias de gran magnitud en la potencia reactiva absorbida por éste.

Las fluctuaciones de tensión son consecuencia de las variaciones aleatorias de la longitud del arco eléctrico, esto produce fluctuaciones aleatorias en la corriente tomada por el horno. Es por este motivo que las variaciones de tensión serán proporcionales a la potencia del horno, en particular en relación a la potencia de corto circuito de la red. El horno de arco es el principal generador de Flicker.

2.3. Descripción de las fluctuaciones de tensión

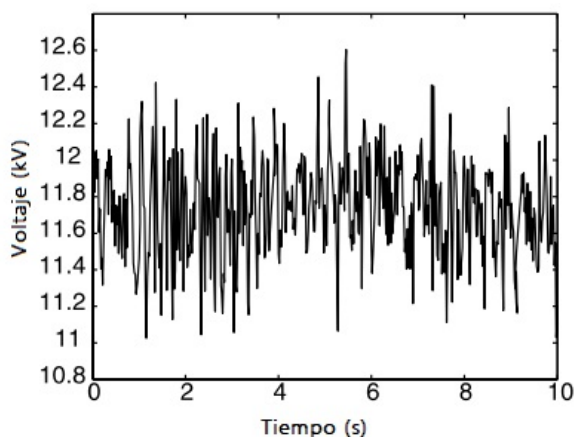


Figura 2.1: Fluctuaciones de voltaje en la red debido al funcionamiento del horno de arco durante un ciclo de trabajo del mismo [15].

Máquinas de soldadura por arco

La técnica de soldadura por arco eléctrico consiste en la fusión de un metal a temperatura elevada por empleo de un diferencial de potencial creándose un arco por el aire, entre el electrodo y la pieza a soldar. Estas máquinas representan para la red, cargas con un alto índice de cambios de potencia (ciclos repetitivos de soldaduras) con respecto a la capacidad de cortocircuito en el punto de conexión al instrumento, generando oscilaciones bruscas del voltaje. El consumo total de energía es pequeño en comparación con la demanda de potencia instantánea que produce.

Motores de inducción

Durante el arranque de motores de gran potencia o de grupos de motores con cargas variables, se producen caídas de tensión debido a las corrientes de arranque del motor que producen fluctuaciones de voltaje.

2.3. Descripción de las fluctuaciones de tensión

Considerando que el Flicker es un fenómeno que está fuertemente relacionado con las variaciones del valor eficaz de la tensión y con la frecuencia con la que estas ocurren, es necesario introducir definiciones y ecuaciones matemáticas para poder representarlas para un posterior estudio del Flickermeter. La fluctuación de tensión se puede suponer como una modulación AM sobre la tensión de la red. La presencia de la modulación produce que la tensión eficaz de medio ciclo oscile entre determinados valores y no tenga un valor constante, como se aprecia en la figura 2.2.

Se introduce el concepto de Variación Relativa de Tensión para representar la severidad que producen las fluctuaciones de tensión, expresada a través de la

Capítulo 2. Flicker

ecuación 2.1.

$$\frac{\Delta V}{V} * 100 \% \quad (2.1)$$

En donde V es la amplitud de la señal cuando no hay perturbaciones y ΔV es la diferencia entre las amplitudes máxima y mínima cuando hay perturbación.

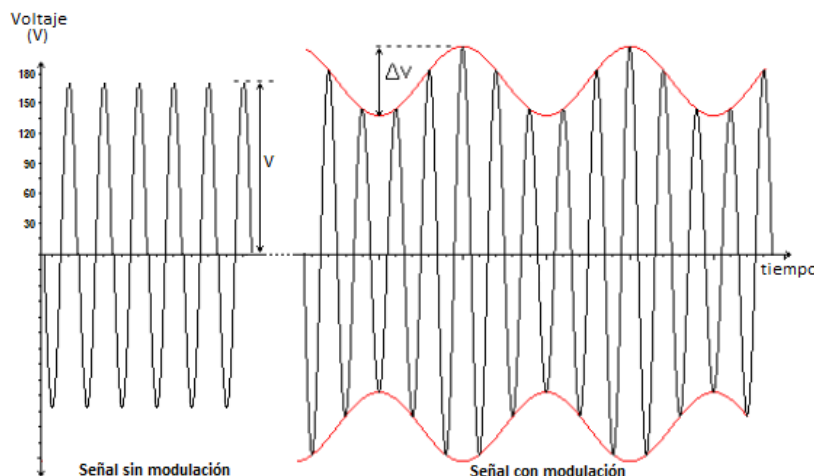


Figura 2.2: Señal de 120 Vrms/50 Hz, con y sin fluctuación de tensión.

A continuación se presenta el modelo analítico de las fluctuaciones de tensión.

En la ecuación 2.2 se describe la modulación en amplitud de la tensión de frecuencia fundamental.

$$v(t) = \sqrt{2}V [1 + m(t)] \cos(2\pi f_0 t) \quad (2.2)$$

Donde V es el valor eficaz de la tensión sin distorsión (onda portadora), f_0 la frecuencia fundamental y $m(t)$ la modulación. La expresión 2.2 describe teóricamente cualquier distorsión de tensión mediante la elección apropiada de $m(t)$.

Considerando una fluctuación de tensión sinusoidal de frecuencia f_M , la modulación se puede escribir de la siguiente forma:

$$m(t) = M \cos(2\pi f_M t + \Phi_M) \quad (2.3)$$

Sustituyendo la ecuación 2.3 en 2.2 se obtiene la siguiente ecuación que representa una tensión fluctuante:

$$v(t) = \sqrt{2}V [1 + M \cos(2\pi f_M t + \Phi_M)] \cos(2\pi f_0 t) \quad (2.4)$$

A partir de propiedades trigonométricas¹, la expresión 2.4, puede expresarse como:

¹ $\cos(a)\cos(b) = \frac{\cos(a-b) + \cos(a+b)}{2}$

2.3. Descripción de las fluctuaciones de tensión

$$\begin{aligned}
 v(t) = & \sqrt{2}V \cos(2\pi f_0 t) \\
 & + \frac{1}{2} \sqrt{2}VM \cos(2\pi(f_0 + f_M)t + \Phi_M) \\
 & + \frac{1}{2} \sqrt{2}VM \cos(2\pi(f_0 - f_M)t + \Phi_M)
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

El primer término de la ecuación 2.5 es la onda portadora, el segundo y tercer término se denominan lóbulos laterales, que en el espectro de la frecuencia son componentes a cada lado de la onda portadora como se observa en la figura 2.3. Por lo tanto, las fluctuaciones de tensión pueden ser descritas en el dominio de la frecuencia como lóbulos laterales en los lados opuestos de la frecuencia fundamental.

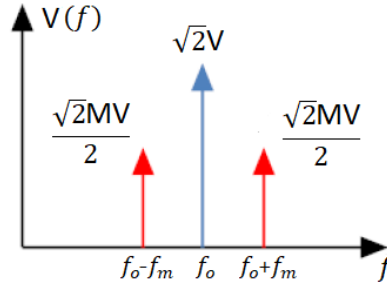


Figura 2.3: Espectro de frecuencia de U.

Esta observación es importante para poder estudiar el efecto que producen las fluctuaciones de tensión en las fluctuaciones de la intensidad del flujo luminoso, debido a que se pueden separar de la onda portadora las fluctuaciones de tensión a través de la demodulación.

Las fluctuaciones de tensión también pueden presentarse en la fase y se denomina modulación de fase pura a la fluctuación que se expresa de la siguiente forma:

$$v(t) = \sqrt{2}V \cos(2\pi f_0 t + \Phi(t)) \tag{2.6}$$

Considerando pequeñas variaciones de fase, $|\Phi(t)| \ll 1$, la ecuación 2.6 puede escribirse de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 v(t) = & \sqrt{2}V \cos(2\pi f_0 t) \cos(\Phi(t)) - \sqrt{2}V \sin(2\pi f_0 t) \sin(\Phi(t)) \\
 v(t) \approx & \sqrt{2}V \cos(2\pi f_0 t) - \sqrt{2}V \Phi(t) \sin(2\pi f_0 t)
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

Para una modulación sinusoidal de fase:

$$\Phi(t) = \Phi \cos(2\pi f_M t + \Phi_M) \tag{2.8}$$

Capítulo 2. Flicker

A partir de propiedades trigonométricas², se puede reescribir la ecuación 2.7:

$$\begin{aligned} v(t) = & \sqrt{2}V \cos(2\pi f_0 t) \\ & - \frac{1}{2} \sqrt{2}VM \cos(2\pi(f_0 + f_M)t + \Phi_M) \\ & - \frac{1}{2} \sqrt{2}VM \cos(2\pi(f_0 - f_M)t + \Phi_M) \end{aligned} \quad (2.9)$$

El resultado obtenido se puede describir como la suma tres términos al igual que el estudio con la modulación de amplitud. El primer término es la onda portadora, el segundo y tercer términos son los lóbulos laterales. La diferencia con respecto a la modulación de amplitud está en el signo correspondiente a los lóbulos laterales.

2.4. Lámparas incandescentes

En el marco del proyecto es pertinente presentar el funcionamiento de las lámparas incandescentes debido que la norma IEC 61000-4-15 [12] basa su análisis lumínico en función de este tipo de lámparas para la realización de un Flickermeter. La norma utiliza dos modelos distintos: lámparas incandescentes de 60W/120V y 60W/230V.

Una lámpara incandescente consiste en un filamento de tungsteno en espiral rodeado por una bombilla llena de una mezcla de nitrógeno y argón. El voltaje en los terminales de una lámpara incandescente genera una corriente a través del filamento de la lámpara, la cual calienta el filamento, comenzando a emitir luz cuando el filamento alcanza una temperatura suficientemente alta (la temperatura en el filamento en estado estacionario es de alrededor de 3500 K). En consecuencia, una fluctuación en el voltaje conducirá a una fluctuación en la intensidad de la luz.

Considerando que se aplica un voltaje $v(t)$ sobre los terminales de una lámpara incandescente y modelando ésta como una resistencia R ; Las pérdidas térmicas que se producen al calentarse el filamento se modelan en la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{in} = \frac{v^2(t)}{R} \quad (2.10)$$

En contrapartida, la pérdida de energía disipada al ambiente enfriará el filamento llegando a un equilibrio térmico, obteniéndose la siguiente expresión:

$$m_f c_1 \frac{dT_f}{dt} = \varepsilon_{in} - \varepsilon_{out} \quad (2.11)$$

- T_f : temperatura del filamento.
- c_1 : el calor específico del tungsteno.

² $\cos(a)\cos(b) = \frac{\cos(a-b) + \cos(a+b)}{2}$

2.4. Lámparas incandescentes

- m_f : la masa del filamento.
- ε_{in} : energía consumida en calentar el filamento.
- ε_{out} : energía entregada al ambiente.

La transferencia de calor del filamento al ambiente es una combinación de conducción, convección y radiación. Como la bombilla está llena de gas, la conducción tendrá una contribución menor con respecto a las demás. La transferencia de calor debido a la radiación y convección dependen de factores cuyo análisis detallado queda por fuera del alcance de este proyecto. Por lo tanto, para determinar la transferencia de calor del filamento al medio ambiente se asumirá una relación linealmente proporcional con la diferencia de temperatura. Esta relación se cumple en casos excepcionales como por ejemplo con convección forzada, pero se demostrará posteriormente que esta suposición se corresponde con el modelo comúnmente utilizado para una lámpara incandescente representado por un filtro pasabajo de primer orden.

Finalmente, la ecuación 2.12 representa la transferencia de calor total al ambiente.

$$\varepsilon_{out} = c_2 T_f \quad (2.12)$$

La resistencia del metal en el filamento es proporcional a la temperatura:

$$R = c_3 T_f \quad (2.13)$$

Entonces, combinando las ecuaciones 2.10, 2.11, 2.12 y 2.13 tenemos la siguiente ecuación diferencial para la temperatura del filamento:

$$m_f c_1 \frac{dT_f}{dt} = \frac{v^2(t)}{c_3 T_f} - c_2 T_f \quad (2.14)$$

Suponiendo que el voltaje varía de forma sinusoidal:

$$v(t) = \sqrt{2}V \cos(\omega_0 t) \quad (2.15)$$

Sustituyendo 2.15 en 2.14 obtenemos una ecuación diferencial lineal en función de T_f^2 :

$$\frac{1}{2} m_f c_1 c_3 T_f \frac{dT_f}{dt} + \frac{1}{2} c_2 c_3 T_f^2 = V^2 \cos^2(\omega_0 t) \quad (2.16)$$

$$\cos^2(\omega_0 t) = \frac{1 + \cos(2\omega_0 t)}{2} \quad (2.17)$$

$$m_f c_1 c_3 T_f \frac{dT_f}{dt} + c_2 c_3 T_f^2 = V^2 + V^2 \cos(2\omega_0 t) \quad (2.18)$$

Capítulo 2. Flicker

En estado estacionario ($\frac{dT_f}{dt} = 0$), tenemos la siguiente expresión:

$$T_f^2 = \frac{V^2 + V^2 \cos(2w_0 t)}{c_2 c_3} \quad (2.19)$$

A su vez, sabemos que en estado estacionario T_f^2 se compone por un término constante y un término que varía sinusoidalmente con una frecuencia igual al doble que la frecuencia de la tensión aplicada.

$$T_f^2 = T_{f0}^2 + \Delta T_f^2 \cos(2w_0 t + \xi) \quad (2.20)$$

Por lo tanto, comparando 2.20 con 2.19 se obtiene la siguiente expresión para la temperatura promedio del filamento en estado estacionario:

$$T_{f0} = \frac{V}{\sqrt{c_2 c_3}} \quad (2.21)$$

De la ecuación 2.21 se desprende que la temperatura promedio en estado estacionario depende de la eficiencia de la transferencia de calor al ambiente y la resistencia del filamento.

Alternativamente, la lámpara puede modelarse como un filtro paso bajo de primer orden de $v^2(t)$ a $T_f^2(t)$. Reescribiendo la ecuación 2.14 se obtiene:

$$\frac{dT_f^2}{dt} + \frac{T_f^2}{\tau_f} = \frac{v^2(t)}{\tau_f c_2 c_3} \quad (2.22)$$

Con $\tau_f = \frac{m_f c_1}{2c_2}$ representando la constante de tiempo térmica de la lámpara, que depende de la masa del filamento y de la eficiencia de la transferencia de calor al medio ambiente.

Las constantes de tiempo típicas son 19 ms para una lámpara de 230 V/60 W y 28 ms para una lámpara de 120 V/60 W.

La ecuación diferencial 2.22 puede desarrollarse un poco más utilizando el conocimiento de la temperatura media del filamento T_{f0} para la tensión eficaz nominal V_0 .

De la ecuación 2.21 se obtiene:

$$T_{f0} = \frac{V_0}{\sqrt{c_2 c_3}} \Rightarrow c_2 c_3 = \left(\frac{V_0}{T_{f0}} \right)^2 \quad (2.23)$$

Sustituyendo en 2.22:

$$\frac{1}{T_{f0}^2} \frac{dT_f^2}{dt} + \frac{1}{\tau_f} \frac{T_f^2}{T_{f0}^2} = \frac{1}{\tau} \frac{v^2(t)}{V_0^2} \quad (2.24)$$

Se obtiene un modelo (basado en el supuesto de que la pérdida de calor con el ambiente es linealmente proporcional a la temperatura del filamento)³ que pro-

³ Para modelos de convección más precisos y para incluir la pérdida de calor debido a la radiación, la ecuación diferencial resultante será no lineal y no se puede resolver sin el uso de métodos numéricos.

2.4. Lámparas incandescentes

proporciona la temperatura del filamento en función de la tensión de alimentación.

Asumiendo que el filamento se comporta como un radiador de cuerpo negro, se puede aplicar la ley de radiación de Planck para determinar la cantidad de luz emitida en función de la temperatura. De acuerdo con dicha ley, la cantidad de energía por unidad de volumen en un intervalo de longitud de onda $[\lambda, \lambda + d\lambda]$ se puede calcular a partir de:

$$dW = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{d\lambda}{e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)} - 1} \quad (2.25)$$

- h : constante de Planck.
- k : constante de Boltzmann.
- c : velocidad de la luz.

Esta relación se puede observar en la Figura 2.4 para cinco valores diferentes de la temperatura T : 90, 95, 100, 105 y 110 % de la temperatura normal del filamento (3500 K). La figura 2.4 muestra claramente que incluso una variación relativamente pequeña en la temperatura (y por tanto, una variación pequeña en el voltaje) proporciona un cambio muy grande en la cantidad de radiación emitida. La parte visible del espectro electromagnético (400 a 800 nm) está indicada por las líneas verticales celestes.

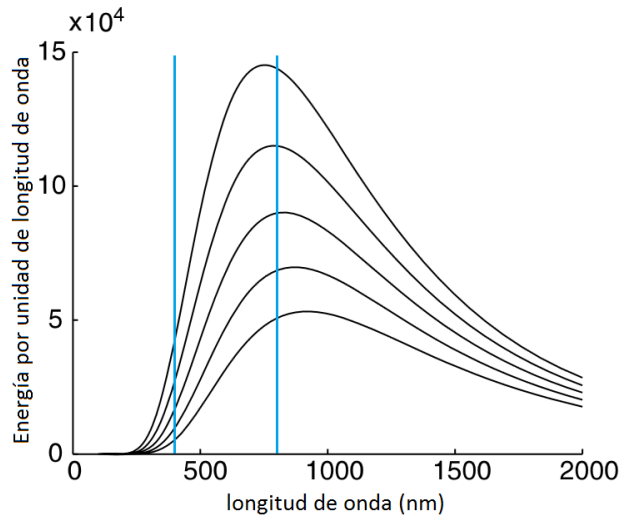


Figura 2.4: Energía por unidad de longitud de onda. Espectros de radiación para cuerpos negros con temperaturas de (arriba a abajo) 3850, 3675, 3500, 3325 y 3150 K.

En la figura 2.5 se integra la radiación emitida sobre la parte visible del espectro, en donde se observa mejor el cambio de energía emitida en relación a variaciones relativamente pequeñas en la temperatura. Esto se utiliza como una

Capítulo 2. Flicker

medida de la intensidad de la luz de la lámpara, el rango de temperatura en la figura 2.5 es solo $\pm 10\%$ alrededor de 3500K, sin embargo, la variación en la intensidad de la luz varía en un factor de valor igual a 4 aproximadamente. Linealizando la curva alrededor de $T=3500\text{K}$ se observa que un cambio del 1% en la temperatura produce un cambio del 6.5% en la intensidad de luz. Este efecto de amplificación, junto con la alta sensibilidad de los ojos para fluctuaciones rápidas en la intensidad de la luz, resulta en que fluctuaciones de voltaje incluso muy pequeñas, conducen a fluctuaciones irritables en la intensidad de la luz.

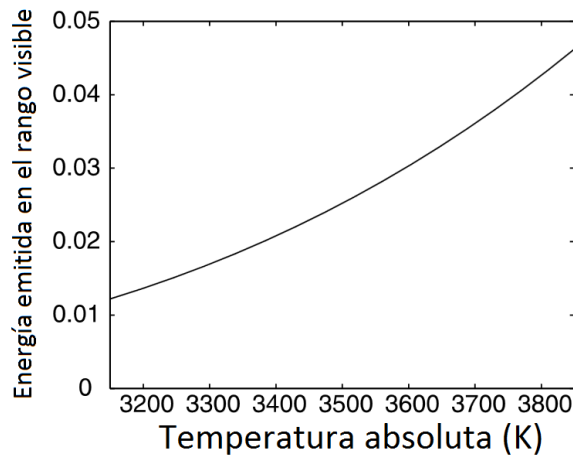


Figura 2.5: Energía total emitida por el cuerpo negro en la parte visible del espectro para temperaturas que oscilan entre $\pm 10\%$ alrededor de 3500 K.

La reacción de una lámpara a las fluctuaciones de tensión se describe por medio del denominado factor de ganancia. El factor de ganancia es la relación entre la fluctuación relativa en la intensidad de la luz y la fluctuación relativa en la tensión:

$$G = \frac{\Delta R/R}{\Delta V/V} \quad (2.26)$$

- ΔR : Fluctuación en la intensidad de la luz.
- R : Intensidad de luz promedio.
- ΔV : Fluctuación en la amplitud de voltaje.
- V : Amplitud de voltaje promedio.

Este factor de ganancia G depende de la frecuencia de la fluctuación. Cada lámpara tiene su propio factor de ganancia en función de la frecuencia.

En base a los estudios [17] y [4] se presenta el factor de ganancia de la siguiente forma:

2.4. Lámparas incandescentes

$$G(f_M) = \frac{K}{\sqrt{1 + (2\pi f_M \tau)^2}} \quad (2.27)$$

- K : factor de ganancia.
- τ : constante de tiempo de las lámparas

La ecuación 2.27 representa un filtro pasabajo de primer orden. En la figura 2.6 se presenta el valor del factor de ganancia para una lámpara incandescente de 60 W/ 230 V y 60 W/120 V y una lámpara fluorescente. Se observa que el factor de ganancia es más alto para una lámpara de 230V que para una lámpara de 120 V de la misma potencia. Por lo tanto, para las mismas fluctuaciones de voltaje, la lámpara de 230 V mostrará fluctuaciones de intensidad de luz más grandes. La lámpara fluorescente muestra fluctuaciones de intensidad de luz mucho menores que las lámparas incandescentes.

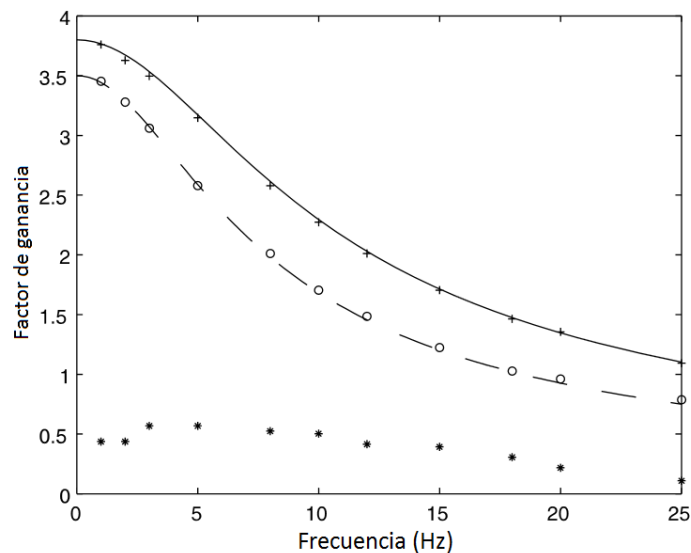


Figura 2.6: Factor de ganancia medida para: lámpara incandescente de 230 V, 60 W (+), lámpara incandescente de 120 V, 60 W (o) y lámpara fluorescente (*) junto con curvas teóricas para lámpara incandescente de 230V, 60W (línea continua) y lámpara incandescente de 120V, 60W (Línea discontinua).

La figura 2.6 también muestra las curvas teóricas basadas en la ecuación 2.27. Para la lámpara de 230 V, se ha utilizado un factor de ganancia $K = 3,8$ y una constante de tiempo $\tau = 21ms$. Para la lámpara de 120 V, se utilizó $K = 3,5$ y $\tau = 29ms$. Este factor de ganancia y la constante de tiempo se eligieron manualmente para obtener un buen ajuste a las curvas. Las constantes de tiempo típicas son $\tau = 19ms$ para una lámpara incandescente de 230 V, 60 W y $\tau = 28ms$ para una lámpara de 120V.

2.5. Percepción del Flicker

La presencia de fluctuaciones en la intensidad lumínica no es directamente un problema, en nuestro caso de estudio sólo es importante cuando las fluctuaciones de voltaje generan la impresión de inestabilidad de la sensación visual (fenómeno de Flicker). Los cambios en la intensidad lumínica que se producen lentamente o que se producen lejanos en el tiempo, son vistos por el observador como simples cambios sin presentar ninguna molestia o sensación de inestabilidad. Con el incremento de la frecuencia de estas fluctuaciones el parpadeo lumínico empieza a generar molestia visual. Si la frecuencia de las fluctuaciones sigue aumentando el observador deja de notar las fluctuaciones y tiene una sensación constante del flujo luminoso que se emite, la frecuencia en la cual el fenómeno se vuelve continuo se conoce como *frecuencia de fusión* o *frecuencia crítica* y esta depende de la iluminación promedio y de la magnitud de las fluctuaciones.

Experimentos sobre la relación entre la *frecuencia de fusión* y la magnitud de las fluctuaciones, llevaron a la descripción del comportamiento cerebro-ojo caracterizado por un filtro (Filtro de Lange), un resumen de estos resultados se pueden encontrar en “Guide to Quality of Electrical Supply for Industrial Installation. Part 5: Flicker and Voltage Fluctuations” [4]. Experimentos posteriores determinaron el modelo Rashbass-Koenderink-van Door que vincula la relación entre las fluctuaciones de la intensidad lumínica y la sensación de Flicker instantáneo y se puede apreciar en la figura 2.7.

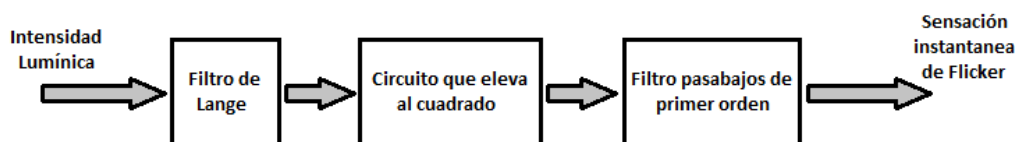


Figura 2.7: Modelo Rashbass-Koenderink-van Door

El modelo de Rashbass-Koenderink-van Door consiste en tres bloques [15]:

- Filtro de Lange: Rashbass y Koenderink demostraron que la respuesta del ojo humano tiene la característica de un filtro pasa banda entre 0,5 Hz y 35 Hz, con una sensibilidad máxima al flujo luminoso a una frecuencia de alrededor de 8-9 Hz.
- Circuito que eleva al cuadrado: Tiene como objetivo obtener la amplitud de las fluctuaciones.
- Filtro pasa bajos de primer orden: Modela la función de memoria de nuestro cerebro

2.6. Curva de Flicker

La curva de Flicker representa la menor fluctuación de tensión que produce la sensación de Flicker en función de la frecuencia de la fluctuación. Es obtenida a partir de la combinación de la curva del factor de ganancia de la lámpara en función de la frecuencia de la fluctuación (ver figura 2.6) y de la intensidad de la fluctuación lumínica en función de la frecuencia con que estas ocurren (filtro de Lange).

Como el factor de ganancia depende del tipo de lámpara, la curva de Flicker también dependerá de ellas. Por lo tanto, según la norma IEC 61000-4-15 [12], los modelos de lámparas que se utilizan para obtener la curva de Flicker son: lámparas incandescentes de 230 V / 60 W y de 120 V / 60 W.

En la figura 2.8 se muestran las curvas de Flicker para fluctuaciones sinusoidales y rectangulares en la tensión.

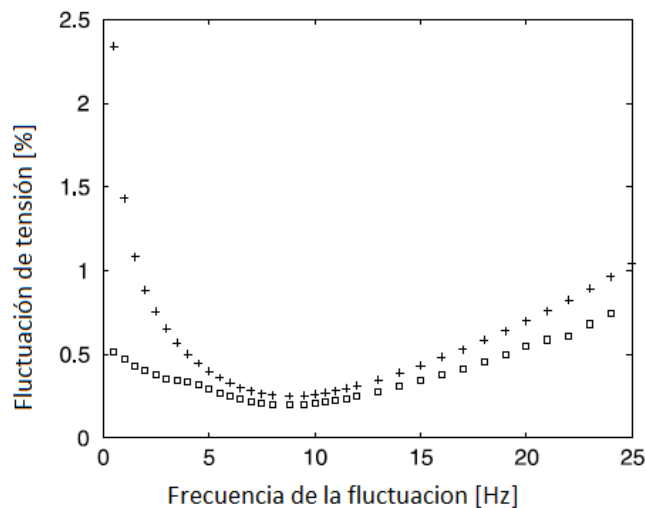


Figura 2.8: Curva de Flicker para fluctuaciones rectangulares (□) y fluctuaciones sinusoidales (+).

De la figura 2.8 se observa que la curva para fluctuaciones rectangulares presenta un umbral menor para la percepción de Flicker. Esto se debe a que las modulaciones rectangulares presentan múltiples componentes de frecuencia, de las cuales cada una de ellas contribuye a la sensación de Flicker instantáneo. Encontrándose el valor más bajo de fluctuaciones de tensión para fluctuaciones rectangulares del orden de los 8.8 Hz, donde alcanza con tener fluctuaciones de 0.2% para generar parpadeo visible.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 3

Flickermeter según la norma IEC 61000-4-15

En el presente capítulo se hará una introducción al instrumento Flickermeter y a los ensayos requeridos para que un instrumento de medición de fluctuaciones de tensión y Flicker sea considerado como tal. Lo presentado aquí se encuentra más detallado en el libro “Signal Processing of Power Quality Disturbances” de M. Bollen y I. Gu [15], y en la norma IEC 61000-4-15 [12].

3.1. Introducción

Durante muchos años la curva de Flicker o Flickercurve introducida en la sección 2.6 fue utilizada para evaluar la severidad de las fluctuaciones de tensión, con la salvedad de que la curva fue desarrollada para fluctuaciones rectangulares, por lo tanto, para distintos tipos de fluctuaciones, sinusoidales o triangulares era necesario considerar un factor de corrección. Sin embargo, para fluctuaciones irregulares, o para el análisis de medidas realizadas, esto presentaba complicaciones.

Para determinar el Flicker debido a fluctuaciones de tensión arbitrarias se desarrolló e implementó la norma IEC 61000-4-15 [12] donde se introduce el instrumento Flickermeter. Este se basa en el modelo de Rashbass para la percepción del Flicker como se observa en la figura 2.7, sin embargo a diferencia del modelo de Rashbass en donde la señal de entrada es la intensidad lumínica, en el Flickermeter la señal de entrada es la tensión y los valores a salida son parámetros que determinan la sensación de molestia debido al Flicker.

La norma introduce parámetros para cuantificar el grado de molestia debido al Flicker, representados por los índices P_{inst} , P_{st} y P_{lt} . P_{inst} se relaciona con la capacidad de un observador humano para ver el parpadeo de la luz. P_{st} representa la severidad de Flicker a corto plazo y se relaciona con las objeciones de un observador humano al nivel del parpadeo de la luz. P_{lt} representa la severidad de Flicker a largo plazo.

Capítulo 3. Flickermeter según la norma IEC 61000-4-15

La figura 3.1 muestra el diagrama de bloques simplificado del modelo del Flickermeter especificado en la norma IEC 61000-4-15.

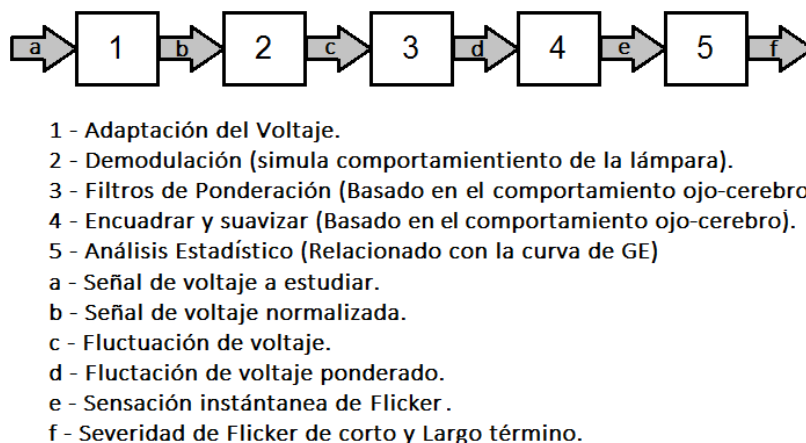


Figura 3.1: Diagrama de bloques y señales del Flickermeter [15].

El diagrama de bloques representa cómo a partir de relevar una señal con fluctuaciones de tensión en un punto de estudio determinado, se puede simular su efecto en un modelo que representa a la lámpara incandescente (establecida como referencia por la norma) y el efecto que las fluctuaciones lumínicas producen a las personas (modelo lámpara-ojo-cerebro), para obtener una representación de la sensación visual que experimenta un observador medio (sensación instantánea de Flicker). Sin embargo, las personas reaccionan de manera diferente a las variaciones en la intensidad del flujo luminoso, por este motivo, el valor de sensación instantánea de Flicker es analizado en un modelo estadístico basado en un estudio experimental con un grupo de personas para obtener un índice de severidad del Flicker.

3.2. Arquitectura del Flickermeter

La arquitectura del Flickermeter se describe mediante el diagrama de bloques de la Figura 3.2. El mismo puede descomponerse en tres partes, de las cuales cada una realiza una de las siguientes tareas:

- Adquisición y adaptación de la tensión de entrada.
- Simulación de la respuesta del conjunto lámpara-ojo-cerebro.
- Análisis estadístico de la señal de parpadeo y presentación de los resultados.

La primer tarea es realizada por el bloque 1, la segunda tarea es realizada por los bloques 2, 3 y 4, mientras que la tercer tarea es llevada a cabo por el bloque 5 como se ilustra en la figura 3.2 .

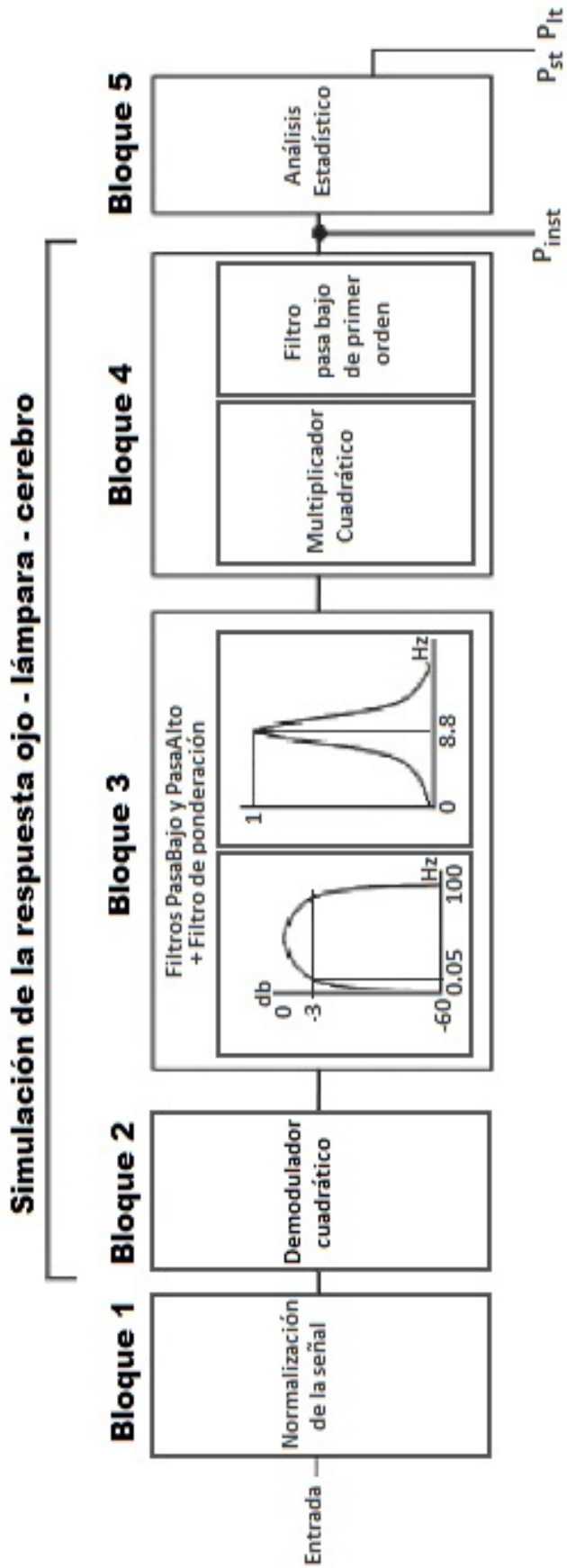


Figura 3.2: Diagrama funcional del Flickermeter. [12]

3.3. Presentación de los bloques

3.3.1. Bloque 1: Adaptador de la tensión de entrada

Este bloque contiene un circuito de adaptación de voltaje que escala la tensión de entrada a un nivel de referencia interno, con el objetivo de realizar mediciones de Flicker independientemente del nivel de voltaje de la señal de entrada adquirida. Para ello se normaliza la señal y se expresa el nivel de fluctuación como una relación de porcentaje a través de la ecuación 3.1. Es decir, para una fluctuación de tensión del 1 % en 240 V, se obtiene la misma salida que para una fluctuación del 1 % en 200 V.

$$\frac{\Delta V}{V} \% \quad (3.1)$$

- ΔV : Fluctuación en la amplitud de voltaje.
- V : Amplitud de voltaje promedio.

3.3.2. Bloque 2: Demodulador cuadrático

Este bloque determina las fluctuaciones de la intensidad del flujo luminoso en función de las fluctuaciones de tensión de la entrada. Como se detallo en la sección 2.4, las fluctuaciones de tensión son directamente proporcionales a las fluctuaciones de la intensidad del flujo luminoso emitida por una lámpara incandescente (ver ecuación 2.26). Por lo tanto, en este bloque se eleva la señal de entrada al cuadrado, para poder recuperar el valor de la fluctuación de tensión de la entrada y determinar las fluctuaciones de la intensidad del flujo luminoso.

3.3.3. Bloque 3: Filtros de ponderación-simulación del ojo humano.

El tercer bloque representa el comportamiento del modelo lámpara-ojo del Flickermeter. Como se mencionó previamente, este bloque está basado en el modelo de Rashbass, pero con fluctuaciones de voltaje como señal de entrada. El bloque 3 se puede descomponer en dos filtros en cascada: Un primer filtro pasa banda seguido de un filtro de ponderación.

