

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

IMPLEMENTACIÓN DEL FLICKERMETRO DE LA NORMA IEC 61000-4-15

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Andrés Santilli
para optar al título
de Ingeniero Electricista.

Caracas, Junio de 2017

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

IMPLEMENTACIÓN DEL FLICKERMETRO DE LA NORMA IEC 61000-4-15

Prof. Guía: Dan El Montoya

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Andrés Santilli
para optar al título
de Ingeniero Electricista.

Caracas, Junio de 2017

A Dios, a mis padres y hermanos.

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

A Dios por acompañarme en el camino durante toda la carrera y brindarme la fortaleza necesaria para alcanzar esta meta.

A mis padres, Patrizia y Alfredo, por su entrega y apoyo incondicional, este logro también es de ustedes. Para mi madre, que me cuida desde los cielos, gracias por protegerme y darme la fuerza necesaria para perseverar.

A mis hermanos, Roberto y Maurizio, por ser mis compañeros incondicionales; en especial Roberto, por darme apoyo en toda la carrera. Así como a mi familia, por todo el apoyo que me han dado.

A mi tutor, Dan El Montoya, por brindarme la oportunidad de trabajar con él, por su paciencia, por sus enseñanzas, por siempre darme ánimos y por ayudarme en este trabajo.

Al Departamento de Potencia, por el préstamo de equipos y gracias a todos los profesores que me acompañaron en este camino.

A la Universidad Central de Venezuela, por abrirme las puertas al conocimiento, a la cultura, a la diversidad; es un gran orgullo ser ucevista. A la Facultad de Ingeniería y a la Escuela de Ingeniería Eléctrica, por todas las enseñanzas y por hacerme sentir parte de una familia.

A los profesores que me dieron clases, en especial a la profesora Mercedes Arocha, por todas sus enseñanzas y compartir sus experiencias.

Y a todos los compañeros de estudio que conocí a lo largo de la carrera, personas increíbles que forman parte del espíritu universitario.

Gracias a todos por hacer esto posible.

Santilli M., Andrés A.

**IMPLEMENTACIÓN DEL FLICKERMETRO DE LA NORMA IEC
61000-4-15**

**Prof. Guía: Dan El Montoya. Tesis. Caracas. U.C.V. Facultad de
Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Ingeniero Electricista.**

Opción: Industrial. Institución: UCV. 2017. 64 h. + anexos.

Palabras Claves: Flicker, Medidor, Flickermetro, Calidad de energía.

Resumen. La necesidad de una mejora en la calidad de la energía eléctrica es cada día mayor en la sociedad, lo cual conlleva a un beneficio en los medios de producción mediante el uso de dispositivos electrónicos y equipos que no generen discrepancias en las redes de alimentación; ya que éstos afectan las cargas conectadas en puntos de acoplamiento común (PCC) en la distribución de la energía eléctrica causando perturbaciones a otros usuarios. Partiendo de este hecho, se encuentra la necesidad de brindar un servicio eléctrico adecuado siendo capaz de medir variables que perjudican la calidad de la energía eléctrica como lo es el Flicker. En este trabajo especial de grado, se plantea un modelo de medidor de flicker estipulado en la norma IEC 61000-4-15; con la finalidad de medir en redes de baja tensión y analizar el comportamiento de estos sistemas en relación a la calidad de la energía eléctrica.

ÍNDICE GENERAL

CONSTANCIA DE APROBACIÓN	III
RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS	IV
RESUMEN	V
ÍNDICE GENERAL	VI
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABLAS	XIII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
CAPÍTULO II	
OBJETIVOS	5
2.1. Objetivo General	5
2.2. Objetivos Específicos	5
CAPÍTULO III	
MARCO TEÓRICO	6
3.1. El Flicker	6
3.1.1. Modelo matemático del flicker	7
3.1.2. Medición de flicker	10
3.1.3. Medición del flicker según la norma IEC-61000-4-15	15
3.1.4. Índice de severidad del flicker a corto y a largo plazo (P_{st} y P_{lt})	21
3.1.5. Pruebas del flickermetro según norma IEC-61000-4-15 . . .	23

CAPÍTULO IV	
MARCO METODOLÓGICO	29
4.1. Esquema del sistema trabajado	29
4.2. Generación de la señal contaminada con flicker	30
4.2.1. Generación de la señal mediante el programa SignalExpress LabVIEW	33
4.3. Flickermetro	35
4.3.1. Circuito acondicionador de la señal de entrada	36
4.3.2. DSP F28335	38
4.3.3. MSP430G2553	39
4.3.4. Pantalla digital del flickermetro implementado	40
4.3.5. PC utilizada para carga y monitoreo del flickermetro	42
4.4. Modelo del flickermetro en Simulink	43
4.4.1. Modelo del flickermetro en Simulink (Montoya A, 2014) . .	43
4.4.2. Simulación del modelo del medidor de flicker	43
4.4.3. Implementación del modelo del flickermetro en el DSP . .	45
4.5. Analizador de redes Fluke 437	46
CAPÍTULO V	
RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DEL MEDIDOR DE FLICKER	48
5.1. Prueba de la sensación instantánea de flicker P_{inst} ante cambios de tensión sinusoidales/rectangulares	48
5.2. Pruebas del índice de severidad de flicker P_{st} ante variaciones de tensión rectangulares	51
CAPÍTULO VI	
MONTAJE EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	52

6.1. Prueba de la sensación instantánea de flicker P_{inst} ante cambios de tensión sinusoidales/rectangulares	55
6.2. Pruebas del índice de severidad de flicker P_{st} ante variaciones de tensión rectangulares	56
CAPÍTULO VII	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	61
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
ANEXO	A
Modelos de Simulink y Código	A
1.1. Modelo Simulink del flickermetro	A
1.2. Propiedades del modelo en Simulink implementado al DSP	G
1.3. Código de la pantalla digital mediante el MSP430G2553	H
Programas y equipos utilizados	L
2.1. Versiones de los programas utilizados	L

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Tensión cosenoidal contaminada con flicker cosenoidal. . .	9
Figura 3.2. Señal cosenoidal modulada por una señal cuadrada.	9
Figura 3.3. Rango del flicker observable y perturbador de una lámpara incandescente de $60Hz$, $120V$ y $60W$. (IEEE-141, 1993)	11
Figura 3.4. Máximo permisible de fluctuaciones de tensión. (IEEE-519, 1992)	12
Figura 3.5. Límite de sensibilidad del ojo a las variaciones de ilumina- ción causadas por fluctuaciones de tensión, en lámparas de incan- descencia.	13
Figura 3.6. Diagrama de Bloques del Flickermetro de la Norma IEC- 61000-4-15.	15
Figura 3.7. Sensación instantánea de flicker limitando el número de clases para la asignación de sus muestras a diez. (Wierda, 2001) .	22
Figura 3.8. Función de probabilidades acumulativa de la sensación ins- tantánea de flicker limitando el número de clases a diez. (Wierda, 2001)	23
Figura 3.9. Cambios rectangulares de tensión ($\Delta V/V = 40\%$, $8,8\text{ Hz}$) (IEC-61000-4-15, 2010)	27
Figura 4.1. Esquema general representativo del montaje realizado. . .	29
Figura 4.2. Programa SignalExpress LabVIEW - Configuración para P_{st} .	34
Figura 4.3. Programa SignalExpress LabVIEW - Configuración para P_{st} .	34
Figura 4.4. Programa SignalExpress LabVIEW - Configuración para P_{st} .	35

Figura 4.5. Circuito acondicionador para entrada analógica del DSP F28335.	37
Figura 4.6. Forma de onda de tensión a la salida del circuito acondicio- nador de entrada.	37
Figura 4.7. Placa PCB del circuito acondicionador de entrada realizado en el programa Eagle.	38
Figura 4.8. Esquema representativo del medidor de flicker.	40
Figura 4.9. Diagrama de conexión de la pantalla digital.	41
Figura 4.10. Pantalla digital utilizada.	41
Figura 4.11. Vista de la ventana del programa Code Composer Studio v3.3.	42
Figura 4.12. Esquema representado en Simulink de las diferentes tipos de entrada de tensión con flicker y circuito de entrada al DSP. . .	44
Figura 4.13. Esquema representado en Simulink de los bloques del Flic- kermetro contenidos en la programación del DSP.	45
Figura 4.15. Analizador de redes Fluke 437.	46
Figura 4.14. Modelo final realizado en Simulink adaptado para el DSP F28335.	47
Figura 5.1. Forma de onda de la sensación instantánea de flicker para una frecuencia de 8,8 Hz. Prueba sinusoidal.	49
Figura 5.2. Forma de onda de la sensación instantánea de flicker para una frecuencia de 8,8 Hz. Prueba rectangular.	50
Figura 6.1. Montaje experimental del flickermetro realizado en el labo- ratorio.	53
Figura 6.2. Procesador digital de señales Texas Instruments F28335. .	53

Figura 6.3. Medidor dentro de la carcasa, conformado por transformador reductor, circuito acondicionador y DSP.	54
Figura 6.4. Pantalla digital conectada al launchpad MSP 430G2553 operando como parte del flickermetro.	54
Figura 6.5. Linealidad del P_{st} obtenida experimentalmente.	59
Figura 6.6. Gráfica del error porcentual contra el factor de linealidad k	60
Figura 1.1. Figura-Anexo 1.1	A
Figura 1.2. Submodelo Simulink del flickermetro implementado - Bloque de cálculo del P_{st}	A
Figura 1.3. Modelo Simulink del flickermetro implementado.	B
Figura 1.4. Submodelo Simulink del flickermetro implementado - Bloque de cálculo del P_{st}	C
Figura 1.5. Submodelo Simulink del flickermetro implementado - Bloque de cálculo del P_{st}	C
Figura 1.6. Submodelo Simulink del flickermetro implementado - Bloque de cálculo del P_{st}	D
Figura 1.7. Submodelo Simulink del flickermetro implementado - Bloque 3 Filtros Ponderadores.	D
Figura 1.8. Submodelo Simulink del flickermetro implementado - Bloque 3 Filtros ponderadores.	D
Figura 1.9. Submodelo Simulink del flickermetro implementado - Bloque 4 Multiplicador cuadrático.	E
Figura 1.10. Submodelo Simulink del flickermetro implementado - Bloque de cálculo del P_{st}	E
Figura 1.11. Submodelo Simulink del flickermetro implementado - Bloque 1 Adaptador de señal.	F

Figura 1.12. Submodelo Simulink del flickermetro implementado - Blo-	
que de cálculo del P_{st}	F
Figura 2.1. Programa SignalExpress LabVIEW - Configuración para P_{inst} .	M
Figura 2.2. Programa SignalExpress LabVIEW - Configuración para P_{inst} .	M
Figura 2.3. Programa SignalExpress LabVIEW - Configuración para P_{inst} .	N
Figura 2.4. Programa Energia - Ventana de programación.	N

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Especificaciones de pruebas para flickermetros (IEC-61000-4-15, 2010)	25
Tabla 3.2. Respuesta del flickermetro para fluctuaciones de tensión sinusoidales y rectangulares 120 V 60 Hz. (IEC-61000-4-15, 2010) .	26
Tabla 3.3. Especificaciones de ensayo para el clasificador del flickermetro (Lámpara 120 V/60 Hz) (IEC-61000-4-15, 2010)	28
Tabla 4.1. Especificaciones técnicas del computador utilizado en el laboratorio.	31
Tabla 4.2. Equipos utilizados en el montaje del generador de eventos de calidad de energía eléctrica.	32
Tabla 5.1. Resultados de simulaciones del Pinst. Ensayo cambios de tensión sinusoidales.	49
Tabla 5.2. Resultados de simulaciones del Pinst. Ensayo cambios de tensión rectangulares.	50
Tabla 5.3. Resultados de simulaciones del Pst. Ensayo cambios de tensión rectangulares.	51
Tabla 6.1. Resultados del P_{inst} , ensayo cambios de tensión sinusoidales a 60 Hz. Pruebas obligatorias.	55
Tabla 6.2. Resultados del P_{inst} , ensayo cambios de tensión rectangulares a 60 Hz. Pruebas obligatorias.	56
Tabla 6.3. Resultados P_{st} para variaciones de tensión rectangulares y ensayos de funcionamiento.	57

Tabla 6.4. Resultados P_{st} para variaciones de tensión rectangulares y ensayos de funcionamiento. Ensayo de linealidad.	58
Tabla 2.1. Versiones de programas utilizados.	L
Tabla 2.2. Especificaciones técnicas del computador utilizado en el la- boratorio.	L

INTRODUCCIÓN

La calidad de energía eléctrica se refleja en el suministro de energía eléctrica a los dispositivos con características y condiciones adecuadas que les permita mantener su operatividad sin perjudicar su desempeño u ocasionar fallas a sus componentes.