Filtro pasa banda

Este filtro elimina la componente DC y la componente del doble de la frecuencia de la red presente en la salida del demodulador, buscando obtener un pre-filtrado de aquellas fluctuaciones no perceptibles por el ojo humano. Para ello se requiere la conexión en cascada de un filtro paso alto de primer orden, -3 dB a 0,05 Hz y un filtro pasa bajo Butterworth de 6º orden con frecuencia de corte de 35 Hz para sistemas de 50 Hz y para sistemas 60 Hz una frecuencia de corte de 42Hz.

3.3. Presentación de los bloques

Filtro de ponderación

El segundo filtro, corresponde a un filtro de ponderación pasa banda con máximo en la frecuencia de 8.8 Hz, que simula la respuesta en frecuencia del sistema visual humano a las fluctuaciones de voltaje sinusoidal de una lámpara incandescente. La función de transferencia que representa el filtro, es especificada por la norma con la ecuación 3.2.

$$F(s) = \frac{k w_1 s}{s^2 + 2\lambda s + w_1^2} \frac{1 + \frac{s}{w_2}}{\left(1 + \frac{s}{w_3}\right) \left(1 + \frac{s}{w_4}\right)} \quad (3.2)$$

En la tabla 3.1 se especifican los valores de las constantes de la ecuación 3.2 dependiendo del voltaje de alimentación de lámpara incandescente.

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	$2\pi 21,9$	$2\pi 17,31512$

Tabla 3.1: Valores de los parámetros de la transferencia del filtro de ponderación.

La función que representa dicho filtro, fue determinada en función de análisis estadísticos realizados sobre grupos de personas y representa la sensibilidad de un individuo medio al Flicker producido por lámparas incandescentes de 60 W (120/220V). La función de respuesta se basa en el umbral de perceptibilidad encontrado en cada frecuencia en un 50 % de las personas evaluadas. [15]

La respuesta en frecuencia del filtro para una lámpara de 230 V se muestra en la figura 3.3, en donde la curva sólida representa el valor absoluto de la ecuación 3.2 y la curva de puntos es la contribución del primer factor de la ecuación 3.2, que tiene un comportamiento pasa banda con una ganancia máxima cerca de los 9 Hz. La curva discontinua es la contribución del segundo factor de la ecuación 3.2, que tiene una característica de filtro pasa bajo, en donde se observa que la ganancia disminuye aproximadamente a la mitad de su valor original a partir de los 2 Hz y decae lentamente después de eso. La transferencia final tiene una característica pasa banda con una ganancia máxima alrededor de los 8.8 Hz.

La respuesta en frecuencia del filtro para una lámpara de 120 V se presenta en la figura 3.4 junto con la respuesta del filtro para una lámpara de 230 V.

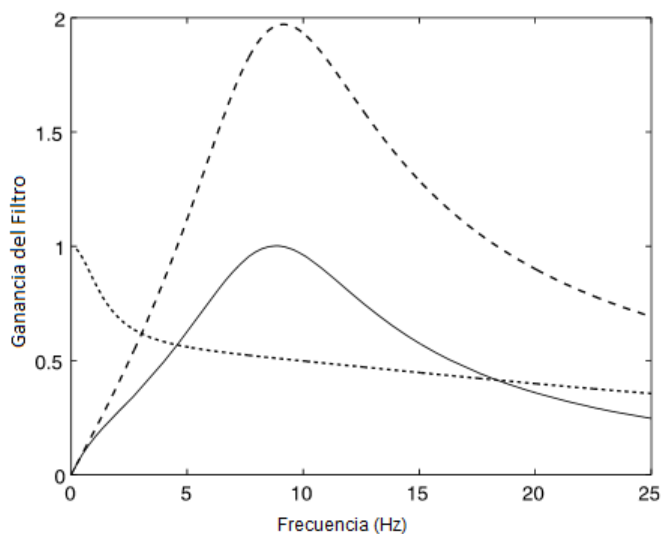


Figura 3.3: Respuesta en frecuencia del filtro de ponderación para 230 V (línea continua). Las líneas discontinuas representan la contribución del segundo factor de la ecuación 3.2 en el filtro y los puntos representan la contribución del primer factor de la ecuación 3.2 en el filtro de ponderación.

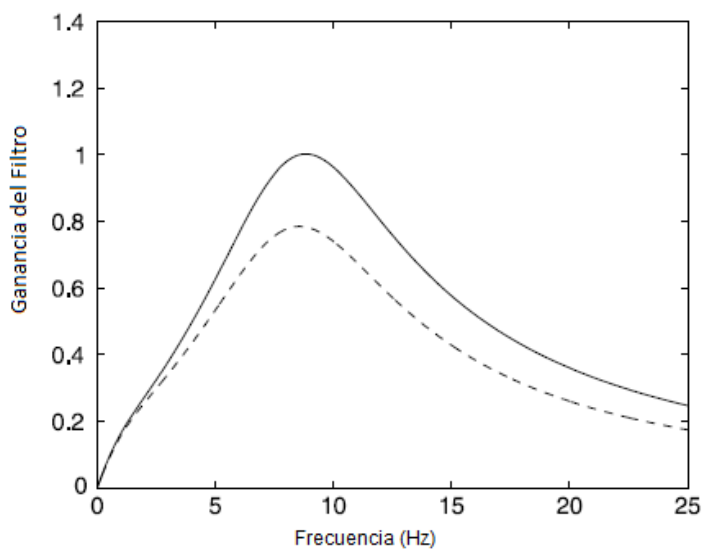


Figura 3.4: Función de transferencia del filtro de ponderación para lámparas incandescentes de 230 V (línea continua) y 120 V (línea discontinua).

En la figura 3.4 se puede observar que la ganancia del filtro para lámparas de 120 V es menor a la ganancia para lámparas de 230 V debido a que las fluctuaciones de la intensidad lumínica son menores como se mostró en la figura 2.6.

3.3.4. Bloque 4: Encuadrar y suavizar - modelo del cerebro

En el bloque 4 se modela el comportamiento del sistema ojo-cerebro. Se utiliza un multiplicador cuadrático para representar la respuesta no lineal del sistema ojo-cerebro y un filtro de primer orden con constante de tiempo de 300 ms para modelar el efecto de memoria del cerebro. La salida de este bloque representa la percepción instantánea de Flicker: P_{inst} .

Nota: La percepción de Flicker se corresponde con un valor de $P_{inst} = 1$, por lo tanto, valores por encima de este límite indican valores de Flicker perceptibles.

3.3.5. Bloque 5: Análisis estadístico

El objetivo de este bloque es analizar los niveles instantáneos de Flicker por medio de análisis estadístico para obtener los valores de severidad, P_{st} y P_{lt} . El análisis se realizará mediante el muestreo de los valores de P_{inst} obtenidos a la salida del bloque 4 y la subdivisión de estas muestras en un número adecuado de clases.

El proceso consiste en hallar la función de distribución a partir del muestreo de los valores de P_{inst} , para ello se subdividen las muestras de P_{inst} en "X" clases.

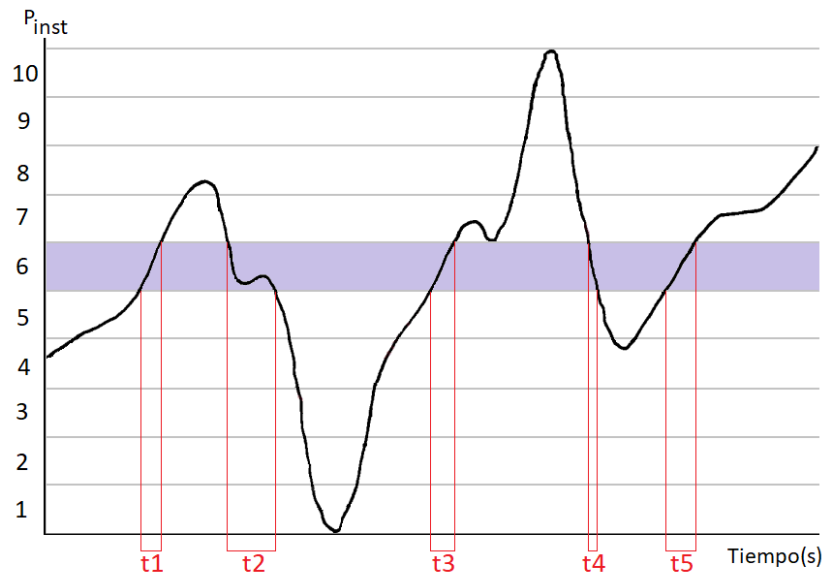


Figura 3.5: Subdivisión de P_{inst} en 10 clases.

Se calcula por cada clase la proporción del tiempo en el que P_{inst} está dentro del dominio de dicha clase. Si tomamos por ejemplo el presentado en la figura 3.5, podemos decir que para la clase 6 es:

$$\frac{t_{clase6}}{tiempo_{total}} * 100 = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{tiempo_{total}} * 100$$

Capítulo 3. Flickermeter según la norma IEC 61000-4-15

De esta manera, se obtiene la función de densidad de probabilidad de los valores de P_{inst} que representa la distribución de la duración del nivel de parpadeo en cada clase. A partir de la función de densidad de probabilidad se obtiene la función de probabilidad acumulada, de la cual se obtienen los percentiles¹. Estos representan el porcentaje de tiempo que se ha excedido un cierto nivel de Flicker asignado, el cual será de importancia en la aplicación de los algoritmos de cálculo de severidad de Flicker, representada por la ecuación 3.3.

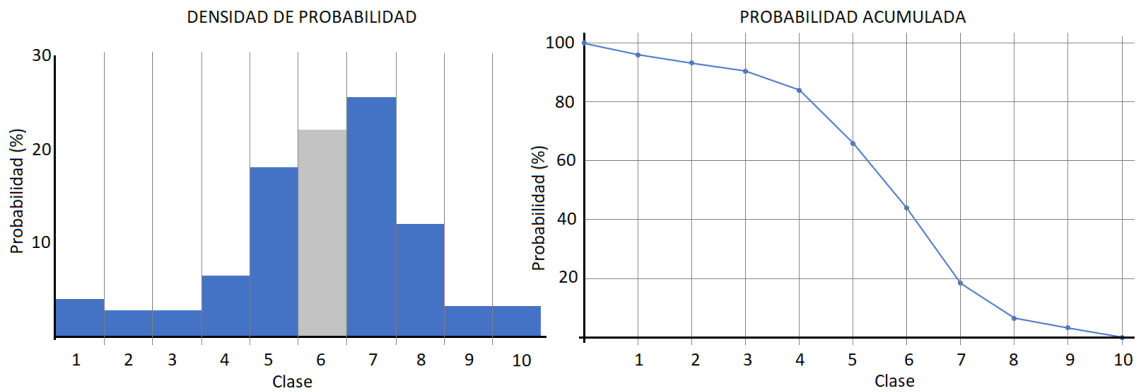


Figura 3.6: Función de densidad de probabilidad y de probabilidad acumulada para 10 Clases.

Se definen dos periodos de observación distintos, uno de tiempo corto de 10 minutos y otro de tiempo largo de 2 horas, obteniendo la severidad de Flicker de tiempo corto P_{st} y de tiempo largo P_{lt} , respectivamente.

Se considera que la evaluación de Flicker a corto plazo es adecuada para evaluar las perturbaciones causadas por fuentes individuales con un ciclo de trabajo corto. Si se tiene en cuenta el efecto combinado de varias cargas perturbadoras que trabajan al azar o si se consideran fuentes de Flicker con ciclos de trabajo largos y variables, entonces, es necesario analizar la evolución de la severidad del Flicker a largo plazo.

- Evaluación del Flicker a corto plazo - P_{st}

A partir de la función de probabilidad acumulada se define el siguiente algoritmo para hallar el valor de P_{st} .

$$P_{st} = \sqrt{0,031P_{0,1} + 0,052P_{1s} + 0,065P_{3s} + 0,28P_{10s} + 0,08P_{50s}} \quad (3.3)$$

¹El percentil es una medida de posición usada en estadística, una vez ordenados todos los datos observados de menor a mayor, el percentil indica el valor de la variable por debajo del cual se encuentra un porcentaje dado de observaciones. Por ejemplo, el percentil 20° indica el valor observado para el cual se encuentra el 20 por ciento de las observaciones totales.

3.4. Análisis teórico del procesamiento de la señal de los bloques 2, 3 y 4

donde los percentiles $P_{0,1}$, P_1 , P_3 , P_{10} y P_{50} son los niveles de Flicker excedidos para 0,1, 1, 3, 10 y 50 % del tiempo durante el período de observación. El sufijo "s" en la fórmula indica que deben usarse valores suavizados; estos se obtienen usando las siguientes ecuaciones:

$$P_{50s} = \frac{(P_{30} + P_{50} + P_{80})}{3} \quad (3.4)$$

$$P_{10s} = \frac{(P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17})}{5} \quad (3.5)$$

$$P_{3s} = \frac{(P_{2,2} + P_3 + P_4)}{3} \quad (3.6)$$

$$P_{1s} = \frac{(P_{0,7} + P_1 + P_{1,5})}{3} \quad (3.7)$$

Las constantes multiplicativas de los percentiles en la ecuación 3.3 son coeficientes de ponderación, los cuales se determinaron de acuerdo al umbral de molestia o curva de $P_{st} = 1$ definida en la norma IEC 61000-3-3 [11].

- Evaluación de Flicker a largo plazo.

La formula se obtiene de los valores de severidad a corto plazo (P_{st}), durante un período de evaluación apropiado relacionado con el ciclo de trabajo de la carga o un período sobre el cual un observador puede reaccionar al Flicker, utilizando la siguiente fórmula:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N P_{sti}^3}{N}} \quad (3.8)$$

donde P_{sti} ($i = 1, 2, 3, \dots$) son lecturas consecutivas de la severidad a corto plazo P_{st} .

3.4. Análisis teórico del procesamiento de la señal de los bloques 2, 3 y 4

Para comprender el funcionamiento de los bloques 2, 3 y 4, se presenta a continuación un ejemplo en donde la señal de entrada contiene una fluctuación sinusoidal.

En la entrada del bloque 2 se tiene la siguiente señal:

$$v(t) = \sqrt{2}V [1 + M \cdot \cos(2\pi f_M t + \Phi_M)] \cos(2\pi f_0 t) \quad (3.9)$$

La salida del bloque 2 corresponden a la señal demodulada:

Capítulo 3. Flickermeter según la norma IEC 61000-4-15

$$señal_{salida_bloque.2} = M.cos(2\pi f_M t + \Phi_M) \quad (3.10)$$

Los filtros del bloque 3 modifican la amplitud y la fase de la fluctuación de tensión de la ecuación 3.10. Esta modificación dependen de la frecuencia de la fluctuación (f_M),

$$señal_{salida_bloque.3} = M.F(f_M).cos(2\pi f_M t + \Phi'_M) \quad (3.11)$$

En donde $F(f_M)$ es el módulo de la transferencia del filtro de ponderación, evaluada en la frecuencia de fluctuación de tensión.

En el bloque 4 se obtiene el resultado de elevar al cuadrado la señal proveniente del bloque 3:

$$[señal_{salida_bloque.3}]^2 = \frac{1}{2}[MF(f_M)]^2 + \frac{1}{2}[MF(f_M)]^2 cos(4\pi f_M t + 2\Phi'_M) \quad (3.12)$$

El filtro pasa bajos del bloque 4 deja pasar el primer término sin amortiguamiento, mientras amortigua la componente oscilante de la ecuación 3.12, dejando su valor despreciable frente al primer término. La constante de amortiguación de este ultimo termino es igual a:

$$F_{LPF} = \frac{1}{\sqrt{1 + w^2 r^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 16\pi^2 f_M^2 r^2}} \quad (3.13)$$

Siendo r la constante de tiempo del filtro igual a 300 ms.

Por lo tanto, el Flicker instantáneo: P_{inst} , tiene en cuenta la sensibilidad de la combinación lámpara-ojo-cerebro en cada frecuencia, obteniéndose a la salida del bloque 4 la siguiente expresión:

$$P_{inst} \simeq \frac{1}{2}[MF(f_M)]^2 \quad (3.14)$$

3.5. Ensayos al Flickermeter

3.5.1. Introducción

La norma IEC 61000-4-15 [12] define un número determinado de ensayos con el objetivo de evaluar el funcionamiento de un Flickermeter y la exactitud de sus medidas. Los diferentes ensayos evalúan valores de P_{st} y P_{inst} .

En la tabla 3.2 se presenta un resumen general de las características de los ensayos, de sus objetivos y de los parámetros de salida a analizar en los mismos.

Características de la tensión de ensayo	Objetivo del ensayo	Parámetro analizado	Clases de los Flickermeters		
Cambios rectangulares y sinusoidales de tensión (Tablas 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6).	Ensayar la respuesta característica de los filtros y los parámetros de escala	P_{inst}	F1	F2	F3
Cambios rectangulares de tensión y ensayos de rendimiento (Tabla 3.7).	Ensayar el clasificador y los algoritmos estadísticos.	P_{st}	F1	F2	F3
Cambios en frecuencia y amplitud	Ensayar los circuitos de medida o hardware	P_{inst}	F1		
Tensión distorsionada con múltiples cruces por cero	Ensayar la estabilidad de los circuitos de control de entrada	P_{inst}	F1		
Armónicos de banda lateral	Ensayar el ancho de banda de la entrada	P_{inst}	F1		
Salto de fase	Ensayar el ancho de banda del circuito de entrada, el ancho de banda de la entrada y el clasificador	P_{st}	F1		
Cambios rectangulares de tensión con ciclo de trabajo del 20 %	Ensayar el clasificador y evaluar los algoritmos estadísticos.	P_{st}	F1	F2	

Tabla 3.2: Especificaciones de ensayos para el Flickermeter [12]

Además, estas pruebas permiten clasificar a los Flickermeters en tres clases diferentes: F1, F2 y F3.

- Clase F1: Consiste en un instrumento de uso general, adecuado para el monitoreo de calidad de energía y para ensayos de conformidad. Estos Flickermeters pueden estar sujetos a un amplio rango de variaciones de voltaje de entrada, incluyendo cambios de frecuencia y saltos de fase. Para realizar verificaciones periódicas de calibración, solo se requiere el ensayo de cambio de voltaje rectangular, especificado en la tabla 5 de la norma IEC 61000-4-15 [12].

Capítulo 3. Flickermeter según la norma IEC 61000-4-15

- Clase F2: Instrumento diseñado para la realización de ensayos de conformidad de acuerdo a las norma IEC 61000-3-3 o IEC 61000-3-11 , funcionando en un entorno controlado, con frecuencia y fase constante, y fluctuaciones de voltaje limitadas. Por lo tanto, el ensayo de cambio de voltaje rectangulares, especificado en la tabla 5 de la norma IEC 61000-4-15 [12], es suficiente para verificar el funcionamiento correcto del Flickermeter.
- Clase F3: Instrumento diseñado para estudios de calidad de energía, resolución de problemas y otras aplicaciones donde no se requieren incertidumbres de medición bajas.

3.5.2. Ensayo 1: Variaciones de tensión sinusoidales y rectangulares

El objetivo de esta prueba es analizar la respuesta de los los distintos filtros del Flickermeter. En las tablas 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6 (correspondientes a las tablas 1a, 1b, 2a y 2b del la norma IEC 61000-4-15 [12]) se detallan las señales cuya percepción instantánea de Flicker máximo: $P_{inst,max}$ es 1, con una tolerancia del 8 %.

En cada tabla se detalla la señal sinusoidal principal (120 Vrms/60 Hz, 120Vrms/50 Hz, 230 Vrms/50 Hz, 230 Vrms/60 Hz), la frecuencia y amplitud (en porcentaje respecto de la sinusoidal principal) de la señal moduladora.

Un ejemplo de la señal resultante se muestra en la figura 3.7.

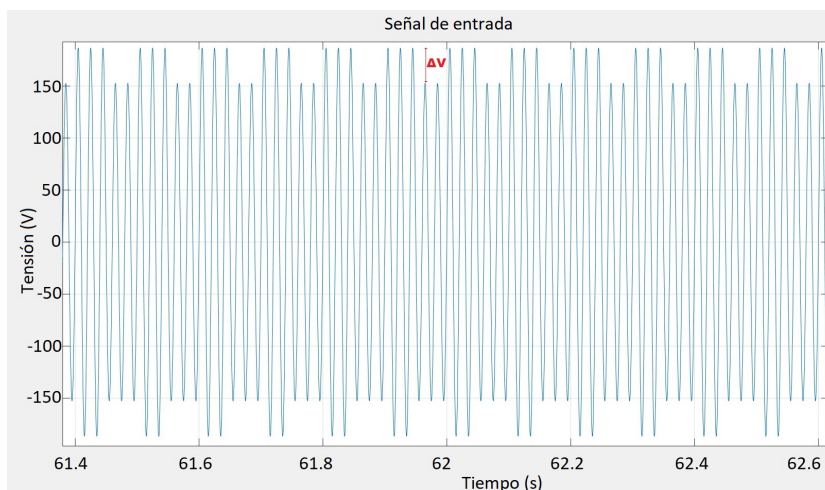


Figura 3.7: Seno de 120 Vrms (amplitud de 169V), 50 Hz con modulación rectangular de 10 Hz (20 cambios por segundo) y 20 % ($\Delta V = 33,94$ por lo que la amplitud máxima es de 186.7 V y la amplitud mínima de 157.7 V)

3.5. Ensayos al Flickermeter

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
1.0	1.465	1.465	10.5	0.355	0.355
1.5	1.126	1.126	11.0	0.373	0.373
2.0	0.942	0.942	11.5	0.394	0.394
2.5	0.815	0.815	12.0	0.417	0.417
3.0	0.717	0.717	13.0	0.469	0.469
3.5	0.637	0.637	14.0	0.528	0.528
4.0	0.570	0.570	15.0	0.592	0.592
4.5	0.514	0.514	16.0	0.660	0.660
5.0	0.466	0.466	17.0	0.734	0.734
5.5	0.426	0.426	18.0	0.811	0.811
6.0	0.393	0.393	19.0	0.892	0.892
6.5	0.366	0.366	20.0	0.977	0.978
7.0	0.346	0.346	21.0	1.067	1.068
7.5	0.332	0.332	22.0	1.160	1.162
8.0	0.323	0.323	23.0	1.257	1.261
8.8	0.321	0.321	24.0	1.359	1.365
9.5	0.329	0.329	25.0	1.464	1.476
			33 1/3	2.570	3.111
			40.0	4.393	

Tabla 3.3: Respuesta Normalizada del Flickermeter a modulaciones sinusoidales de señales de 120 Vrms.

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
1.0	1.397	1.397	10.5	0.271	0.271
1.5	1.067	1.067	11.0	0.283	0.283
2.0	0.879	0.879	11.5	0.298	0.298
2.5	0.747	0.747	12.0	0.314	0.314
3.0	0.645	0.645	13.0	0.351	0.351
3.5	0.564	0.564	14.0	0.393	0.393
4.0	0.497	0.497	15.0	0.438	0.438
4.5	0.442	0.442	16.0	0.486	0.486
5.0	0.396	0.396	17.0	0.537	0.537
5.5	0.357	0.357	18.0	0.590	0.590
6.0	0.325	0.325	19.0	0.646	0.647
6.5	0.300	0.300	20.0	0.704	0.703
7.0	0.280	0.280	21.0	0.764	0.764
7.5	0.265	0.265	22.0	0.828	0.826
8.0	0.256	0.256	23.0	0.894	0.892
8.8	0.250	0.250	24.0	0.964	0.959
9.5	0.254	0.254	25.0	1.037	1.029
			33 1/3	2.128	1.758
			40.0		2.963

Tabla 3.4: Respuesta Normalizada del Flickermeter a modulaciones sinusoidales de señales de 230 Vrms.

NOTA: Las entradas impresas en negrita en las tablas 3.3 y 3.4, muestran los puntos que deben ser obligatoriamente ensayados.

Capítulo 3. Flickermeter según la norma IEC 61000-4-15

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	0.598	0.597	11.5	0.308	0.308
1.0	0.548	0.547	12.0	0.324	0.325
1.5	0.503	0.503	13.0	0.367	0.363
2.0	0.469	0.468	14.0	0.411	0.413
2.5	0.439	0.438	15.0	0.457	0.460
3.0	0.419	0.420	16.0	0.509	0.511
3.5	0.408	0.408	17.0	0.575	0.562
4.0	0.394	0.394	18.0	0.626	0.611
4.5	0.373	0.372	19.0	0.688	0.683
5.0	0.348	0.348	20.0	0.746	0.768
5.5	0.324	0.323	21.0	0.815	0.811
6.0	0.302	0.302	21.5	0.837	0.820
6.5	0.283	0.283	22.0	0.851	0.852
7.0	0.269	0.269	23.0	0.946	0.957
7.5	0.258	0.259	24.0	1.067	1.052
8.0	0.253	0.253	25.0	1.088	1.087
8.8	0.252	0.252	25.5	1.072	1.148
9.5	0.258	0.258	28.0	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	0.292	0.293	37.0	1.304	
			40.0	3.451	

Tabla 3.5: Respuesta Normalizada del Flickermeter a modulaciones rectangulares de señales de 120 Vrms.

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	0.467	0.468	12.0	0.245	0.244
1.5	0.429	0.429	13.0	0.272	0.275
2.0	0.398	0.399	14.0	0.308	0.306
2.5	0.370	0.371	15.0	0.341	0.338
3.0	0.352	0.351	16.0	0.376	0.376
3.5	0.342	0.342	17.0	0.411	0.420
4.0	0.332	0.331	18.0	0.446	0.457
4.5	0.312	0.313	19.0	0.497	0.498
5.0	0.291	0.291	20.0	0.553	0.537
5.5	0.268	0.269	21.0	0.585	0.584
6.0	0.248	0.249	21.5	0.592	0.600
6.5	0.231	0.231	22.0	0.612	0.611
7.0	0.216	0.217	23.0	0.680	0.678
7.5	0.207	0.206	24.0	0.743	0.753
8.0	0.199	0.200	25.0	0.764	0.778
8.8	0.196	0.196	25.5	0.806	0.768
9.5	0.199	0.199	28.0	0.915	0.962
10	0.203	0.203	30.5	0.847	1.105
10.5	0.212	0.212	33 1/3	1.671	1.258
11.0	0.22	0.22	37.0		0.975
			40.0		2.327

Tabla 3.6: Respuesta Normalizada del Flickermeter a modulaciones rectangulares de señales de 230 Vrms.

NOTA: Las entradas impresas en negrita en las tablas 3.5 y 3.6 muestran los puntos que deben ser obligatoriamente ensayados.

3.5.3. Ensayo 2: Cambios de tensión rectangulares

El propósito de este ensayo es analizar los algoritmos de clasificación y evaluación estadístico del bloque 5 del Flickermeter. El ensayo establece las amplitudes y frecuencias de distintas fluctuaciones rectangulares, para las cuales el valor de P_{st} tiene que ser 1.00 con una tolerancia del 5 %.

Las especificaciones del ensayo se presentan en la tabla 3.7 (correspondiente a la tabla 5 de la norma IEC 61000-4-15 [12]).

NOTA: La norma establece que este ensayo es suficiente en caso de realizar las calibraciones de manera regular al instrumento.

fm (CPM)	Fluctuaciones de tensión (%)			
	120 V/50 Hz	120 V/60 Hz	230 V/50 Hz	230 V/60 Hz
1	3.178	3.181	2.715	2.719
2	2.561	2.564	2.191	2.194
7	1.694	1.694	1.450	1.450
39	1.045	1.040	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 3.7: Especificación del ensayo para una señal con cambios rectangulares.

3.5.4. Ensayo 3: Cambios de frecuencia y voltaje combinados

En el siguiente ensayo la frecuencia y la amplitud de la señal de prueba van cambiando cada 4 segundos, los cambios se dan en el siguiente paso por cero de la señal luego de transcurridos los 4 segundos. En la tabla 3.8 (correspondiente a la tabla 6 de la norma IEC 61000-4-15 [12]), se dan la frecuencia y amplitud de las señales que se alternan. Una vez ensayada la señal, el $P_{inst,max}$ deberá ser 1.00 con una tolerancia del 8 %.

120V			230V		
Frecuencia del sistema (Hz)	Cambios de frecuencia f (Hz)	Cambios de voltaje (V rms)	Frecuencia del sistema (Hz)	Cambios de frecuencia f (Hz)	Cambios de voltaje (V rms)
60	59.75	120.000	50	49.75	230.000
	60.25	119.266		50.25	228.812
50	49.75	120.000	60	59.75	230.000
	50.25	119.270		60.25	228.805

Tabla 3.8: Especificación del ensayo para cambios en frecuencia y voltaje combinados.

3.5.5. Ensayo 4: Tensión distorsionada con múltiples cruces por cero

En este ensayo se genera una señal de tensión distorsionada con múltiples cruces por cero que contiene la tensión fundamental U y los niveles de armónicos de acuerdo a lo especificado en la Tabla 3.9 (correspondiente a la tabla 7 de la norma IEC 61000-4-15 [12]). Todos los armónicos tienen un cambio de fase de 180° con respecto a la fundamental de 50 Hz / 60 Hz. Esta señal de tensión distorsionada se modula mediante una senoide de 8.8 Hz con una amplitud de acuerdo con la tabla 3.10 (correspondiente a la tabla 8 de la norma IEC 61000-4-15 [12]). El $P_{inst,max}$ debe ser 1.00 con una tolerancia del 8%.

Armónico de orden i	3	5	7	9	11	13	17	19	23	25	29	31
$U_i = \% \text{ de } U$	5	6	5	1.5	3.5	3.0	2.0	1.76	1.41	1.27	1.06	0.97

Tabla 3.9: Especificación para la tensión distorsionada con múltiples cruces por cero.

230V		120V	
Frecuencia del sistema (Hz)	Fluctuaciones de tensión U/U (%)	Frecuencia del sistema (Hz)	Fluctuaciones de tensión U/U (%)
50	0.250	50	0.321
60	0.250	60	0.321

Tabla 3.10: Características de la modulación de 8.8 Hz para el ensayo de voltaje distorsionado.

3.5.6. Ensayo 5: Análisis del ancho de banda utilizando modulación de banda lateral armónica e inter-armónica

En el siguiente ensayo, la tensión de red de 230 Vrms o 120 Vrms con una frecuencia fundamental de 50 Hz o 60 Hz debe modularse mediante la superposición de dos tensiones con frecuencias de modulación separadas por 10 Hz, como se muestra en la tabla 3.11 (correspondiente a la tabla 9 de la norma IEC 61000-4-15 [12]).

Las frecuencias de modulación f_v y f_i ($f_i = f_v - 10Hz$) se incrementan en saltos de 50 Hz para establecer el ancho de banda máximo del Flickermeter. La frecuencia más alta $f_{v,max}$, para la cual $P_{inst,max}$ es 1.00 con una tolerancia del 8%, corresponde al ancho de banda de entrada del Flickermeter. La norma establece que $f_{v,max}$ debe ser de al menos 450 Hz, para una amplitud relativa de $\frac{U_i}{U}$ para ambas modulaciones.

3.5. Ensayos al Flickermeter

230 V			120 V		
Frecuencia del sistema (Hz)	fi/fv	Fluctuaciones de tensión Ui/U (%)	Frecuencia del sistema (Hz)	fi/fv	Fluctuaciones de tensión Ui/U (%)
50	140/150	3.611	60	170/180	4.126
60	170/180	3.611	50	140/150	4.126

Tabla 3.11: Especificación del ensayo para armónicos con banda lateral.

3.5.7. Ensayo 6: Saltos de fase

El ensayo consiste en generar una secuencia de saltos de fase en cada cruce por cero positivo, después de 1 min, 3 min, 5 min, 7 min y 9 min (± 10 s) luego del comienzo de un período de observación de 10 min. La prueba se repetirá para ángulos de salto de fase de $\Delta\beta = +30^\circ$, $\Delta\beta = -30^\circ$, $\Delta\beta = +45^\circ$ y $\Delta\beta = -45^\circ$. El valor de P_{st} obtenido debe corresponderse con la Tabla 3.12 (correspondiente a la tabla 10 de la norma IEC 61000-4-15 [12]) con una tolerancia del 5% o ± 0.05 , lo que sea mayor. El objetivo de este ensayo es analizar la estabilidad del circuito de control de entrada, el ancho de banda de entrada y los algoritmos utilizados en el análisis estadístico.

Salto de fase	230 V/ 50 Hz P_{st}	120 V/ 60 Hz P_{st}	120 V/ 50 Hz P_{st}	230 V/ 60 Hz P_{st}
$\pm 30^\circ$	0.913	0.587	0.706	0.760
$\pm 45^\circ$	1.060	0.681	0.819	0.882

Tabla 3.12: Especificación para los ensayos con salto de fase.

3.5.8. Ensayo 7: Cambios de voltaje rectangulares con un ciclo de trabajo del 20%

En el siguiente ensayo, la tensión de entrada se modula rectangularmente con una frecuencia de 28 Hz con un ciclo de trabajo del 20%, es decir, en un período de 60 segundos la señal permanece en un nivel de tensión durante 12 segundos y 48 segundos en otro nivel de tensión. Las especificaciones del ensayo se proporcionan en la tabla 3.13 (correspondiente a la tabla 11 de la norma IEC 61000-4-15 [12]). El parámetro de salida a analizar es el P_{st} , que debe ser igual a 1.00 con una tolerancia del $\pm 5\%$. El objetivo de este ensayo es analizar los algoritmos utilizados en el análisis estadístico del bloque 5 del Flickermeter.

Capítulo 3. Flickermeter según la norma IEC 61000-4-15

230 V		120 V	
Frecuencia del sistema (Hz)	Fluctuaciones de tensión (%)	Frecuencia del sistema (Hz)	Fluctuaciones de tensión (%)
50	1.418	60	2.126
60	1.480	50	2.017

Tabla 3.13: Especificaciones para el ensayo de cambios rectangulares con un ciclo de trabajo del 20 %.

Capítulo 4

Sistema de medida construido: Hardware

El hardware del sistema de medición se compone de la PC donde corre el software, la placa convertora analógica digital (CAD) de la marca National Instruments modelo USB-6343, el circuito de adaptación de señales construido en el marco del presente proyecto y el fotodiodo de la marca Centronic modelo OSD-60-E. En el presente capítulo se describe el funcionamiento de la placa convertora y se presenta el diseño y funcionamiento del circuito de adaptación de señales, que acondiciona las señales de entrada al sistema para la adquisición y digitalización de las mismas por la placa convertora. Hay más detalle del Hardware y del conexionado en el manual de usuario del sistema de medición en el apéndice B.

4.1. Placa convertora analógico-digital

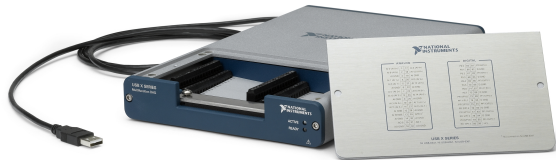


Figura 4.1: Placa convertora NI USB-6343 [5].

Para la adquisición de datos se utilizó una placa convertora analógico-digital (DAQ) multifunción diseñada por National Instruments. A continuación se presentan las características principales del instrumento [5].

- **Rango de tensión de entrada:** tensión máxima de trabajo para entradas analógicas (señal + modo común) $\pm 11V$ *of AIGND*. Los rangos de protección son $\pm 25V$ con el dispositivo encendido y $\pm 15V$ para el dispositivo apagado, además de soportar una corriente de entrada durante condiciones de sobre tensión de $\pm 20mA$.
- **Impedancia de la tarjeta:** entre las entradas analógicas + y - a tierra la misma presenta una impedancia de $10G\Omega // 100pF$ cuando esta encendida y una de $1,200\Omega$ cuando esta apagado.

4.2. Acondicionamiento de la señal de voltaje para la entrada de la Placa CAD

En esta sección se desarrolla el diseño del circuito realizado para el acondicionamiento de la señal de entrada, para que pueda ser digitalizada por la placa conversora analógico - digital. La placa conversora presenta una restricción para la tensión de entrada que es capaz de soportar, para ello se recurre a un divisor de tensión para disminuir la señal de la red a una señal capaz de ser adquirida por la tarjeta. En la figura 4.2 se presenta un diagrama con las distintas partes que componen el circuito.

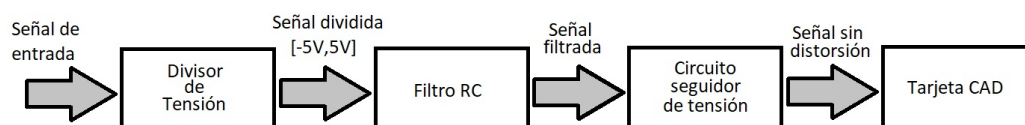


Figura 4.2: Diagrama del circuito de acondicionamiento de señal para la entrada a la CAD.

Es fundamental que la señal a estudiar se reconstruya digitalmente de forma certera, ya que será la señal evaluada por el software, para ello debemos garantizar por diseño el cumplimiento de los siguientes criterios:

- La relación de transformación debe ser independiente de la frecuencia (hasta 10 kHz), la tensión, la temperatura y la polaridad.
- Debe estar exento a influencias externas, por lo tanto, la influencia del divisor sobre el circuito que se mide debe ser mínima. Para ello es absolutamente necesario disponer de circuitos pasivos cuya relación de división no varíe en el rango de frecuencia a trabajar.

En la figura 4.3 se presenta el circuito implementado para la adquisición de señales. El mismo se compone de un divisor de tensión resistivo, un filtro RC, un circuito de adaptación de señal y diodos zener limitadores de voltaje para la protección contra sobretensión de la placa conversora.

4.2. Acondicionamiento de la señal de voltaje para la entrada de la Placa CAD

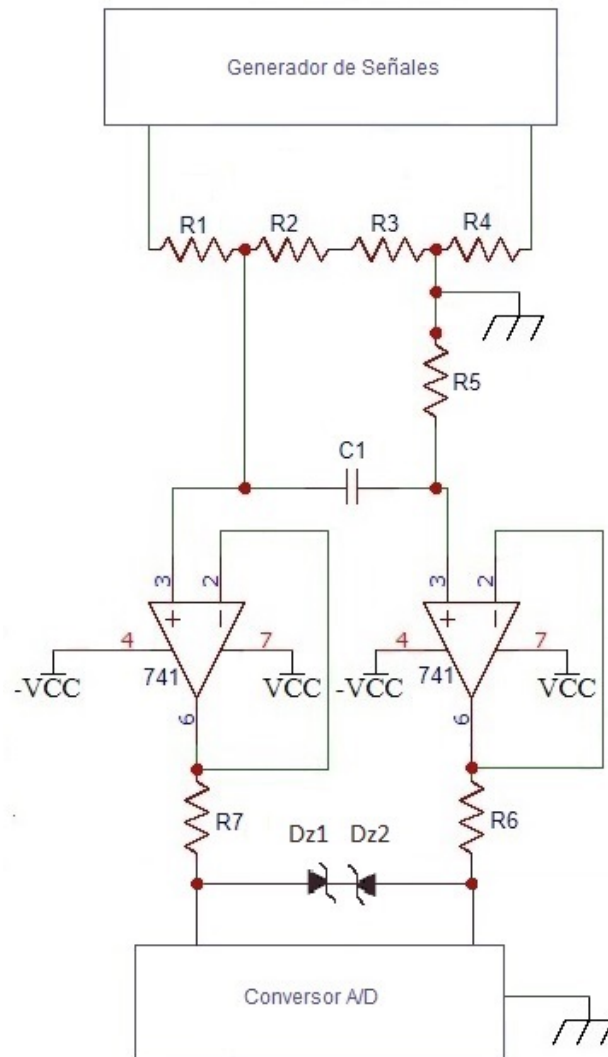


Figura 4.3: Circuito diseñado para el acondicionamiento de la señal de entrada.

Divisor de tensión

Como se menciona en párrafos anteriores es necesario llevar la tensión de entrada a valores admitidos por la placa convertora, por este motivo, se realizó un divisor de tensión para llevar tensiones del orden de $230 V_{rms}$ a tensiones del orden de los $3 V_{rms}$. Como se observa en la figura 4.3 la referencia de tierra del circuito es introducida entre las resistencias R_3 y R_4 para cumplir los requerimientos de la National Instruments para adquirir datos con la placa convertora, como se explicará en los párrafos posteriores.

Capítulo 4. Sistema de medida construido: Hardware

Filtro RC

Se utilizó a la salida del divisor de tensión un filtro pasa bajos RC con constante de tiempo $\tau = 0,1ms$, para filtrar la señal de ruidos con frecuencias iguales o mayores a los 10 kHz.

Circuito de adaptación de señal para utilizar la placa conversora sin generar distorsión

La National Instrument recomienda [2] que la impedancia de entrada de la tarjeta CAD sea mucho mayor en relación con la impedancia de salida del circuito Thevenin a medir, para no alterar la señal adquirida cuando se utiliza más de un canal de adquisición de datos. Sugiriéndose para reducir la impedancia de salida, la utilización de un circuito seguidor de tensión para disminuir la impedancia vista por la placa conversora y poder adaptar la misma con el modelo Thvenin del circuito a utilizar, la implementación del mismo se presenta en la figura 4.4.

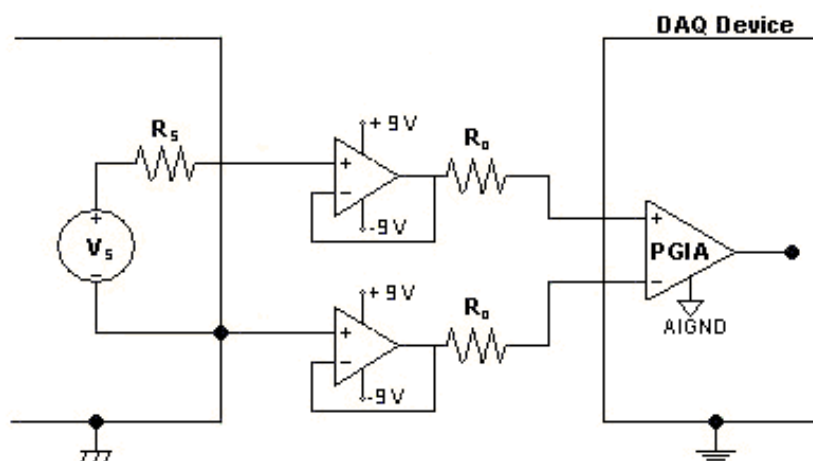


Figura 4.4: Circuito recomendado por National Instrument para la adquisición de datos.

Como se presenta en la figura 4.4, es necesario introducir a la salida del filtro RC, amplificadores operacionales configurados como seguidores (ganancia unitaria), seguidos de una resistencia de 50Ω y referenciando la tierra del circuito como se observa en la figura 4.3 para poder implementar el modelo adecuadamente. La alimentación de los operacionales se realiza a través de dos baterías de 9 V conectadas en serie para obtener $\pm 9V$ simétricos con respecto a la tierra del circuito para no saturar ninguno de los operacionales.

Para cumplir con las sugerencias, la solución implementada requiere que la señal de entrada sea diferencial y flotante respecto a tierra.

4.2. Acondicionamiento de la señal de voltaje para la entrada de la Placa CAD

Diodos zener limitadores de tensión

Se utilizaron dos diodos zener de 10 V y 1 W en serie como se observa en la figura 4.5 para limitar la tensión de entrada a la placa conversora, con el fin de proteger la misma de posibles sobretensiones.

A continuación, se verifica que ambos diodos soporten la tensión máxima producida a la salida del circuito de adaptación de la señal sin sufrir daños.

La corriente máxima que puede soportar el diodo zener sin dañarse queda determinada por la ecuación 4.1.

$$I_{z,max} = \frac{P_z}{V_z} \quad (4.1)$$

Se calcula entonces que la corriente máxima que pueden soportar ambos diodos zener es igual a $100mA$.

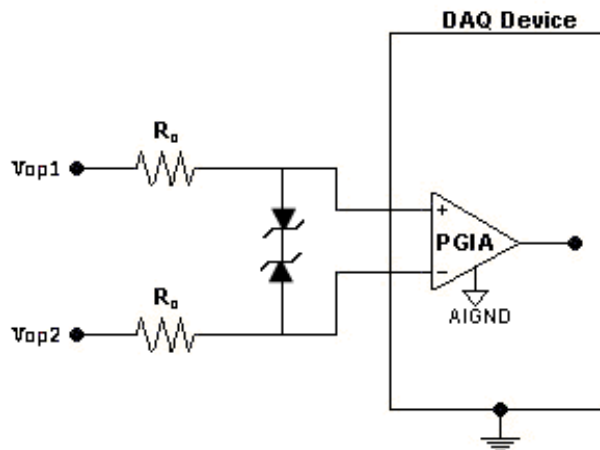


Figura 4.5: Diodos zener limitadores de tensión

Se asume que el peor caso de sobretensión ocurre cuando ambos operacionales se encuentran saturados con igual valor de tensión pero opuestas en signo. El valor máximo de tensión a la salida del operacional es de $+9V$ o $-9V$ ¹, generando una diferencia de tensiones en la entrada de la placa conversora de $18V$.

La corriente máxima que puede circular por los diodos depende de las resistencias a la salida de los operacionales a través de la ecuación 4.3.

$$V_{op1} - V_{op2} = 2 \cdot R_0 I_{max} - V_z \quad (4.2)$$

¹Ambos operacionales son alimentados a través de un banco de baterías que proporciona 9 V.

Capítulo 4. Sistema de medida construido: Hardware

$$I_{max} = \frac{V_{op1} - V_{op2} + V_z}{2R} = \frac{18V - 10V}{112\Omega} = 71mA \quad (4.3)$$

Se corrobora que los diodos zener son capaces de soportar la corriente máxima en caso de saturación de los operacionales.

Conexión del circuito de señal con la placa conversora

National Instrument recomienda la siguiente conexión entre el circuito y la placa conversora: conectar el conductor negativo del circuito (salida del amplificador operacional que copia la referencia de tierra a su salida) a la entrada negativa del canal de la placa conversora, el conductor positivo del circuito (salida del amplificador operacional que copia la señal de entrada) a la entrada positiva del canal y la referencia de tierra del circuito debe conectarse a la tierra de la placa a través de uno de sus terminales de entrada que esté referenciado a tierra. Además, se recomienda que si se utilizan más de un canal para adquirir datos, los mismos sean consecutivos.

En la figura 4.6 se presenta el conexionado final del circuito de adquisición de señales con la entrada del canal de medición de la placa conversora.

Los componentes utilizados en el armado del circuito de la figura 4.6 son los siguientes.

Componente	Descripción
<i>R1</i>	Resistencia de carbón de 6.8 MΩ - 1/4 W - 5%
<i>R2</i>	Resistencia de carbón de 67 kΩ - 1/4 W - 5%
<i>R3</i>	Resistencia de carbón de 67 kΩ - 1/4 W - 5%
<i>R4</i>	Resistencia de carbón de 67 kΩ - 1/4 W - 5%
<i>R5</i>	Resistencia de carbón de 1.5 kΩ - 1/4 W - 5%
<i>R6</i>	Resistencia de carbón de 56 Ω - 1/4 W - 5%
<i>R7</i>	Resistencia de carbón de 56 Ω - 1/4 W - 5%
<i>C1</i>	Capacitor cerámico de 10 nF
<i>741</i>	Amplificador operacional modelo LM741
<i>Dz1</i>	Diodo Zener 10 V - 1 W
<i>Dz2</i>	Diodo Zener 10 V - 1 W
<i>Baterías</i>	2 baterías recargables de 9 V

Tabla 4.1: Lista de componentes del Circuito para la adquisición de señales de tensión.

4.3. Circuito sensor óptico

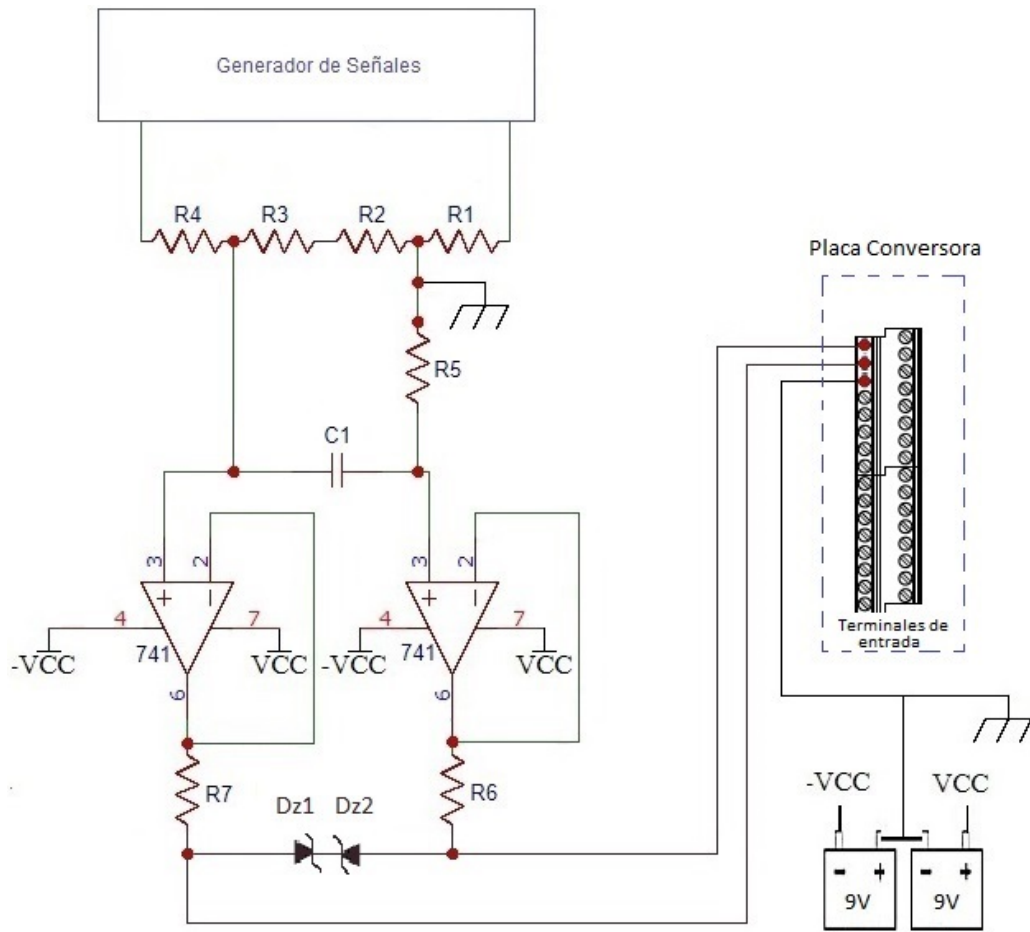


Figura 4.6: Conexión del circuito de adquisición de señales y la placa convertora.

4.3. Circuito sensor óptico

Este circuito permite realizar la medición de iluminancia por el sistema de medición, para la construcción del mismo se utiliza un sensor CENTRONIC OSD60-E el cual es introducido en el presente capítulo. En primera instancia, se presenta el funcionamiento de un fotodiodo, para luego introducir el diseño del circuito en función de las características de funcionamiento del mismo.

4.3.1. Fotodiodo

Un fotodiodo consiste en una unión p-n activa, que trabaja con polarización invertida². En el fotodiodo la corriente es la que circula en sentido inverso al permitido por la juntura del diodo. Es decir, para su funcionamiento el fotodiodo es polarizado en inverso y se produce un aumento de la circulación de la corriente cuando el diodo es estimulado por la luz.

La figura 4.7 muestra la respuesta para un fotodiodo típico. La curva es la misma que la de un diodo normal, pero con la salvedad de que toda la curva se mueve hacia arriba o hacia abajo a medida que el fotodiodo queda expuesto a la luz. En la figura 4.7 se muestra en amplificado la función de transferencia alrededor del origen donde no hay luz presente y se puede observar la presencia de una corriente de fugas: I_{dark} ³. Entonces, la salida del fotodiodo será distinta de 0 A, siempre que el voltaje de polarización sea distinto de 0 V. Si bien el funcionamiento del fotodiodo polarizado en inverso (modo fotoconductor) puede dar como resultado una respuesta más rápida, el funcionamiento con voltaje de polarización 0 (modo fotovoltaico) elimina la corriente de fugas del fotodiodo, por lo tanto se busca trabajar con el fotodiodo en modo fotovoltaico para minimizar la corriente de fugas y tener medidas más precisas.

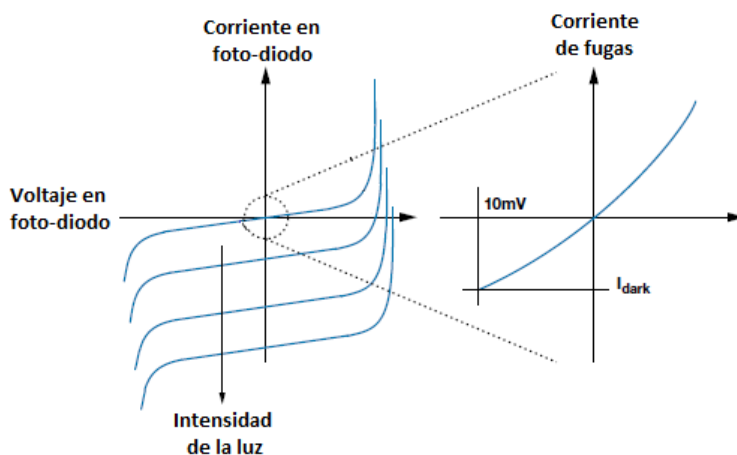


Figura 4.7: Función de Transferencia de un fotodiodo.

²Los diodos tienen un sentido normal de circulación de corriente, que se llama polarización directa, en ese sentido el diodo deja pasar la corriente eléctrica y prácticamente no permite la circulación de corriente en inverso.

³La corriente de fugas se especifica normalmente para un valor inverso de 10 mV por los fabricantes.

4.3.2. Diseño del circuito

El diseño está basado en lo presentado en el documento "Programmable-Gain Transimpedance Amplifiers Maximize Dynamic Range in Spectroscopy Systems" [20].

El circuito diseñado busca operar el fotodiodo en modo fotovoltaico, por lo tanto, se conecta el fotodiodo a un amplificador operacional para mantener la tensión de polarización cerca de 0V, mientras se convierte la corriente del fotodiodo en una tensión a través de una resistencia. La figura 4.8 muestra la conexión del fotodiodo y el amplificador. En la práctica, la corriente de fugas no desaparece completamente, debido al voltaje de offset del amplificador que producirá un pequeño desbalance en los terminales del fotodiodo.

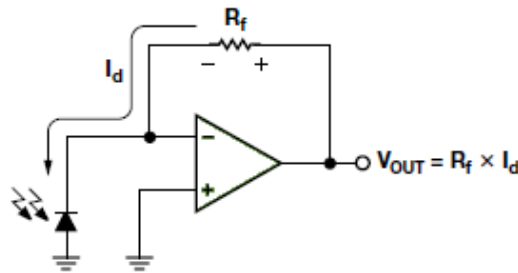


Figura 4.8: Circuito del sensor óptico.

En una situación ideal, la entrada de inversa del amplificador operacional estará en tierra virtual, y toda la corriente del fotodiodo circulará a través de la resistencia de realimentación R_f , con un extremo de R_f en tierra virtual el voltaje de salida es $R_f \cdot I_d$. Para poder asumir que el amplificador opera de esta forma, la corriente de polarización de entrada del amplificador operacional y la tensión de offset de entrada deben ser pequeñas.

Entonces, las señales lumínicas serán medidas por el sensor óptico y transformadas a una señal con valores de voltaje a través de la ecuación 4.4, para luego ser adquiridas por la placa convertora.

$$V_{out} = R_f \times I_d \quad (4.4)$$

Capítulo 4. Sistema de medida construido: Hardware

4.3.3. Elección de los componentes del circuito

Sensor óptico OSD60-E



Figura 4.9: Sensor óptico OSD60-E.

El sensor óptico utilizado es un fotodiodo de la marca CENTRONIC: OSD60-E [7]. Fue elegido por presentar una respuesta espectral aproximada a la del ojo humano, siendo idóneo para la medición de las fluctuaciones de luz y su posterior comparación con los resultados de P_{st} obtenidos. En la figura 4.10 se puede observar la respuesta espectral del sensor en comparación con la respuesta del ojo humano.

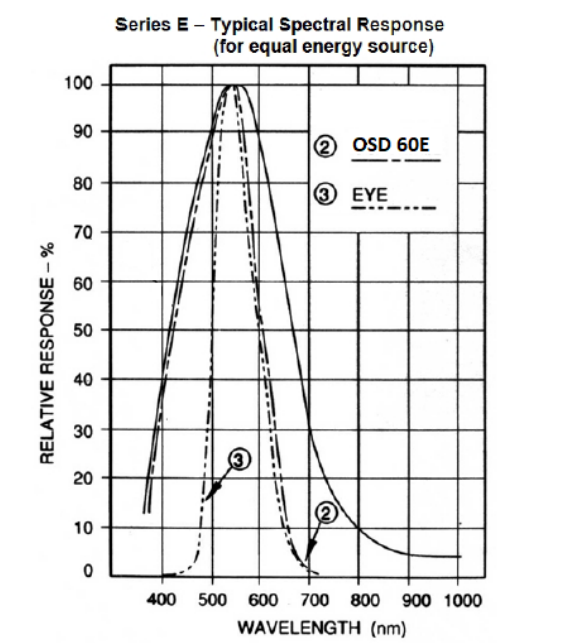


Figura 4.10: Respuesta espectral del sensor OSD60-E [7].

Resistencia

Para el cálculo de la resistencia que se utilizará en el circuito se realiza una estimación de la corriente que emitirá el sensor óptico cuando es estimulado por una lámpara incandescente.

4.3. Circuito sensor óptico

Asumiendo que solo el 15 % de la potencia emitida por la lámpara es potencia radiante y considerando que el flujo luminoso⁴ es aproximadamente el 10 % de la potencia radiante, se obtiene que para una lámpara incandescente de 60 W que emite aproximadamente entre 12 a 18 Lum/W, la lámpara emitirá un flujo luminoso aproximado de 10,8 a 16,2 Lúmenes.

Aplicando la ecuación A.1, se determina la iluminación que genera la lámpara incandescente sobre el sensor, la misma se encuentra en el entorno de 870,9 a 1306 lux considerando que aproximadamente menos del 5 % del total de la iluminación incide en el sensor.

NOTA: En el cálculo de la ecuación A.1 se utilizó que el área efectiva del sensor OSD60-E es igual a 62mm^2 según su hoja de datos [7].

Considerando en una primera aproximación la sensibilidad relativa (SR) del sensor, que según su hoja de datos tiene valor típico de 26nA/lux [7], se determina que la corriente que emitirá el sensor tendrá un valor aproximado de entre 0,0226 a 0,0339 mA.

Por lo tanto, se utilizará una resistencia de valor $270\text{k}\Omega$ para obtener un voltaje aproximado de 8V a la salida del circuito, siendo un valor aceptable para medir con la placa conversora⁵.

Amplificador operacional

El amplificador seleccionado es un amplificador operacional OP07 debido a que presenta un bajo valor de V_{offset} a la entrada: $V_{offset,max} = 75\mu\text{V}$ [13]. En función de la configuración de circuito, se puede determinar que el voltaje a la salida debido al V_{offset} del Amplificador Operacional es el mismo valor de V_{offset} . Lo cual representa un error muy bajo si se considera el orden de voltajes que se obtendrán a la salida del operacional⁶.

La alimentación del operacional se realiza a través de dos baterías⁷ de 9 V conectadas en serie para obtener $\pm 9\text{V}$ simétricos con respecto a la tierra del circuito.

Diodo Zener

Luego de los ensayos realizados al circuito (ver sección 4.4), se determinó que el sensor en estado de saturación produce 14 V a la salida del circuito (ver tabla 4.3), un valor superior al tolerado por la placa conversora. Para proteger la placa

⁴Parte de la potencia radiante que se encuentra en la región visible.

⁵La tensión máxima de trabajo de la placa conversora para entradas analógicas (señal + modo común) es $\pm 11\text{VofAIGND}$ [5]

⁶El orden del voltaje de salida del operacional esta en el rango de [0V, 8V].

⁷Se utiliza el mismo banco de baterías que alimenta los amplificadores operacionales del circuito de Acondicionamiento de la señal de voltaje para la entrada de la Tarjeta CAD.

Capítulo 4. Sistema de medida construido: Hardware

de sobretensiones se decidió utilizar un diodo zener de 7.1 V limitando a este valor el voltaje de entrada a la placa y tener un margen de medición entre 0 y 750 lux (ver tabla 4.5).

La corriente máxima que puede soportar el diodo zener sin dañarse queda determinada por la ecuación 4.5, siendo igual a $70,4mA$. A partir de la tabla 4.3 que presenta el ensayo realizado al circuito para obtener los valores de saturación del mismo, se obtiene que la máxima corriente que puede circular por el diodo es $52,7mA$, verificando la corriente máxima que puede soportar el diodo zener.

$$I_{z,max} = \frac{P_z}{V_z} \quad (4.5)$$

4.3.4. Diseño final del circuito

El diseño final del circuito y su conexión con la placa de adquisición de datos se puede observar en la figura 4.11.

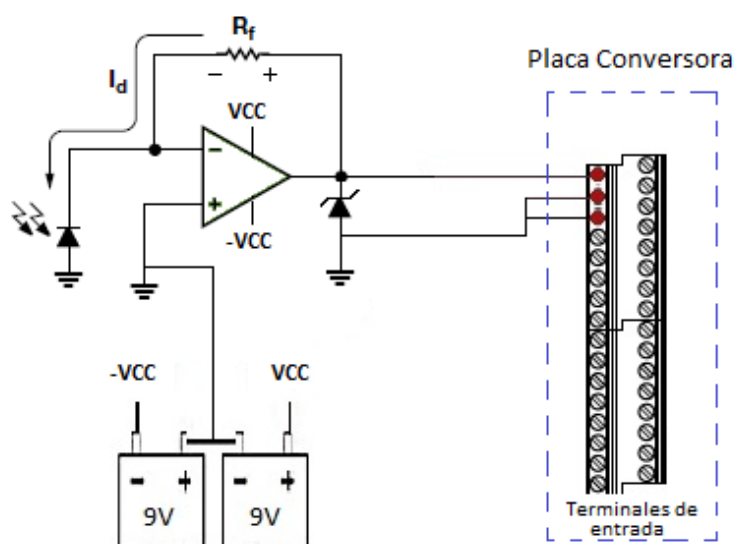


Figura 4.11: Circuito sensor.

Los componentes utilizados en el armado del circuito son los siguientes.

Componente	Descripción
<i>Sensor</i>	Sensor Óptico modelo OSD60-E
<i>Rf</i>	Resistencia de carbono de 270 kΩ
<i>Amplificador operacional</i>	Amplificador operacional modelo OP07
<i>Dz</i>	Diodo Zener de 7.1V - 0.5 W

Tabla 4.2: Lista de componentes del Circuito Sensor.

4.4. Caracterización del sensor OSD60-E

4.4.1. Ensayo 1: Caracterización del sensor

El ensayo⁸ se realizó con el objetivo de determinar la sensibilidad relativa (SR) del sensor y hallar el punto de saturación del mismo. El mismo consistió en estimular el sensor con una lámpara incandescente de 230 V y 200 W a posición fija, en una sala oscura e ir variando la distancia entre el sensor y la lámpara para variar la intensidad lumínica que recibía el sensor.

Se procedió a medir el voltaje a la salida del circuito (sin diodo zener) en paralelo a la medición de la iluminancia incidente en la posición del sensor óptico. Los instrumentos utilizados para el ensayo consistieron en un multímetro Fluke 179 y un Luxómetro⁹ LMT Pocket proporcionado por el laboratorio.

En la tabla 4.3 se muestran los distintos valores de voltaje obtenidos a la salida del circuito. La corriente que emite el sensor fue calculada en función del voltaje medido y el cálculo de SR en función de la corriente resultante y la iluminancia medidos. La alimentación de los operacionales se hizo con $-VCC = 0V$ y $VCC = 18V$.

⁸El ensayo se realizó en el Laboratorio de Fotometría del IIE.

⁹Un Luxómetro es un instrumento ajustado a la curva de sensibilidad fotópica del ojo humano debido a las radiaciones monocromáticas.

Capítulo 4. Sistema de medida construido: Hardware

E (lux)	Voltaje (Vrms)	Corriente (mA)	SR
80,0	0,726	0,00270	3,37E-08
95,0	0,877	0,00326	3,43E-08
122	1,13	0,00420	3,44E-08
140	1,30	0,00483	3,45E-08
162	1,52	0,00565	3,49E-08
193	1,80	0,00669	3,47E-08
213	2,00	0,00743	3,49E-08
248	2,34	0,00870	3,51E-08
275	2,59	0,00963	3,50E-08
297	2,79	0,0104	3,49E-08
316	2,98	0,0111	3,51E-08
350	3,32	0,0123	3,53E-08
376	3,56	0,0132	3,52E-08
413	3,92	0,0145	3,53E-08
446	4,25	0,0158	3,54E-08
490	4,69	0,0174	3,56E-08
524	4,95	0,0184	3,51E-08
584	5,54	0,0206	3,53E-08
670	6,34	0,0236	3,52E-08
856	8,12	0,0302	3,53E-08
1096	10,4	0,0387	3,53E-08
1358	12,9	0,0479	3,53E-08
1496	13,9	0,0516	3,45E-08
1610	14,2	0,0527	3,27E-08
1730	14,2	0,0527	3,04E-08

Tabla 4.3: Mediciones del Ensayo 1: Cálculo de SR del sensor.

De los datos relevados se puede observar que el sensor presenta un comportamiento aproximadamente lineal entre los valores de 150 Lux y 670 Lux, siendo este el rango de trabajo que se define con la implementación del diodo zener que limita el voltaje a 7.1V. Promediando los valores de SR hallados en la zona de trabajo, se determina que el valor de SR del sensor es igual a 35nA/Lux.

En la gráfica 4.12 se muestra los valores obtenidos de tensión e iluminancia, donde se aprecia mejor la linealidad del sensor para la zona delimitada entre 150 Lux y 680 Lux.

4.4. Caracterización del sensor OSD60-E

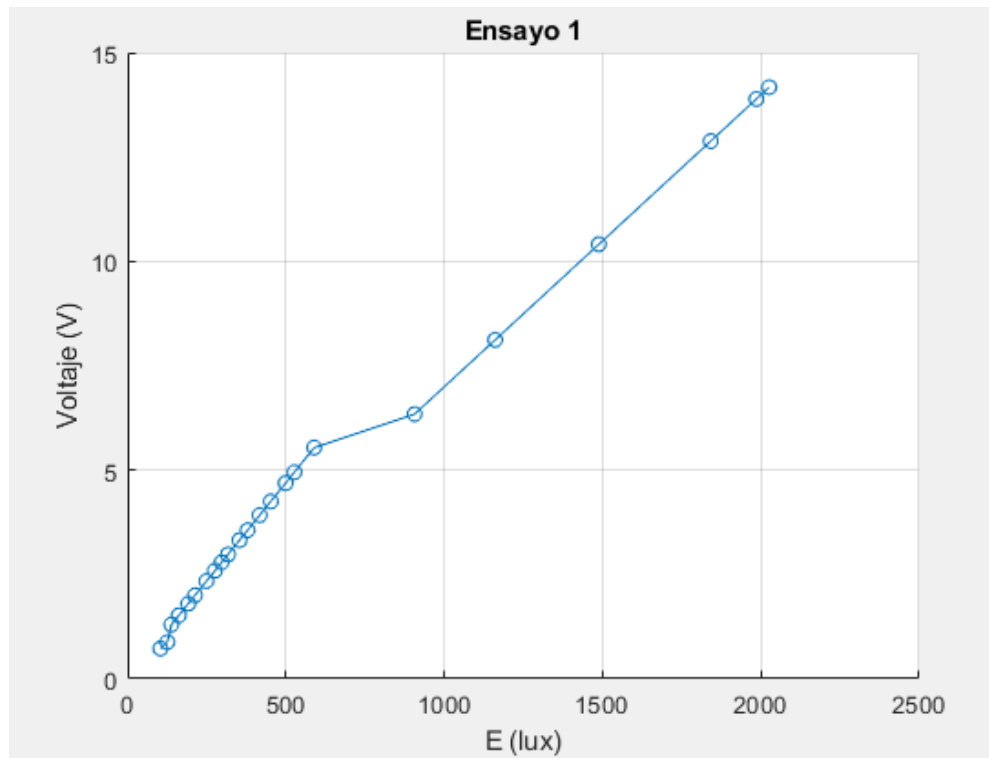


Figura 4.12: Gráfica con los valores medidos en en el ensayo 1

En la tabla 4.4 se muestra el valor de iluminancia hallado en función del valor de SR determinado en el ensayo, en comparación al valor de iluminancia obtenido por el luxómetro.

Capítulo 4. Sistema de medida construido: Hardware

$E_{Luxómetro}(lux)$	$E_{Circuito}(lux)$	$E_{Luxómetro} - E_{Circuito}(lux)$	Error relativo (%)
80,0	77,2	2,80	3,50
95,0	93,2	1,75	1,84
122	120,2	1,84	1,51
140	138,2	1,77	1,26
162	161,6	0,37	0,23
193	191,4	1,60	0,83
213	212,7	0,33	0,16
248	248,8	0,82	0,33
275	275,4	0,40	0,15
297	296,7	0,33	0,11
316	316,9	0,87	0,28
350	353,03	3,03	0,87
376	378,6	2,55	0,68
413	416,8	3,83	0,93
446	451,9	5,92	1,33
490	498,7	8,70	1,78
524	526,9	2,89	0,55
584	588,9	4,88	0,83
670	674,2	4,16	0,62
856	863,4	7,43	0,87
1096	1106,9	10,9	1,00
1358	1369,6	11,6	0,85
1496	1476,9	19,0	1,27
1610	1506,8	103,3	6,41
1730	1506,8	223,3	12,9
2064	1506,8	557,3	27,0

Tabla 4.4: Mediciones del Ensayo 1: Calculo de Iluminancia.

Se observa que en el rango de trabajo mencionado el error relativo máximo es del 1.8% en comparación con el Luxómetro del Laboratorio de Fotometría.

De las mediciones realizadas (ver tabla 4.3) se puede concluir que la condición de saturación del sensor comienza a producirse a partir de los 1500 Lux, produciendo a la salida del circuito una tensión de 14,17V, condición por la cual se limitó la tensión a la salida del circuito con un diodo zener.

4.4.2. Ensayo 2: Calculo de Iluminancia

En esta segunda instancia se procedió a ensayar el circuito con la implementación del diodo zener con el objetivo de verificar la condición de saturación a la salida del circuito. Las mediciones se realizaron con el programa de software (detallado en la sección 5.5) y la placa conversora con el objetivo de testear el correcto funcionamiento del instrumento en su conjunto.

Se utilizó un Luxómetro proporcionado por el Laboratorio de Fotometría del IIE para la posterior verificación de los resultados obtenidos por el circuito.

En la tabla 4.5 se muestran las medidas obtenidas en el ensayo.

$E_{Luxómetro}(lux)$	Voltajes (V)	Corriente (mA)	$E_{Circuito}(lux)$	Error relativo
205	1,96	0,00730	204,8	0,09
236	2,27	0,00843	236,6	0,25
249	2,38	0,00884	248,1	0,36
282	2,71	0,0101	282,5	0,16
305	2,93	0,0109	305,1	0,04
315	3,03	0,0113	316,4	0,45
345	3,31	0,0123	345,7	0,19
360	3,45	0,0129	360,2	0,05
385	3,69	0,0137	385,0	0,01
415	4,01	0,0149	417,8	0,67
423	4,08	0,0152	425,2	0,52
454	4,39	0,0163	457,5	0,78
501	4,86	0,0180	506,5	1,09
511	4,98	0,0185	519,7	1,70
526	5,09	0,0189	530,7	0,89
610	5,92	0,0220	617,8	1,28
614	5,93	0,0220	618,4	0,72
653	6,29	0,0234	656,5	0,53
662	6,40	0,0238	667,6	0,84
694	6,68	0,0248	697,1	0,45
740	6,90	0,0257	720,2	2,67
747	6,93	0,0258	723,3	3,17
766	7,01	0,0261	731,4	4,52
839	7,07	0,0263	737,3	12,1
915	7,05	0,0262	735,3	19,7
1093	7,06	0,0262	736,1	32,7
1245	7,06	0,0262	736,5	40,9

Tabla 4.5: Mediciones del Ensayo 2: Calculo de Iluminancia.

Se concluye que el nuevo punto de saturación del circuito de acondicionamiento de la señal del sensor se produce a 6,9V a la entrada de la placa conversora, verificando las restricciones que ésta presenta. El circuito implementado presenta un error relativo máximo del 1.7% en la medición de la iluminancia para la zona

Capítulo 4. Sistema de medida construido: Hardware

de comportamiento lineal en comparación con el Luxómetro del Laboratorio de Fotometría del IIE .

En la figura 4.13 se presenta la linealidad del sensor para las medidas realizadas en el ensayo.

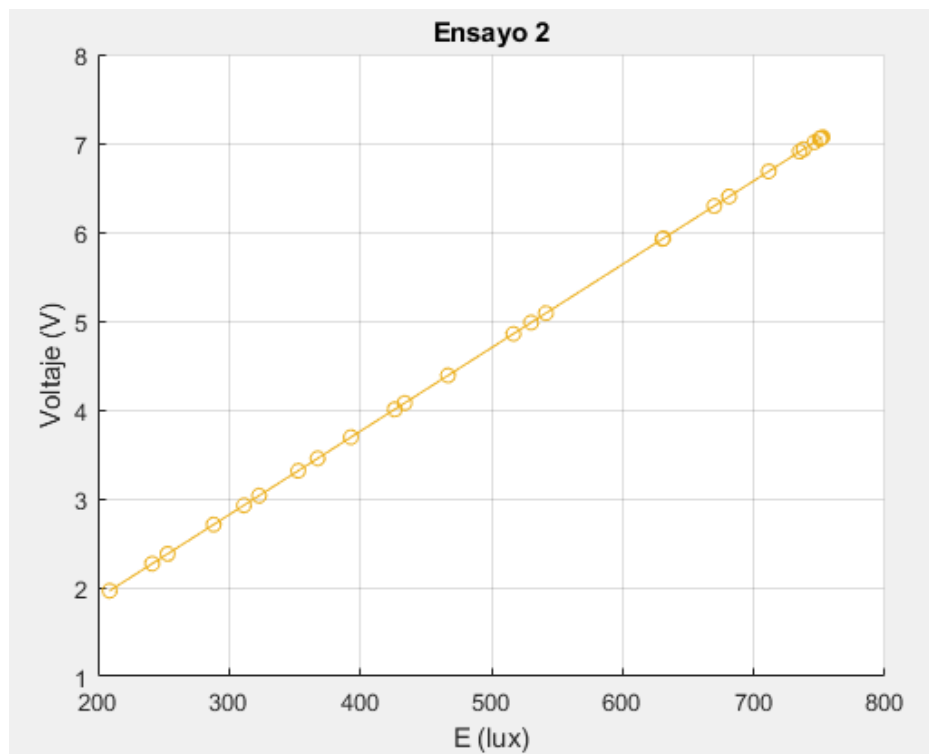


Figura 4.13: Gráfica con los valores medidos en el ensayo 2.

Capítulo 5

Sistema de medida construido: Software

5.1. Introducción

En la siguiente sección se presenta el software realizado, explicando el código implementado a través del programa Matlab. El objetivo del software es realizar el cálculo de P_{st} y mostrar la medida de iluminancia a partir de señales digitales.

Existen varias formas de obtener la señal digitalizada de voltaje: señales de entrada correspondientes a una señal física que se obtienen de la interacción con la placa conversora analógico -digital a través de una rutina de adquisición de datos que sirve como nexo entre la placa conversora y el software; a través del “Banco de Señales”, señales de testeo generadas por el propio software; o señales previamente adquiridas que son importadas. En cuanto a la señal digitalizada correspondiente a la iluminancia se puede adquirir conjuntamente cuando se adquiere la señal correspondiente al cálculo de P_{st} o se puede importar. Además se da la posibilidad de exportar las señales y los resultados a un archivo “.mat”.