El estudio de la calidad de la energía eléctrica ha adquirido gran fuerza en la actualidad, ya que promover la disminución de los fenómenos que afectan negativamente la calidad de la energía eléctrica, trae como consecuencia un aumento en la productividad de las empresas, así como un mejor aprovechamiento de la energía suministrada (J.G, 2005). La optimización ocurre en ciertos equipos como motores eléctricos, y también a nivel de automatización de procesos que involucran dispositivos electrónicos como PLCs, variadores de frecuencia, etc. Una variación en las señales de control de estos dispositivos puede ocasionar fallas significativas a nivel de operatividad.

El flicker es un fenómeno comprendido entre los eventos de calidad de energía eléctrica, el cual se define como una variación sistemática de la forma de onda de tensión las cuales producen efectos irritantes y no deseados en la visión de los usuarios que se encuentren en un ambiente presente con este fenómeno por un tiempo prolongado (Wierda, 2001), debido a que produce variaciones en la intensidad luminosa. Típicamente este fenómeno es producido por arranque de motores y demás equipos con un régimen de operación, que se encuentren conectados en un punto de acoplamiento común (PCC) entre las luminarias y dichas cargas.

Los instrumentos de medición que cumplan los estándares nacionales (Normas de Calidad del Servicio de Distribución de Electricidad promulgada en Gaceta

Oficial N°37.825) e internacionales (IEC-61000-4-15, IEEE-519, etc), y que su desarrollo sea de bajo costo representa una tarea importante en el área de ingeniería. Teniendo en cuenta esto, se plantea la implementación de un instrumento capaz de medir las fluctuaciones de tensión generadas por el fenómeno flicker, tomando como base la norma IEC 61000-4-15, la cual presenta las especificaciones técnicas y pruebas de funcionamiento de dicho instrumento.

A nivel de software, en el presente trabajo especial de grado se utilizará Matlab®Simulink®; ya que los modelos de flicker del trabajo de Montoya (Montoya A, 2014), en los cuales se establece la base del medidor de flicker presentado en este trabajo, se encuentran en dicho software.

En cuanto al hardware, la base del medidor de flicker estará dado por un procesador digital de señales (DSP) modelo F28335, de la Texas Instruments; al cual se le diseñará un circuito acondicionador para la entrada analógica, que reduce la tensión de 120 V (señal a medir con flicker) a niveles de tensión aceptados por el DSP. También contará con una pantalla digital en la que se podrá observar los valores de la sensación instantánea de flicker (P_{inst}) y el índice de severidad de flicker a corto plazo (P_{st}).

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Partiendo de la necesidad de cuidar y mantener la calidad del servicio eléctrico para la población, se requiere regular la calidad del servicio eléctrico a nivel de cliente o consumidor.

De acuerdo a las Normas de Calidad del Servicio de Distribución de Electricidad (Gaceta Oficial-37.825, 2003), el concepto de calidad de servicio eléctrico engloba tres áreas:

- (a) Calidad del producto técnico.
- (b) Calidad del servicio técnico.
- (c) Calidad del servicio comercial.

La calidad del producto técnico establece el nivel de cumplimiento de los valores admisibles establecidos en la norma, la cual toma en consideración los niveles de tensión y perturbaciones de la onda de tensión. Una de las mediciones para obtener las perturbaciones de la onda de tensión es el P_{st} o índice de severidad del flicker.

Diversos organismos internacionales han desarrollado indicadores para determinar los índices que regulan la calidad del servicio eléctrico. Estos indicadores se ven reflejados en la duración y cantidad de interrupciones, así como la calidad de la onda de tensión, también en el compromiso que ofrece el servicio técnico de quién provee el suministro de energía eléctrica a nivel comercial. Esto se ve reflejado en Las Normas de Calidad del Servicio de Distribución de Electricidad promulgada

en Gaceta Oficial N°37.825 del 25/11/2003; así como en la Ley Orgánica del Sistema y Servicio Eléctrico promulgada en Diciembre de 2010.

CAPÍTULO II

OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Implementar la medición de la sensación instantánea de Flicker y el índice de severidad de Flicker a corto plazo de señales de baja tensión a 120 V, 60 Hz mediante un procesador digital de señales (DSP).

2.2. Objetivos Específicos

1. Documentar los aspectos resaltantes del fenómeno de Flicker.
2. Adecuar la señal de baja tensión de 120 V y 60 Hz distorsionada con Flicker a los niveles de tensión de entrada del procesador digital de señales.
3. Adecuar los modelos Matlab-Simulink del trabajo de Montoya (Montoya 2006) para que puedan ser compilados exitosamente sobre el procesador digital de señales.
4. Presentar las señales de salida del procesador digital de señales, sensación instantánea de Flicker e índice de severidad del Flicker en una pantalla conectada al DSP.
5. Realizar pruebas del funcionamiento del medidor, con señales de baja tensión, contra un analizador de redes comercial.

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1. El Flicker

El flicker o parpadeo de la luz se define como "la impresión subjetiva de la fluctuación de la luminancia" (Wierda, 2001). Es un fenómeno de origen fisiológico visual que acusan los usuarios que frecuentan áreas donde se encuentran lámparas alimentadas por una fuente común a un sistema de iluminación y a una carga perturbadora. Este efecto de parpadeo que genera molestias en los usuarios se manifiesta en luminarias de baja de tensión, aunque las cargas perturbadoras puedan encontrarse conectadas a cualquier nivel de tensión. El flicker es el resultado de fluctuaciones de amplitud pequeña en la tensión de alimentación (Montoya A, 2014).

En el estándar IEEE-519 (IEEE-519, 1992), el flicker es descrito como la impresión de inestabilidad de la sensación visual inducida por un estímulo luminoso cuya luminancia o distribución espectral fluctúa en el tiempo. Lo mencionado anteriormente expresa que el fenómeno flicker es la respuesta de la cadena lámpara-ojo-cerebro ante una variación en la intensidad luminosa a determinada frecuencia, producto de una variación proporcional en el tensión de alimentación de la lámpara. Dicha respuesta es de carácter fisiológico, porque involucra la percepción a través de la vista.

Estas fluctuaciones son generadas principalmente por:

1. Variaciones de tensión periódicas o erráticas permanentes: Se deben a cargas o conjunto de cargas cuya utilización se caracteriza por una variación constante de la demanda de potencia: Hornos de arco, máquinas de soldar, etc.

2. Variaciones bruscas y repetitivas de tensión; conexión y desconexión asociado a cargas con un ciclo de trabajo corto: Nevera doméstica, arranque de motores, conmutación de condensadores para la corrección del factor de potencia.

3. Mal funcionamiento del sistema de iluminación.

3.1.1. Modelo matemático del flicker

Las fluctuaciones asociadas al flicker poseen un modelado similar a una modulación AM convencional, donde la señal portadora es la señal de tensión de la red a 60 Hz y la señal moduladora es la variación de tensión asociada al flicker, cuya frecuencia se sitúa por lo general entre 0,5 Hz y 25 Hz, provocando de esta manera un cambio en la amplitud de la portadora de no más del 10 % de la amplitud de la misma (Montoya A, 2014).

Una señal cosenoidal modulada en amplitud obedece a la siguiente expresión temporal (Oviedo y Rueda, 2008):

$$S(t) = A_c \cdot (1 + m \cdot g(t)) \cdot \cos(2\pi \cdot f_c \cdot t) \quad (3.1)$$

donde $S(t)$ corresponde a la señal moduladora normalizada en amplitud y m corresponde al coeficiente de modulación. Este coeficiente representa el cambio de amplitud presente en una forma de onda de amplitud modulada. El porcentaje de modulación es el coeficiente de modulación expresado en porcentaje.

La función $g(t)$ se encuentra normalizada en amplitud, ya que matemáticamente m incluye la amplitud de la señal moduladora. Para el caso de una variación

de amplitud cosenoidal, tenemos que:

$$g(t) = \cos(2\pi \cdot f_m \cdot t) \quad (3.2)$$

Sustituyendo la ecuación 3.2 en 3.1, se obtiene la ecuación 3.3.

$$S(t) = A_c \cdot (1 + m \cdot \cos(2\pi \cdot f_m \cdot t)) \cdot \cos(2\pi \cdot f_c \cdot t)$$

$$S(t) = A_c \cdot \cos(2\pi \cdot f_c \cdot t) + A_c \cdot m \cdot [\cos(2\pi \cdot (f_c - f_m) \cdot t) + \cos(2\pi \cdot (f_c + f_m) \cdot t)] \quad (3.3)$$

La ecuación 3.3 representa el modelo matemático de una señal de tensión cosenoidal contaminada con un flicker cosenoidal. El modelo se basa en el efecto de modulación de amplitud con el siguiente coeficiente de modulación:

$$m = \frac{A_m}{A_c} \quad (3.4)$$

donde A_c representa la amplitud máxima de la señal cosenoidal de alimentación y A_m es el máximo en la amplitud de la variación de flicker.

Si consideráramos una variación de flicker rectangular, la ecuación que regiría la forma de onda modulada en amplitud es la siguiente:

$$S(t) = A_c \cdot [1 + m \cdot \text{sign}(\cos(2\pi \cdot f_m \cdot t))] \cdot \cos(2\pi \cdot f_c \cdot t) \quad (3.5)$$

donde:

A_c : Amplitud de la portadora sin modular.

f_c : Frecuencia de la portadora sin modular.

m : Coeficiente de modulación.

f_m : Frecuencia de la moduladora.

ΔV : Amplitud pico-pico entre el mínimo y el máximo de la amplitud de la señal modulada.

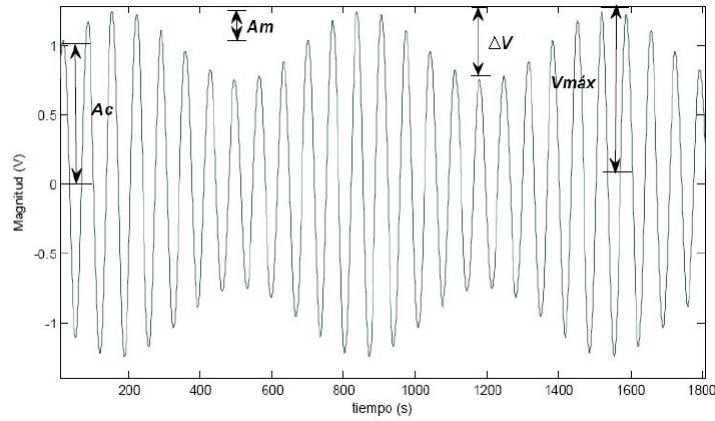


Figura 3.1. Tensión cosenoidal contaminada con flicker cosenoidal.
(Oviedo y Rueda, 2008)

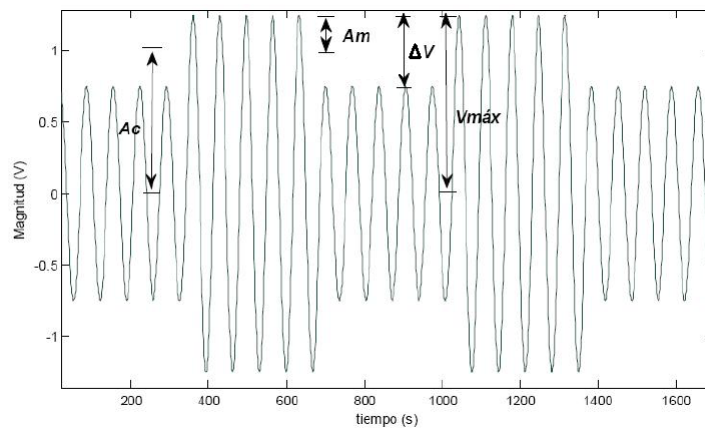


Figura 3.2. Señal cosenoidal modulada por una señal cuadrada.
(Oviedo y Rueda, 2008)

3.1.2. Medición de flicker

En la medición de flicker intervienen factores técnicos, fisiológicos y psicológicos dado que se debe cuantificar la sensación de molestia experimentada por la persona.

Por muchos años, IEEE ha publicado curvas con recomendaciones límites para las fluctuaciones de tensión, e indican de igual manera la magnitud de variación de tensión aceptable y frecuencia de la ocurrencia para bombillos incandescentes de 60 W, 120 V. Dichas curvas están basadas en pruebas estadísticas a diferentes personas, y así determinar el borde de irritabilidad de la visión. Estas han sido ampliamente utilizadas por las empresas de servicio eléctrico (J.G, 2005).

El apogeo del uso de equipos de electrónica de potencia ha contribuido a la presencia de complejas fluctuaciones de tensión que no pueden ser fácilmente tratadas por las normas IEEE. A continuación se presentan las curvas de tolerancia de la norma IEEE.

Curva de tolerancia de la norma IEEE 141

La curva de la figura 3.3 muestra los límites aceptables de flicker, en base a la magnitud de la variación de tensión y la frecuencia de la ocurrencia del mismo.

La curva inferior indica el límite a partir del cual el ser humano comienza a detectar el flicker. La curva superior indica el límite a partir del cual el ser humano empieza a ser perturbado por el flicker. Por ejemplo, observando las curvas de la figura 3.3, para 2 perturbaciones por hora, el flicker es detectado desde fluctuaciones de tensión del 2%; mientras que si estas fluctuaciones de tensión llegan a alcanzar el 5% o un nivel mayor, el flicker comienza a perturbar e irritar al individuo.