El cálculo de P_{st} y la medida de la iluminancia se analizan en sus respectivos programas de análisis de datos a partir de las señales digitales. Tener en cuenta que no siempre se tiene señal de iluminancia.

En la figura 5.1 se presenta el diagrama de flujo correspondiente al programa implementado en función de la señal de entrada al mismo.

Capítulo 5. Sistema de medida construido: Software

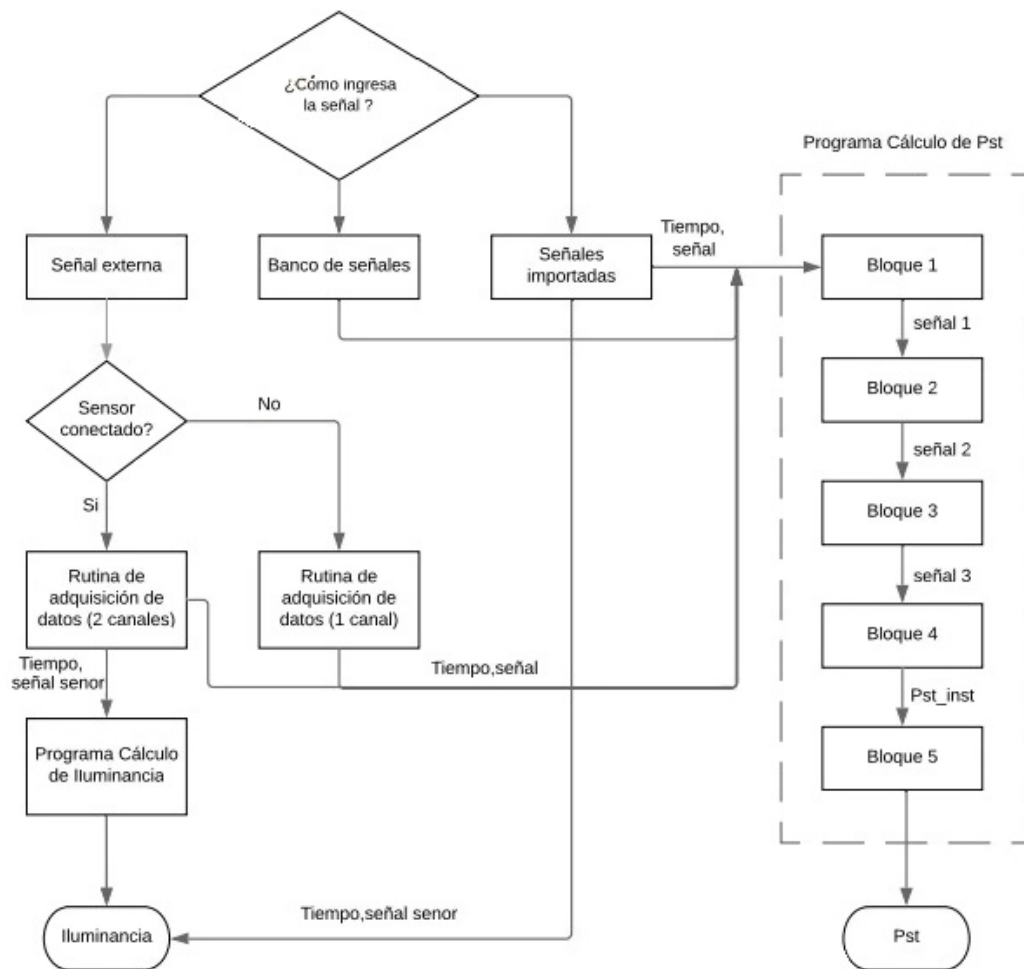


Figura 5.1: Diagrama de flujo del programa de software.

5.2. Diseño del Software

El software consta de un programa principal que despliega la interfaz e interactúa con el usuario y desde ahí son llamadas las funciones *Banco de señales*, *cálculo de P_{st}* , *cálculo de Iluminancia* y se realiza la configuración para la adquisición de datos con la placa.

The screenshot displays the software's configuration interface. At the top, there are logos for MFyFT, FACULTAD DE INGENIERIA, and other institutions. The main area is divided into several sections:

- Parametros Generales:** Includes input fields for 'Muestras por segundo', 'T short (min)', 'Tiempo total de la señal (min)', and 'Cantidad de clases bloque 5'.
- Origen de la Señal:** Features radio buttons for 'Señal Interna' (selected) and 'Señal Externa'.
- Señal Interna:** Contains a 'Señal Principal' dropdown menu, an 'Agregar Ruido' checkbox, and a 'Generar Señal' button.
- Auxiliar Señal Interna:** Includes two empty input fields.
- Importar / Exportar:** Contains buttons for 'Exportar' and 'Importar', each with a 'NombreDelArchivo' input field and a corresponding '.mat' button.
- Buttons:** 'Ver Manual' and 'Salir' buttons are located at the bottom.

Figura 5.2: Interfaz del Software.

Desde la interfaz el usuario selecciona si la señal de tensión es del banco de señales, si se adquiere una señal externa o si se importa de un archivo “.mat” .

Cuando se adquiere una señal externa el programa despliega una gráfica en tiempo real que permite observar las mediciones que se estén realizando. Observándose una gráfica si solo se está digitalizando la señal de tensión y dos si se esta trabajando con el sensor en paralelo para medir iluminancia.

Adicionalmente, permite exportar las mediciones realizadas por ambos canales a un archivo “.mat” e importarlos para realizar estudios posteriores off-line en el programa.

Los datos que se exportan/importan son los siguientes:

- Frecuencia de muestreo.

Capítulo 5. Sistema de medida construido: Software

- Tiempo total de medición.
- Amplitud de la señal.
- Frecuencia de la señal.
- Valores de P_{inst} en función del tiempo.
- Valor de P_{st} .
- Iluminancia medida en función del tiempo.

En la “Guía de usuario” del sistema de medida se encuentra detallado el uso del software, el mismo esta disponible en el Apéndice B.

5.3. Banco de señales

El banco de señales es una herramienta que presenta el programa para poder testear el software de calculo de P_{st} . Esta funcionalidad del software permite generar señales digitales sinusoidales con 230 Vrms y 120 Vrms a 50 Hz y 60 Hz, además de las señales de prueba que propone la norma IEC 6100-4-15 que se presentaron en la sección 3.5

El banco de señales trabaja generando una señal principal (sinusoides puras de 230 Vrms/120 Vrms y 50 Hz/60 Hz) y permite elegir diferentes tipo de alteraciones sobre la misma:

- Sin Cambios: la señal final coincide con la señal principal.
- Cambios Rectangulares:

Permite generar las señales propuestas para los ensayos :

- Ensayo 1 (modulaciones rectangulares) descrito en la sección 3.5.2. Los valores de frecuencia y de variación de amplitud en porcentaje se deben ingresar como se muestran en las tablas 3.5 y 3.6.
- Ensayo 2 descrito en la sección 3.5.3. Los cambios de amplitud y frecuencia se deben ingresar como se muestran en la tabla 3.7.

- Cambios Sinusoidales:

Permite generar las señales propuestas para el ensayo 1 (modulaciones sinusoidales) descrito en la sección 3.5.2. Los valores de frecuencia y de variación de amplitud en porcentaje se ingresan tal cual se muestran en las tablas 3.3 y 3.4.

5.4. Cálculo de P_{st}

- Cambios en Frecuencia y Amplitud:

Genera las señales propuestas para el Ensayo 3, el cual se describe en la sección 3.5.4.

- Voltajes distorsionados por cruces por cero:

Permite generar las señales propuestas para el Ensayo 4, el cual se describe en la sección 3.5.5.

- Armónicos con Banda Lateral:

Genera las señales para el Ensayo 5 descrito en la sección 3.5.6. Se debe ingresar la frecuencia de las señales que modulan la señal principal.

- Saltos de Fase:

Permite generar las señales propuestas para el Ensayo 6 descrito en la sección 3.5.7. Para generar dicha señal se debe ingresar el salto de fase.

- Cambios de Voltajes rectangulares con relación de trabajo:

Permite generar las señales propuestas para el Ensayo 7 descrito en la sección 3.5.8. La variación de amplitud se ingresa como se muestra en la tabla 3.13.

5.4. Cálculo de P_{st}

El programa para el cálculo de P_{st} fue realizado en función de lo estipulado por la norma IEC 6100-4-15 [12] detallado en la sección 3.2.

5.4.1. Bloque 1: Normalización de la señal

El bloque 1 se encarga de normalizar la señal de entrada al sistema para que las medidas de Flicker puedan realizarse independientemente del valor de voltaje de la señal de entrada.

Si la señal de entrada al bloque 1 es proveniente de un canal externo y la misma presenta una frecuencia de 60 Hz, la señal será filtrada por un filtro “stopband” para eliminar el ruido de 50 Hz introducido por la red de tensión local de frecuencia 50 Hz.

En la figura 5.3 se muestra el comportamiento del filtro en magnitud y en la figura 5.4 el comportamiento de fase para la frecuencia normalizada¹ utilizando

¹Es la relación entre la frecuencia analógica y la frecuencia de muestreo: $f_{normalizada} = \frac{f_{senal}}{f_{muestreo}}$

Capítulo 5. Sistema de medida construido: Software

una frecuencia de muestro igual a 6000 Hz.

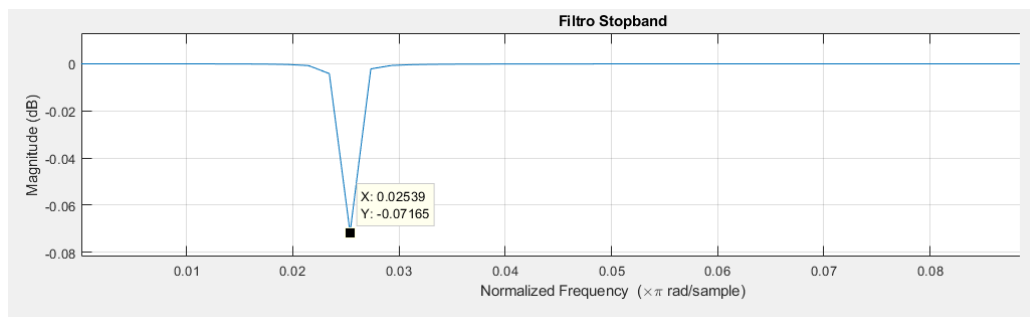


Figura 5.3: Bode de Magnitud para el filtro stopband.

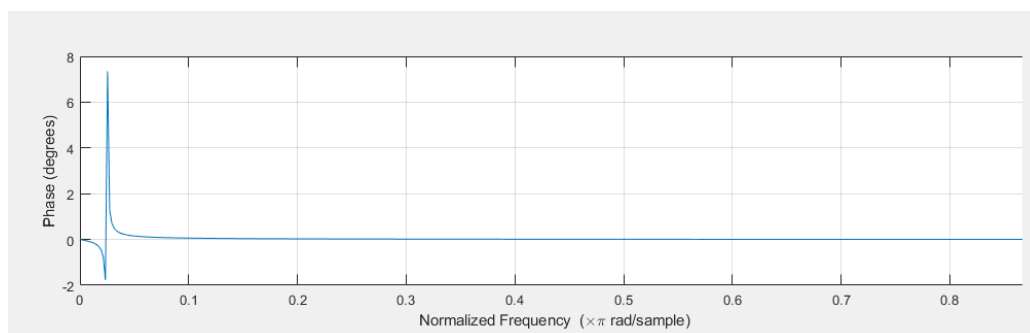


Figura 5.4: Diagrama de Bode para la fase del filtro stopband.

En la figura 5.3 se observa que el pico máximo de atenuación se encuentra en 48.5 Hz presentando una atenuación de 0.072 dB.

NOTA: Si se trabaja en una red de 60 Hz, es necesario realizar un filtro “stop-band” para filtrar el ruido de 60 Hz introducido por la red cuando se trabaja con señales de 50 Hz provenientes de un canal externo.

5.4.2. Bloque 2: Demodulación cuadrática

Esta función eleva al cuadrado la señal proveniente del bloque 1, con el fin de recuperar la señal que modula la amplitud del voltaje de la señal principal, simulando el comportamiento de una lámpara incandescente.

5.4.3. Bloque 3: Filtros de ponderación

El bloque 3 esta compuesto por 3 filtros en cascada que se presentan a continuación:

- Filtro Pasa Alto.
- Filtro Pasa Bajo.
- Filtro de Ponderación.

Cada uno de estos filtros esta representado por una función, la cual es llamada desde la función de calculo de P_{st} , para la ejecución de los mismas.

Filtro Pasa Alto

El filtro es utilizado para eliminar la componente DC de la señal proveniente del Bloque 2. El mismo consiste en un filtro Butterworth de primer orden, con frecuencia de corte igual a 0.05 Hz (-3dB). El filtro se realiza con la función *butter* para calcular su función de transferencia y la función *filter*² para realizar el filtrado de la señal correspondiente con la transferencia hallada.

A continuación, se presenta el comportamiento del filtro en magnitud en la figura 5.5 y fase en la figura 5.6 para la frecuencia normalizada.

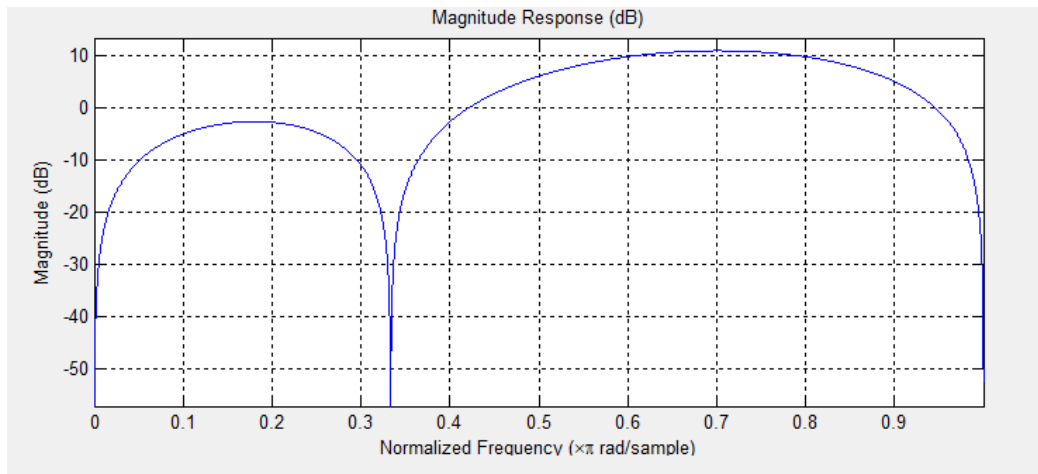


Figura 5.5: Diagrama de Magnitud para el filtro pasa alto.

²El numerador y denominador de la ecuación y la señal a filtrar son datos de entrada para la función *filter*, la salida de la función proporciona la señal filtrada.

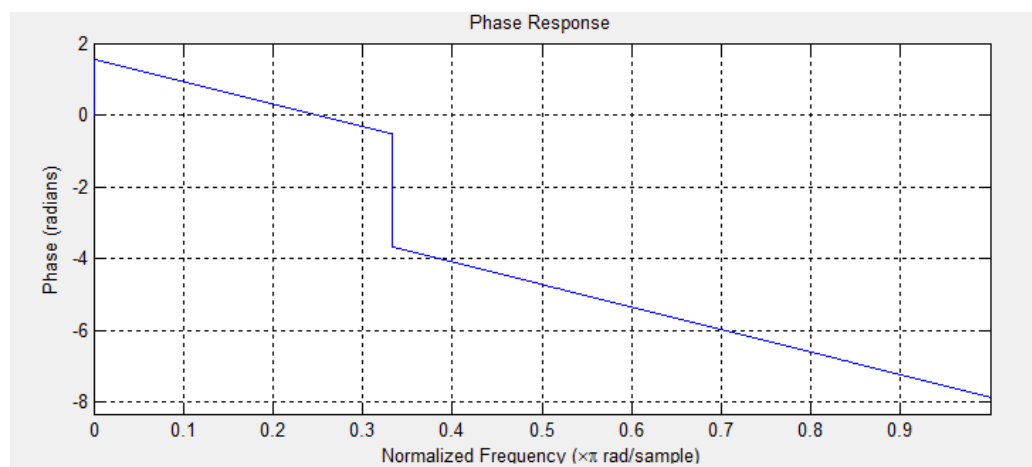


Figura 5.6: Diagrama de Fase para el filtro pasa alto.

Suavizado

Para mitigar los efectos del ruido que presentan las señales externas y las generadas por el banco de señales con ruido, se implementa a la salida del filtro pasa alto la función *movmean*. Para cada punto de la señal de entrada, la función calcula sobre una ventana deslizante de longitud igual a 25 puntos, un promedio a través de los 24 elementos vecinos, centrándose la ventana en la posición actual. El tamaño de la ventana se trunca automáticamente en los puntos finales cuando no hay suficientes elementos para llenar la ventana. Cuando la ventana se trunca, el promedio se toma solo sobre los elementos que llenan la ventana [18].

La frecuencia de muestreo sugerida para señales con frecuencia principal de 50 Hz corresponde a 4000 muestras por segundo y para señales con frecuencia principal de 60 Hz a 6000 muestras por segundo, generando una ventana deslizante de 6 ms y 4ms respectivamente.

Filtro Pasa Bajo

Este filtro elimina las componentes del doble de la frecuencia principal presentes en la señal proveniente del bloque 2. Es realizado por un filtro Butterworth de 6to orden con una frecuencia de corte de 35 Hz para señales de frecuencia fundamental de 50 Hz y con frecuencia de corte de 42 Hz para señales con frecuencia fundamental de 60 Hz. Con la función *butter* se determina la función de transferencia del filtro y luego se filtra la señal con la función *filter* aplicada a la transferencia hallada.

A continuación se presenta el comportamiento del filtro en magnitud, y fase, figura 5.7, para la frecuencia normalizada.

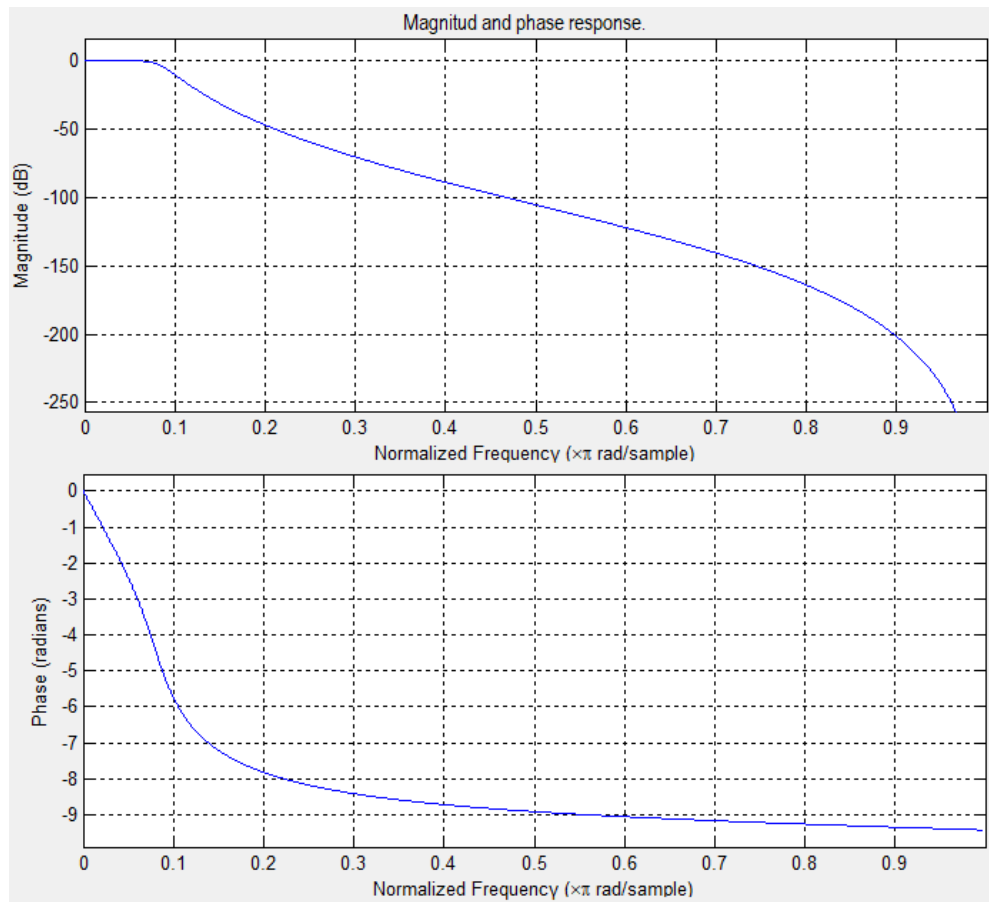


Figura 5.7: Diagrama de Magnitud y fase para el filtro pasa bajo.

Filtro de Ponderación

El filtro simula la respuesta en frecuencia del sistema de visión humano para fluctuaciones sinusoidales de voltaje de una lámpara incandescente de 230V/120V de 60 W. La función de repuesta esta basada en el umbral de perceptibilidad. Para una modulación en tensión se halló la frecuencia a la cual el 50% de las personas sometidas a las pruebas manifestaba molestia visual, ensayos realizados como se detalla en la sección 3.2 .

La función de transferencia que representa el filtro es la siguiente:

$$F(s) = \frac{k w_1 s}{s^2 + 2\lambda s + w_1^2} \frac{1 + \frac{s}{w_2}}{\left(1 + \frac{s}{w_3}\right) \left(1 + \frac{s}{w_4}\right)} \quad (5.1)$$

Los valores de la función de transferencia fueron presentados en la tabla 3.1 para un sistema de 230 V y un sistema de 120 V.

Sustituyendo los valores de la tabla 3.1 en la ecuación 5.1 se obtiene la siguiente función de transferencia para un sistema de 120 V:

Capítulo 5. Sistema de medida construido: Software

$$F(s) = \frac{5,047s^2 + 93,23s}{0,001049s^4 + 0,1783s^3 + 10,87s^2 + 453s + 3249} \quad (5.2)$$

A través de la función $cd2^3$ se halla la función de transferencia del filtro para un modelo discreto, debido a que la señal adquirida se encuentra de forma discreta.

$$F(z) = \frac{0,001116z^4 + 2,043x10^{-5}z^3 - 0,002212z^2 - 2,043x10^{-5}z + 0,001096}{z^4 - 3,834z^3 + 5,512z^2 - 3,522z + 0,8437} \quad (5.3)$$

Posteriormente se filtra la señal proveniente del filtro pasa bajo con la función *filter*, que utiliza como entrada la función de transferencia discreta hallada y la señal de entrada.

A continuación se presentan el Diagrama de Bode del filtro correspondiente a la ecuación 5.3 donde se puede observar que el filtro presenta una ganancia igual a 0.7821 para una frecuencia de 8.8 Hz que se corresponde con lo detallado en la sección 3.2.

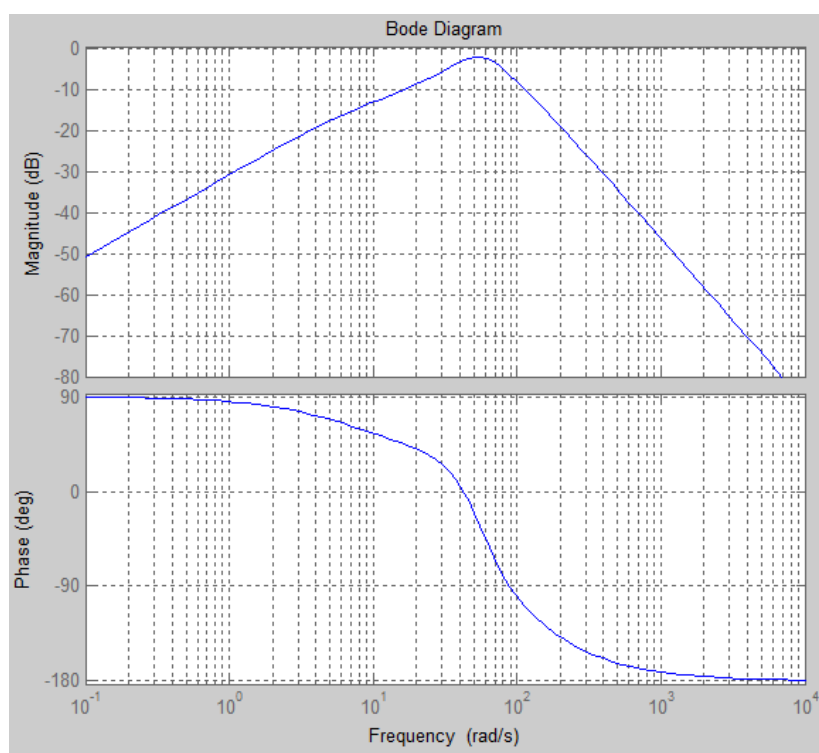


Figura 5.8: Diagrama de Bode del filtro de Ponderación de 120 V.

³La función *cd2* utiliza el siguiente cambio de variables: $s = 2f_s \frac{1-z}{1+z}$, para hallar la transferencia en tiempo discreto a partir de una transferencia de tiempo continuo.

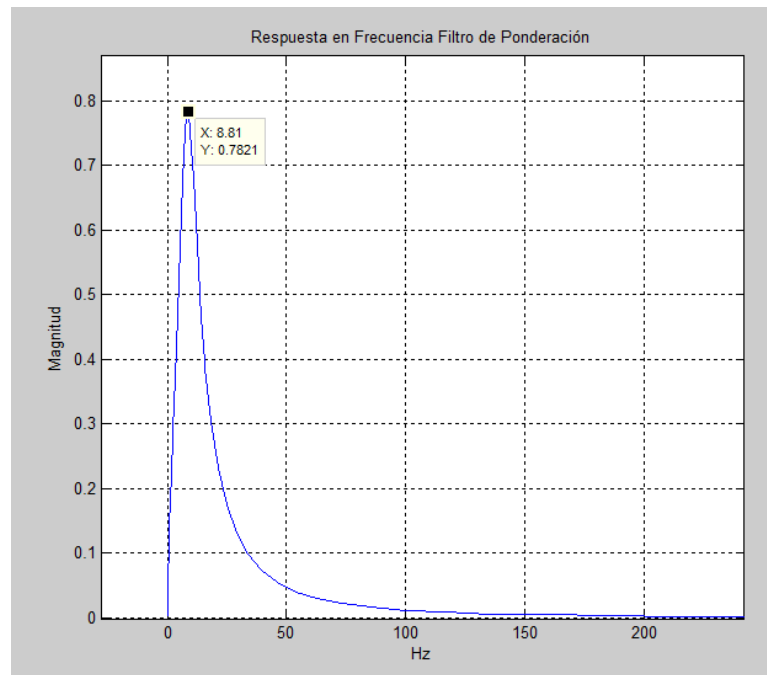


Figura 5.9: Diagrama de Bode de la respuesta en magnitud del filtro de Ponderación para 120 V.

Para un sistema de entrada de 230 V se obtiene la siguiente transferencia:

$$F(s) = \frac{7,02s^2 + 100,5s}{0,0009439s^4 + 0,1853s^3 + 11,12s^2 + 504,8s + 3309} \quad (5.4)$$

Al igual que para el sistema de 120 V se utilizó la función *cd2* y se halló la función de transferencia del filtro para un modelo discreto.

$$F(z) = \frac{0,0017z^4 + 2,418 \times 10^{-5}z^3 - 0,003377z^2 - 2,418 \times 10^{-5}z + 0,001676}{z^4 - 3,811z^3 + 5,443z^2 - 3,454z + 0,8216} \quad (5.5)$$

A partir de la función de transferencia de la ecuación 5.5, se utiliza la función *filter* para filtra la señal proveniente del filtro pasa bajo.

A continuación se presentan el Diagrama de Bode del filtro correspondiente a la ecuación 5.5:

Capítulo 5. Sistema de medida construido: Software

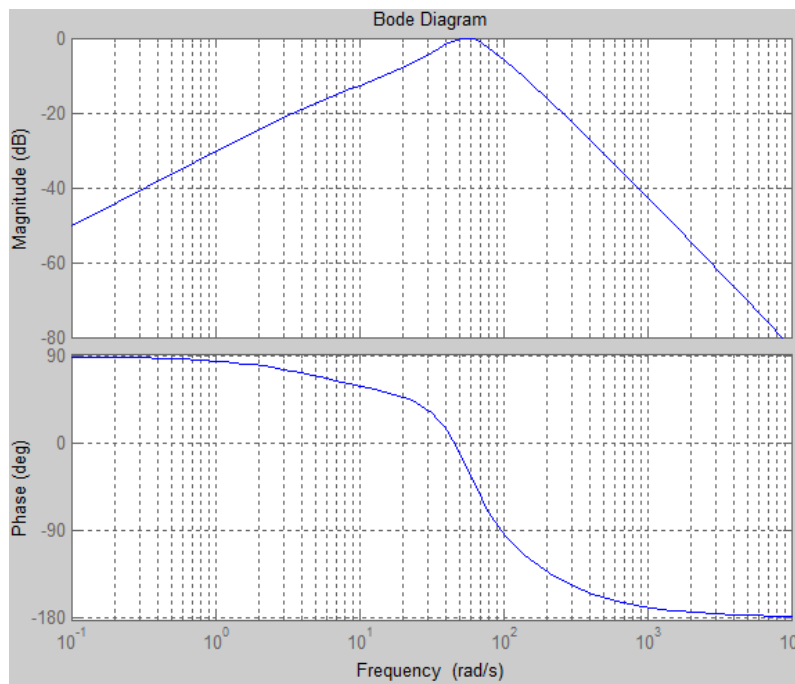


Figura 5.10: Diagrama de Bode del filtro de Ponderación de 230 V.

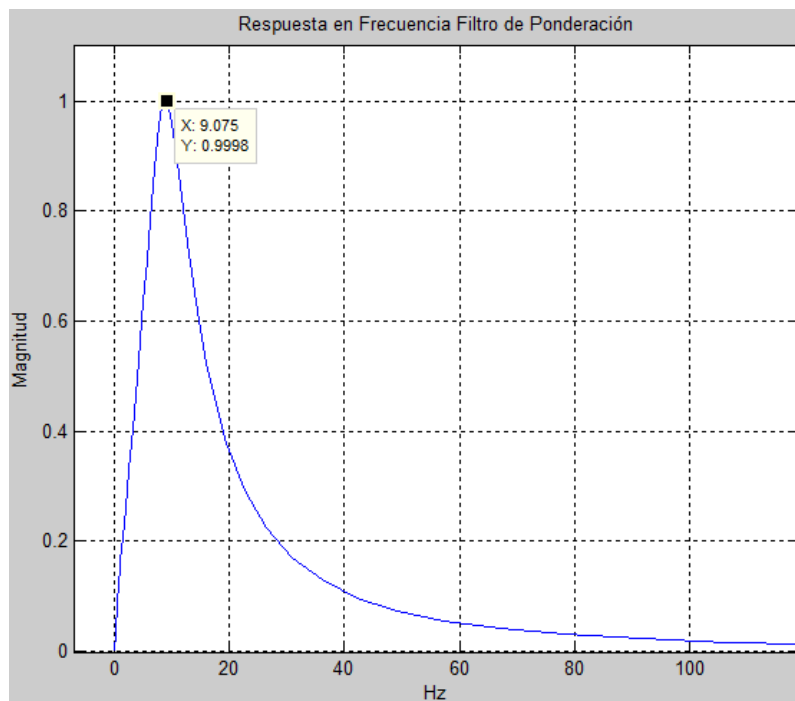


Figura 5.11: Diagrama de Bode de la respuesta en magnitud del filtro de Ponderación para 230 V.

Se puede observar en la figura 5.11 que el filtro presenta una ganancia igual a 1 para una frecuencia de 9.075 Hz que se corresponde con lo detallado en la sección 3.2.

5.4.4. Bloque 4: Multiplicador cuadrático

El bloque 4 multiplica cuadráticamente la señal proveniente del bloque 3, para simular la percepción no lineal del sistema ojo-cerebro. Luego la señal es filtrada con un filtro pasa bajos de primer orden, el cual simula la capacidad del cerebro de guardar información.

La función de transferencia del filtro esta representada por la siguiente ecuación:

$$F(s) = \frac{1}{1 + Ts} \quad (5.6)$$

siendo T una constante de valor 300 ms.

En la imagen 5.12 se observa el Diagrama de Bode del filtro:

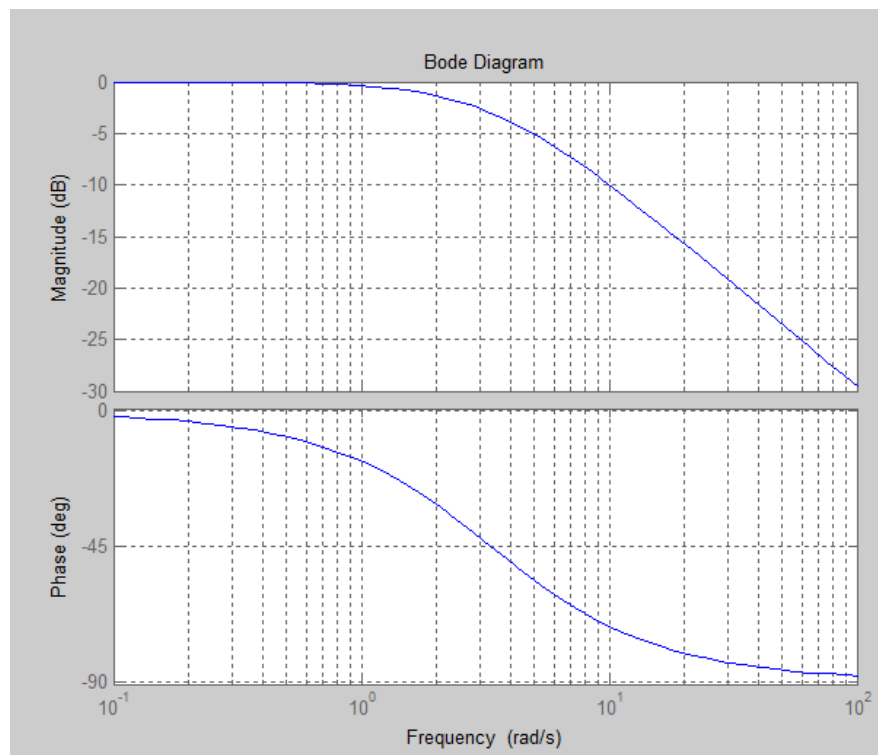


Figura 5.12: Diagrama de Bode del filtro del bloque 4.

A través de la función *cd2* se halló la función de transferencia del filtro para un modelo discreto, representada por la ecuación 5.7

$$F(z) = \frac{0,001664z + 0,001664}{z - 0,9967} \quad (5.7)$$

Se filtra la señal con la función *filter*, que utiliza como entrada la función de transferencia discreta hallada y la señal proveniente del bloque 3.

Factor de Ponderación

Para ajustar el valor de P_{inst} a la salida del bloque 4, es necesario multiplicar la señal por un factor de ponderación que depende del orden de tensión y frecuencia de la señal de entrada, los mismos se determinan en función del ensayo 1 descrito en la sección 3.5, que presenta distintas señales de prueba de la tabla 3.2 para las cuales es obligatorio obtener $P_{inst,max} = 1 \pm 8\%$ en la señal de salida del bloque 4.

En la tabla 5.1 se presentan las constantes de ponderación determinadas a partir del ensayo mencionado.

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

Tabla 5.1: Constantes de ponderación del bloque 4.

El valor de P_{inst} (señal de salida del bloque 4) se ve afectado por la quita de los primeros 50 segundos, y los últimos 10 segundos del total de la señal capturada. Esto se debe a la respuesta de los filtros, que presentan un transitorio en el arranque. Para que esto no afecte el tiempo total de medición de la señal, la captura se hace por un minuto más que el tiempo que se quiere relevar.

5.4.5. Bloque 5: Análisis Estadístico

En este bloque se realiza el análisis estadístico de los valores de P_{inst} provenientes del bloque 4 como se indica en la sección 3.3.

A partir de P_{inst} se construye un histograma ⁴ con la cantidad de clases que el usuario introduce desde la interfaz. A partir del histograma, se halla la probabilidad acumulada e interpolando se hallan los valores de los percentiles que la norma plantea.

A través, de la siguiente formula se determina finalmente del valor de P_{st} :

$$P_{st} = \sqrt{0,031P_{0,1} + 0,052P_{1s} + 0,065P_{3s} + 0,28P_{10s} + 0,08P_{50s}}$$

⁴Gráfico de la representación de distribuciones de frecuencias.

5.4.6. Ejemplo de calculo de P_{st}

A continuación, se presenta un ejemplo del funcionamiento de los diferentes bloques del software, a través del análisis de una señal de entrada conocida. En una primera instancia se utiliza una señal de entrada sinusoidal de 230 V, 50 Hz con cambios rectangulares de frecuencia 8.8 Hz y $\Delta U = 20\%$ para poder observar las modulaciones.

En la figura 5.13 se muestra la señal de entrada:

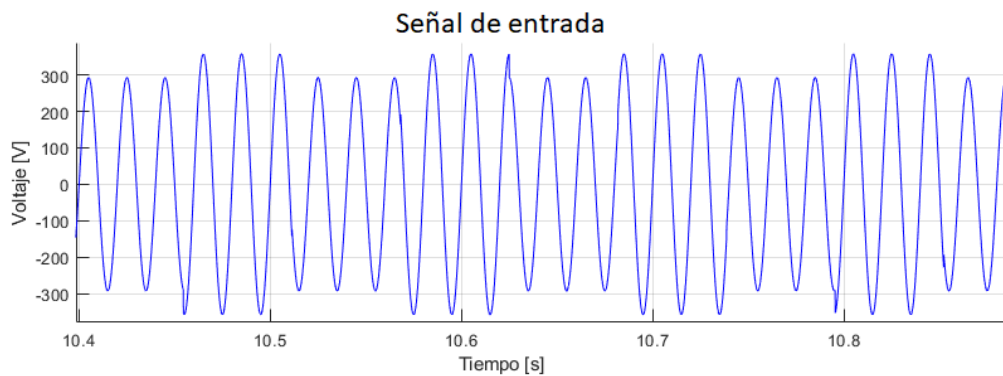


Figura 5.13: Señal de entrada.