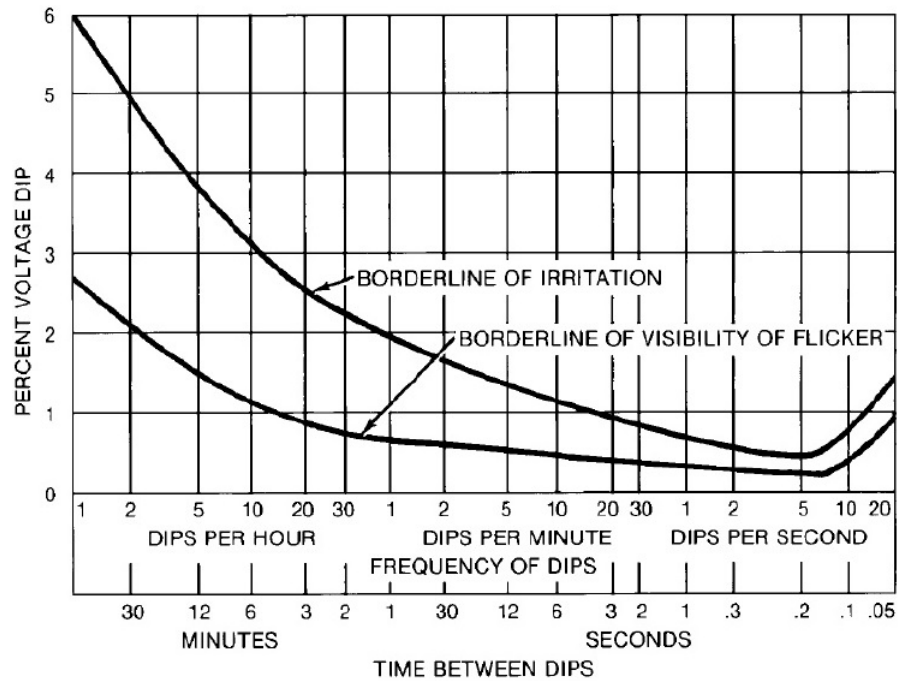


Figura 3.3. Rango del flicker observable y perturbador de una lámpara incandescente de 60Hz , 120V y 60W . (IEEE-141, 1993)

Curva de tolerancia de la norma IEEE 519

Bajo el mismo principio indicado en la recomendación de la norma IEEE-141, en la norma IEEE-519 se presenta una clasificación del grado de susceptibilidad en base al tipo de carga presente.

La tabla de la figura 3.4, es derivada de estudios experimentales hechos a diversas fuentes, sobre la base del uso de lámparas incandescentes de 60 W .

Sensación instantánea de flicker y dosis de flicker

En el planteamiento de la dosis de flicker se basan las actuales normas de caracterización de flicker, y éste fue el primer parámetro de cuantificación de la

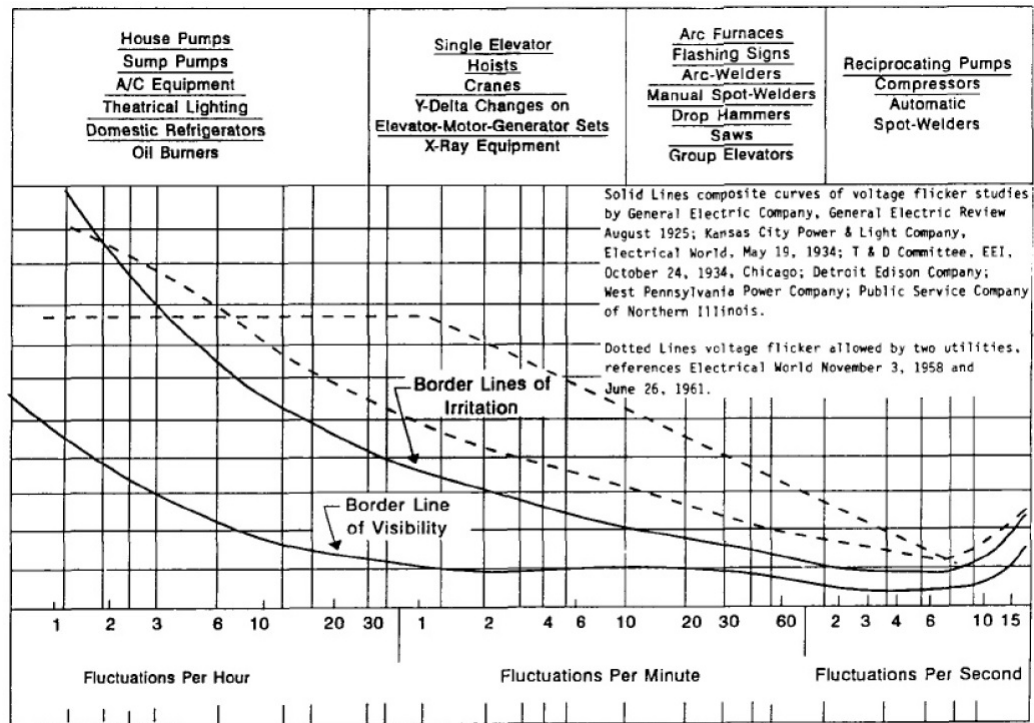


Figura 3.4. Máximo permisible de fluctuaciones de tensión. (IEEE-519, 1992)

sensación de flicker. Esta definición se originó en Francia a partir de prácticas experimentales sobre lámparas incandescentes de 60 W, 50 Hz y 220 V. En las mismas se obtuvieron las siguientes conclusiones (Wierda, 2001):

1. La sensación de molestia es función del cuadrado de la amplitud de la fluctuación de la tensión y de la duración de esta.

2. La sensibilidad del observador medio a las fluctuaciones de iluminación es máxima en 8,8 Hz.

3. El límite mínimo de percepción ocurre para la frecuencia de 8,8 Hz ($\frac{\Delta V}{V} = 0,0025$). Además, a esta frecuencia ocurre el límite mínimo de molestia ($\frac{\Delta V}{V} = 0,005$), como se observa en la figura 3.5

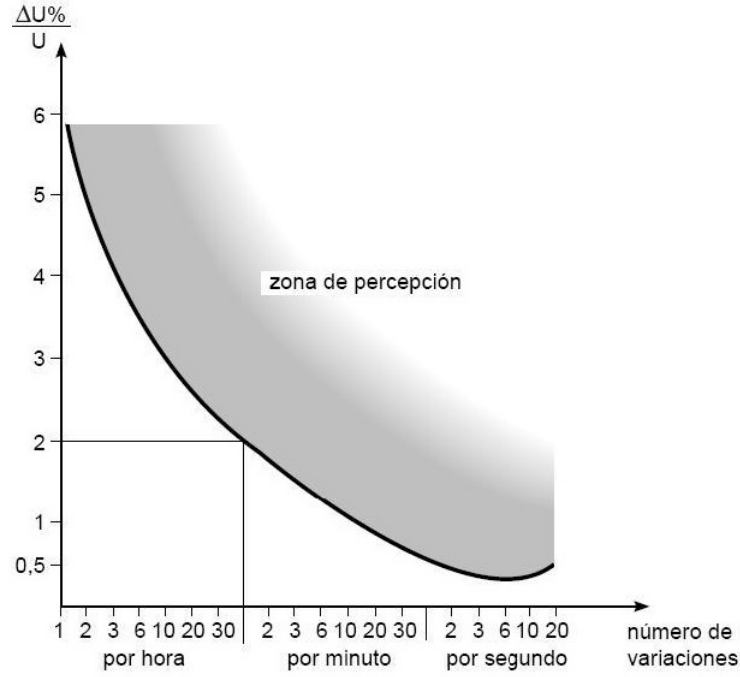


Figura 3.5. Límite de sensibilidad del ojo a las variaciones de iluminación causadas por fluctuaciones de tensión, en lámparas de incandescencia.
(Wierda, 2001)

Sobre la base de nuevos experimentos y las conclusiones anteriores, se demostró que la molestia de flicker percibida para una fluctuación de tensión a una frecuencia f (diferente de 8,8 Hz) con una amplitud $a_f(t)$ es equivalente a la molestia percibida por una fluctuación de la tensión a 8,8 Hz y una amplitud equivalente $a_{8,8}(t) = g_f \cdot a_f(t)$. El coeficiente g_f es dependiente sólo de la frecuencia f , de esta manera, toda fluctuación de tensión puede expresarse en una fluctuación de tensión equivalente a 8,8 Hz. De igual manera, se demostró que una superposición de varias fluctuaciones de tensión a frecuencias f_i y amplitudes $a_i(t)$ distintas, equivale a una fluctuación de amplitud $a_{8,8}(t)$ equivalente a 8,8 Hz y dada por (Wierda, 2001):

$$a_{8,8}(t) = \sqrt{\sum_i a_{8,8i}^2(t)} = \sqrt{\sum_i a_i^2(t) \cdot g_{f_i}^2} \quad (3.6)$$

El parámetro $a_{8,8}^2(t)$ es una función dependiente del tiempo, y se denomina sensación instantánea de flicker o flicker instantáneo.

También se pudo observar que para una fluctuación de tensión, frecuencia, amplitud y duración determinada, se experimenta una sensación de molestia similar que para una fluctuación de tensión de la misma frecuencia, de amplitud doble, pero de duración cuatro veces más corta. Dichas observaciones permitieron definir un parámetro de cuantificación de la molestia de flicker percibida sobre un período de tiempo determinado (normalmente un minuto). Este parámetro de medida es denominado dosis de flicker y se expresa en unidades $\% ^2 \cdot mn$ (por ciento al cuadrado minuto), como se indica en la ecuación 3.7

$$G = \int_{t_o}^{t_o+T} a_{8,8}^2(t) dt \quad (3.7)$$

El parámetro de dosis de flicker proporciona una valoración de la cantidad de molestia durante un tiempo de duración determinada. Este parámetro es muy fluctuante para una carga perturbadora con un ciclo de funcionamiento mayor respecto al período de integración, lo cual hace que sea una desventaja para estos casos, ya que no expresa correctamente la molestia total percibida. Teniendo en cuenta lo anterior, la IEC-61000-4-15 (IEC-61000-4-15, 2010) desarrolló un método de análisis estadístico, el cual toma en cuenta tanto los cambios bruscos de tensión así como las fluctuaciones de tensión periódicas (Wierda, 2001). Dicho análisis tuvo como consecuencia la definición de parámetros como el índice de severidad de flicker a corto plazo (P_{st}) y el índice de severidad de flicker a largo plazo (P_{lt}), los cuales se encuentran expresados en el estándar IEC-61000-4-15.

3.1.3. Medición del flicker según la norma IEC-61000-4-15

Por medio de un medidor de flicker que cumpla con las especificaciones estipuladas en la norma IEC-61000-4-15 (IEC-61000-4-15, 2010) con referencia a las pruebas descritas en la tabla 3.1, es posible evaluar y medir directamente todos los tipos de fluctuaciones de tensión.

La estructura del flickermetro se presenta en el diagrama de bloques de la figura 3.6

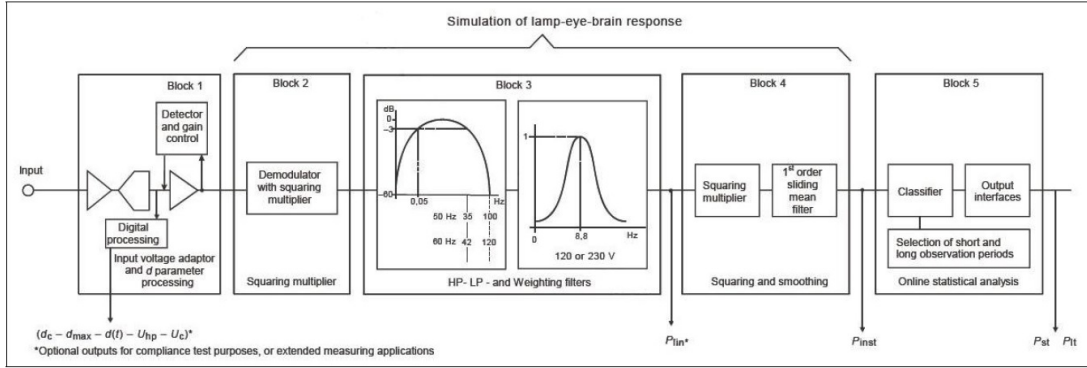


Figura 3.6. Diagrama de Bloques del Flickermetro de la Norma IEC-61000-4-15. (IEC-61000-4-15, 2010)

El medidor de flicker de la norma IEC-61000-4-15 se divide en dos partes funcionales. La primera parte comprende los bloques 2, 3 y 4 de la figura 3.6; estos bloques simulan la respuesta de la cadena lámpara-ojo-cerebro. La segunda parte abarca el bloque 5, el cual realiza el análisis estadístico en tiempo real y la presentación de los resultados en función del tipo de período deseado. La norma presenta las especificaciones de los bloques funcionales para los sistemas de 120 V, 50 Hz; 120 V, 60 Hz; 230 V, 50 Hz; 230 V, 60 Hz. En el presente trabajo sólo se consideran los parámetros del flickermetro para el sistema de 120 V, 60 Hz.