Salida bloque 1

En la figura 5.14 se presenta la salida del bloque 1 con la tensión normalizada en 1 V:

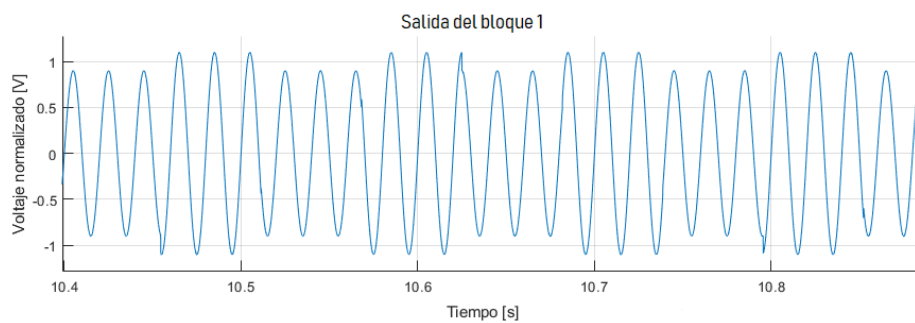


Figura 5.14: Señal de entrada normalizada.

Salida bloque 2

En la figura 5.15 se presenta la demodulación cuadrática para la señal proveniente del bloque 1.

Capítulo 5. Sistema de medida construido: Software

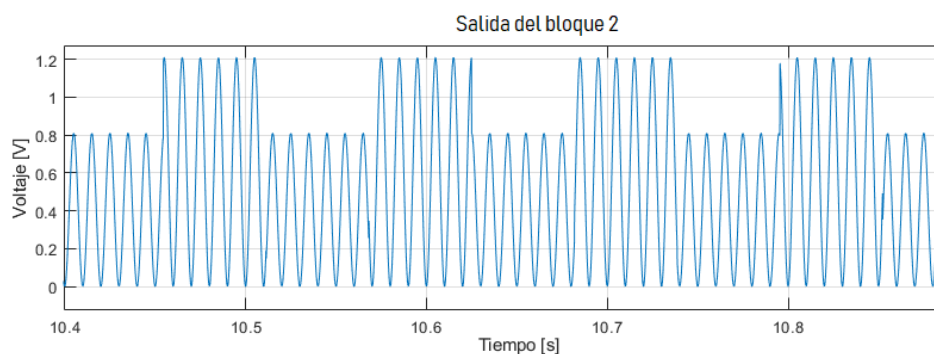


Figura 5.15: Señal demodulada.

Salida bloque 3

A continuación, en la figura 5.16 se presenta la señal de salida del filtro pasa alto:

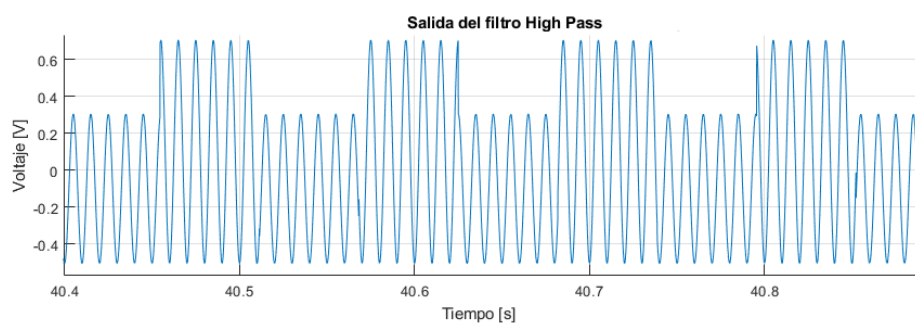


Figura 5.16: Señal de salida del filtro pasa alto.

En la figura 5.17 se muestra la salida del filtro pasa bajo:

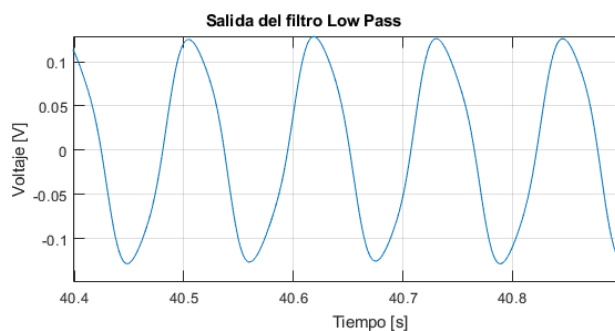


Figura 5.17: Señal de salida del filtro pasa bajo.

Finalmente, en la figura 5.18 se obtiene la señal de salida del filtro de ponderación y salida del bloque 3.

5.4. Cálculo de P_{st}

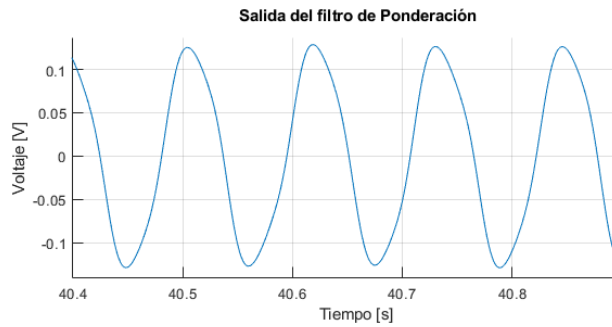


Figura 5.18: Señal de salida del filtro de ponderación.

Salida bloque 4

Para la siguiente simulación se utiliza una señal de entrada sinusoidal de 230 V y 50 Hz con cambios rectangulares de frecuencia 8.8 Hz y $\Delta U = 0,196\%$ propuesta por la norma IEC 6100-4-15 [12] para poder observar valores de $P_{inst} \simeq 1$.

En la figura 5.19 se muestra la señal obtenida a la salida del bloque 4, que representa el valor de P_{inst} en función del tiempo.

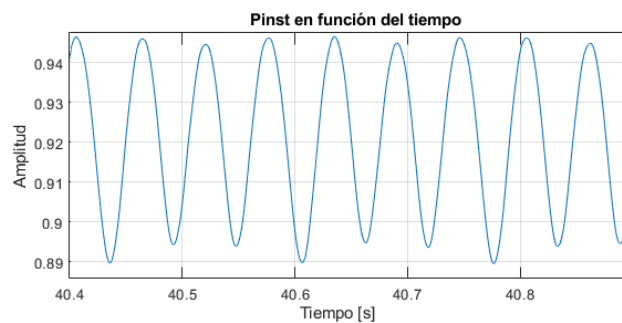


Figura 5.19: P_{inst} en función del tiempo.

Salida bloque 5

A continuación, se presenta en la figura 5.20 el histograma de la distribución de las frecuencias acumuladas para 1000 clases, de la cual se determinan los valores de los percentiles. La señal de entrada utilizada para la simulación es una onda sinusoidal de 230 V y 50 Hz con cambios rectangulares de frecuencia 0.325 Hz y $\Delta U = 0,894\%$ que representa un valor de $P_{st} = 1$ a la salida del bloque 5.

Capítulo 5. Sistema de medida construido: Software

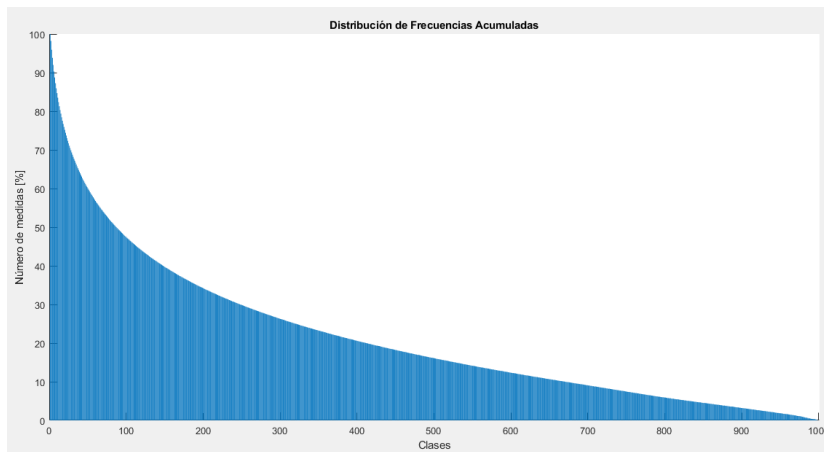


Figura 5.20: Distribución de frecuencias acumuladas.

5.5. Medida de Iluminancia

A continuación, se presenta el programa desarrollado para el análisis de la señal obtenida por el sensor óptico, donde se calcula la iluminancia de una fuente de luz. En la figura 5.21 se presenta el diagrama de flujo para el cálculo del mismo en función de como ingresa la señal al programa.

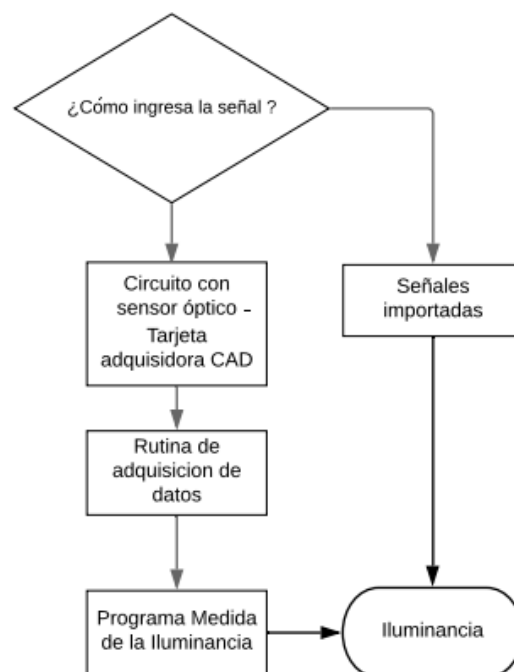


Figura 5.21: Diagrama de flujo del cálculo de la Iluminancia.

El programa trabajara con los datos obtenidos a través de la placa conversora,

5.6. Rutina Adquisición de Datos

por lo que la señal a ser analizada tendrá valores en voltaje, como se puede observar en la figura 4.8 que representa el circuito de adaptación señales provenientes del sensor y la entrada a la placa conversora .

A través, de la ecuación 4.4 introducida en la sección 4.3 se hallan los valores de corriente que emite el sensor óptico en función de la luz capturada y con el valor de Sensibilidad Relativa⁵ del sensor determinado con los ensayos presentados en la sección 4.4 se halla el valor de Iluminancia.

El programa permite desplegar una gráfica con los valores de Iluminancia en función del tiempo.

En la figura 5.22 se presenta la medida de Iluminancia para una lámpara incandescente alimentada con una fuente de tensión que produce $P_{st} = 1$ ⁶.

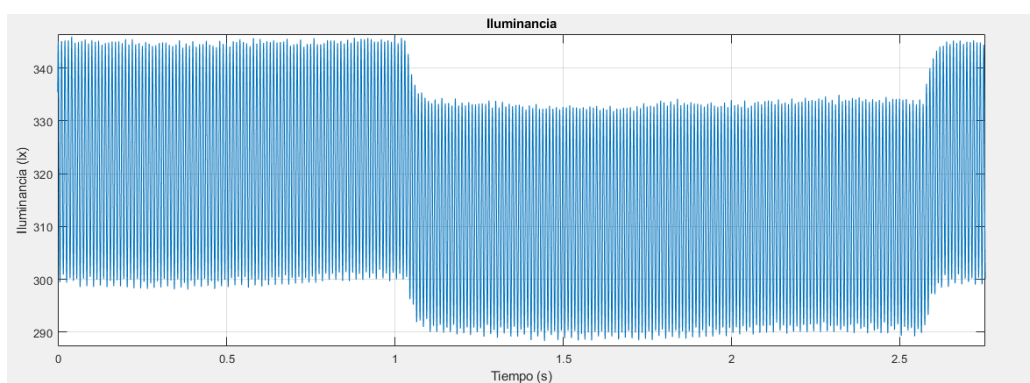


Figura 5.22: Medida de iluminancia para una señal con $P_{st}=1$.

5.6. Rutina Adquisición de Datos

En esta sección se introduce la rutina de software realizado para la adquisición de datos, que es el nexo entre el software y la placa conversora, comandando la digitalización de las señales analógicas que recibe la placa conversora y entregando al software la señal digitalizada para procesar.

La rutina realizada permite la interacción entre la placa conversora desarrollada por National Instrument y el programa de Matlab. La misma habilita la adquisición de datos a través de dos canales de medición distintos. Un canal es utilizado para medir fluctuaciones de tensión y poder calcular el valor de P_{st} y el otro canal se utiliza para medir la Iluminancia de una lámpara incandescente (no es mandatorio realizar las dos mediciones, pudiéndose realizar una sola medición).

⁵Sensibilidad Relativa igual a 35 nA/Lux

⁶Señal de tensión sinusoidal de 230 V y 50 Hz que presenta una modulación rectangular con una frecuencia de 39 cambios por minuto y una variación de tensión igual a 0.894%.

Capítulo 5. Sistema de medida construido: Software

Se debe especificar en el programa los canales de la placa conversora que se utilizan para las mediciones, los valores de la tasa de muestro y el tiempo total de medición de datos para ambos canales con el fin de habilitar y configurar la misma para realizar medidas.

Capítulo 6

Ensayos

A continuación se presenta los distintos ensayos realizados para validar el software a través del *banco de señales*¹ realizado en el programa y la validación del instrumento en su totalidad a través de la generación de señales con la fuente programable. Adicionalmente se presentan ensayos complementarios para constatar el correcto funcionamiento del mismo frente a señales conocidas y señales propuestas por el artículo “Evaluating Alternatives to Voltage Fluctuation and Flicker measurements Based on IEC Standard 61000-4-15” [14] cuyos valores de P_{st} presenta uno de los principales cuestionamientos al Flickermeter actualmente presentado en la sección 1.3.

Todos los ensayos fueron realizados con una tasa de muestreo de 4000 y 6000 muestras por segundo para las señales con frecuencia principal de 50 Hz y 60 Hz respectivamente.

6.1. Ensayos de verificación del software según la norma IEC 61000-4-15 con señales del banco de señales.

En la siguiente sección, se presentan los resultados obtenidos para la verificación del software en el cálculo del P_{st} , a través del “banco de señales” desarrollado en el programa (ver la sección 5.3), en donde se generan todas las señales necesarias para los ensayos provistos por la norma IEC 61000-4-15 [12].

Verificación ensayo 1

En las tablas 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4 se presentan los valores obtenidos de P_{inst} máximo para fluctuaciones sinusoidales y rectangulares definidas en las tablas 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6 respectivamente. Se observa que la desviación obtenida en todos los puntos de las tablas entran en los límites establecidos en la norma IEC 61000-4-15 [12] ($P_{inst,max} = 1 \pm 8\%$).

¹Funcionalidad del programa que permite generar todas las señales de prueba propuesta por la norma IEC 6100-4-15

Capítulo 6. Ensayos

Fluctuaciones sinusoidales - 120 V/50 Hz - 120 V/ 60 Hz				
	señales 50Hz		señales 60Hz	
f_m (Hz)	Δu (%)	Pinst,max	Δu (%)	Pinst,max
0.5	2.453	1.01	2.453	0.96
1.5	1.126	1.01	1.126	0.96
8.8	0.321	1.01	0.321	0.96
20	0.978	1.01	0.977	0.96
25			1.464	0.96
33.3	3.111	1.01	2.570	0.96
40			4.393	0.96

Tabla 6.1: Resultados del software para el ensayo 1 - Fluctuaciones sinusoidales de amplitud 120 V.

Fluctuaciones sinusoidales 230 V/50 Hz - 230 V/60 Hz				
	señales 50Hz		señales 60Hz	
f_m (Hz)	Δu (%)	Pinst,max	Δu (%)	Pinst,max
0.5	2.325	1.01	2.325	0,99
1.5	1.067	1.01	1.067	0,99
8.8	0.250	1.01	0.250	0,98
20	0.704	1.02	0.703	0,99
25	1.037	1.00	1.029	0.99
33.3		0.99		0.98
40			2.963	0,97

Tabla 6.2: Resultados del software para el ensayo 1 - Fluctuaciones sinusoidales de amplitud 230 V.

Fluctuaciones rectangulares - 120 V/50 Hz - 120 V/60 Hz				
	señales 50Hz		señales 60Hz	
f_m (Hz)	Δu (%)	Pinst,max	Δu (%)	Pinst,max
0.5	0.509	1.01	0.510	0.96
3.5	0.342	1.01	0.342	0.96
8.8	0.196	1.01	0.196	0.96
18	0.446	1.01	0.457	0.96
21.5	0.592	1.01		
22			0.611	0.95
25	0.764	1.00		
25.5			0.768	0.95
28	0.915	1.01		
30.5	0.847	1.01		
33.33		1.01		0.97
37			0.975	1.03
40			2.327	0.96

Tabla 6.3: Resultados del software para el ensayo 1 - Fluctuaciones rectangulares de amplitud 120 V.

6.1. Ensayos de verificación del software según la norma IEC 61000-4-15 con señales del banco de señales.

Fluctuaciones rectangulares - 230 V/ 50 Hz - 230 V/60 Hz				
	señales 50Hz		señales 60Hz	
f_m (Hz)	Δu (%)	$P_{inst,max}$	Δu (%)	$P_{inst,max}$
0.5	0.509	1.01	0.510	0.99
3.5	0.342	1.01	0.342	0.99
8.8	0.196	1.01	0.196	0.99
18	0.446	1.01	0.457	0.99
21.5	0.592	1.01		
22			0.611	0.99
25	0.764	1.00		
25.5			0.768	0.98
28	0.915	1.01		
30.5	0.847	1.01		
33.33		1.01		1.00
37			0.975	1.05
40			2.327	0.99

Tabla 6.4: Resultados del software para el ensayo 1 - Fluctuaciones rectangulares de amplitud 230 V.

Verificación ensayo 2

En la tabla 6.5 se muestran los resultados correspondientes al ensayo para las diferentes señales de entrada, en la misma, se muestran los valores de P_{st} obtenidos para las fluctuaciones rectangulares descritas en la tabla 3.7. Se puede observar que en todos los puntos del ensayo las medidas se encuentran dentro del límite provisto por la norma IEC 61000-4-15 [12] ($P_{st} = 1 \pm 5\%$).

f_m (CPM)	P_{st}			
	120 V/50 Hz	120 V/60 Hz	230 V/50 Hz	230 V/60 Hz
1	1.0	0.97	1.00	0.98
2	1.0	0.97	1.00	0.99
7	1.0	0.97	1.01	0.99
39	1.0	0.97	1.00	0.99
110	1.0	0.97	1.00	0.99
1620	1.0	0.98	1.00	0.99
4000	1.01	Ensayo no requerido	0.99	Ensayo no requerido
4800	Ensayo no requerido	1.00	Ensayo no requerido	1.01

Tabla 6.5: Resultados del software para del ensayo 2

Verificación ensayo 3

Aplicando los cambios de amplitud en tensión y de frecuencia que se especificaron en la tabla 3.8, se obtienen los valores de $P_{inst,max}$ presentados en la tabla 6.6. Estos resultados tienen una desviación menor a los límites requeridos ($P_{inst,max} = 1 \pm 8\%$).

Capítulo 6. Ensayos

Señal de entrada	P _{inst,max}
120 V/50 Hz	1.04
120 V/60 Hz	0.93
230 V/50 Hz	1.05
230 V/60 Hz	0.92

Tabla 6.6: Resultados del software para el ensayo 3.

NOTA: Se debe ingresar una frecuencia de muestreo superior a las 10000 muestras por segundo para permitir generar la onda completa y no producir cambios bruscos de tensión para la señal de entrada de 230V y 50Hz.

Verificación ensayo 4

Para la señal de entrada distorsionada por múltiples cruces por cero, introducida en la sección 3.5.5, se obtuvieron los valores de $P_{inst,max}$ mostrados en la tabla 6.7, verificando lo establecido por el ensayo ($P_{inst,max} = 1 \pm 8\%$).

Señal de entrada	P _{inst,max}
120 V/50 Hz	1.00
120 V/60 Hz	0.95
230 V/50 Hz	1.01
230 V/60 Hz	0.99

Tabla 6.7: Resultados del software para el ensayo 4.

Verificación ensayo 5

En función de las especificaciones de la tabla 3.11 estipulada por la norma IEC 61000-4-15, se obtiene que para señales de 230V y 120V de 50Hz el sistema de medición presenta un ancho de banda de $f_{v,max} = 1750Hz$ y para señales de 230V y 120V de 60Hz el ancho de banda corresponde a $f_{v,max} = 1740Hz$, por lo tanto, se verifica en todos los casos el ancho de banda mínimo de valor igual a $f_{v,max} = 450Hz$.

Verificación ensayo 6

Aplicando en la señal de entrada los saltos de fase especificados en la tabla 3.12, se obtienen los resultados presentados en la tabla 6.8. Se puede observar que todos los puntos de la tabla verifican lo estipulado en la norma IEC 61000-4-15.

6.2. Ensayos de verificación del instrumento de medida según la norma IEC 61000-4-15 con señales generadas con la fuente programable.

Salto de fase	P_{st}			
	120 V/50 Hz	120 V/60 Hz	230 V/50 Hz	230 V/60 Hz
30°	0.703	0.598	0.916	0.776
-30°	0.721	0.601	0.941	0.782
45°	0.820	0.684	1,07	0.889
-45°	0.861	0.689	1,11	0.901

Tabla 6.8: Resultados del software para el ensayo 6.

Verificación ensayo 7

En este ensayo, la señal de entrada es modulada rectangularmente con un ciclo de trabajo del 20 % con las características especificadas en la tabla 3.13. En la tabla 6.9 se muestran los valores obtenidos de P_{st} para las diferentes entradas, los cuales cumplen con los límites establecidos por la norma IEC 61000-4-15 ($P_{st} = 1 \pm 5\%$).

Señal de entrada	P_{st}
120 V/50 Hz	0.96
120 V/60 Hz	0.95
230 V/50 Hz	0.96
230 V/60 Hz	0.97

Tabla 6.9: Resultados del software para el ensayo 7.

6.2. Ensayos de verificación del instrumento de medida según la norma IEC 61000-4-15 con señales generadas con la fuente programable.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los distintos ensayos realizados para validar el sistema de medición realizado (hardware y software) para el cálculo de P_{st} , a través, de la generación de señales de prueba estipuladas por la norma IEC 6100-4-15 [12] con la fuente APS 1102A y la tarjeta Analog Discovery 2.

6.2.1. Verificación ensayo 1

En las tablas 6.10, 6.11, 6.12 y 6.13 se presentan los valores obtenidos de P_{inst} máximo para fluctuaciones sinusoidales y rectangulares definidas en las tablas 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6 respectivamente. El margen previsto por la norma era de tener un valor de $P_{inst} = 1 + 8\%$.

Capítulo 6. Ensayos

Fluctuaciones sinusoidales - 120 V/50 Hz - 120 V/60 Hz				
	señales 50Hz		señales 60Hz	
f_m (Hz)	Δu (%)	Pinst,max	Δu (%)	Pinst,max
0.5	2.453	0,99	2.453	1,07
1.5	1.126	1,01	1.126	1,07
8.8	0.321	1,01	0.321	1,06
20	0.978	1,00	0.977	1,06
25			1.464	1,05
33.3	3.111	0,93	2.570	1,02
40			4.393	1,07

Tabla 6.10: Resultados del instrumento para el ensayo 1 - Fluctuaciones sinusoidales de amplitud 120 V.

Fluctuaciones sinusoidales - 230 V/50 Hz - 230 V/60 Hz				
	señales 50Hz		señales 60Hz	
f_m (Hz)	Δu (%)	Pinst,max	Δu (%)	Pinst,max
0.5	2.325	1,00	2.325	1.06
1.5	1.067	1,00	1.067	1.00
8.8	0.250	1,03	0.250	1.06
20	0.704	1,00	0.703	1.05
25	1.037	0,99		
33.33	2.128	0,94	1.758	1.07
40			2.963	1.06

Tabla 6.11: Resultados del instrumento para el ensayo 1 - Fluctuaciones sinusoidales de amplitud 230 V.

Fluctuaciones rectangulares - 120 V/50 Hz - 120 V/60 Hz				
	señales 50Hz		señales 60Hz	
f_m (Hz)	Δu (%)	Pinst,max	Δu (%)	Pinst,max
0.5	0.597	1.03	0.598	1.02
3.5	0.408	1.02	0.408	1.02
8.8	0.252	1.02	0.252	1.03
18	0.611	1.00	0.626	1.00
21.5	0.820	0.97		
22			0.851	1.05
25	1.087	1.07		
25.5			1.072	1.04
28	1.303	1.03		
30.5	1.144	1.07		
33.33		1.03		
37			1.304	1.04
40			3.451	0.99

Tabla 6.12: Resultados del instrumento para el ensayo 1 - Fluctuaciones rectangulares de amplitud 120 V.

6.2. Ensayos de verificación del instrumento de medida según la norma IEC 61000-4-15 con señales generadas con la fuente programable.

Fluctuaciones rectangulares - 230 V/50 Hz - 230 V/60 Hz				
	señales 50Hz		señales 60Hz	
f_m (Hz)	Δu (%)	$P_{inst,max}$	Δu (%)	$P_{inst,max}$
0.5	0.509	1.00	0.510	0.99
3.5	0.342	1.04	0.342	1.01
8.8	0.196	1.06	0.196	1.01
18	0.446	0.99	0.457	1.01
21.5	0.592	0.93		
22			0.611	0.92
25	0.764	0.96		
25.5			0.768	1.00
28	0.915	1.01		
30.5	0.847	1.06		
33.33	1.671	0.93	1.258	1.05
37			0.975	1.05
40			2.327	0.98

Tabla 6.13: Resultados del instrumento para el ensayo 1 - Fluctuaciones rectangulares de amplitud 230 V.

Se verifica que en todos los puntos de las distintas tablas del ensayo, los valores de $P_{inst,max}$ obtenidos se encuentran dentro de la desviación permitida por la norma IEC 61000-4-15 [12], $P_{inst,max} = 1 \pm 8\%$.

6.2.2. Verificación ensayo 2

La tabla 6.14 presenta los resultados obtenidos con el instrumento para las diferentes señales de prueba, en la misma se muestran los valores de P_{st} obtenidos para las fluctuaciones rectangulares descritas en la tabla 3.7.

fm (CPM)	P_{st}			
	230 V/50 Hz	230 V/60 Hz	120 V/50 Hz	120V /60 Hz
1	0,98	0,97	0,97	0,95
2	0,98	0,97	0,97	0,95
7	0,97	0,97	0,97	0,95
39	0,97	0,97	0,98	0,95
110	0,97	0,95	0,98	0,96
1620	0,96	0,97	0,96	0,96
4000	0.95	Ensayo no requerido	0,95	Ensayo no requerido
4800	Ensayo no requerido	1,03	Ensayo no requerido	1,00

Tabla 6.14: Resultados del instrumento para del ensayo 2.

Se verifica que en todos los puntos del ensayo los valores de P_{st} obtenidos se encuentran dentro de la desviación permitida por la norma IEC 61000-4-15 [12], $P_{st} = 1 \pm 5\%$.

6.3. Ensayos adicionales al instrumento de medida

En esta sección se presentan los resultados de distintos ensayos realizados para la validación del instrumento en comparación con un Flickermeter industrial proporcionado por el departamento de Calidad de Energía del IIE, además del análisis de las señales propuestas en el artículo “Evaluating Alternatives to Voltage Fluctuation and Flicker measurements Based on IEC Standard 61000-4-15” [14].

6.3.1. Ensayos de correlación con respecto al Medidor de Calidad de Energía Hioki PW3198

En estos ensayos se buscó observar la correlación entre el instrumento desarrollado y el medidor de calidad de energía Hioki PW3198 en la medición de P_{st} para distintas señales. Además se constata que el valor de P_{st} depende de la amplitud de la variación de tensión, cuando se multiplica la variación de tensión por un determinado factor, el valor de P_{st} se modifica aumentando su valor, multiplicando éste por el mismo factor.

Las señales de prueba y los valores obtenidos se presentan en la tabla 6.15.

Fluctuaciones rectangulares 230 V/50 Hz				
Fluctuación de Voltaje (%)	f_m (Hz)	$P_{st_{esperado}}$	$P_{st_{Hioki}}$	$P_{st_{MFyFT}}$
1	0.5	1.23	1.32	1.27
2	0.5	2.46	2.42	2.41
1	2	1.76	1.70	1.69
2	8	7.04	7.05	6.97

Tabla 6.15: Ensayos de correlación con respecto al instrumento Hioki PW3198.

Como se observa de la tabla 6.15 para las dos primeras señales se constata que un aumento del doble de la variación de tensión, repercute en un aumento del doble del valor de P_{st} .

Se concluye que el instrumento desarrollado presenta una buena correlación con respecto al Hioki PW3198 presentando un error relativo menor al 5%.

6.3.2. Ensayo con señales propuestas en el artículo “Evaluating Alternatives to Voltage Fluctuation and Flicker measurements Based on IEC Standard 61000-4-15” [14]

Como es mencionado el capítulo introductorio en la sección 1.3, uno de los principales cuestionamientos al Flickermeter esta dado por el hecho, de que el

6.3. Ensayos adicionales al instrumento de medida

análisis de concatenar distintas señales que dan $P_{st} = 1$, resulta en valores mayores a $P_{st} = 1$ como era de esperarse en un principio. En estos ensayos se busca replicar alguna de las señales estudiadas en el artículo [14] para constar dicho comportamiento.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la concatenación de distintas señales cuyo análisis por separado dan un valor de $P_{st} = 1^2$.

Señal con modulación de 1 CPM concatenada con señal de modulación de 1620 CPM

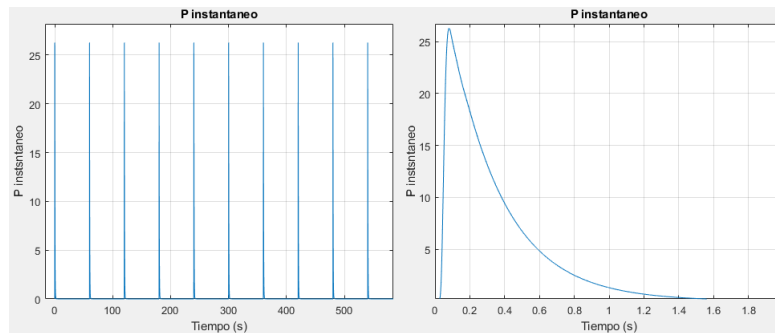


Figura 6.1: P_{inst} para una modulación con 1 CPM.

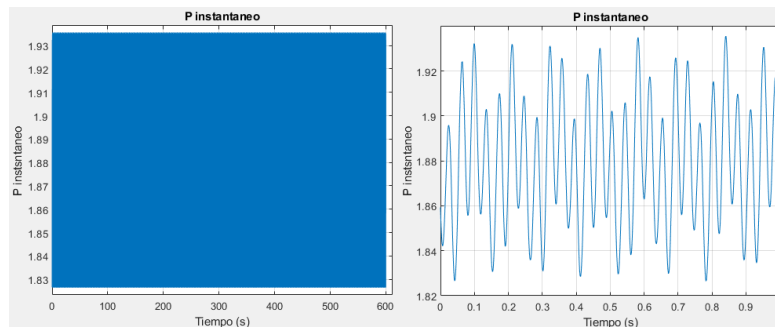


Figura 6.2: P_{inst} para una modulación con 1620 CPM.

²Señales propuestas por la norma IEC 6100-4-15, especificadas en la tabla 3.7.

Capítulo 6. Ensayos

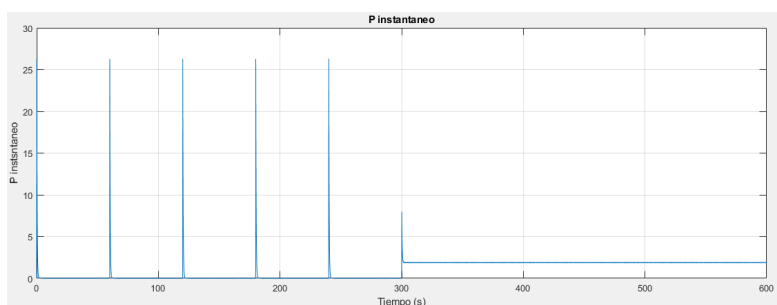


Figura 6.3: P_{inst} para una modulación con 1 CPM y 1620 CPM.

Para la señal mostrada en en la figura 6.6 se obtiene un valor de $P_{st} = 1,22$. Que representa una diferencia del 22% del valor esperado ($P_{st} = 1$) siendo consecuente con lo presentado en el artículo [14].

Señal con modulación de 2 CPM concatenada con señal de modulación de 110 CPM

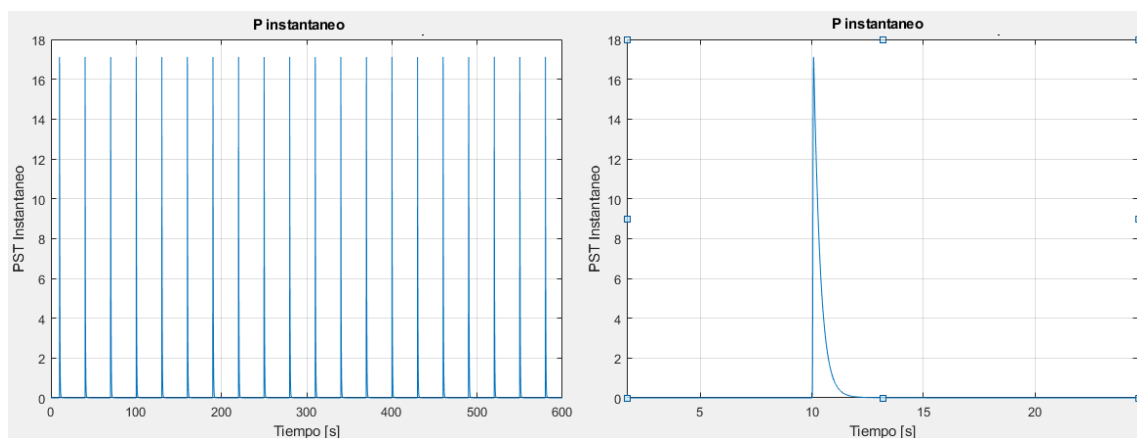


Figura 6.4: P_{inst} para una modulación con 2 CPM.

6.4. Ensayo circuito óptico

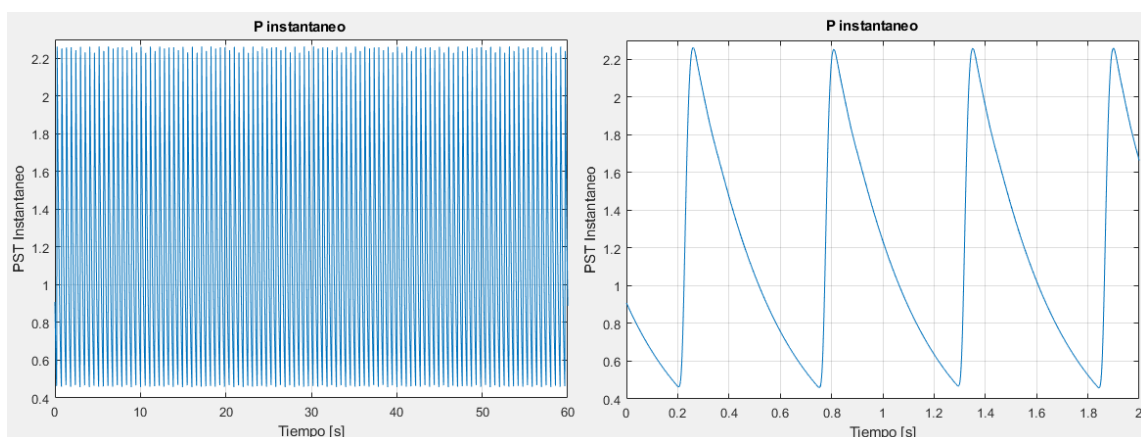


Figura 6.5: P_{inst} para una modulación con 110 CPM.

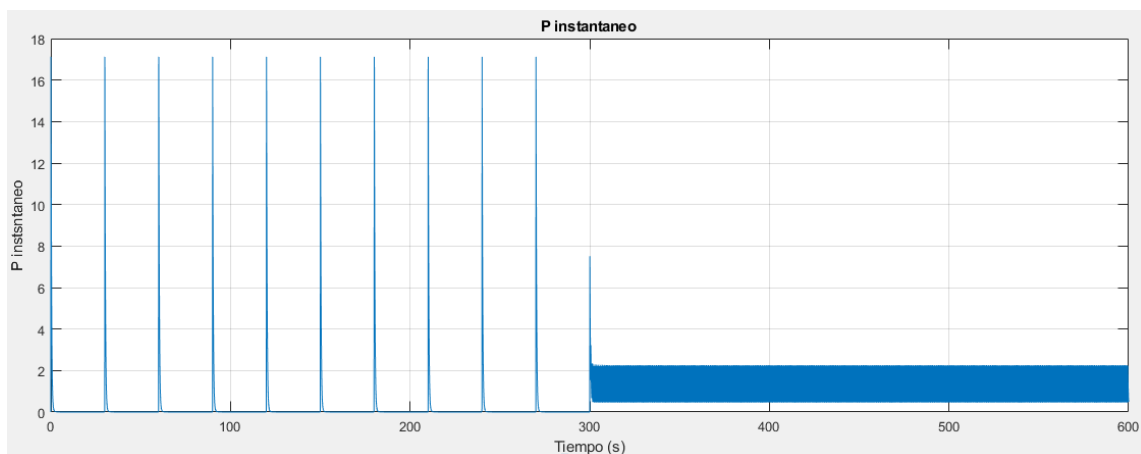


Figura 6.6: P_{inst} para una modulación con 2 CPM y 110 CPM.

Para la señal mostrada en la figura 6.6 se obtiene un valor de $P_{st} = 1,16$. Que representa una diferencia del 16% del valor esperado ($P_{st} = 1$) siendo consecuente con lo presentado en el artículo [14].