Los bloques que conforman el flickermetro de la norma IEC-61000-4-15 son explicados a continuación:

Bloque 1: Adaptador de la tensión de entrada y dispositivo calibrador

El bloque 1 comprende un circuito adaptador de tensión que escala el valor eficaz de la tensión de entrada a un nivel de referencia de valor constante sin alterar la fluctuación relativa de la modulación flicker. De esta forma, es posible realizar las medidas de flicker independientemente del nivel de la tensión de entrada y expresarlo en una relación porcentual. Este bloque también contiene un generador de señales que verifica la calibración del flickermetro.

Bloque 2: Demodulador cuadrático

La función del bloque 2 es recuperar la fluctuación de tensión elevando al cuadrado la tensión de entrada escalada al nivel de referencia para, de esta forma, simular el comportamiento de una lámpara. A la salida de este bloque se debe tener una tensión proporcional a la amplitud de la fluctuación de modulación flicker.

Bloque 3: Filtros de ponderación

El bloque 3 está compuesto de dos filtros dispuestos en cascada y un selector de márgenes de medida que puede estar antes o después de los filtros mencionados. El primer filtro elimina las componentes de corriente continua y de rizado al doble de la frecuencia de la red a la salida del demodulador cuadrático (bloque 2). Se asumen despreciables las amplitudes de las componentes a frecuencias superiores. Este filtro debe poseer una sección pasa-alto de primer orden con una atenuación de 3 dB sugerida para una frecuencia de 0,05 Hz, y una sección pasa-bajo para la cual se sugiere un filtro Butterworth de sexto orden con una atenuación de 3 dB

a 42 Hz. Estas especificaciones están dadas para el sistema de alimentación 120 V/60 Hz.

El segundo filtro tiene la tarea de simular la respuesta en frecuencia a las fluctuaciones sinusoidales de tensión de una lámpara de gas con filamento enrollado (60 W/120 V) en conjunto con el sistema de visión humano. La función respuesta está basada en el umbral de perceptibilidad encontrada a cada frecuencia para el 50 % de las personas sometidas a la prueba.

Si asumimos que el filtro que suprime la portadora definido anteriormente tiene una influencia despreciable en el ancho de banda ocupado por las señales de fluctuación de tensión flicker, se puede modelar la respuesta global o total del bloque 3 a través de la función de transferencia de la ecuación 3.8

$$H(s) = \frac{\kappa \cdot \omega_1 \cdot s}{s^2 + 2\lambda \cdot s + \omega_1^2} \times \frac{1 + \frac{s}{\omega_2}}{(1 + \frac{s}{\omega_3}) \cdot (1 + \frac{s}{\omega_4})} \quad (3.8)$$

donde para el sistema 120 V/ 60 Hz:

$$\begin{aligned} \kappa &= 1,6357 \\ \lambda &= 2\pi 4,167375 \\ \omega_1 &= 2\pi 9,077169 \\ \omega_2 &= 2\pi 2,939902 \\ \omega_3 &= 2\pi 1,394468 \\ \omega_4 &= 2\pi 17,31512 \end{aligned}$$

Bloque 4: Multiplicador cuadrático y filtro de desplazamiento de la media

El bloque 4 tiene dos funciones primordiales, las cuales son:

1. Elevar al cuadrado la señal flicker ponderada para simular la percepción no

lineal del sistema ojo-cerebro.

2. Desplazar la media de la señal flicker para simular el efecto de almacenamiento en el cerebro.

El multiplicador cuadrático debe tener márgenes de funcionamiento entrada/salida suficientes para obtener el nivel admisible de flicker a 8,8 Hz. Además, el desplazamiento de la media debe realizarse mediante la función de transferencia de un filtro resistivo-capacitivo pasa-bajo de primer orden con una constante de tiempo de 300 ms.

La señal que representa la sensación instantánea de flicker se encuentra a la salida de este bloque.

Bloque 5: Análisis estadístico en tiempo real

El bloque 5 tiene la función de realizar un análisis estadístico en tiempo real de la sensación instantánea de flicker, haciendo posible de esta forma, el cálculo de parámetros de medida de flicker como el índice de severidad del flicker a corto plazo (P_{st}) y a largo plazo (P_{lt}). El análisis estadístico se debe realizar muestreando la sensación instantánea de flicker y dividiendo su amplitud máxima en un número adecuado de clases. Este bloque comprende el uso de un microprocesador.

Las muestras de la sensación instantánea de flicker obtenidas deben ser procesadas para la determinación de su histograma sobre el período de observación. Para esto la norma recomienda, para los instrumentos que monitorizan la calidad de potencia con propósitos generales (clase F1) con ocurrencias de grandes fluctuaciones de tensión, 16 bits de resolución (es decir, 65536 niveles) y al menos 512 clases distribuidas logarítmicamente para el clasificador. Además, la norma recomienda que el instrumento debe indicar si hay valores de la sensación instantánea de flicker (P_{inst}) fuera del rango del clasificador.

Al muestrear un valor apropiado, el contador de la clase correspondiente se incrementa en uno. De esta manera, se obtiene la función distribución de frecuencias de los valores de entrada. Al termino del intervalo de medida (generalmente 10 minutos) queda como resultado la duración del flicker instantáneo en cada clase. Sumando los valores de los contadores de todas las clases y expresando el valor del contador de cada clase en proporción con la suma total se obtiene la función densidad de probabilidades de la sensación instantánea de flicker. Mediante esta función, se obtiene la función de distribución acumulativa de probabilidades usada en el método estadístico de evaluación del índice de severidad del flicker a corto plazo (P_{st}).

Durante el procesamiento en tiempo real, inmediatamente después de la conclusión de cada intervalo de tiempo corto, tiene lugar el análisis estadístico del siguiente intervalo; y los resultados de los intervalos que ya han transcurrido estarán disponibles a la salida. De esta forma, los índices necesarios estarán disponibles para evaluar el índice de severidad del flicker a largo plazo (P_{lt}) (generalmente calculado para un período de tiempo de 2 horas, es decir, calculado a partir de 12 mediciones consecutivas del P_{st}).

La medida de la severidad del flicker basada en un período de observación de 10 minutos se denomina P_{st} , y se calcula a partir de las estadísticas obtenidas del clasificador de nivel del bloque 5. Para su cálculo se emplea la ecuación 3.9.

$$P_{st} = \sqrt{0,0314 \cdot P_{0,1} + 0,0525 \cdot P_{1s} + 0,0657 \cdot P_{3s} + 0,28 \cdot P_{10s} + 0,08 \cdot P_{50s}} \quad (3.9)$$

Los parámetros $P_{0,1}$, P_{1s} , P_{3s} , P_{10s} y P_{50s} corresponden con los niveles de flicker instantáneo excedidos a lo largo del 0,1 %, 1 %, 3 %, 10 % y 50 % del período de observación. El sufijo “s” en la ecuación 3.8 indica que debe usarse el valor alisado,

los cuales se calculan de la siguiente manera:

$$P_{1s} = \frac{(P_{0,7} + P_1 + P_{1,5})}{3} \quad (3.10)$$

$$P_{3s} = \frac{(P_{2,2} + P_3 + P_4)}{3} \quad (3.11)$$

$$P_{10s} = \frac{(P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17})}{5} \quad (3.12)$$

$$P_{50s} = \frac{(P_{30} + P_{50} + P_{80})}{3} \quad (3.13)$$

El período de tiempo de 10 minutos a lo largo del cual se basa la evaluación de la severidad del flicker a corto plazo es suficiente para evaluar las perturbaciones originadas por fuentes individuales con un ciclo de trabajo corto. En los casos en que deba tomarse en cuenta el efecto combinado de varias cargas perturbadoras actuando de manera aleatoria, o cuando deban considerarse las fuentes de flicker con ciclos de trabajo largos y variable, se debe calcular el índice de severidad del flicker a largo plazo (P_{lt}). Para su cálculo deberán utilizarse los valores de P_{st} registrados a lo largo de un período de tiempo apropiado o lo suficientemente largo para que un observador pueda reaccionar al flicker. La fórmula utilizada en el cálculo del P_{lt} es el indicado en la ecuación 3.14.

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N P_{st_i}^3}{N}} \quad (3.14)$$

Los valores P_{st_i} para $i=1,2,\dots,N$ son lecturas consecutivas del índice de severidad del flicker a corto plazo (P_{st}).

3.1.4. Índice de severidad del flicker a corto y a largo plazo (P_{st} y P_{lt})

El método de evaluación de la severidad del flicker a corto plazo (P_{st}) se basa en el cálculo de la función distribución acumulativa de la sensación instantánea de flicker según el estándar IEC-61000-4-15, como se observó en el punto explicado con anterioridad sobre el bloque 5 de la figura 3.6. De esta forma se obtiene la función densidad de probabilidades $f_x(x)$, y a partir de ésta, la función de probabilidad acumulativa $F_X(x)$. La función de probabilidad acumulativa con variable aleatoria X (flicker instantáneo), es planteada acumulando probabilidades hacia adelante, de esta forma queda planteada en la ecuación 3.15.

$$F_X(x) = P\{X \geq x\} = \int_x^{\infty} f_x(x)dx \quad (3.15)$$

Para la obtención de la función densidad de probabilidades ($f_x(x)$), se dividió el histograma entre el número de muestras obtenidas en el período de observación. Un punto de la función de probabilidades acumulativa ($x; F_X(x)$) representa la sensación instantánea de flicker con coordenada en el eje horizontal x , y coordenada en el eje vertical $F_X(x)$ que representa el porcentaje de tiempo respecto al período de observación donde se excede el valor x de la sensación instantánea de flicker.

Se puede observar en la figura 3.7, la sensación instantánea de flicker limitando el número de clases para la asignación de sus muestras a diez.

En la figura 3.8, se observa la función de probabilidades acumulativa de la sensación instantánea de flicker limitando el número de clases a diez.

Como se observó con anterioridad, para obtener los índices de severidad del flicker es requerido leer de la función de probabilidad acumulativa, los valores instantáneos de flicker sobrepasados en el 0,1 %, 1 %, 3 %, 10 % y 50 % del período

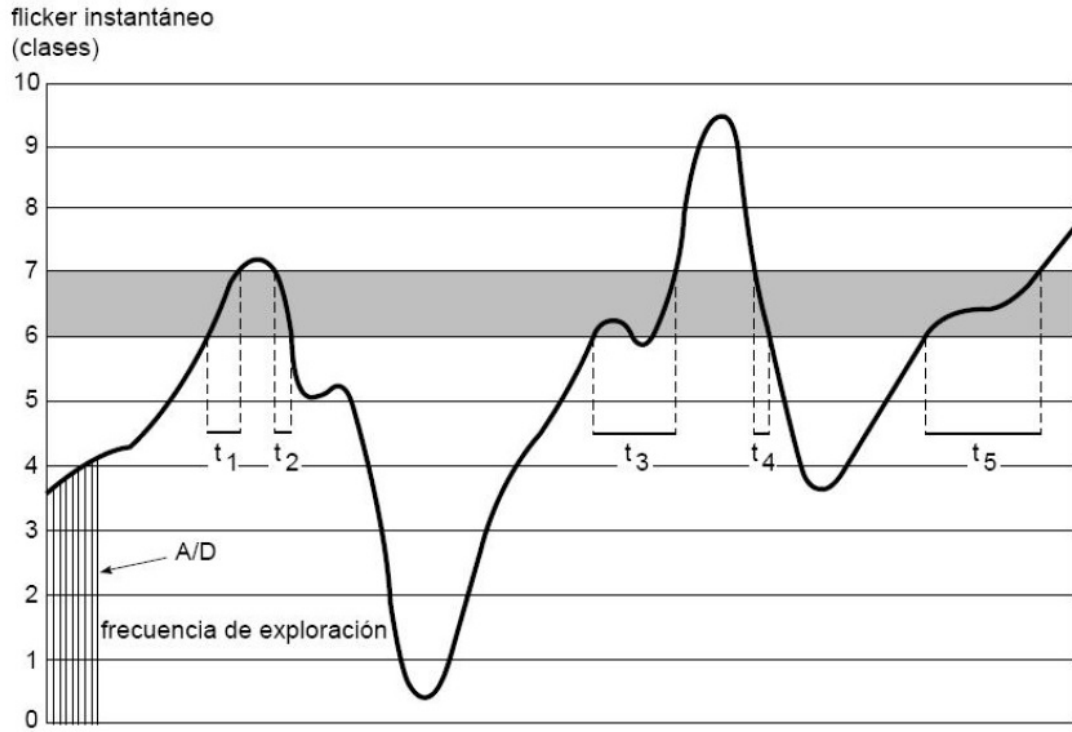


Figura 3.7. Sensación instantánea de flicker limitando el número de clases para la asignación de sus muestras a diez. (Wierda, 2001)

de observación planteado (generalmente 10 minutos). Estos valores tienen lugar en la ecuación 3.8 que se mostró con anterioridad, para así determinar el P_{st} .

Los coeficientes de ponderación permiten que la curva límite de molestia del flicker de la norma IEC se corresponda con el valor constante de $P_{st}=1$.

Al haber diferentes fuentes perturbadoras colocadas a una misma red, el parámetro global P_{st} se calcula según la fórmula 3.16. El valor “ m ” es el número de elementos perturbadores conectados a la red (IEC-61000-3-7, 2008)).

$$P_{st} = \sqrt[m]{\sum_i P_{st_i}^m} \quad (3.16)$$

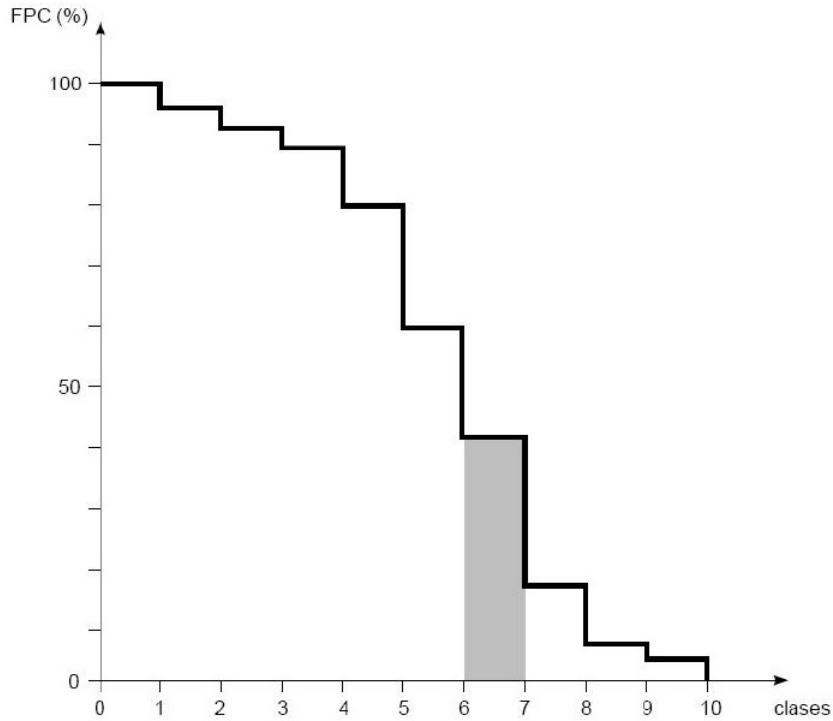


Figura 3.8. Función de probabilidades acumulativa de la sensación instantánea de flicker limitando el número de clases a diez. (Wierda, 2001)

La severidad del flicker a largo plazo (P_{lt}), como se observó con anterioridad, se calcula mediante la ecuación 3.14. El P_{lt} es calculado a partir de los valores de P_{st} comprendido en un período de tiempo adecuado según el ciclo de la carga o durante el cual un observador pueda ser sensible al flicker (generalmente 2 horas). La magnitud del límite tolerable para el P_{lt} es 0,8 (IEC-61000-2-2, 2002).

3.1.5. Pruebas del flickermetro según norma IEC-61000-4-15

La norma IEC-61000-4-15 explica las pruebas que se deben realizar a los instrumentos de medición de flicker para estar bajo los estándares de la misma. Tres clases de flickermetro están definidos:

1. Flickermetro clase F1 (flickermetros de propósito general): Son adecuados para realizar tareas de supervisión de calidad de energía y pruebas de funcionamiento. Pueden estar sometidos a un rango amplio de variaciones de tensión de entrada, variaciones de frecuencia e inclusive saltos de fase.
2. Flickermetro clase F2: Su uso está enfocado a productos que cumplan con las pruebas de las normas IEC-61000-3-3 ó IEC-61000-3-11 que operen en ambientes controlados, con frecuencia y fase constante, y fluctuaciones de tensión controladas.
3. Flickermetro clase F3: Son medidores de flicker utilizados en campañas de medición de calidad de onda, búsqueda de fallas y otras aplicaciones donde no se requiera de una gran precisión o incertidumbres pequeñas en la medición.

La tabla 3.1 indica las especificaciones de pruebas que se realizan a los flickermetros dependiendo de su clase.

Se debe destacar que la sensación instantánea de flicker muestreada debe ser procesada con el fin de obtener la determinación de su histograma sobre el período de observación. Teniendo esto presente, la norma recomienda que para instrumentos que miden la calidad de potencia con propósitos generales (clase F1) con ocurrencias de grandes fluctuaciones de tensión, 16 bits de resolución (65536 niveles) y al menos 512 clases distribuidas logarítmicamente para el clasificador. Adicionalmente, la norma recomienda que el instrumento debe indicar si hay valores de la sensación instantánea de flicker (P_{inst}) fuera del rango del clasificador.

Cada vez que aparece el valor apropiado, el contador de la clase correspondiente se incrementa en una unidad. El resultado final al termino del intervalo de medida (generalmente 10 minutos) es la duración del flicker instantáneo en cada clase.

Tabla 3.1 Especificaciones de pruebas para flickermetros (IEC-61000-4-15, 2010)

Características de tensión	Intención	Valor usado para la prueba	Clases del flickermetro		
Cambios de tensión sinusoidal y rectangular	Prueba las características de respuesta del filtro y escalamiento	P_{inst}	F1	F2	F3
Cambios de tensión rectangular y prueba de desempeño	Prueba el clasificador y algoritmos de evaluación estadística	P_{st}	F1	F2	F3
Cambios de frecuencia	Prueba la medición del circuito	P_{inst}	F1		
Distorsiones de tensión con múltiples cruces por cero	Prueba la estabilidad del circuito de control	P_{inst}	F1		
Armónicos con banda lateral	Prueba la entrada del ancho de banda	P_{inst}	F1		
Salto de fase	Prueba la estabilidad del circuito de control de entrada, el ancho de banda de entrada y la clasificación	P_{st}	F1	F2	
Variaciones de tensión rectangulares con ciclo de utilización	Ensayo de los algoritmos con ciclo de utilización	P_{st}	F1	F2	
$d_c, d_{max}, d(t)$	Ensayo de funcionamiento según la norma IEC-61000-3-3		$F1^*$	F2	

Pruebas de funcionamiento de la respuesta total desde la entrada a la salida P_{inst} para cambios de tensión sinusoidales/rectangulares

Para los medidores de flicker, debe verificarse la respuesta total desde la entrada a la salida P_{inst} ante las variaciones de tensión sinusoidales y rectangulares. Para todos los puntos del ensayo de la tabla 3.2 del sistema 120 V / 60 Hz, $P_{inst,max}$ debe ser igual a 1,00 con una tolerancia de $\pm 8\%$. En dicha tabla está representada la fluctuación de tensión relativa $\Delta V/V$ para una unidad de flicker instantáneo.

Tabla 3.2 Respuesta del flickermetro para fluctuaciones de tensión sinusoidales y rectangulares 120 V 60 Hz. (IEC-61000-4-15, 2010)

Fluctuación de Tensión [%]			Fluctuación de Tensión [%]		
Hz	Sinusoidal	Rectangular	Hz	Sinusoidal	Rectangular
0,5	2,453	0,598	10,0	0,341	0,266
1,0	1,465	0,548	10,5	0,355	0,278
1,5	1,126	0,503	11,0	0,373	0,292
2,0	0,942	0,469	11,5	0,394	0,308
2,5	0,815	0,439	12,0	0,417	0,324
3,0	0,717	0,419	13,0	0,469	0,367
3,5	0,637	0,408	14,0	0,528	0,411
4,0	0,570	0,394	15,0	0,592	0,457
4,5	0,514	0,373	16,0	0,660	0,509
5,0	0,466	0,348	17,0	0,734	0,575
5,5	0,426	0,324	18,0	0,811	0,626
6,0	0,393	0,302	19,0	0,892	0,688
6,5	0,366	0,283	20,0	0,977	0,746
7,0	0,346	0,269	21,0	1,067	0,815
7,5	0,332	0,258	22,0	1,160	0,851
8,0	0,323	0,253	23,0	1,257	0,946
8,8	0,321	0,252	25,0	1,464	1,088
9,5	0,329	0,258	25,5		1,072
			33 1/3	2,570	1,823
			37,0		1,304
			40,0	4,393	3,451

En la figura 3.9, se puede observar el significado de $\Delta V/V$ y el número de cambios de tensión, explicado en la norma IEC-61000-4-15. Las pruebas de rendimiento asumen la relación de fase entre la frecuencia fundamental y la

función moduladora, es decir, una función sinusoidal. Un cambio en la relación de fase puede generar distintos valores de P_{inst} y P_{st} en pruebas de modulación rectangular.

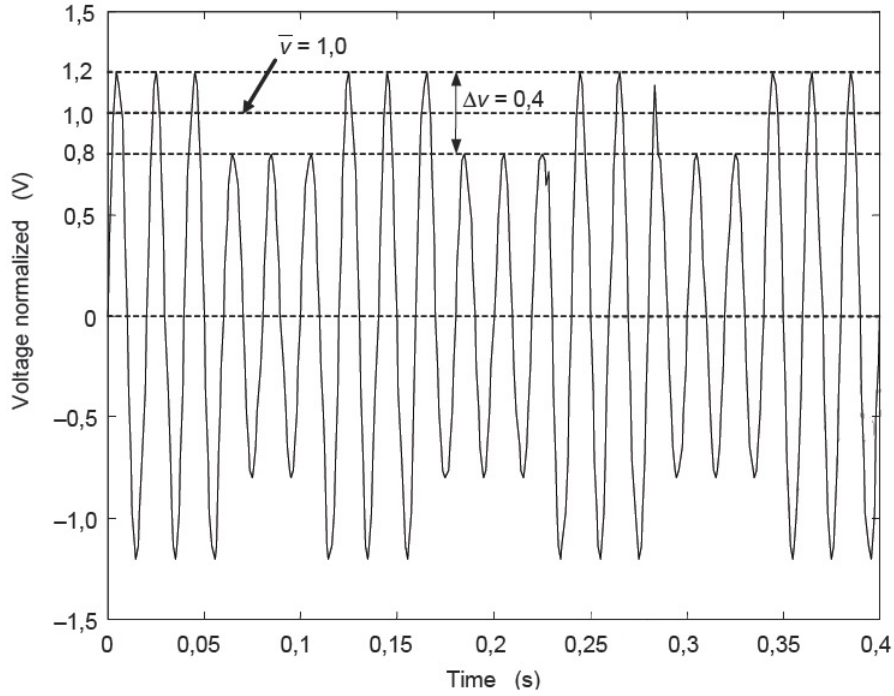


Figura 3.9. Cambios rectangulares de tensión ($\Delta V/V = 40\%$, 8,8 Hz) (IEC-61000-4-15, 2010)

Variaciones de tensión rectangulares y ensayos de funcionamiento

De acuerdo con la norma IEC-61000-4-15 el medidor de flicker, con su clasificador, debe estar sometido a una serie de variaciones de tensión rectangulares. Para cada caso de la tabla 3.3, el índice de severidad del flicker P_{st} debe ser $1,00 \pm 0,05$.

El fabricante debe especificar el rango de funcionamiento del flickermetro. De

Tabla 3.3 Especificaciones de ensayo para el clasificador del flickermetro (Lámpara 120 V/60 Hz) (IEC-61000-4-15, 2010)

Variaciones por minuto	Variaciones de tensión ($\Delta V/V$) [%]
1	3,181
2	2,564
7	1,694
39	1,040
110	0,844
1620	0,548
4800	4,837

esta forma, todos los valores de $\Delta V/V$ de la tabla 3.3 se multiplican por un factor k establecido, y el P_{st} toma directamente el valor de k . El fabricante también debe especificar el valor de k más grande y el más pequeño para que el valor de P_{stk} correspondiente esté dentro del mayor de los valores entre el ± 5 %. Esto especifica el rango de funcionamiento del clasificador. El patrón de modulación rectangular debe aplicarse con un ciclo de utilización de $50\% \pm 2\%$, y el tiempo de transición de un nivel tensión al siguiente debe ser inferior a 0,5 ms.

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

4.1. Esquema del sistema trabajado

En la figura 4.1 se observa un esquema general representativo del trabajo realizado, el cual se divide en dos partes fundamentales. La primera parte es la generación de la señal contaminada con flicker. Para generar esta señal fue utilizado el montaje del trabajo especial de grado realizado por Carlos Arroyo (Arroyo, Noviembre 2016). De esta manera se pudo generar mediante un PC con el programa SignalExpress LabVIEW, señales contaminadas con flicker; siendo posible en este programa, ajustar parámetros de interés tales como la frecuencia y la fluctuación de tensión de la señal contaminada con flicker. Los equipos utilizados en esta parte del montaje están descritos en la tabla 4.2.