6.4. Ensayo circuito óptico

El ensayo³ consistió en alimentar una lampara incandescente de 230V y 60W con señales⁴ de tensión que producen $P_{st}=0$, $P_{st}=1$ y $P_{st}=2$. Las mediciones se realizaron con la lampara introducida en una esfera de Ulbricht⁵.

³Realizado en el Laboratorio de Fotometría del IIE.

⁴Señales generadas a través de la fuente programable APS 1102A.

⁵La Esfera de Ulbricht es una esfera hueca (en el caso del LabFot-IIE de 2 metros de diámetro), cubierta en su interior con una pintura especial, de color blanco, cuya carac-

Capítulo 6. Ensayos

La utilización de la esfera de Ulbricht presenta la ventaja que solo la luz que se difunde en la esfera estimula el sensor óptico permitiendo realizar una medición limpia de interferencias lumínicas externas, además permite medir la luz total irradiada en todas las direcciones desde la lámpara.

A continuación, en las figuras 6.7, 6.8 y 6.9 se presentan las medidas realizadas con una modulación de 39 cambios por minuto en la tensión de alimentación (señal propuesta por la norma IEC 6100-4-15).

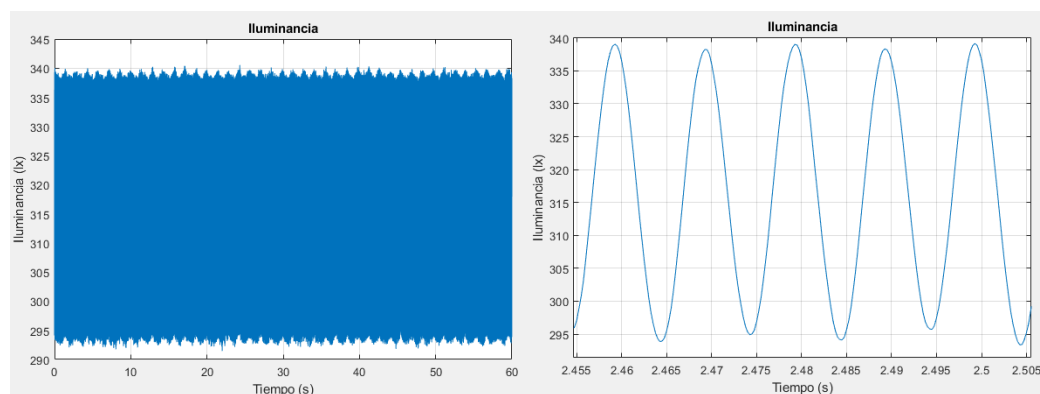


Figura 6.7: Medida de iluminancia para una señal con $P_{st}=0$.

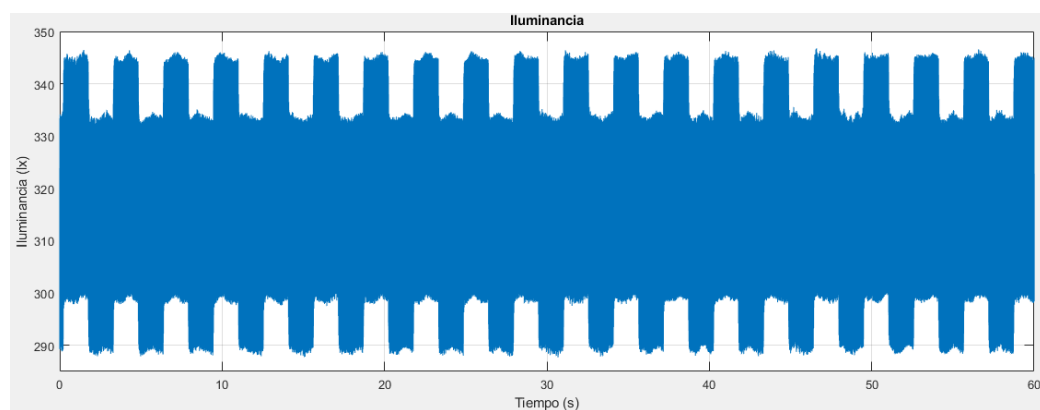


Figura 6.8: Medida de iluminancia para una señal con $P_{st}=1$.

terística es presentar una reflexividad lo mas uniforme posible a las diferentes longitudes de onda percibidas por el ojo humano. En su centro geométrico se sitúa la lámpara cuyo flujo se quiere determinar” [19]

6.4. Ensayo circuito óptico

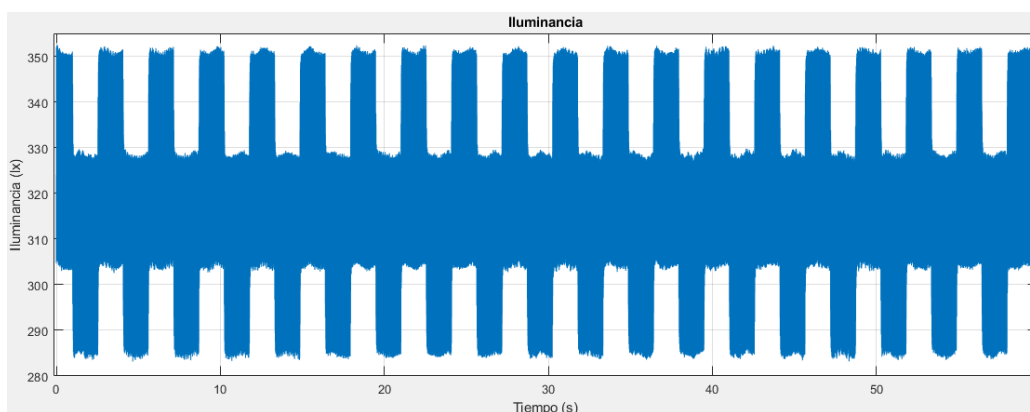


Figura 6.9: Medida de iluminancia para una señal con $P_{st}=2$.

Como se observa en la figura 6.7 la señal varía sinusoidalmente con una frecuencia de 100 Hz, igual al doble que la frecuencia de la tensión aplicada, como era de esperarse según lo presentado en las ecuaciones 2.12 y 2.20.

De las figuras 6.8 y 6.9 se desprende que las variaciones en la iluminancia también se producen cada 39 cambios por minuto, presentando la misma correlación que la señal de tensión como era de esperarse. Además, se observa que al aumentar la variación de tensión de la modulación en la señal de entrada, (señal con $P_{st} = 2$) también se produce un aumento en la variación en la iluminancia.

Las mediciones realizadas en éste ensayo, pretendían mostrar la potencialidad que tiene el sistema de medida para analizar en profundidad, la relación entre las fluctuaciones de tensión y el flujo luminoso de lámparas modernas y la correlación entre diversas señales luminosas que producen (en teoría) similar molestia visual en usuarios en trabajos futuros.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 7

Conclusiones y trabajos a futuro

7.1. Conclusiones

Basándonos en el objetivo del proyecto que constaba en la construcción de un sistema que mida simultáneamente iluminancia y P_{st} de acuerdo a la norma IEC 61000-4-15 y su calibración, podemos afirmar que el mismo fue cumplido, como quedó documentado a lo largo del texto.

El sistema de medición realizado tiene un fin académico por lo que cuenta con algunas características especiales, como ser, tener libre acceso al software para poder realizarle cambios. En ese sentido queremos destacar que se trabajó especialmente en el desarrollo de un software que fuera sencillo y que quedara bien documentado, para facilitar la interacción de los futuros usuarios con el mismo. Además se tuvo en cuenta incluir un banco de señales por software donde se generen todas las señales que la norma exige para la validación del instrumento. A su vez existe la posibilidad de generar dichas señales con ruido. Esto está motivado en el hecho de darle la posibilidad al usuario final de realizar un primer testeo de forma rápida y simple una vez que se realicen eventuales modificaciones en el software con fines de investigación.

También se procuró que el diseño del software fuera funcional, intuitivo y práctico, donde es viable desde la interfaz comandar la placa conversora para iniciar la captura de señales externas y generar señales desde el banco de señales. La misma permite a su vez importar y exportar señales para un posterior tratamiento y análisis. Además presenta los valores de P_{st} y de ser de interés permite ver la gráfica de P_{inst} en función del tiempo.

El sistema de medición incluye también la posibilidad de medir iluminancia de una lámpara incandescente, que se realiza a través de un fotodiodo que presenta un comportamiento similar al del ojo humano. La interfaz de usuario permite desplegar la gráfica de iluminancia en función del tiempo cuando la medida de iluminancia es realizada. La ventaja de contar con esta característica frente a medir

Capítulo 7. Conclusiones y trabajos a futuro

con un luxómetro es que se puede apreciar el comportamiento de la iluminancia respecto al tiempo, a diferencia del luxómetro que presenta el valor de iluminancia promediado. Esta característica del instrumento de medición permite estudiar la correlación entre la medidas de P_{st} y las variaciones de iluminancia, característica no disponible en los Flickermeters comerciales.

El hardware esta compuesto por la placa conversora analógico-digital, la PC y el circuito de adaptación de señales. Se trabajó en el circuito de adaptación para asegurar que las señales de entrada (variables a medir) sean transmitidas con valores adecuados para la conversión analógica-digital. También se trabajó en tener un diseño practico que permita realizar el conexionado de forma correcta y segura.

En cuanto a los ensayos pautados por la norma IEC 61000-4-15, se realizaron todos los ensayos para señales generadas por el banco de señales, cumpliéndose con éxito todos los requisitos previstos, validando el software realizado. Para el sistema de medición completo, se realizaron los ensayos 1 y 2 indicados en la tabla 3.2, verificándose todos los puntos de ambas tablas, validando el instrumento realizado, permitiendo clasificarlo como clase F3 según la norma IEC 6100-4-15 [12] ("Instrumento diseñado para estudios de calidad de energía, resolución de problemas y otras aplicaciones donde no se requieren incertidumbres de mediciones bajas"). Adicionalmente se comparó el sistema de medición realizado frente al instrumento industrial HIOKI PW3198 clase A según IEC 61000-4-30 obteniendo una muy buena correlación, presentando un error relativo menor al 5% en los valores obtenidos.

7.2. Trabajos a futuro

El Sistema de medición fue desarrollado con el fin de ser de utilidad para investigaciones sobre fenómenos de Flicker y de modulaciones en la tensión. A continuación se presentarán algunas posibles líneas de investigación que se verán potenciadas por contar con este instrumento.

En primer lugar se están explorando cambios en el proceso de medición, especialmente en el bloque estadístico. Este sistema de medición permite realizar los cambios por software al tener el código disponible. Permite un rápido testeo de dichos cambios por contar con un banco interno de señales y además se pueden testear con señales reales a través del circuito de acondicionamiento y la placa conversora.

Se puede profundizar en los estudios de Flicker al tener la capacidad de correlacionar medidas de P_{st} con su correspondiente cambio de iluminancia. Permite por ejemplo estudiar si existe alguna similitud entre distintas gráficas de iluminancia para un mismo valor de P_{st} . Además, es posible ver como evoluciona el comportamiento de la iluminancia al utilizar señales de tensión que producen valores de P_{st} más elevados.

7.2. Trabajos a futuro

En cuanto al instrumento realizado una posible mejora a futuro es realizar un acondicionamiento de señales que permita que el mismo se conecte a la red eléctrica (actualmente solo permite medir de una entrada diferencial). Si bien esto no era parte del alcance del presente proyecto, entendemos que dicho aspecto es una mejora y le da más versatilidad al instrumento. Permitirá también investigar otros aspectos relevantes del fenómeno Flicker como propagación en las redes, combinación de fuentes de perturbación, etc.

Otra posible mejora es incluir la capacidad de medir iluminancia de otros tipos de lámparas. Para ello es necesario calibrar el sensor para las lámparas que quieran medirse y actualizar el software. Esta funcionalidad permitiría estudiar como se comportan distintas lámparas a la misma señal. Poder ver como es el comportamiento de la iluminancia en el tiempo para cada lámpara y analizar su tolerancia a las fluctuaciones de tensión.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Apéndice A

Conceptos de Luminotecnia

En este capítulo se presenta al lector distintos conceptos sobre iluminación para una mejor comprensión del fenómeno Flicker (desarrollado en el capítulo 2) y sus efectos sobre las personas. También con el fin de introducir conceptos importantes para el diseño de un circuito óptico capaz de medir fluctuaciones de luz a través de un fotodiodo con una respuesta parecida al ojo humano. Por más detalle sobre estos conceptos remitirse a [1].

A.1. Flujo Luminoso

La mayoría de las fuentes de luz emiten energía electromagnética distribuida en múltiples longitudes de onda. Cuando se suministra energía eléctrica a una lámpara, la misma emite radiación, esta energía radiante emitida por la lámpara por unidad de tiempo, se llama potencia radiante o flujo radiante. Sólo una pequeña porción de esta potencia radiante es energía luminosa de la cual solo un fragmento de la misma se encuentra en la región visible por el humano: entre 400 y 700 nm. Entonces se define el flujo luminoso (F), como la porción de la potencia radiante total emitida por una fuente de luz que es capaz de afectar el sentido de la vista.

En otras palabras, iguales potencias radiantes de diferentes longitudes de onda no producen la misma brillantez. Por ejemplo, una lámpara de luz verde de 40 W se ve más brillante que una lámpara de luz azul de 40 W. La figura A.1 muestra una gráfica que indica la respuesta del ojo a diversas longitudes de onda para una visión fotópica¹.

Se observa que la curva de sensibilidad tiene forma de campana centrada aproximadamente en la región media del espectro visible. Por lo tanto, en condiciones normales, el ojo es más sensible a la luz verde-amarilla de longitud de onda de 555 nm y decae rápidamente para longitudes de onda más largas y más cortas.

¹La visión fotópica es la percepción visual que se produce con niveles de iluminación diurnos. Esta visión posibilita la correcta interpretación del color por el ojo.

Apéndice A. Conceptos de Luminotecnia

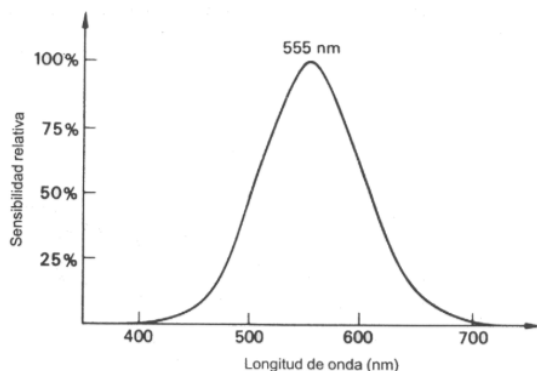


Figura A.1: Curva de sensibilidad de ojo humano (visión fotópica).

La unidad del flujo luminoso se debe corresponder a la respuesta sensitiva del ojo humano, por lo tanto, se define una nueva unidad diferente al Watt (W), debido a que las sensaciones visuales no son las mismas para colores diferentes. Se define el lumen (lm), la cual es una unidad capaz de medir la brillantez, que es determinada por comparación con una fuente patrón.

Para definir el lumen se utiliza la curva de sensibilidad del ojo como base para establecer el flujo luminoso, relacionándola con la fuente patrón, un lumen se define en términos de la potencia radiante de la luz verde-amarilla. Por consiguiente, un lumen es equivalente a 1/680 W de luz verde-amarilla de 555 nm de longitud de onda, por lo tanto, para poder determinar el flujo luminoso emitido por una luz de diferente longitud de onda, debe usarse la curva de luminosidad a fin de compensar la sensibilidad visual.

A.2. Iluminación

Si la intensidad de la fuente aumenta, el flujo luminoso transmitido a cada unidad de área en la vecindad de la fuente también aumenta y la superficie aparece más brillante. En la medición de la eficiencia luminosa, interesa la densidad del flujo luminoso sobre una superficie. Esto conlleva entonces a analizar la iluminación sobre una superficie.

Se define la iluminación (E) de una superficie (A) como el flujo luminoso (F) por unidad de área, representada en la ecuación A.1.

$$E = \frac{F}{A} \quad (\text{A.1})$$

Cuando el flujo F se mide en lúmenes y el área A en metros cuadrados, la iluminación E tiene las unidades de lúmenes por metro cuadrado o lux (lx).

Esta definición es importante, debido que a través de ella se puede calcular el flujo luminoso que percibe un observador, representado por un sensor óptico (fotodiodo) capaz de medir iluminancia.

Apéndice B

Guia de Usuario

Apéndice B. Guia de Usuario



SISTEMA DE MEDICIÓN MFyFT

Guía de Usuario

Instrumento configurable para la medición de flicker, fluctuaciones de tensión y fluctuaciones de iluminación

30 de mayo de 2019

Edición 1.0

Índice

1. Introducción	2
2. Software	3
2.1. Inicio del programa	3
2.2. Generación o Adquisición de la señal	4
2.2.1. Entradas en el panel Parámetros Generales	4
2.2.2. Panel Origen de la Señal	4
2.2.3. Entradas del panel Señal Interna	5
2.2.4. Entradas del panel Auxiliar Señal Interna	7
2.2.5. Entradas del panel Señal Externa	7
2.2.6. Panel Sensor Óptico	8
2.3. Cálculo de Pst	9
2.3.1. Botones desplegados en el panel	9
2.4. Cálculo de Iluminancia	10
3. Procedimiento para la adquisición y análisis de datos	12
3.1. Generación de una señal	12
3.2. Adquisición de una señal	13
3.3. Análisis de datos	14
4. Exportación e importación de datos	16
4.1. Exportación	16
4.2. Importación	16
5. Hardware para la adquisición de señales	18
5.1. Sensor	18
5.2. Circuito de adaptación de señales	18
5.3. Placa conversora analógica digital	19

1. Introducción

El siguiente documento tiene como objetivo explicar el uso del sistema de medición “MFyFT” desarrollado en el marco del proyecto de fin de carrera de Ingeniería Eléctrica en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República. Este instrumento consta de un sistema configurable para la medición de P_{st} y fluctuaciones lumínicas.

Se explica el uso del programa de software para realizar las medidas correspondientes y el conexionado entre la PC, la tarjeta adquisidora de datos¹ y el instrumento de medición.

El programa permite al usuario el cálculo de P_{st} y de iluminancia, a partir de mediciones de señales de tensión en tiempo real durante un determinado periodo de tiempo y la generación de señales de prueba propuestas por la norma IEC 61000-4-15. Además el usuario tendrá la posibilidad de exportar e importar los datos analizados para un posterior trabajo off-line.

¹Tarjeta adquisidora datos multifunción NI USB 6343 diseñada por National Instrument.

2. Software

El programa permite calcular P_{st} a partir de señales generadas por un banco de señales proporcionadas por el software, señales adquiridas en tiempo real y señales importadas al programa. El mismo está desarrollado en Matlab y para su buen funcionamiento debe correrse en una versión de Matlab superior a la versión 2018a.

2.1. Inicio del programa

Al iniciar el programa se despliega en la pantalla la interfaz presentada en la figura 1.

The screenshot displays the software's user interface with the following components:

- Logos:** MFyFT, FACULTAD DE INGENIERIA, iie, and a university crest.
- Parametros Generales:** Includes input fields for 'Muestras por segundo', 'T short (min)', 'Tiempo total de la señal (min)', and 'Cantidad de clases bloque 5'.
- Origen de la Señal:** Radio buttons for 'Señal Interna' (selected) and 'Señal Externa'.
- Señal Interna:** A 'Señal Principal' dropdown menu, an 'Agregar Ruido' checkbox, and a 'Generar Señal' button.
- Auxiliar Señal Interna:** Two empty input fields.
- Importar / Exportar:** Buttons for 'Exportar' and 'Importar', each with a 'NombreDelArchivo' input field and a corresponding action button ('Exportar a .mat' and 'Importar .mat').
- Footer:** 'Ver Manual' and 'Salir' buttons.

Figura 1: Interfaz de Usuario.

2.2. Generación o Adquisición de la señal

Para la generación o adquisición de señales es necesario ingresar en el programa distintos parámetros y especificaciones que son necesarias para el correcto funcionamiento del mismo.

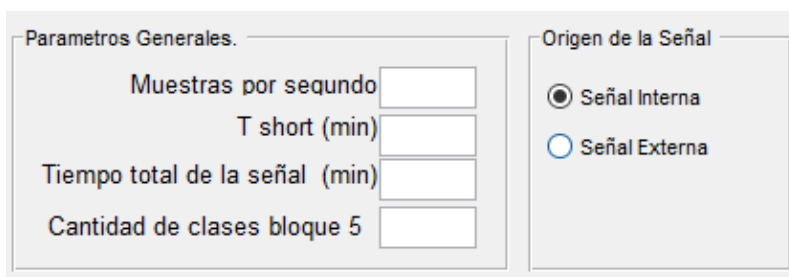
2.2.1. Entradas en el panel Parámetros Generales

Se deben ingresar los siguientes datos para la generación o adquisición de señales.

- **Muestras por segundo:** Ingresar el valor para la cantidad de muestras por segundo que tendrá la señal adquirida o generada por el banco de señales. Se recomienda que la cantidad de muestras sea un múltiplo de la frecuencia de la señal principal y la misma sea mayor a 4000 muestras por segundo.
- **T short(min):** Determina cada cuantos minutos el programa calculara el P_{ST} .
- **Tiempo total de la señal (min):** Especifica el tiempo total de la medición, en caso de realizarse una sola medición, el valor ingresado debe ser igual al valor ingresado en T short.

NOTA: El programa captura 50 segundos adicionales al principio de la medición, tiempo de “pre-test” para cargar los distintos filtros de los bloques y 10 segundos al finalizar la señal para evitar transitorios.

- **Cantidad de clases bloque 5:** Ingresar el valor de la cantidad de clases del bloque 5 para el cálculo de los percentiles y posterior calculo de P_{st} .



The image shows a screenshot of a software interface with two panels. The left panel, titled 'Parametros Generales', contains four input fields: 'Muestras por segundo', 'T short (min)', 'Tiempo total de la señal (min)', and 'Cantidad de clases bloque 5'. The right panel, titled 'Origen de la Señal', contains two radio button options: 'Señal Interna' (which is selected) and 'Señal Externa'.

Figura 2: Panel de Parámetros generales y panel de Origen de la señal.

2.2.2. Panel Origen de la Señal

Panel donde se especifica al software si se trabajar con señales generadas o adquiridas en tiempo real.

- **Señal Interna:** Se debe marcar esta casilla para generar señales desde el banco de señales del programa. Posteriormente de marcar esta opción se despliega el panel “Señal Interna”.

- **Señal Externa:** Se debe marcar esta casilla para adquirir señales con la placa adquisidora. Posteriormente de marcar esta opción se despliega el panel “Señal Externa”.

NOTA: En caso de que la señal sea importada no se tendrá en cuenta lo que figure en este panel.

2.2.3. Entradas del panel Señal Interna

Panel que permite seleccionar el tipo de señal a generar. El mismo se despliega si se selecciona la opción “Señal Interna” en el panel “Origen de la señal”.

- **Señal Principal:** Despliega una lista con las señales que son posibles generar por el programa. Se debe seleccionar una de las opciones desplegadas.
 - **Sinusoidal 120V / 60Hz:** Genera una señal sinusoidal de amplitud 120 Vrms y frecuencia fundamental de 60 Hz.
 - **Sinusoidal 120V / 50Hz:** Genera una señal sinusoidal de amplitud 120 Vrms y frecuencia fundamental de 50 Hz.
 - **Sinusoidal 230V / 60Hz:** Genera una señal sinusoidal de amplitud 230 Vrms y frecuencia fundamental de 60 Hz.
 - **Sinusoidal 230V / 50Hz:** Genera una señal sinusoidal de amplitud 230 Vrms y frecuencia fundamental de 50 Hz.

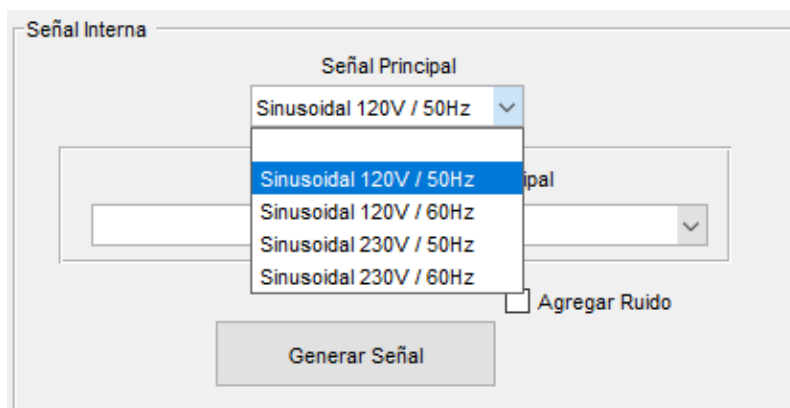


Figura 3: Entradas del panel Señal Interna.

- **Alteraciones a la Señal Principal:** Despliega una lista con las posibles alteraciones que se le pueden realizar a la señal generada.
 - **Sin Cambios:** No introduce ninguna alteración en la señal principal.
 - **Cambios Rectangulares:** Introduce una modulación rectangular en la amplitud señal principal. Se deben especificar las magnitudes de la señal modulante en el panel “Auxiliar Señal Interna”.

- **Cambios Sinusoidales:** Introduce una modulación sinusoidal en la amplitud de la señal principal. Se deben especificar las magnitudes de la señal modulante en el panel “Auxiliar Señal Interna”.
- **Cambios en Frecuencia y voltaje:** Genera una señal que modula la señal principal, en donde la frecuencia y la amplitud van cambiando cada 4 segundos. Los valores de las magnitudes están estipulados por la norma IEC 61000-4-15, por lo tanto, no es necesario ingresar valores en el panel “Auxiliar Señal Interna”.
- **Voltajes distorsionados con cruces por cero:** Genera una señal distorsionada con múltiples cruces por cero que contiene la tensión fundamental U de la señal principal y los niveles de armónicos de acuerdo a lo especificado en la Tabla 7 de la norma IEC 61000-4-15. No es necesario ingresar valores en el panel “Auxiliar Señal Interna”.
- **Armónicos con Banda Lateral:** Introduce en la señal principal la superposición de dos modulaciones separadas por 10 Hz. Se deben especificar las magnitudes de la señal modulante en el panel “Auxiliar Señal Interna” de acuerdo a la Tabla 9 de la norma IEC 61000-4-15.
- **Saltos de Fase (Tshort=10,Tiempo total=10):** Introduce saltos de fase en cada cruce por cero positivo, después de 1, 3, 5, 7 y 9 minutos en la señal principal. Se debe especificar el valor del salto de fase en grados en el panel “Auxiliar Señal Interna” de acuerdo a la Tabla 10 de la norma IEC 61000-4-15.
- **Cambios de voltaje rectangulares con ciclo de trabajo:** Modula la señal principal con una onda rectangular con una frecuencia de 28 Hz con un ciclo de trabajo del 20 %. Se debe especificar el valor de la variación de la tensión en porcentaje de la señal modulante, en el panel “Auxiliar Señal Interna” de acuerdo a la Tabla 11 de la norma IEC 61000-4-15.

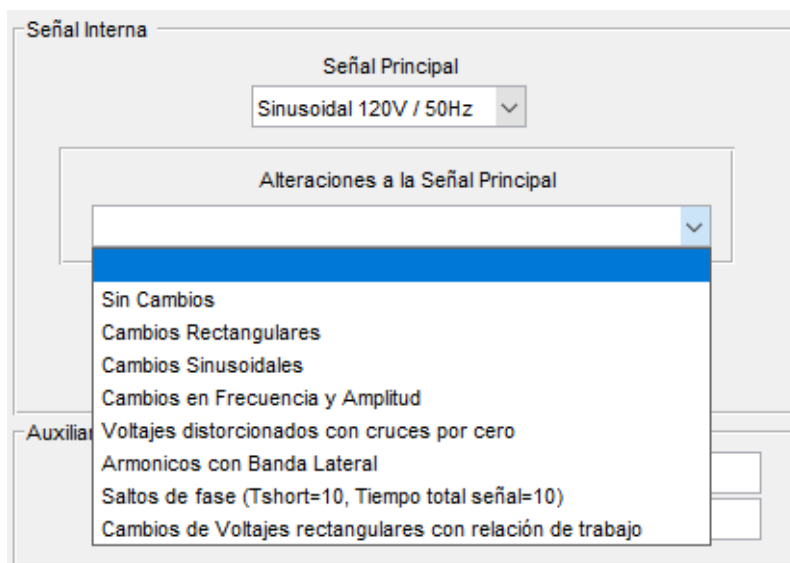


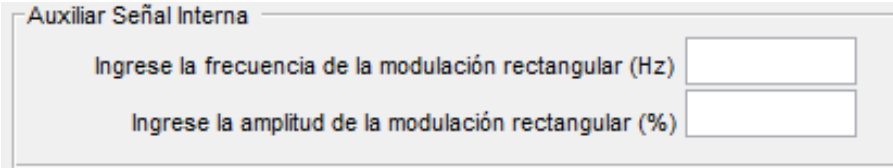
Figura 4: Pestaña: Alteraciones a la Señal Principal.

- **Agregar Ruido:** Permite agregar ruido blanco a la señal generada. Genera como máximo 1 V de pico.

2.2.4. Entradas del panel Auxiliar Señal Interna

Panel donde se ingresan las magnitudes de las señales que alteran la señal principal.

- **Ingrese la frecuencia (Hz) de la señal:** Permite ingresar el valor de la frecuencia de la señal modulante cuando se selecciona Cambios Rectangulares, Cambios Sinusoidales en la pestaña “Alteraciones a la Señal Principal”. Permite el ingreso de números y de funciones.
- **Ingrese el cambio de voltaje en %:** Permite ingresar el valor de la variación de tensión que introduce la señal modulante cuando se selecciona Cambios Rectangulares, Cambios Sinusoidales, Armónicos con Banda Lateral o Cambios de Voltaje rectangulares con relación de trabajo, en la pestaña “Alteraciones a la Señal Principal”.
- **Ingrese fv:** Permite ingresar el valor de la frecuencia de una de las señales modulantes, la segunda señal tendrá la frecuencia ingresada menos 10 Hz. Se debe ingresar este valor cuando se selecciona Armónicos con Banda Lateral en la pestaña “Alteraciones a la Señal Principal”.
- **Ingrese el salto de fase:** Permite ingresar el valor en grados del salto de fase que se introduce en la señal principal cuando se selecciona Saltos de Fase (Tshort=10, Tiempo total=10) en la pestaña “Alteraciones a la Señal Principal”.



Auxiliar Señal Interna

Ingrese la frecuencia de la modulación rectangular (Hz)

Ingrese la amplitud de la modulación rectangular (%)

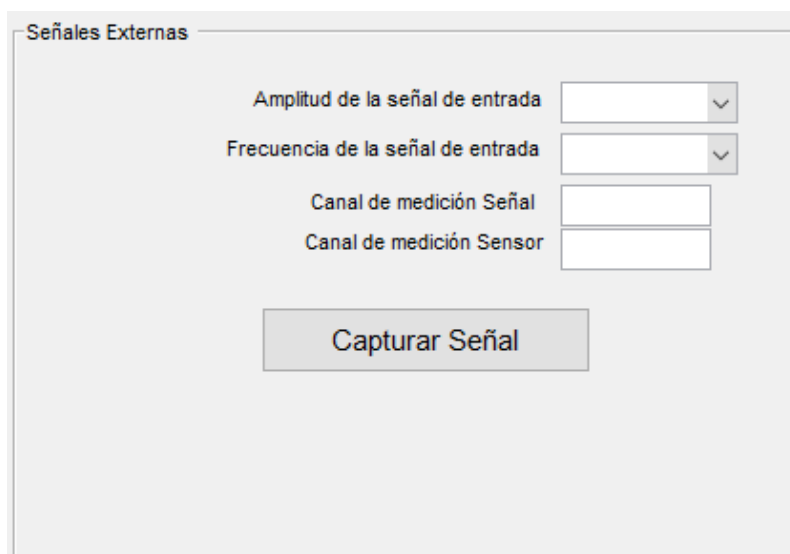
Figura 5: Panel Auxiliar Señal Interna.

2.2.5. Entradas del panel Señal Externa

Permite ingresar los datos necesarios para poder adquirir señales con la placa adquisidora. El mismo se despliega si se selecciona la opción “Señal Externa” en el panel “Origen de la señal”.

- **Amplitud de la señal de entrada:** Permite seleccionar el orden de tensión de la señal que será adquirida (120 Vrms/230 Vrms).
- **Frecuencia de la señal de entrada:** Permite seleccionar la frecuencia de la señal que será adquirida (50Hz/60Hz).

- **Canal de medición Señal:** Permite seleccionar el canal de medición de la placa adquisidora que será utilizado para la adquisición de datos de la señal de tensión.
- **Canal de medición sensor:** Permite seleccionar el canal de medición de la placa adquisidora que será utilizado para la adquisición de datos de la señal lumínica.
- **Botón Capturar Señal:** Una vez seleccionado el botón comienza a capturarse la señal.



Señales Externas

Amplitud de la señal de entrada

Frecuencia de la señal de entrada

Canal de medición Señal

Canal de medición Sensor

Capturar Señal

Figura 6: Panel Señal Externa.

2.2.6. Panel Sensor Óptico

El panel se despliega si se selecciona la opción “Señal Externa” en el panel “Origen de la señal” y se utiliza para especificar al programa si se medirán señales lumínicas o no.

- **Si:** Habilita la opción de ingresar un canal de medición en la placa adquisidora para señales lumínicas en la casilla: “*Canal de medición Sensor*” en el panel “Señales Externas”.
- **No:** No habilita la casilla “*Canal de medición Sensor*” en el panel “Señales Externas”.

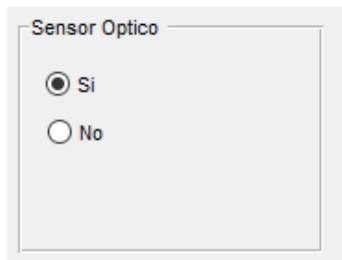


Figura 7: Panel Sensor Óptico

2.3. Cálculo de Pst

Posteriormente de adquirida o generada la señal se despliegan los botones “Hallar Pst” y “Mostrar P inst” en el panel “Pst” para calcular el valor de Pst de la señal y mostrar una gráfica P_{inst} en función del tiempo respectivamente.

2.3.1. Botones desplegados en el panel

- **Hallar Pst:** Despliega el valor de P_{st} de la señal en el panel “Pst”. Si se ingresa un valor de Tiempo total de la señal mayor a Tshort en el panel ”Parámetros Generales”, se despliega una lista con los valores de P_{st} calculados para cada el intervalo de tiempo ingresado en Tshort.
- **Mostrar P inst:** Despliega una gráfica con el valor P_{inst} en función del tiempo. Si se ingresa un valor de Tiempo total de la señal mayor a Tshort en el panel ”Parámetros Generales”, se despliegan varias gráficas con los valores de P_{inst} en función del tiempo calculados para cada intervalo de tiempo ingresado en Tshort.



Figura 8: Panel PST

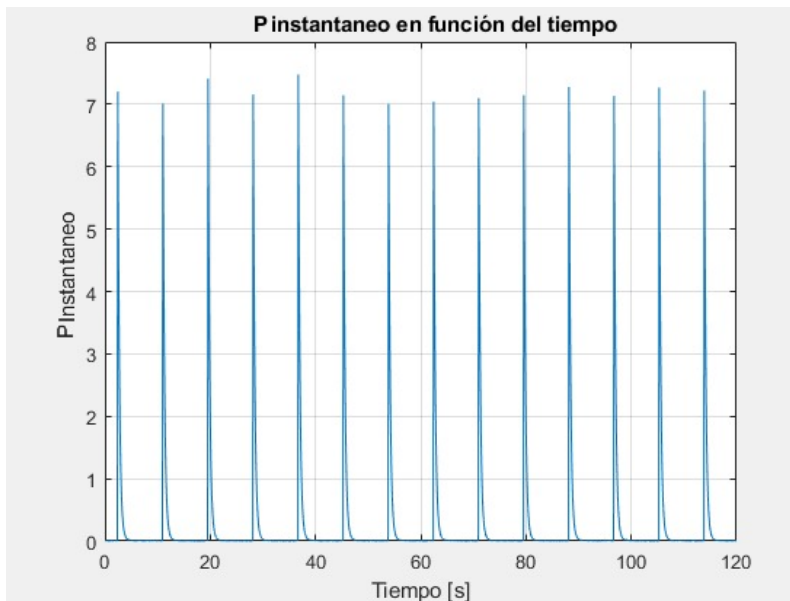


Figura 9: Gráfica de P_{inst} en función del tiempo.

2.4. Cálculo de Iluminancia

Luego de adquirida la señal o importado un archivo con datos de iluminancia se genera en la pestaña “Sensor Óptico” el botón “Ver Gráfica de Iluminancia”.

El botón despliega una gráfica con los valores de Iluminancia de la señal adquirida en función del tiempo.



Figura 10: Panel Sensor Óptico con botón Ver Gráfica de Iluminancia.