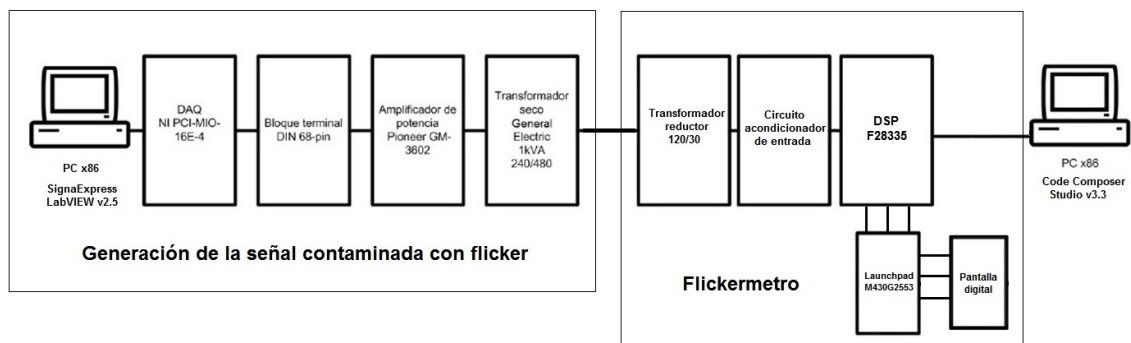


Figura 4.1. Esquema general representativo del montaje realizado.

La otra parte del esquema es representada por el medidor de flicker objetivo de este trabajo. El flickermetro está compuesto por un transformador reductor 120/30, un circuito acondicionador de entrada y el DSP F28335. Estos serán explicados con mayor detalle más adelante.

La señal una vez acondicionada es adquirida por el DSP a través de una de sus entradas analógicas y es debidamente procesada por los bloques que se observan en la figura 3.6. Dichos bloques fueron modelados utilizando el software Matlab®Simulink®, tomando como base el modelo de flickermetro desarrollado por Montoya (Montoya A, 2014). A la salida del modelo, se obtienen la sensación instantánea de flicker (P_{inst}) y el índice de severidad de flicker a corto plazo (P_{st}).

Para indicar los valores de dichas variables a la salida del sistema se utilizó una pantalla digital que interactúa mediante protocolo SPI con un micro MSP430G2553. Este micro tiene la función de servir de interlocutor entre el DSP y la pantalla digital. El DSP le envía las variables de interés (P_{inst} y P_{st}) mediante señales PWM. Esto con la finalidad de observar y analizar las variables de salida del flickermetro, sin necesidad de estar conectado a un terminal o computador.

4.2. Generación de la señal contaminada con flicker

La sección que comprende la generación de la señal contaminada con flicker de la figura 4.1 está compuesto por 4 bloques fundamentales:

- **Tarjeta de Adquisición de Datos NI PCI-MIO-16E-4:** Tarjeta DAQ (Data Acquisition) marca National Instruments utilizada para formular, desarrollar y generar señales. En este trabajo, se utilizó en conjunto con el programa SignalExpress LabVIEW para alcanzar este fin. La señal generada tiene una amplitud pico-pico $V_{pp} = 8V$.

El computador personal PC usado para programar la señal contaminada con

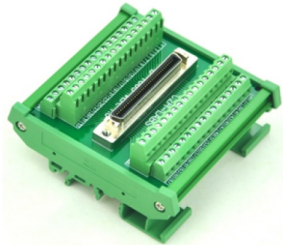
flicker que genera la tarjeta de adquisición se describe en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Especificaciones técnicas del computador utilizado en el laboratorio.

Software	Hardware
Microsoft Windows XP Profesional Versión 2002 Service Pack 2	Intel(R) Pentium(R) 4 CPU 1,70 GHz 1,0 GB RAM

- **Bloque terminal DIN:** Bloque utilizado para conectar los pines de la tarjeta DAQ, y de esta forma, poder manipular las salidas analógicas de la tarjeta hacia los demás equipos.
- **Amplificador de audio GM-A3602:** Utilizado para amplificar la señal contaminada con flicker. Se pudo amplificar la señal hasta 20 V con este equipo, debido a que más allá de esto, el amplificador se satura y perjudica la señal generada.
- **Transformador monofásico:** Con este transformador con relación de transformación de 120/240 V - 240/480 V, puenteando estos devanados, se logró llevar la amplitud de la señal generada a 80 V.

Tabla 4.2 Equipos utilizados en el montaje del generador de eventos de calidad de energía eléctrica.

Equipo	Descripción
NI PCI-MIO-16E-4	- Tarjeta de Adquisición de Datos - Marca National Instruments - 16 canales - 500 kS/s - 12 bits - 2 AO / 8 DIO 
Bloque terminal DIN	- 68 pines/terminales 
Amplificador de audio GM-A3602	- Máxima potencia de salida: 400 W - Respuesta en frecuencia: De 10 Hz a 70 kHz - Distorsión armónica (4Ω): < 0.05 % (1 kHz) - Relación señal a ruido: > 95 dB 
Transformador monofásico	- General Electric - 1 kVA - 50/60 Hz - Baja 120/240 V - Alta 240/480 V 

4.2.1. Generación de la señal mediante el programa SignalExpress LabVIEW

El programa SignalExpress LabVIEW cuenta con la opción de recibir señales mediante entradas digitales y analógicas, así como la posibilidad de crear señales, ya sea digitales o analógicas, y enviarlas a las diferentes salidas de la tarjeta DAQ (previamente instalada y reconocida por el computador, mediante el programa NI MAX).

Al seleccionar la opción de generar señal a través de la salida analógica, aparecerá una ventana como en la figura 4.2, en el cual en el cuadro *Signal type* es posible seleccionar la manera de desarrollar la forma de onda a generar. Tiene la posibilidad de generar formas de ondas pre-establecidas como lo son la onda sinusoidal, onda cuadrada, onda triangular, entre otras; así como una opción llamada *Formula* en la cual se puede generar una forma de onda mediante una función en donde el parámetro t viene siendo el eje horizontal de la gráfica, los parámetros a y w vienen siendo la amplitud y la frecuencia respectivamente, los cuales son variables en los respectivos cuadros de diálogo.

Al tener desarrollada la expresión de la señal a generar, se debe tener en cuenta el *Sample rate* (S/s) y el *Block size* (*samples*) ya que con estos dos parámetros se maneja la ventana de tiempo de la señal generada como se indica en la figura 4.2.

Otras propiedades a tomar en cuenta son el modo de generación de la señal y las muestras a escribir *Samples to Write*, observadas en la figura 4.3. Siendo de suma importancia tenerlo seleccionado en *Continuous Samples* y las muestras a escribir en por lo menos las 2/3 partes del valor colocado en el cuadro *Block size*.

Adicionalmente se debe considerar el *Timeout(s)* de la figura 4.4, ya que este valor representa la acción cuando la señal generada se reinicia habiendo transcurrido este tiempo estipulado; es decir, el valor del timeout debe ser mayor

o igual al de la ventana de tiempo sino habrá reinicios fortuitos en la generación de la señal.

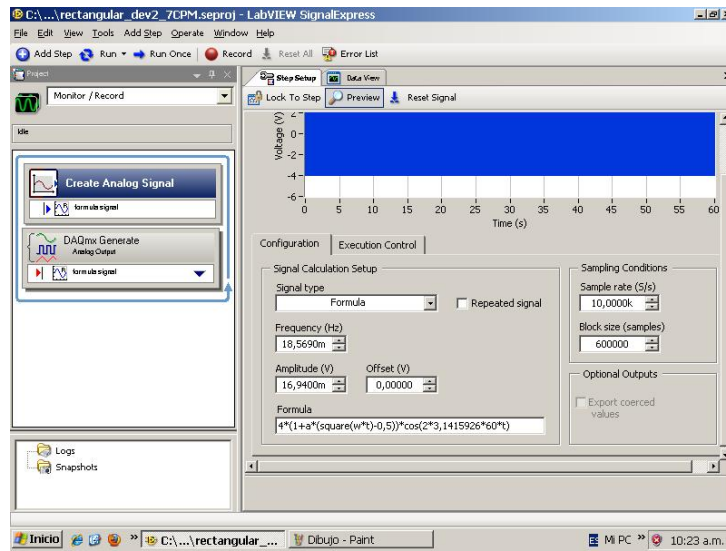


Figura 4.2. Programa SignalExpress LabVIEW - Configuración para P_{st} .

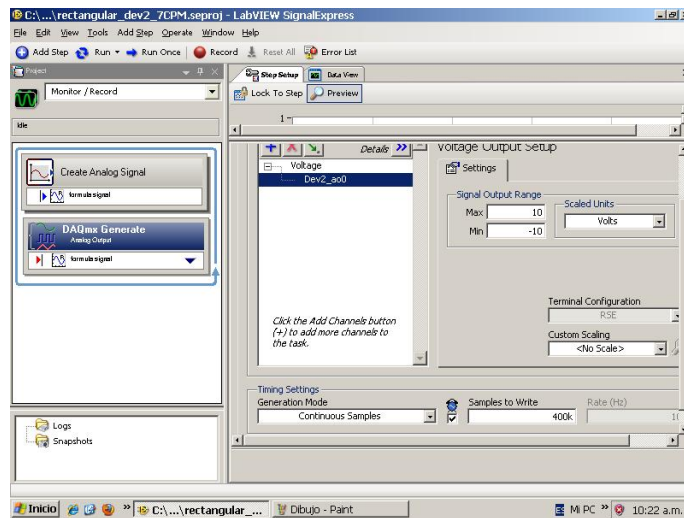


Figura 4.3. Programa SignalExpress LabVIEW - Configuración para P_{st} .

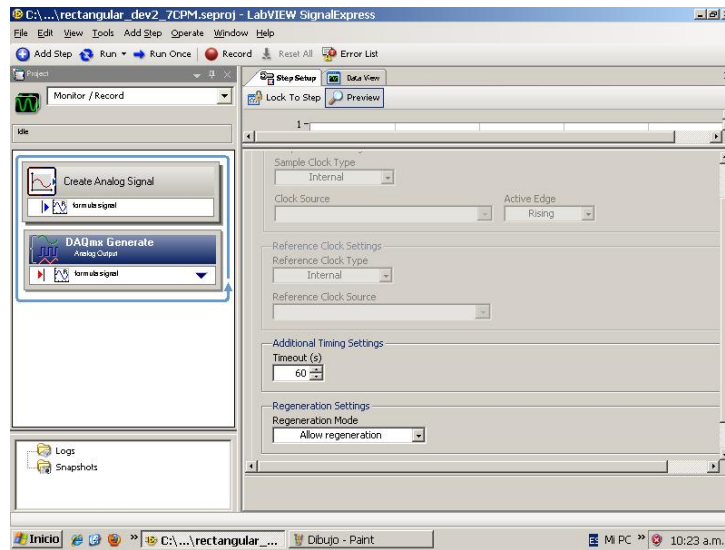


Figura 4.4. Programa SignalExpress LabVIEW - Configuración para P_{st} .

4.3. Flickermetro

La sección que comprende el flickermetro de la figura 4.1 está compuesto por 5 bloques fundamentales:

- **Transformador reductor:** Transformador caracterizado por poseer una relación de transformación ajustable, lo cual garantiza su uso en niveles de baja tensión variables, como ocurrió al generar la señal de 120 V resultando ser una de 80 V por imprevistos en los equipos. Las relaciones de transformación utilizada para 120 V es de 120/30 y para 80 V es de 80/20 para obtener en ambos casos a la salida, una señal con amplitud de 4 V.
- **Circuito acondicionador de entrada:** Circuito diseñado en placa PCB que consta de dos inversores con dos entradas, para así obtener a la salida una señal que se adapte a las características del DSP F28335.

- **DSP F28335:** Procesador digital de señales marca Texas Instruments modelo F28335, utilizado como base y procesador del flickermetro implementado.
- **Launchpad MSP430G2553:** Microprocesador MSP430G2553 marca Texas Instruments, utilizado como interlocutor entre el DSP y la pantalla digital para lectura de variables relacionadas al flicker.
- **Pantalla digital:** Pantalla implementada al medidor de flicker, utilizada para indicar variables como el P_{inst} y el P_{st} para operar de manera independiente sin terminal.

4.3.1. Circuito acondicionador de la señal de entrada

Se diseñó un circuito que acondiciona la señal de entrada de 120 V, 60 Hz contaminada con flicker a la entrada analógica del DSP, y así poder procesar la señal con el modelo del flickermetro de la norma IEC 61000-4-15 (IEC-61000-4-15, 2010).

La entrada analógica del DSP F28335 tiene la característica de que recibe valores de tensión de entre $0 - 3V$, es decir no acepta valores de tensión negativos y los valores de tensiones mayores a 3 V, los toma como si fuesen 3 V. Por lo tanto se diseñó el circuito basado en estos requerimientos.