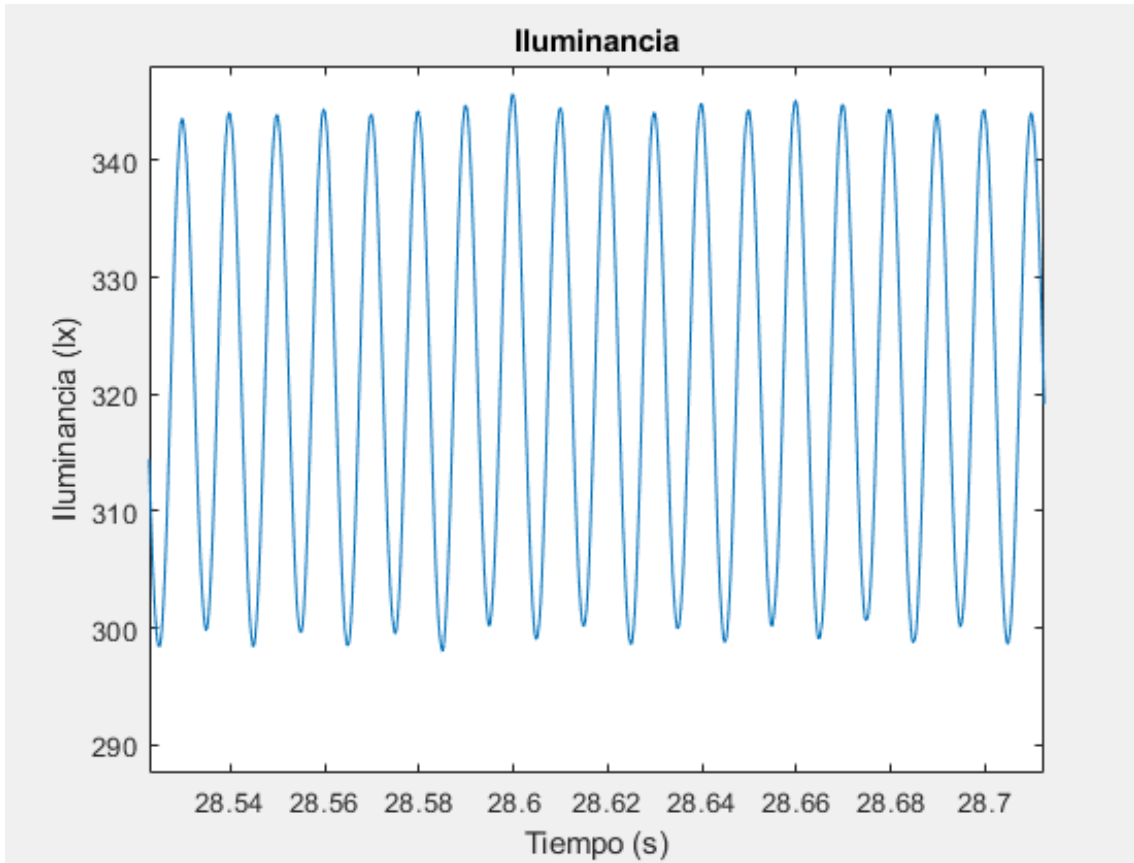


Figura 11: Gráfica de Iluminancia en función del tiempo.

3. Procedimiento para la adquisición y análisis de datos

A continuación se explica el procedimiento para el tratamiento de señales generadas por el banco de señales del software o señales adquiridas por la placa adquisidora.

3.1. Generación de una señal

Para generar una señal a través del programa se debe seguir el siguiente procedimiento:

1. Seleccionar la opción Señal Interna en el panel “Origen de la Señal”.
2. Ingresar los valores requeridos en el panel “Parámetros Generales”.
 - Muestras por segundo.
 - T short.
 - Tiempo total de la señal.
 - Cantidad de clases del bloque 5.
3. Seleccionar la Señal Principal en el panel “Señal Interna”.
 - Sinusoidal 120 V/50 Hz.
 - Sinusoidal 120 V/60 Hz.
 - Sinusoidal 230 V/50 Hz.
 - Sinusoidal 230 V/60 Hz.
4. Seleccionar el tipo de alteración a introducir en la señal principal en la pestaña “Alteraciones a la señal Principal” en el panel “Señal Interna”.
 - Sin Cambios.
 - Cambios Rectangulares.
 - Cambios Sinusoidales.
 - Cambios en Frecuencia y Voltaje.
 - Voltajes Distorsionados con cruces por cero.
 - Armónicos con Banda Lateral.
 - Saltos de fase.
 - Cambios de Voltaje rectangulares con ciclo de trabajo.
5. Especificar las magnitudes de las señales que modulan la señal principal en el panel “Auxiliar Señal Interna”.

- Ingrese la frecuencia de la modulación (Hz).
 - Ingrese la amplitud de la modulación (%).
 - Ingrese fv.
 - Ingrese el salto de fase.
6. Generar la señal apretando el botón “Generar Señal” que se encuentra en el panel “Señal Interna”.

3.2. Adquisición de una señal

Para adquirir una señal a través de la placa adquisidora se debe seguir el siguiente procedimiento en el programa.

1. Seleccionar la opción Señal Externa en el panel ”Origen de la señal”.
2. Ingresar los valores requeridos en el panel ”Parámetros Generales”.
 - Muestras por segundo.
 - T short.
 - Tiempo total de la señal.
 - Cantidad de clases del bloque 5.
3. Seleccionar en el panel ”Sensor Óptico” si se adquieren señales lumínicas en paralelo a la adquisición de una señal de tensión.
 - Si
 - No
4. Ingresar los valores que se encuentran en el panel ”Señales Externas” para la configuración de la placa adquisidora.
 - Amplitud de la señal de entrada.
 - 230 Vrms
 - 120 Vrms
 - Frecuencia de la señal de entrada.
 - 50 Hz
 - 60 Hz
 - Canal de medición Señal
 - Canal de medición Sensor. Solo es necesario especificarlo si se selecciono la opción *si* en el panel ”Sensor Óptico”.
5. Capturar la señal o las señales (si se selecciona opción *si* en el panel Sensor Óptico) apretando el botón Capturar Señal que se encuentra en el panel ”Señales Externas”.

3.3. Análisis de datos

Luego de generada, adquirida o importada la señal de tensión el programa despliega en el panel “Pst” un botón con la opción “Hallar Pst”. El mismo despliega el valor de P_{st} de la señal en el panel “Pst” (si se ingresa un valor de Tiempo total de la señal mayor a Tshort en el panel Parámetros Generales, se desplegara una lista con los valores de P_{st} calculados para cada intervalo de tiempo ingresado en Tshort).

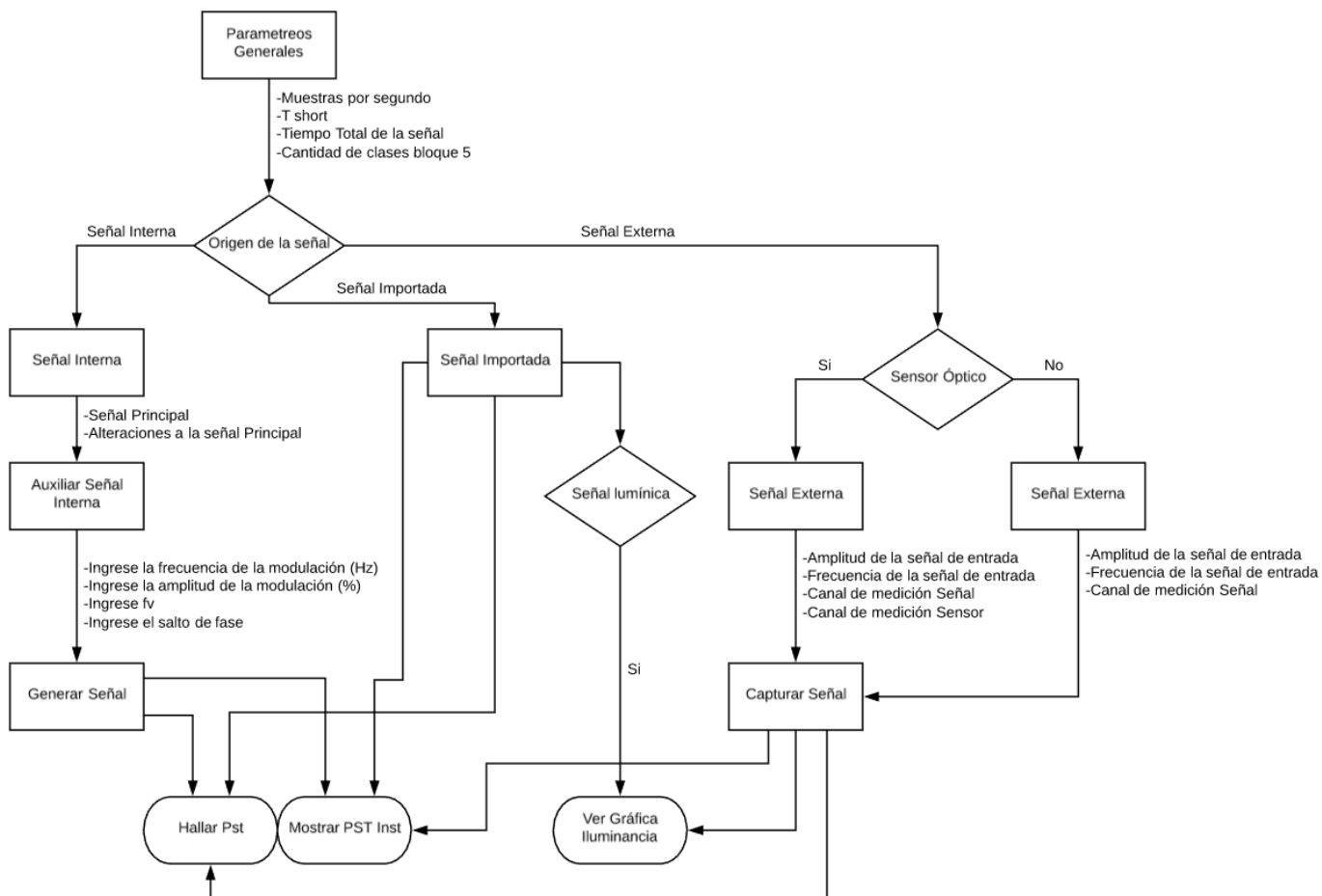
Para poder visualizar la gráfica de P_{inst} en función del tiempo se debe apretar el botón Mostrar P Inst que se encuentra el panel. Si se ingresa un valor de Tiempo total de la señal mayor a Tshort en el panel ”Parámetros Generales”, se desplegaran varias gráficas con los valores de P_{inst} en función del tiempo calculados para cada intervalo de tiempo ingresado en Tshort.

Para poder visualizar la Iluminancia en función del tiempo el programa despliega el botón “Ver Gráfica Iluminancia” en el panel “Sensor Óptico”.

NOTA: El programa solo despliega el botón si se selección la opción *si* en el panel Sensor Óptico o se importa datos que tengan señales lumínicas.

3.3 Análisis de datos

A continuación se presenta el diagrama de flujo del procedimiento para el cálculo de P_{st} e Iluminancia.



4. Exportación e importación de datos

4.1. Exportación

El programa permite guardar los datos relevados en un archivo “.mat” a través del panel “Importar/Exportar”. Se debe especificar el nombre del archivo en la casilla “Exportar”.

Se guardan los siguientes datos:

- Señales adquiridas
- Muestras por segundo
- Tiempo total de señal (seg)
- T Short (min)
- Amplitud Señal (Vrms)
- Frecuencia Señal (Hz)
- Pinst
- Pst
- Iluminancia

NOTA: El archivo se exportara a la carpeta de trabajo de Matlab.

4.2. Importación

El programa permite importar datos previamente relevados para su análisis. El archivo deber tener formato “.mat” y el nombre del archivo se debe ingresar en la casilla “Importar” del panel “Importar/Exportar”.

Se importan los siguientes datos:

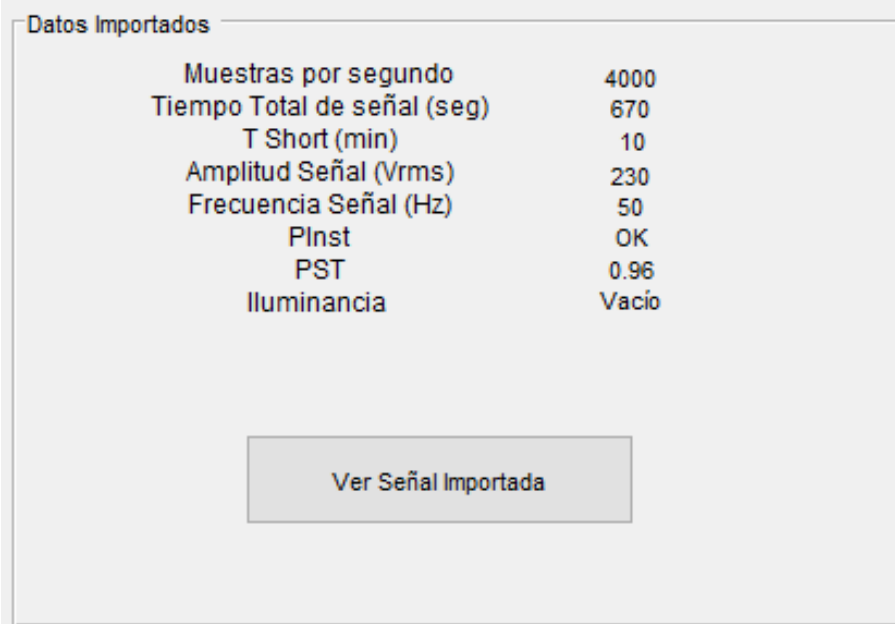
- Señales adquiridas
- Muestras por segundo
- Tiempo total de señal (seg)
- T Short (min)
- Amplitud Señal (Vrms)
- Frecuencia Señal (Hz)
- Pinst

4.2 Importación

- Pst
- Iluminancia

NOTA: El archivo a importar se debe encontrar en la carpeta de trabajo de Matlab.

El programa en el panel “Datos Importados” despliega la lista de los datos importados con sus respectivos valores. Para el caso de de P_{inst} e Iluminancia despliega la palabra “OK” si el archivo importado contiene los parámetros guardados (se importan vectores con los valores guardados) o la palabra ”Vacio” si no contiene datos.



The screenshot shows a window titled "Datos Importados" with a list of parameters and their values. At the bottom of the window is a button labeled "Ver Señal Importada".

Muestras por segundo	4000
Tiempo Total de señal (seg)	670
T Short (min)	10
Amplitud Señal (Vrms)	230
Frecuencia Señal (Hz)	50
PInst	OK
PST	0.96
Iluminancia	Vacio

5. Hardware para la adquisición de señales

El hardware del sistema de medición se compone de la PC donde corre el software, la placa conversora analógica digital (CAD), el circuito de adaptación de señales y el sensor.

5.1. Sensor

El sensor es un fotodiodo de la marca Centronic, modelo OSD-60-E. Tiene un terminal positivo (ánodo) y un terminal negativo (cátodo) que se ubican como se aprecia en la figura 12.

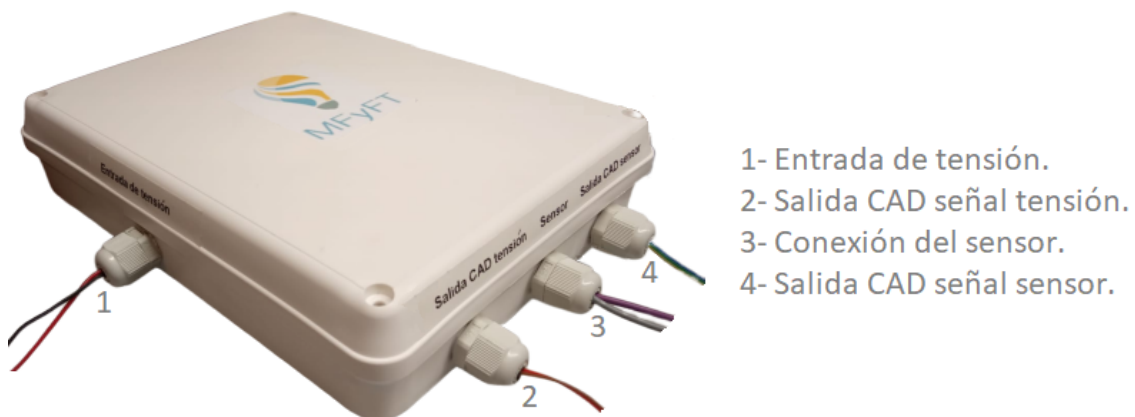


Figura 12: Fotodiodo Centronic OSD-60-E

NOTA: Para tener una correlación entre la medición de P_{st} e iluminancia, el ensayo de la fuente luminosa debe hacerse en un ambiente controlado y la misma debe de alimentarse con la señal a la cual se le ensaya P_{st} .

5.2. Circuito de adaptación de señales

Esta parte del hardware tiene como objetivo adaptar las señales de tensión a medir y las señales del sensor para ser ingresadas a la placa conversora para su digitalización. El mismo se alimenta de dos baterías de 9 V recargables que se encuentran dentro de la caja y debe ser encendido mediante un interruptor.



- **Conexión con la fuente de señal:** Mediante los cables de la salida 1 “Entrada de tensión” , se conecta la señal de tensión a medir. Tener en cuenta que esta señal no puede superar los 240Vrms (considerando las alteraciones). Además debe ser una fuente de tensión flotante.
- **Conexión con el sensor:** Mediante los cables de la salida 3 se conecta el sensor. Los cables están etiquetados indicando cual es el positivo y cual es el negativo, se debe conectar el positivo al ánodo del sensor y el negativo al cátodo del sensor. No es necesario conectar el sensor para utilizar el sistema de medición si únicamente se quieren obtener valores de P_{st} .
- **Conexión con la placa conversora:** Las salidas 2 “Salida CAD señal tensión” y 4 “Salida CAD señal sensor” se componen de 3 cables, cada uno correspondientes al positivo (+), al negativo (-) y tierra (GND) del instrumento, los mismo se encuentran debidamente etiquetados. En la sección 5.3 se indica como debe hacerse el conexionado en la placa. Si únicamente se quiere utilizar el sistema de medición para obtener valores de P_{st} no es necesario conectar la salida 4 “Salida CAD señal sensor” a la placa conversora.

5.3. Placa conversora analógica digital

La placa conversora es de la marca National Instrument, modelo USB6343. La misma debe de estar alimentada de la red y se debe conectar a la PC mediante un cable USB am/bm.

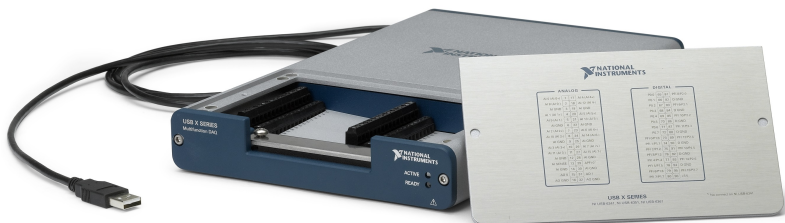


Figura 13: Placa conversora Analógico - Digital, National Instrument USB6343

En la placa se conectan las señales a digitalizar, para lo cual se eligen los canales a los que se le quiere conectar las señales y se conectan los terminales positivos, negativos y tierra como indica el esquema de terminales en la figura 14.

Ejemplo: Si se desea conectar la señal de tensión a digitalizar al canal 0, se debe conectar:

- *Al terminal 1 “AI 0 (AI0+)” el cable indicado como positivo de la “salida CAD señal tensión” del circuito de adaptación de señales.*
- *Al terminal 2 “AI 8 (AI0-)” el cable indicado como negativo de la “salida CAD señal tensión” del circuito de adaptación de señales.*

- Al terminal 3 “AI GND” el cable indicado como GND de la “salida CAD señal tensión” del circuito de adaptación de señales.

Si se desea medir únicamente la señal de tensión, no es necesario conectar los terminales correspondientes a la señal del sensor. Al medirse ambas señales se recomienda la elección de dos canales consecutivos para garantizar un óptimo funcionamiento del sistema de medición.

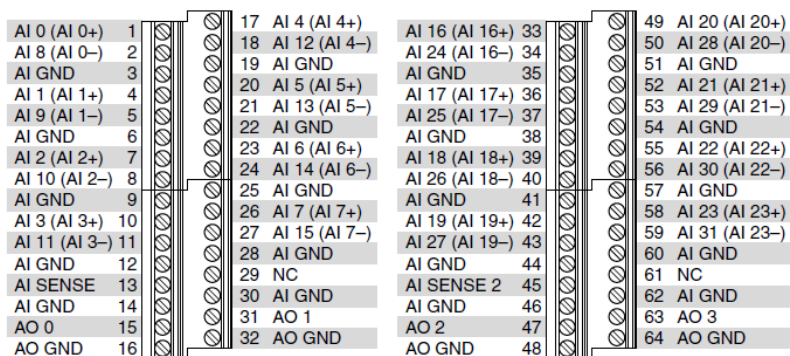


Figura 14: Diagrama de los terminales de conexión de la placa conversora.

Apéndice C

Descripción de los equipos utilizados

A continuación se realiza una breve descripción de los equipos utilizados para la generación y adquisición de señales propuestas por la norma IEC 61000-4-15 [12] para la validación del Flickermeter desarrollado.

C.1. Equipos para la generación de señales

C.1.1. Fuente programable de tensión AC/DC APS-1102A



Figura C.1: Fuente programable de tensión AC/DC

Es un instrumento capaz de generar señales de tensión AC/DC, la misma en conjunto con la tarjeta Analog Discovery 2 permite generar algunas de las señales de prueba y validación para Flickermeter planteadas por la norma IEC 61000-4-15.

A continuación se detallan las características principales [16]:

- Rango de tensión de salida:
 - 100 Vac: 0.0V a 155.0 V_{rms}

Apéndice C. Descripción de los equipos utilizados

- 200 Vac: 0.0V a 310.0 V_{rms}
- Entrada de señal externa:
 - 100 Vac: Ganancia de 0.0 a 220.0
 - 200 Vac: Ganancia de 0.0 a 440.0
- Rango de frecuencias: 1.0 Hz a 550.0 Hz.
- Programación:
 - Memoria: 1 a 30 seteos configurables, con capacidad de 255 niveles de tensión ("pasos") distintos.
 - Tiempo de seteo de la duración de los pasos: 0.001s a 999.9s

C.1.2. Analog Discovery 2

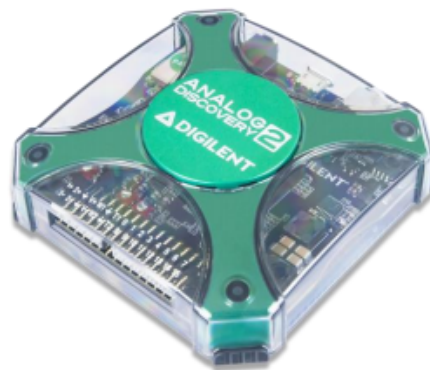


Figura C.2: Tarjeta Analog Discovery 2.

Es un instrumento multifunción que permite a los usuarios medir, visualizar, generar y controlar circuitos de señales mixtas de todo tipo.

La placa permite generar de señales arbitrarias a través de dos canales ($\pm 5V$, 14 bits y 100M muestras/seg).

Se utilizó la placa digital para generar señales con cambio de frecuencia mayores a los 2 Hz que no eran posibles generarlas con la fuente de tensión APS-1102A. Se utilizó la fuente APS-1102A para amplificar la señal a valores del orden 120 V y 220 V.

C.2. Equipos utilizados para correlacionar resultados

C.2. Equipos utilizados para correlacionar resultados

C.2.1. Analizador de Calidad de Energía Hioki PW3198



Figura C.3: Analizador de Calidad de Energía Hioki PW3198.

El instrumento permite calcular el valor de P_{st} y P_{lt} de una señal de amplitud de hasta $600 V_{rms}$ para un tiempo de medida mínimo de 10 minutos. Además con el software del mismo se pueden extraer los valores de P_{inst} máximo.

El equipo se utilizó para validar el instrumento desarrollado comparando los resultados obtenidos por ambos para una misma señal de entrada.

C.2.2. Luxómetro LMT Pocket



Figura C.4: Luxómetro LMT Pocket.

El instrumento permite medir iluminancia con un rango de 0 a 2000 lux.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Referencias

- [1] Flujo luminoso. http://www.itlalaguna.edu.mx/Academico/Carreras/electronica/OPTECA/OPTOPDF1_archivos/UNIDAD1TEMA2.PDF. Acceso online: 3-04-2019.
- [2] Using a unity gain buffer (voltage follower) with a DAQ device. <http://www.ni.com/product-documentation/4494/en/>. Acceso online: 3-04-2019.
- [3] *Distribution Data Book GET-1008G*. General Electric Co, Schenectady, NY, 1957.
- [4] *Guide to Quality of Electrical Supply for Industrial Installation. Part 5: Flicker and Voltage Fluctuations*. International Union for Electricity Applications, 1999.
- [5] National instruments specifications NI 6343. Datasheet, National Instruments, 2016.
- [6] D Arlt, Herivelto Bronzeado, Rong Cai, Emmanuel De Jaeger, Zia Emin, D Guillot, M Halpin. Halpin, N Kobayashi, M Lahtinen, Igor Papic, F Pazos, S Perera, J Price, Herwig Renner, Xavier Yang, and Francisc Zavoda. Review of flicker objectives for LV, MV and HV systems, 02 2011. Journal: CIGRÉ Technical Brochure, Paris, Volume: TB 449.
- [7] Centronic. Eye response detectors (Series -E). Datasheet.
- [8] CIGRE C4 Study Comitee. Review of LV and MV compatibility levels for voltage fluctuations. Journal: CIGRE C4 Power system technical performance, 2016.
- [9] International Electrotechnical Commission. [electropedia - flicker. http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=845-02-49](http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=845-02-49). Acceso online: 06-05-2019.
- [10] International Electrotechnical Commission. IEC std. 61000-4-30, electromagnetic compatibility (EMC) – part 4: Testing and measurement techniques. section 30: Power quality measurement methods. page 52, 2003.
- [11] International Electrotechnical Commission. IEC std. 61000-3-3, electromagnetic compatibility (EMC) – part 3: Limits. section 3: Limitation of voltage

Referencias

- changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems, for equipment with rated current ≤ 16 A per phase and not subject to conditional connection. 10 2005. Edition: 1.2.
- [12] International Electrotechnical Commission. IEC std. 61000-4-15, electromagnetic compatibility (EMC) – part 4: Testing and measurement techniques. section 15: Flickermeter – functional and design specifications. page 88, 08 2010. Edition 2.0.
- [13] Analog Devices. Ultra low offset voltage operational amplifiers OP07, Datasheet. http://www.mit.edu/~6.301/OP07_a.pdf. Acceso online: 20-05-2019.
- [14] D. Geiger, M. Arechavaleta, M. Halpin, and M. Tremblay. Evaluating alternatives to voltage fluctuation and flicker measurements based on iec standard 61000-4-15. In *2016 10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, pages 53–57, June 2016.
- [15] Math H. Bollen ; Irene Gu. *Signal Processing of Power Quality Disturbances*. Wiley-IEEE Press, 1 edition, 2006.
- [16] Gwinstek. Brochure of APS-1102A. <https://www.gwinstek.com/en-US/products/downloadSeriesDownNew/8266/553>. Acceso online: 20-05-2019.
- [17] T.Stephanblome J.Schlabbach, D.Blume. *Voltage Quality in Electrical Power Systems*. Numero 36 en IEE Power and Energy Series. Institution of Engineering and Technology, 2001.
- [18] Matlab. Matlab: Movmean function. https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/\movmean.html?searchHighlight=movmean&s_tid=doc_srchttitle. Acceso online: 20-05-2019.
- [19] G. Pérez M. Sellanes N. Rivero, A. Cardozo. Medida de flujo luminoso en esfera de ulbricht. estudio de incertidumbres. intercomparación con cálculo por integración.
- [20] Luis Felipe Orozco. Programmable-gain transimpedance amplifiers maximize dynamic range in spectroscopy systems. 2013.
- [21] S. Stanley. Visual perception and tolerance of flicker. *Utilities Coordinated Research, Report for Committee for Project*, N° 10, 1937.
- [22] Juan Carlos Gómez Targarona. *Calidad de Potencia para usuarios y empresas eléctricas*. Edigar.
- [23] M. K. Walker. Electric utility flicker limitations. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-15(6):644–655, Nov 1979.

Índice de tablas

3.1. Valores de los parámetros de la transferencia del filtro de ponderación.	29
3.2. Especificaciones de ensayos para el Flickermeter [12]	35
3.3. Respuesta Normalizada del Flickermeter a modulaciones sinusoidales de señales de 120 Vrms.	37
3.4. Respuesta Normalizada del Flickermeter a modulaciones sinusoidales de señales de 230 Vrms.	37
3.5. Respuesta Normalizada del Flickermeter a modulaciones rectangulares de señales de 120 Vrms.	38
3.6. Respuesta Normalizada del Flickermeter a modulaciones rectangulares de señales de 230 Vrms.	38
3.7. Especificación del ensayo para una señal con cambios rectangulares.	39
3.8. Especificación del ensayo para cambios en frecuencia y voltaje combinados.	39
3.9. Especificación para la tensión distorsionada con múltiples cruces por cero.	40
3.10. Características de la modulación de 8.8 Hz para el ensayo de voltaje distorsionado.	40
3.11. Especificación del ensayo para armónicos con banda lateral.	41
3.12. Especificación para los ensayos con salto de fase.	41
3.13. Especificaciones para el ensayo de cambios rectangulares con un ciclo de trabajo del 20 %.	42
4.1. Lista de componentes del Circuito para la adquisición de señales de tensión.	48
4.2. Lista de componentes del Circuito Sensor.	54
4.3. Mediciones del Ensayo 1: Cálculo de SR del sensor.	56
4.4. Mediciones del Ensayo 1: Calculo de Iluminancia.	58
4.5. Mediciones del Ensayo 2: Calculo de Iluminancia.	59
5.1. Constantes de ponderación del bloque 4.	74
6.1. Resultados del software para el ensayo 1 - Fluctuaciones sinusoidales de amplitud 120 V.	82
6.2. Resultados del software para el ensayo 1 - Fluctuaciones sinusoidales de amplitud 230 V.	82

Índice de tablas

6.3. Resultados del software para el ensayo 1 - Fluctuaciones rectangulares de amplitud 120 V.	82
6.4. Resultados del software para el ensayo 1 - Fluctuaciones rectangulares de amplitud 230 V.	83
6.5. Resultados del software para del ensayo 2	83
6.6. Resultados del software para el ensayo 3.	84
6.7. Resultados del software para el ensayo 4.	84
6.8. Resultados del software para el ensayo 6.	85
6.9. Resultados del software para el ensayo 7.	85
6.10. Resultados del instrumento para el ensayo 1 - Fluctuaciones sinusoidales de amplitud 120 V.	86
6.11. Resultados del instrumento para el ensayo 1 - Fluctuaciones sinusoidales de amplitud 230 V.	86
6.12. Resultados del instrumento para el ensayo 1 - Fluctuaciones rectangulares de amplitud 120 V.	86
6.13. Resultados del instrumento para el ensayo 1 - Fluctuaciones rectangulares de amplitud 230 V.	87
6.14. Resultados del instrumento para del ensayo 2.	87
6.15. Ensayos de correlación con respecto al instrumento Hioki PW3198.	88

Índice de figuras

1.1. Comparación de los estudios de percepción del Flicker realizados por General Electric y Consolidated Edison [23].	4
1.2. Curvas de $P_{inst}=1$ para distintos tipos de lámparas con modulaciones sinusoidales [6].	6
1.3. Concatenación de dos señales de 5 minutos para formar una señal de 10 minutos [14].	7
2.1. Fluctuaciones de voltaje en la red debido al funcionamiento del horno de arco durante un ciclo de trabajo del mismo [15].	13
2.2. Señal de 120 Vrms/50 Hz, con y sin fluctuación de tensión.	14
2.3. Espectro de frecuencia de U.	15
2.4. Energía por unidad de longitud de onda. Espectros de radiación para cuerpos negros con temperaturas de (arriba a abajo) 3850, 3675, 3500, 3325 y 3150 K.	19
2.5. Energía total emitida por el cuerpo negro en la parte visible del espectro para temperaturas que oscilan entre $\pm 10\%$ alrededor de 3500 K.	20
2.6. Factor de ganancia medida para: lámpara incandescente de 230 V, 60 W (+), lámpara incandescente de 120 V, 60 W (o) y lámpara fluorescente (*) junto con curvas teóricas para lámpara incandescente de 230V, 60W (línea continua) y lámpara incandescente de 120V, 60W (Línea discontinua).	21
2.7. Modelo Rashbass-Koenderink-van Door	22
2.8. Curva de Flicker para fluctuaciones rectangulares (\square) y fluctuaciones sinusoidales (+).	23
3.1. Diagrama de bloques y señales del Flickermeter [15].	26
3.2. Diagrama funcional del Flickermeter. [12]	27
3.3. Respuesta en frecuencia del filtro de ponderación para 230 V (línea continua). Las líneas discontinuas representan la contribución del segundo factor de la ecuación 3.2 en el filtro y los puntos representan la contribución del primer factor de la ecuación 3.2 en el filtro de ponderación.	30
3.4. Función de transferencia del filtro de ponderación para lámparas incandescentes de 230 V (línea continua) y 120 V (línea discontinua).	30

Índice de figuras

3.5. Subdivisión de P_{inst} en 10 clases.	31
3.6. Función de densidad de probabilidad y de probabilidad acumulada para 10 Clases.	32
3.7. Seno de 120 Vrms (amplitud de 169V), 50 Hz con modulación rectangular de 10 Hz (20 cambios por segundo) y 20% ($\Delta V = 33,94$ por lo que la amplitud máxima es de 186.7 V y la amplitud mínima de 157.7 V)	36
4.1. Placa convertora NI USB-6343 [5].	43
4.2. Diagrama del circuito de acondicionamiento de señal para la entrada a la CAD.	44
4.3. Circuito diseñado para el acondicionamiento de la señal de entrada.	45
4.4. Circuito recomendado por National Instrument para la adquisición de datos.	46
4.5. Diodos zener limitadores de tensión	47
4.6. Conexión del circuito de adquisición de señales y la placa convertora.	49
4.7. Función de Transferencia de un fotodiodo.	50
4.8. Circuito del sensor óptico.	51
4.9. Sensor óptico OSD60-E.	52
4.10. Respuesta espectral del sensor OSD60-E [7].	52
4.11. Circuito sensor.	54
4.12. Gráfica con los valores medidos en en el ensayo 1	57
4.13. Gráfica con los valores medidos en el ensayo 2.	60
5.1. Diagrama de flujo del programa de software.	62
5.2. Interfaz del Software.	63
5.3. Bode de Magnitud para el filtro stopband.	66
5.4. Diagrama de Bode para la fase del filtro stopband.	66
5.5. Diagrama de Magnitud para el filtro pasa alto.	67
5.6. Diagrama de Fase para el filtro pasa alto.	68
5.7. Diagrama de Magnitud y fase para el filtro pasa bajo.	69
5.8. Diagrama de Bode del filtro de Ponderación de 120 V.	70
5.9. Diagrama de Bode de la respuesta en magnitud del filtro de Ponderación para 120 V.	71
5.10. Diagrama de Bode del filtro de Ponderación de 230 V.	72
5.11. Diagrama de Bode de la respuesta en magnitud del filtro de Ponderación para 230 V.	72
5.12. Diagrama de Bode del filtro del bloque 4.	73
5.13. Señal de entrada.	75
5.14. Señal de entrada normalizada.	75
5.15. Señal demodulada.	76
5.16. Señal de salida del filtro pasa alto.	76
5.17. Señal de salida del filtro pasa bajo.	76
5.18. Señal de salida del filtro de ponderación.	77
5.19. P_{inst} en función del tiempo.	77
5.20. Distribución de frecuencias acumuladas.	78

5.21. Diagrama de flujo del cálculo de la Iluminancia.	78
5.22. Medida de iluminancia para una señal con $P_{st}=1$	79
6.1. P_{inst} para una modulación con 1 CPM.	89
6.2. P_{inst} para una modulación con 1620 CPM.	89
6.3. P_{inst} para una modulación con 1 CPM y 1620 CPM.	90
6.4. P_{inst} para una modulación con 2 CPM.	90
6.5. P_{inst} para una modulación con 110 CPM.	91
6.6. P_{inst} para una modulación con 2 CPM y 110 CPM.	91
6.7. Medida de iluminancia para una señal con $P_{st}=0$	92
6.8. Medida de iluminancia para una señal con $P_{st}=1$	92
6.9. Medida de iluminancia para una señal con $P_{st}=2$	93
A.1. Curva de sensibilidad de ojo humano (visión fotópica).	100
C.1. Fuente programable de tensión AC/DC	125
C.2. Tarjeta Analog Discovery 2.	126
C.3. Analizador de Calidad de Energía Hioki PW3198.	127
C.4. Luxómetro LMT Pocket.	127

Esta es la última página.
Compilado el domingo 7 julio, 2019.
<http://iie.fing.edu.uy/>

Desarrollo de un sistema configurable para la medición de Flicker y Fluctuaciones de Tensión

MSc. Ing. Andrés Cardozo, Juan Pizzani, Anaclara Rodriguez .

Abstract—Este documento presenta la implementación de un sistema que mide en forma simultánea iluminancia de una fuente luminosa (entrada óptica) y P_{st} en la tensión de alimentación de dicha fuente (entrada de tensión), desarrollando un Flickermeter digital. El Flickermeter digital está basado en la norma IEC 61000-4-15, validando su efectividad bajo los criterios que la norma plantea.

I. INTRODUCCIÓN

El Flicker es un fenómeno visual que se produce cuando un estímulo luminoso da impresión de inestabilidad fluctuando en el tiempo (parpadeo de las lámparas), es generado por modulaciones en la amplitud de la señal de alimentación de la lámpara. La envolvente de la onda de voltaje tiene que estar dentro de cierto rango de amplitudes y frecuencias (de 0,5Hz a la frecuencia de fusión de imágenes).

La presencia de Flicker en fuentes luminosas produce molestias en los usuarios e induce en reclamos de los mismos a sus proveedores de energía, entendiendo que la calidad del producto que están recibiendo no es la adecuada. Otras consecuencias que tienen las fluctuaciones de tensión son: el deterioro en el rendimiento de accionamientos eléctricos, provocar errores en el funcionamiento de los relés de protección y también pueden afectar otros equipos eléctricos y electrónicos que sean sensibles a este tipo de fluctuaciones de voltaje.[1]

La percepción de Flicker o parpadeo varía de sujeto a sujeto, además de variar el estrés que el mismo genera, en donde influye el entorno y la actividad que el sujeto esté desarrollando. La necesidad de una medición objetiva motivó el desarrollo del Flickermeter, un instrumento basado en el comportamiento lámpara-ojo-cerebro frente a variaciones en la tensión de alimentación de una lámpara incandescente.

El presente artículo presenta la implementación de un sistema que mide en forma simultánea iluminancia de una fuente luminosa (entrada óptica) y P_{st} en la tensión de alimentación de dicha fuente (Flickermeter digital). La interfaz óptica brinda la posibilidad de correlacionar resultados de iluminancia y P_{st} , así como profundizar en el estudio de las señales lumínicas que producen molestia visual.