El circuito en principio consta de un transformador reductor con constante de transformación $120 : 4$, así como de dos amplificadores operacionales operando como inversores; cuyas entradas vienen dado por la señal de 120 V, 60 Hz contaminada con flicker y una tensión DC de 3,3 V la cual le añade un pedestal de tensión de 1,5 V a la salida del circuito. El circuito en cuestión se puede observar en la figura 4.5.

La señal de salida del circuito, se puede observar en la figura 4.6, en la cual se

ve representado por líneas rojas los límites aceptables por el DSP, y la señal azul representa la forma de onda de tensión a la salida del circuito. Esta señal posee una amplitud pico-pico de 2 V, y está centrada en 1,5 V. Ésta posee un margen considerable entre su pico máximo y el límite aceptable por el DSP, con lo cual las mediciones registradas de la sensación instantánea de flicker tendrán un rango considerable por si se tienen picos máximos elevados debido a un flicker de mayor magnitud.

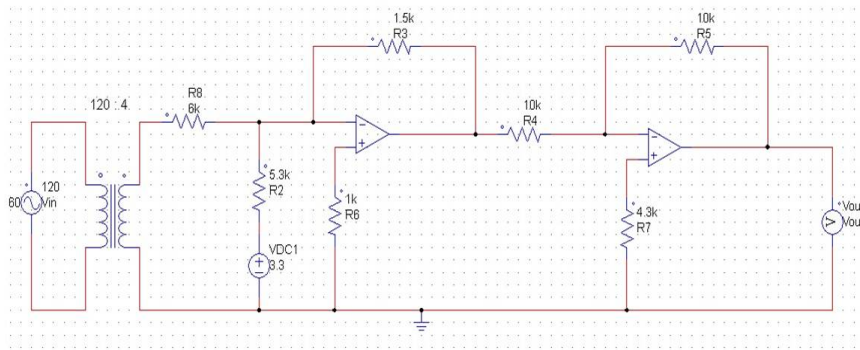


Figura 4.5. Circuito acondicionador para entrada analógica del DSP F28335.

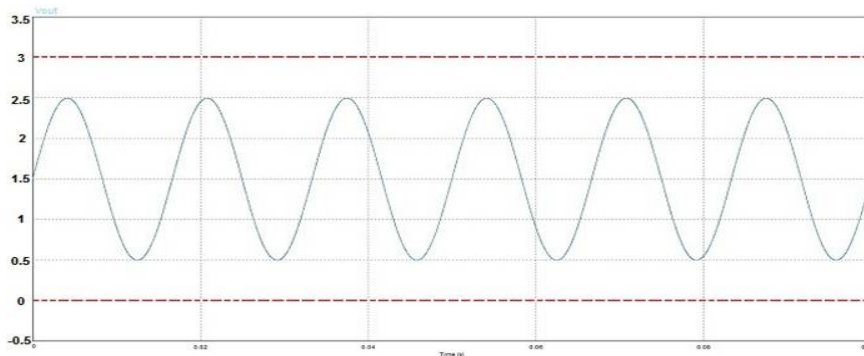


Figura 4.6. Forma de onda de tensión a la salida del circuito acondicionador de entrada.

Para tener un circuito con unas conexiones más robustas, se diseñó mediante el programa PCB Eagle®, una placa de circuito impreso PCB para así reducir el ruido y mejorar las mediciones de la sensación instantánea de flicker (P_{inst}) y del índice de severidad de flicker a corto plazo (P_{st}).

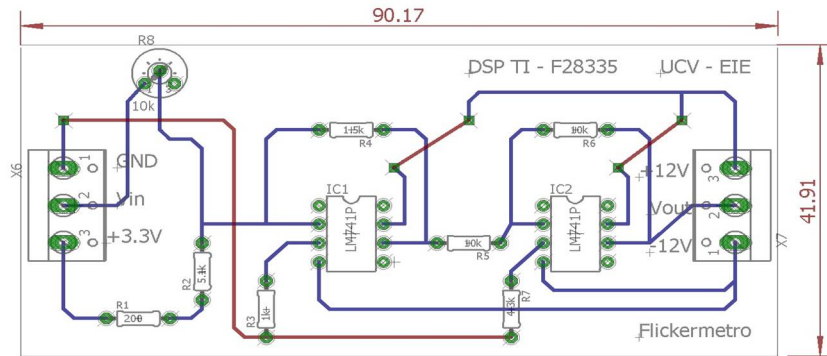


Figura 4.7. Placa PCB del circuito acondicionador de entrada realizado en el programa Eagle.

4.3.2. DSP F28335

El procesador digital de señales de la familia TMS320 modelo F28335 marca Texas Instruments posee las siguientes características:

- **Tecnología CMOS estática de alto desempeño:** Con una frecuencia de reloj de 150 MHz (Tiempo de ciclo de 6,67 ns). La base se alimenta con 1,9V/1,8V, y las I/O poseen un diseño funcional de 3,3 V.
- **CPU de 32-bit:** IEEE-754 Single-Precision Floating-Point Unit.
- **On-Chip Memory:** 256K x 16 Flash, 34K x 16 SARAM. Boot ROM de 8K x 16. Programable en C/C++, Assembler.
- **Entradas/Salidas y funciones disponibles:** Posee 64 entradas y salidas

de propósitos generales (GPIO), de los cuales pueden operar 18 salidas PWM, 6 HRPWM, 8 32-bit timers, 9 16-bit timers, 12-bit ADC (16 canales).

- **Periféricos de puerto serial:** 2 módulos CAN, 3 módulos SCI (UART), 2 módulos SPI y 1 bus I^2C .
- **Soporte de desarrollo:** ANSI C/C++ Compiler/Assembler/Linker. Code Composer Studio™IDE. DSP/BIOS™. Digital Motor Control and Digital Power Software Libraries.

4.3.3. MSP430G2553

El microcontrolador de la familia MSP430G modelo M430G2553 marca Texas Instruments posee las siguientes características:

- **Fuente de alimentación:** Se alimenta con tensiones de entre 1,8 V a 3,6 V.
- **Tiempo de ciclo:** Tiempo de ciclo por instrucción de 62,5 ns. Posee una arquitectura RISC de 16-bit con una frecuencia de reloj de 16 MHz.
- **Entradas/Salidas y funciones disponibles:** Cuenta con 24 pines I/O capacitivas. Posee 2 timers de 16-bit, 1 comparador para señales analógicas y 1 convertidor A/D de 10-bit.
- **Periféricos de puerto serial:** Universal Serial Communication Interface (USCI), Enhanced UART supporting Auto Baudrate Detection (LIN), IrDA encoder and decoder, Synchronous SPI y bus I^2C .
- **Soporte de desarrollo:** Programable con C/C++ a través del Energía IDE.

4.3.4. Pantalla digital del flickermetro implementado

El medidor de flicker presenta los resultados de P_{inst} y P_{st} en una pantalla digital que se comunica con un microcontrolador (MSP430G2553) mediante protocolo de comunicación serial SPI. Dicho microcontrolador recibe las señales de las variables enviadas por el DSP F28335 a través de dos puertos de entrada y salida de propósitos generales (GPIO) moduladas digitalmente por PWM, tal como se indica en el diagrama de conexión de la figura 4.9.

Los pines P1.6 y P1.2 del microcontrolador MSP430G2553 reciben la señal modulada por PWM del P_{inst} y P_{st} respectivamente. El microcontrolador demodula las señales recibidas y las convierte a valores analógicos, y los imprime en la pantalla digital con una tasa de actualización de 1 segundo.

Se debe tener en cuenta que los pines T_x y R_x en J3 del launchpad del MSP430G2553 deben estar abiertos si se quieren utilizar los pines del P1.0 al P1.5 como entradas; ya que de otra forma, estará configurado para operar con protocolo UART. También es necesario desconectar el puerto USB del launchpad a la hora de operar el medidor y alimentar desde el DSP F28335, ya que esto genera imprecisión en la medida al tener dos fuentes distintas de alimentación.

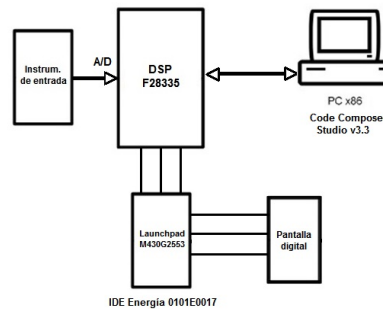


Figura 4.8. Esquema representativo del medidor de flicker.

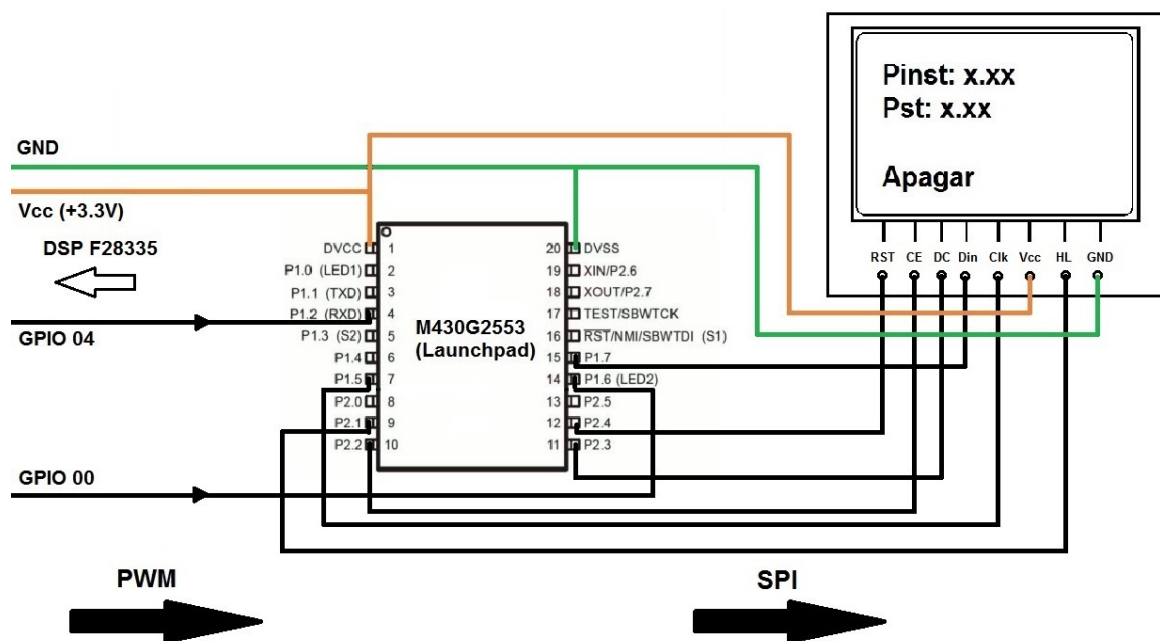


Figura 4.9. Diagrama de conexión de la pantalla digital.

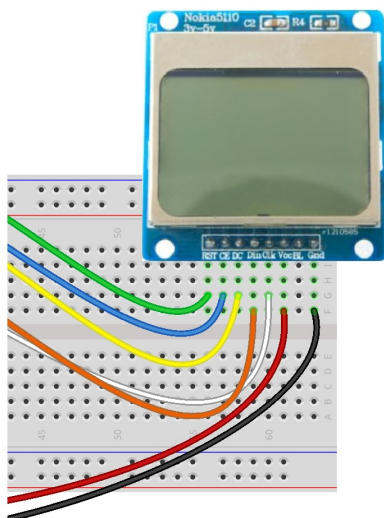


Figura 4.10. Pantalla digital utilizada.

4.3.5. PC utilizada para carga y monitoreo del flickermetro

Se utilizó el computador con las características de la tabla 4.1, en el cual se utilizó el programa Code Composer StudioTMIDE (*Texas Instruments*, 2007) para monitoreo del funcionamiento del flickermetro. Para la carga del programa del modelo del flickermetro hecho en Simulink, el Code Composer Studio v3.3 permite la traducción entre el lenguaje de bloques utilizado en Simulink al lenguaje C permitiendo así mediante seleccionar la opción de *Incremental Build* en la ventana de Simulink, la carga del programa al DSP F28335 y a su puesta en marcha mediante interacción directa y monitoreo con el programa Code Composer Studio.

El programa Code Composer Studio es utilizado para monitorear las variables de interés una vez cargadas al DSP, así como para mostrar gráficas de estas variables contra el tiempo, observando datos de interés en el análisis de este trabajo. La vista del programa se indica en la figura 4.11.