II. FLICKERMETER

II-A. Flickercurve

En la década de 1930 se comenzaron a realizar estudios sobre el fenómeno de Flicker. En particular se relevaron para que envolturas de la señal distorsionada el Flicker era un fenómeno perceptible y para cuales era molesto. En estos experimentos se sometía a las persona a una

iluminación emitida por una lámpara que estaba alimentada por una señal distorsionada conocida y debían indicar si percibían el parpadeo y si el mismo les resultaba molesto. Se marcó como puntos de percepción y molestia visual a los valores de amplitud y frecuencia que tenía la señal de alimentación de la lámpara que hacía que más del 50 % de las personas percibieran el fenómeno o sintieran molestia visual, construyéndose así las flickercurves [4]. Si bien se realizaron nuevos estudios, las curvas aun vigentes coinciden prácticamente en su totalidad con las relevadas en 1930.

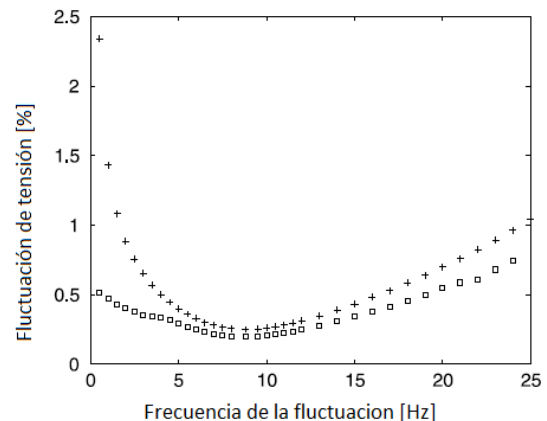


Fig. 1. Curva de Flicker para fluctuaciones rectangulares (□) y fluctuaciones sinusoidales (+) [4]

Durante mucho tiempo la evaluación de la calidad de la energía de una red respecto al Flicker y las fluctuaciones de tensión se realizaban comparándose con la Flickercurve. Posteriormente se desarrolló el Flickermeter, un instrumento cuya entrada es una señal de tensión y la salida corresponde al índice de severidad de Flicker de corto termino P_{st} , el mismo se realizó para que los valores de $P_{st} = 1$ se correspondieran con las señales comprendidas en el umbral de molestia visual de la Flickercurve.

II-B. Flickermeter según la Norma IEC-61000-4-15.

El Flickermeter tiene una entrada de tensión y a partir de ella se simula el comportamiento de una lámpara, el ojo y el cerebro humano. Ese análisis resulta en la percepción instantánea de Flicker (P_{inst}) la cual es analizada estadísticamente para obtener a la salida del instrumento: el indicador de severidad de Flicker de corta duración P_{st} . La arquitectura del Flickermeter se describe en el diagrama de bloques de la Figura 2.

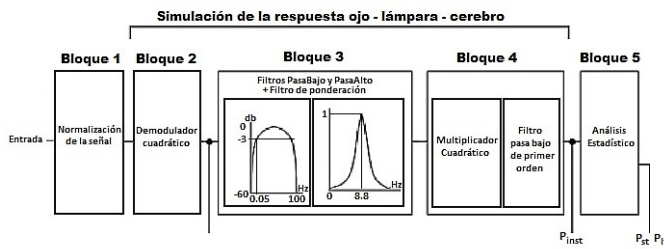


Fig. 2. Arquitectura del Flickermeter.

- La función del bloque 1 es adaptar la tensión de entrada a un valor de tensión interno, ya que para el cálculo de P_{st} solo interesa el cambio relativo dv/v . Se pretende con esto que las alteraciones del 10% en señales de 120 Vrms se igualen con las alteraciones del 10% en señales de 230 Vrms.
- El bloque 2, mediante la multiplicación cuadrática de la señal de salida del bloque 1, pretende recuperar las fluctuaciones de la señal de tensión. Estas son directamente proporcionales a las del flujo lumínico de una lámpara incandescente. Por lo que al recuperar las fluctuaciones de tensión se recuperan las fluctuaciones del flujo lumínico simulando el comportamiento de una lámpara incandescente.
- El bloque 3 representa el comportamiento del modelo lámpara-ojo del Flickermeter. Se puede descomponer en dos filtros en cascada: Un primer filtro pasa banda seguido de un filtro de ponderación.
 - Filtro Pasabanda: Este tiene como fin eliminar la componente DC y la componente del doble de la frecuencia de la red, buscando obtener un pre-filtrado de aquellas fluctuaciones no perceptibles por el ojo humano.
 - Filtro de Ponderación: El segundo filtro, corresponde a un filtro de ponderación pasa banda con máximo en la frecuencia de 8.8 Hz, que simula la respuesta en frecuencia del sistema visual humano a las fluctuaciones de voltaje sinusoidal de una lámpara incandescente.
- En el bloque 4 se modela el comportamiento del sistema ojo-cerebro. Se utiliza un multiplicador cuadrático para representar la respuesta no lineal del sistema ojo-cerebro y un filtro de primer orden con constante de tiempo de 300ms para modelar el efecto de memoria del cerebro. La salida de este bloque representa la percepción instantánea de Flicker: P_{inst} . Un valor unitario de P_{inst} corresponde al umbral de perceptibilidad del parpadeo de la lámpara incandescente para el 50% de los observadores.
- El objetivo del bloque 5 es realizar un análisis estadístico de los niveles de P_{inst} para obtener los valores de severidad de Flicker: P_{st} . Calculado a partir de la función de distribución de probabilidades de P_{inst} en un intervalo de 10 minutos. Un valor unitario de P_{st} corresponde a un nivel de Flicker en el cual la mayoría

de los observadores experimenta molestia.

Más detalle sobre la arquitectura del Flickermeter puede encontrarse en [4] y [3].

III. CUESTIONAMIENTOS ACTUALES

Actualmente existe poca correlación entre la medición de altos valores de P_{st} y el volumen de quejas de los clientes [5]. Debido a ello, la norma IEC 61000-4-15 esta pasando un proceso de revisión. En este contexto fue que se desarrolló el sistema de medición aquí detallado, con el fin de ser de utilidad para las revisiones que se están llevando a cabo.

III-A. Lámparas Modernas

El umbral de irritabilidad que se maneja en el modelo actual corresponde a las lámparas incandescentes las cuales han perdido su cuota mayoritaria en el mercado por lámparas más modernas. Las lámparas modernas responden distinto a las fluctuaciones en la tensión, la mayoría de ellas presentan un comportamiento menos sensible. [2]

III-B. Concatenación de señales

Los puntos conocidos que se ubican en el umbral de molestia visual (dados en la norma [3]) corresponden a una prueba de 10 minutos con una única modulación de magnitud y frecuencia. En realidad, las modulaciones de voltaje debido a las cargas fluctuantes son mucho más complejas: combinando múltiples fluctuaciones con diferentes valores en magnitud y frecuencia. Es de esperarse que durante la ventana de 10 minutos en la que dura la medición de P_{st} se encuentren varias modulaciones diferentes sobre la señal fundamental. Para simular este efecto se ha estudiado el comportamiento de concatenar distintas señales que dan $P_{st} = 1$ por el mismo período de tiempo para formar una señal de 10 minutos. Evaluando dicha señal, se esperaba obtener $P_{st} = 1$, sin embargo el resultado no es siempre el esperado, habiendo casos con valores considerablemente más altos que 1. Se entiende que esto es un error introducido en el análisis estadístico realizado en el bloque 5 y es una de las motivaciones para el trabajo de revisión que se esta realizando sobre este bloque en particular [5].

La postura actual de la IEC es de mantener la sugerencia de que una red óptima es aquella que los consumidores reciben una energía que al realizarse una evaluación de P_{st} , el valor obtenido éste por debajo de 1. Entendiendo que es una buena calidad de la energía y es posible de brindarse. De esta forma se está alejando de la premisa de mantener una red “sin parpadeo” y cambiándola por tener la red por debajo de $P_{st} = 1$.

IV. SISTEMA DE MEDICIÓN DESARROLLADO

El sistema de medición desarrollado se compone por el circuito de adaptación de señales, que permite la digitalización de las señales mediante el uso de la placa multipropósito National Instruments USB NI6343 (CAD). Además se requiere de una PC con el software realizado en MATLAB capaz de

comandar la placa convertora y obtener la señal digitalizada, realizar la conversión de la señal referida al sensor óptico para obtener la gráfica de iluminancia y realizar el cálculo de P_{st} .

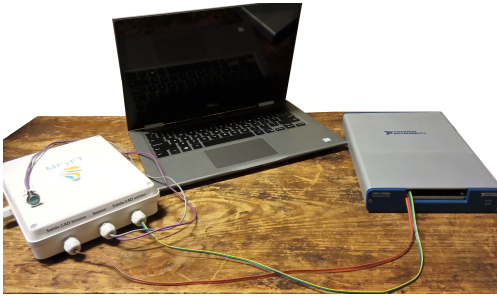


Fig. 3. Sistema de medición desarrollado.

IV-A. Hardware

IV-A.1. Circuito adaptación de señales: El Circuito de adaptación de señales tiene como objetivo acondicionar la señal emitida por el sensor y la señal de tensión a relevar para ser digitalizada por la placa multipropósito. La placa tiene una restricción en sus terminales analógicos de 11V diferencial, por lo que deben de mantenerse ambas señales a ser medidas dentro de ese rango.

IV-A.2. Circuito adaptación de señales - señal de tensión:

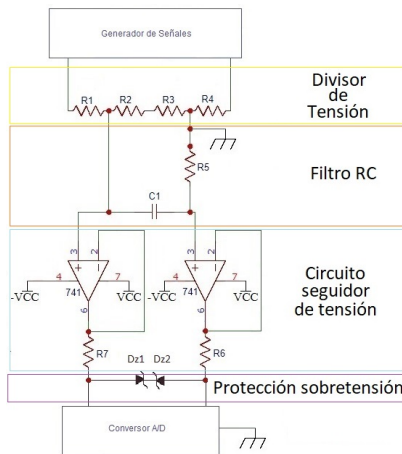


Fig. 4. Diagrama del circuito de adaptación de la señal de tensión.

Este circuito es capaz de convertir las señales de 120 Vrms y 230 Vrms en señales menores a 11 V diferenciales para ser digitalizadas. El requisito era realizar un divisor que tuviera una respuesta plana hasta los 10 kHz de frecuencia. De esta forma la señal digitalizada no presenta distorsiones en frecuencia en el rango de interés para este fenómeno. Para ello se implementó un divisor resistivo que presenta una salida de tensión dentro del rango admisible por la placa multipropósito. Se lo complementó con un filtro pasabajo de frecuencia de corte 10 kHz para filtrar el ruido que no

influye en el fenómeno a estudiar. Por recomendación de la National Instruments se implementó en el circuito una etapa con seguidores. Esto le da a la placa más estabilidad, permitiendo mejores medidas al utilizar más de un canal de medición. Por último se implementó una etapa de protección contra sobretensiones que asegura mantener el nivel de tensión de entrada a la placa dentro del rango admisible.

IV-A.3. Circuito adaptación de señales - sensor:

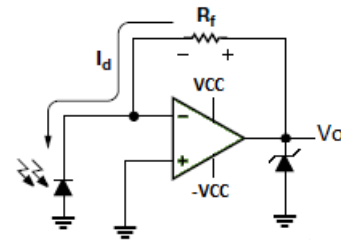


Fig. 5. Diagrama del circuito de adaptación de la señales ópticas.

Se diseñó un circuito capaz de entregar señales de tensión en función de la intensidad lumínica que incide en un sensor óptico (fotodiodo), el mismo presenta una respuesta espectral similar a la del ojo humano como se observa en la figura 6. Se utiliza el fotodiodo en modo fotovoltaico (tensión de polarización aproximada a los 0V) para tener corrientes de fugas despreciables frente a las corrientes que emite el sensor por estimulación de la luz. Se utiliza un amplificador operacional conectado al fotodiodo para lograr este cometido, que presenta un $V_{offset} < 75\mu V$, realimentado con una resistencia para transformar los valores de corriente a valores de tensión procesables por la placa multipropósito. Por último el circuito presenta un diodo zener para proteger la placa de posibles sobretensiones.

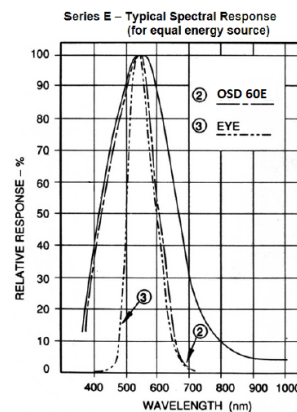


Fig. 6. Respuesta espectral del sensor óptico.

IV-B. Software

El software fue desarrollado en Matlab. Tiene la funcionalidad de comandar la placa multipropósito para comenzar la digitalización, teniendo como requisito la inclusión del tiempo total de la señal a medirse, la

frecuencia de muestreo y los canales de adquisición a utilizar. El software también incluye un banco de señales, que permite generar señales sinusoidales de 120 Vrms/230 Vrms, 50 Hz/60 Hz, además de todas las señales que la norma IEC 61000-4-15 prevé para testear un Flickermeter clase F1. Esta funcionalidad permite probar rápidamente el software de cálculo de P_{st} sin necesidad de relevar señales externas. Adicionalmente cuenta con la posibilidad de exportar/importar las pruebas realizadas en formato ".mat".

El cálculo de P_{st} se realiza de forma digital de acuerdo a la arquitectura introducida en la sección II-B, con la salvedad de que en el bloque 1 se incluyó un filtro stopband de 50 Hz cuando la señal externa relevada es de 60 Hz para filtrar el ruido que introduce la red y en el bloque 3 se implementó un filtro de ventana deslizante para mitigar el ruido externo.

El cálculo de iluminancia se obtiene en función de la sensibilidad relativa del sensor ($35nA/Lux$) y la corriente que emite (hallada en función del voltaje relevado). El programa de software permite desplegar una gráfica de iluminancia en función del tiempo.

IV-C. Ensayos

Con el fin de validar el instrumento de medida desarrollado, se realizaron los ensayos propuestos por la norma. En primera instancia se validó el proceso de cálculo de P_{st} a través de la implementación del banco de señales, obteniendo resultados que se encuentran dentro del rango de validación que establece la norma para todas las señales de un Flickermeter categoría F1. Posteriormente se ensayó el sistema de medición completo a través de señales externas generadas con una fuente programable, verificando que el instrumento puede clasificarse como clase F3.

Adicionalmente se realizaron mediciones de distintas señales de prueba en conjunto con un Flickermeter industrial propiedad de la Facultad de Ingeniería de UdelaR: Medidor de Calidad Hioki PW3198 clase A según IEC 61000-4-30 obteniéndose resultados con un error relativo menor al 5% en comparación al instrumento Hioki.

IV-C.1. Ensayos Iluminancia: En la presente sección se pretende mostrar la potencialidad que tiene el sistema de medida para analizar en profundidad la relación entre las fluctuaciones de tensión y el flujo luminoso de lámparas incandescentes y la correlación entre diversas señales luminosas que producen (en teoría) similar molestia visual en usuarios, en trabajos futuros. El ensayo se realizó en el laboratorio de fotometría de la Facultad de Ingeniería de UdelaR, trabajando en un ambiente controlado, con el fin de obtener medidas de iluminancia sin interferencia de señales lumínicas externas.

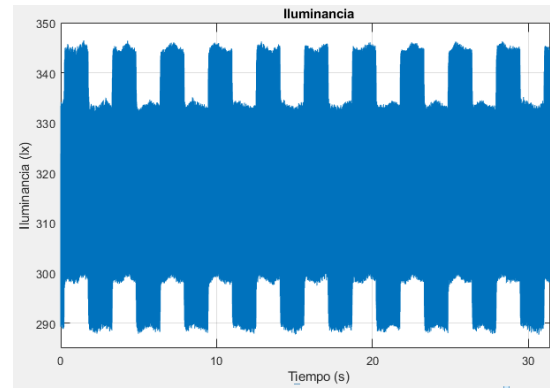


Fig. 7. Ensayos de testeo de interfaz óptica, señal de $P_{st} = 1$

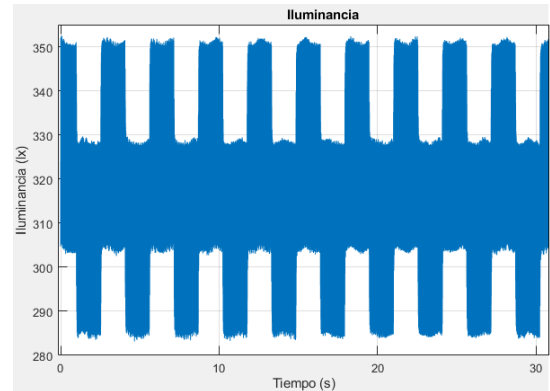


Fig. 8. Ensayos de testeo de interfaz óptica, señal de $P_{st} = 2$

Se ensayó la respuesta de una lámpara incandescente de 230 V y 60 W alimentada con una señal de tensión que presenta una modulación con una frecuencia de 39 cambios por minuto y una amplitud que produce un valor de $P_{st} = 1$ y para una señal con el doble de amplitud en la modulación que produce un valor de $P_{st} = 2$. Como era de esperarse, la frecuencia de la señal de iluminancia obtenida, tiene una frecuencia principal de 100 Hz, igual al doble de la frecuencia fundamental de la tensión aplicada de acuerdo a la transferencia de calor total que emite la lámpara analizada. Además, se puede observar que las variaciones en la iluminancia también se producen cada 39 cambios por minuto, presentando el mismo comportamiento que la señal de tensión y presentan un aumento de la variación de iluminancia frente a un aumento de la amplitud de la modulación de la señal principal mostrando correlación con el aumento de P_{st} que este efecto produce.

V. CONCLUSIONES

Se construyó satisfactoriamente un sistema capaz de medir en forma simultánea iluminancia y P_{st} de acuerdo a la norma IEC 61000-4-15 [3]. Este dispositivo tiene libre acceso al código realizado permitiendo realizar futuras modificaciones a los bloques del Flickermeter, en especial al bloque estadístico, actualmente en fase de estudio para su modificación.

Se generó un banco de señales por software donde se generan todas las señales que la norma exige para la validación del instrumento. A su vez existe la posibilidad de generar dichas señales con ruido para un testeo más realista. Esto pretende darle la posibilidad al usuario final de realizar un primer testeo de forma rápida y simple una vez que realicen eventuales modificaciones en el software. El software desarrollado cumplió satisfactoriamente los requisitos para todas las señales de prueba propuestas por la norma (clase F1), generadas por el banco de señales.

El instrumento cumplió satisfactoriamente los ensayos requeridos por la norma, validando el instrumento realizado, permitiendo clasificarlo como clase F3 según la norma IEC 6100-4-15 ("Instrumento diseñado para estudios de calidad de energía, resolución de problemas y otras aplicaciones donde no se requieren incertidumbres de mediciones bajas"). Presentando además una buena correlación en comparación al instrumento industrial HIOKI PW3198 clase A según IEC 61000-4-30 presentando un error relativo menor al 5 % en los valores obtenidos.

Se puede profundizar en los estudios de Flicker al tener la capacidad de correlacionar medidas de P_{st} con su correspondiente cambio de iluminancia. Permitiendo por ejemplo estudiar si existe alguna similitud entre distintas gráficas de iluminancia para un mismo valor de P_{st} . Además, es posible ver cómo evoluciona el comportamiento de la iluminancia al utilizar señales de tensión que producen valores de P_{st} más elevados.

REFERENCES

- [1] Juan Carlos Gómez Targarona, *Calidad de Potencia para usuarios y empresas eléctricas*, Editorial EDIGAR S.A., 2005.
- [2] CIGRE/CIREN Working Group C4.108. *Review of Flicker Objectives for LV, MV and HV Systems. 1 ed.* Paris, Francia. CIGRE, 2011.
- [3] International Electrotechnical Commission, *IEC Std. 61000-4-15, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques. Section 15: Flickermeter – Functional and design specifications, Edition 2.0.*, Ago 2010.
- [4] Math H. Bollen and Irene Gu, *Signal Processing of Power Quality Disturbances*, Wiley-IEEE Press, 2006.
- [5] D. Geiger and M. Arechavaleta and M. Halpin and M. Tremblay, "Evaluating alternatives to voltage fluctuation and flicker measurements based on IEC standard 61000-4-15", In 2016 10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), pages 53-57.

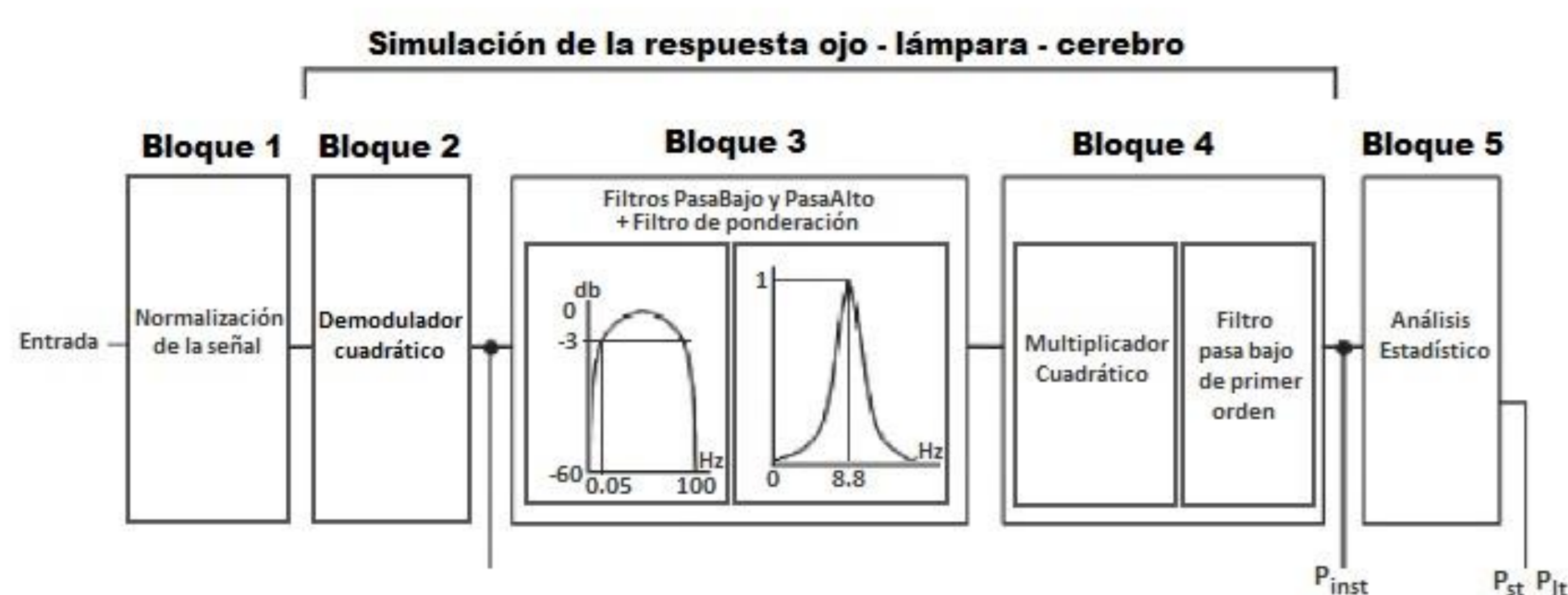
Este documento presenta la implementación de un sistema que cuantifica la calidad de la energía respecto al fenómeno de Flicker. Mide en forma simultánea iluminancia de una fuente luminosa (entrada óptica) y Pst (índice de severidad de Flicker) en la tensión de alimentación de dicha fuente (entrada de tensión), desarrollando un Flickermeter digital basado en la norma IEC 61000-4-15. Fue validada su efectividad bajo los criterios que la norma plantea. La interfaz óptica brinda la posibilidad de correlacionar resultados de iluminancia y Pst algo no presente en instrumentos del mercado, siendo un diferencial que permite estudiar como son las señales lumínicas que producen molestia visual y el vínculo de Pst y las fluctuaciones en la tensión de alimentación de las lámparas incandescentes.

FLICKER

Impresión de inestabilidad de la sensación visual inducida por un estímulo luminoso, cuya luminosidad o distribución espectral fluctúa con el tiempo (parpadeo del estímulo luminoso).

Cuando una lámpara incandescente presenta en su alimentación una tensión con modulación en su amplitud la misma se comporta emitiendo un flujo lumínico que varía de forma relacionada con la envolvente presente en la señal de tensión, pudiendo producir parpadeo visible.

FLICKERMETER

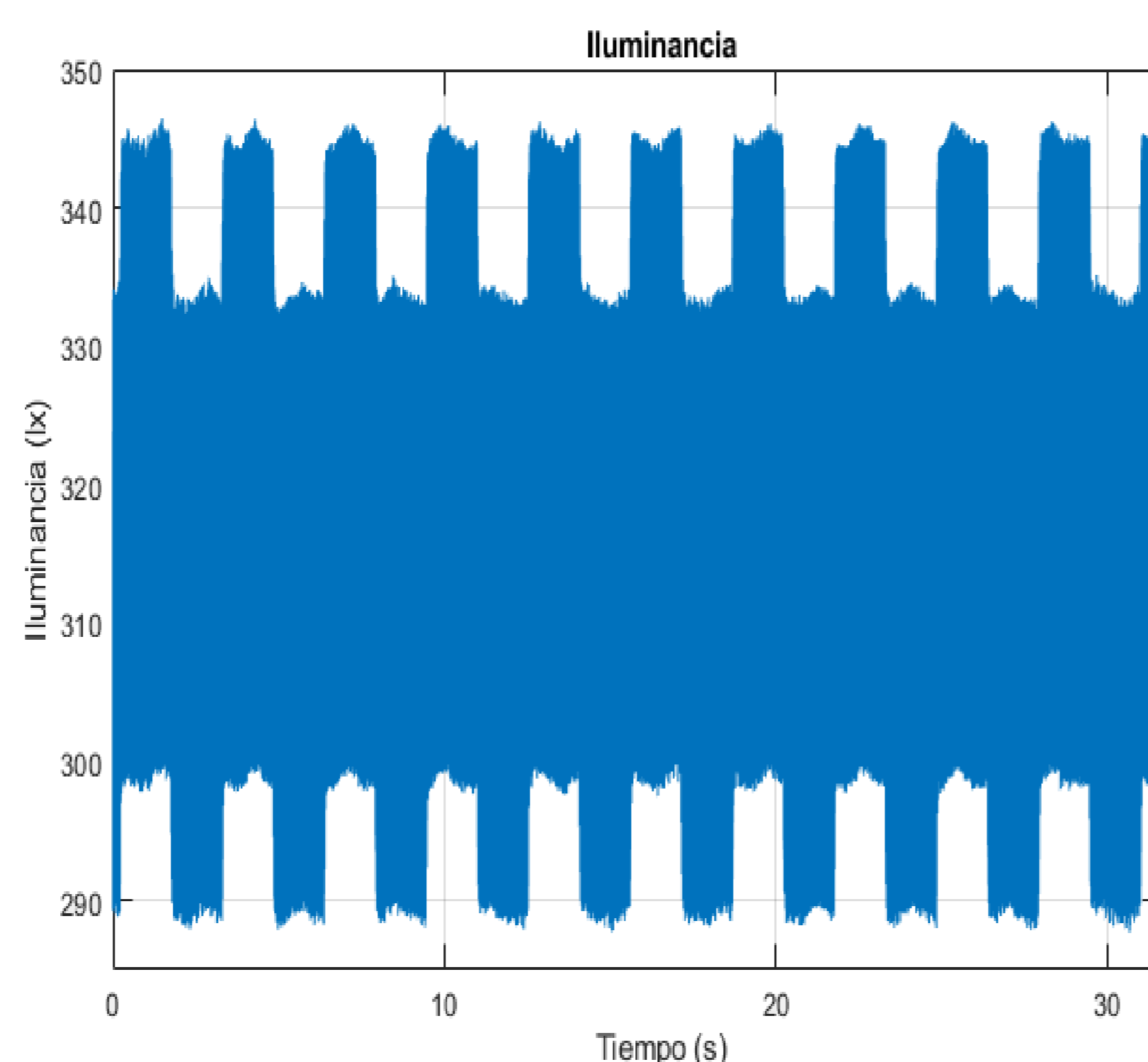


A partir de relevar una señal de tensión que presenta modulaciones AM, se puede simular su efecto en un modelo que representa a la lámpara incandescente y el efecto que las fluctuaciones lumínicas producen a las personas (modelo lámpara-ojo-cerebro), para obtener una representación de la sensación visual que experimenta un observador medio. Como las personas reaccionan de manera diferente a las variaciones en la intensidad del flujo luminoso, el valor de sensación instantánea de Flicker es analizado según un modelo estadístico para obtener el índice de severidad del Flicker (Pst).

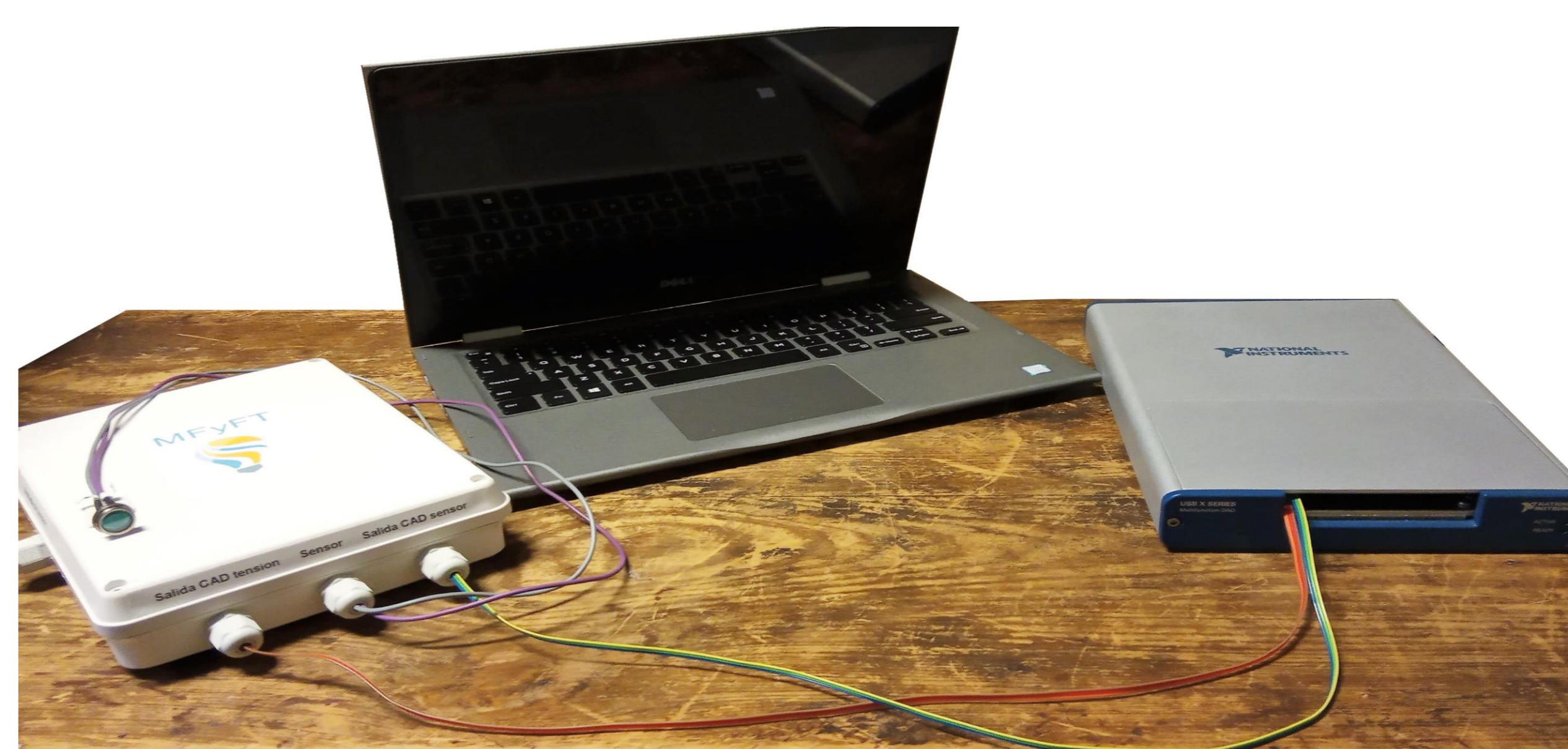
ENSAYOS Y VALIDACIÓN

El sistema de medición desarrollado cumple satisfactoriamente los ensayos requeridos por la norma, permitiendo clasificarlo como clase F3 según la norma IEC 6100-4-15 ("Instrumento diseñado para estudios de calidad de energía, resolución de problemas y otras aplicaciones donde no se requieren incertidumbres de mediciones bajas").

El ensayo de iluminancia muestra la potencialidad que tiene el sistema de medida para analizar en profundidad la relación entre las fluctuaciones de tensión y el flujo luminoso de lámparas incandescentes. Se presenta la respuesta de una lámpara incandescente de 230 V y 60 W alimentada con una señal de tensión que presenta un valor de Pst=1.

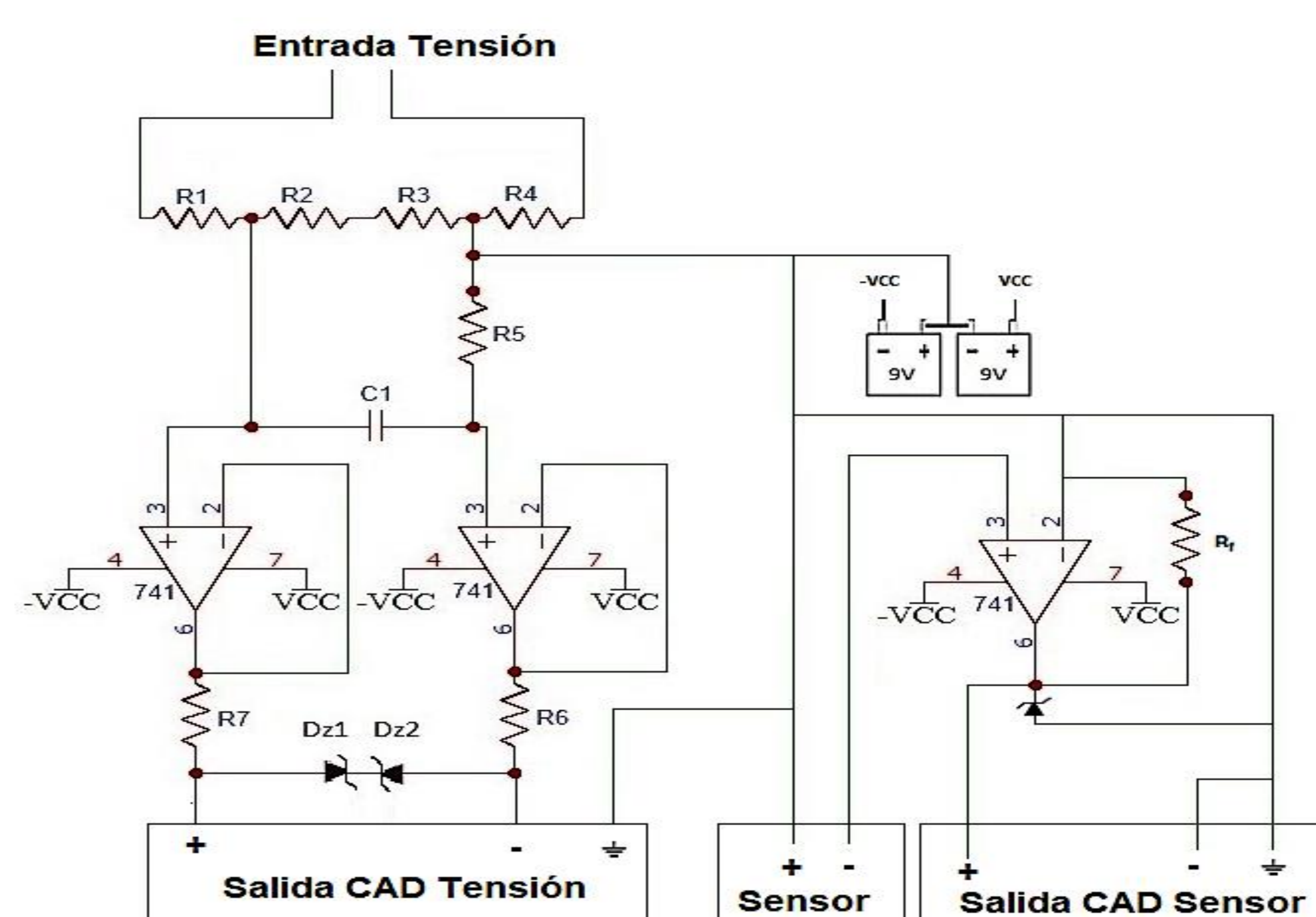


SISTEMA DE MEDICIÓN DESARROLLADO



El sistema de medición desarrollado se compone de:

- Circuito de adaptación de señales: acondiciona la señal emitida por el sensor y la señal de tensión a relevar para ser digitalizada por la placa multipropósito. Para las señales de tensión, convierte señales de 120 Vrsm y 230 Vrsm en señales menores a 11 V diferenciales, a través de un divisor resistivo, un filtro RC para mitigar el ruido y un circuito seguidor para la adaptación de la tarjeta multipropósito.
- La adaptación de la señal lumínica se realiza mediante un circuito capaz de producir señales de tensión en función de la intensidad lumínica que incide en el sensor óptico. El sensor utilizado tiene una respuesta espectral similar a la del ojo humano.



- Placa multipropósito National Instruments USB NI6343 (CAD): Digitaliza señales de tensión.
- Software realizado en MATLAB capaz de comandar la placa multipropósito para la digitalización de señales. Realizar la conversión de la señal de voltaje digitalizada referida al sensor óptico para obtener una gráfica de iluminancia en función del tiempo y realizar el cálculo de Pst de la señal de tensión de alimentación. El cálculo de Pst se realiza de acuerdo con la arquitectura del Flickermeter planteado por la norma IEC 61000-4-15.