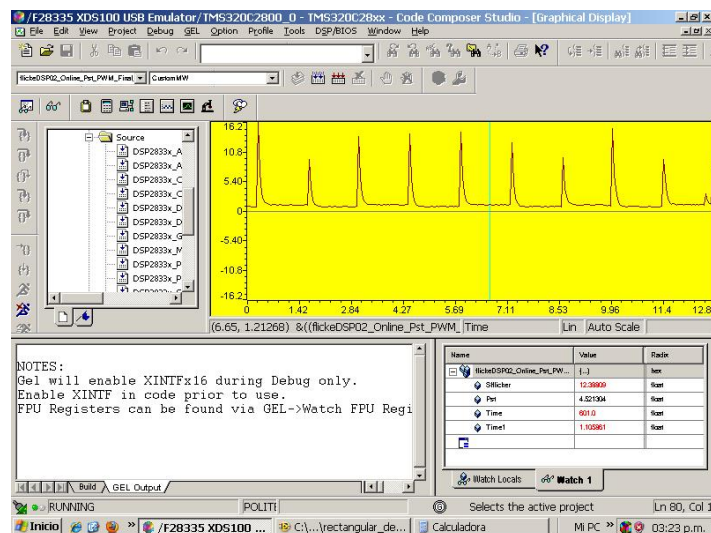


Figura 4.11. Vista de la ventana del programa Code Composer Studio v3.3.

4.4. Modelo del flickermetro en Simulink

4.4.1. Modelo del flickermetro en Simulink (Montoya A, 2014)

El modelo del medidor de flicker realizado en Simulink por Montoya (Montoya A, 2014) es la base de la programación en la cual se fundamenta la implementación del medidor de flicker en este trabajo de grado. Dicho modelo consta de los 5 bloques explicados y referenciados en el estándar IEC-61000-4-15 (IEC-61000-4-15, 2010) como se puede observar en la figura 3.6.

El modelo del flickermetro de Montoya (Montoya A, 2014) se modificó para su implementación en el DSP F28335. Esta modificación se realizó con el fin de evitar la acumulación de 10 minutos de muestras de la sensación instantánea de flicker para el cálculo del P_{st} .

En este sentido se fijó un valor máximo de la sensación instantánea de flicker P_{inst} en 2000 para luego definir las 512 clases del análisis estadístico con ancho $2000/512$.

En la versión original, el modelo del flickermetro espera 10 minutos de acumulación de muestras de P_{inst} para luego determinar con estas muestras el P_{inst} máximo y con este valor el ancho de cada clase.

4.4.2. Simulación del modelo del medidor de flicker

La simulación del modelo del flickermetro, realizado en el software de Matlab® Simulink®, se ha llevado a cabo considerando los diferentes tipos de flicker, a la entrada del DSP como se observa en las figuras 4.12 y 4.13, con el fin de validar el mismo contra los valores P_{inst} y P_{st} del estándar IEC-61000-4-15.

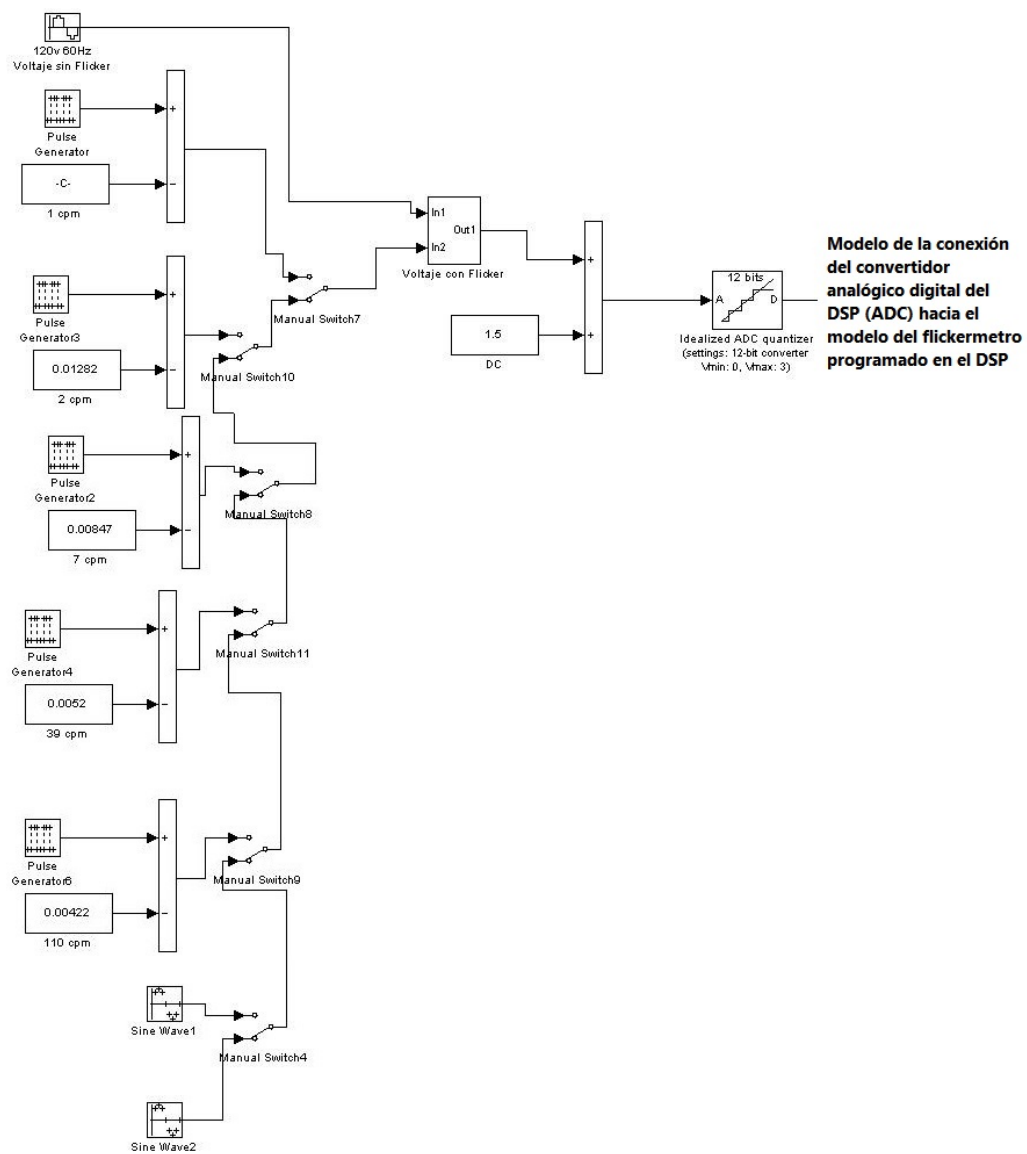


Figura 4.12. Esquema representado en Simulink de las diferentes tipos de entrada de tensión con flicker y circuito de entrada al DSP.

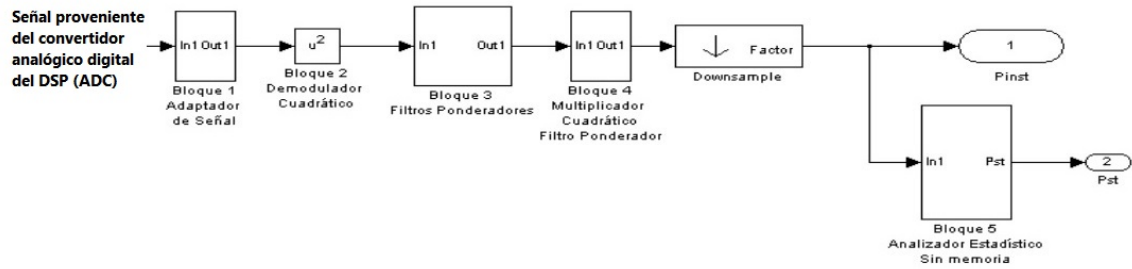


Figura 4.13. Esquema representado en Simulink de los bloques del Flickermetro contenidos en la programación del DSP.

4.4.3. Implementación del modelo del flickermetro en el DSP

El modelo del flickermetro implementado en el DSP se presenta en la figura 4.14. Se han programado dos salidas a dos leds integrados en el DSP de manera que indiquen, mediante señales cuadradas, el funcionamiento del DSP.

El bloque convertidor analógico digital (ADC) convierte la entrada de la señal de 120 V, 60 Hz contaminada con flicker (reducida previamente por el circuito acondicionador de entrada de la figura 4.5), que entra al medidor de flicker, para de esta forma obtener las salidas de interés que son la sensación instantánea de flicker (P_{inst}) y el índice de severidad de flicker a corto plazo (P_{st}).

4.5. Analizador de redes Fluke 437

Dado que se utilizó el equipo del generador de eventos de calidad de energía eléctrica realizado por Arroyo (Arroyo, Noviembre 2016), y que el mismo fue validado para la generación de las señales contaminadas con flicker; se utilizaron las mediciones obtenidas y registradas en su trabajo especial de grado para compararlas con los resultados experimentales de este trabajo. El equipo analizador de redes marca Fluke Modelo 437 se utilizó en el modo: Analizador de flicker (P_{inst} y P_{st}). En este trabajo se referirá al analizador de redes Fluke 437 como simplemente Fluke.



Figura 4.15. Analizador de redes Fluke 437.

CAPÍTULO V

RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES DEL MEDIDOR DE FLICKER

El modelo simulado en Matlab®Simulink®, tiene como finalidad comprobar el correcto funcionamiento del medidor de flicker según las pruebas de la norma IEC 61000-4-15 (IEC-61000-4-15, 2010), antes de implementar el modelo en el DSP.

El medidor de flicker en Simulink se compila hacia el Code Composer Studio™, en lenguaje c++, y desde aquí se compila hacia el DSP TI F28335. Una vez que se carga el programa en el DSP, se puede desconectar del computador y el DSP puede ser operado de manera independiente.

En la figura 4.12, se puede observar las diferentes tipos de entradas (sinusoidales y rectangulares) que se le pueden aplicar a la entrada del modelo del medidor de flicker. Las características de estas entradas para las pruebas que explica la norma que son de interés para este trabajo, así como los resultados a nivel de simulación, se indican a continuación.

5.1. Prueba de la sensación instantánea de flicker P_{inst} ante cambios de tensión sinusoidales/rectangulares

Esta prueba, contenida en el estándar IEC-61000-4-15 como se puede observar de la tabla 3.2, permite evaluar la sensación instantánea de flicker ante cambios de tensión sinusoidales/rectangulares. Según la norma, para esta prueba el máximo de la sensación instantánea de flicker $P_{inst,max}$ debe ser igual a 1,00 con una tolerancia

de $\pm 8\%$.

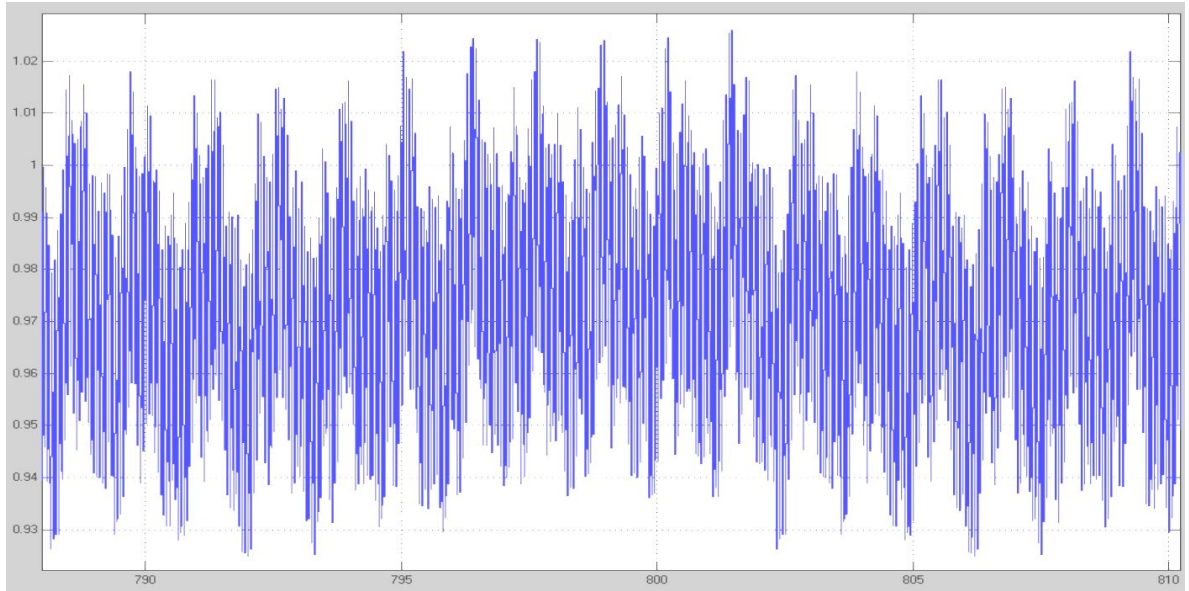


Figura 5.1. Forma de onda de la sensación instantánea de flicker para una frecuencia de 8,8 Hz. Prueba sinusoidal.

Tabla 5.1 Resultados de simulaciones del P_{inst} . Ensayo cambios de tensión sinusoidales.

Frecuencia Moduladora [Hz]	$P_{inst,max}$ simulado	Error porcentual [%]
0,5	1,01	1,0
1,5	1,01	1,0
8,8	1,02	2,0
20,0	1,00	0,0
25,0	1,01	1,0
33 1/3	1,00	1,0
40,0	0,94	6,0

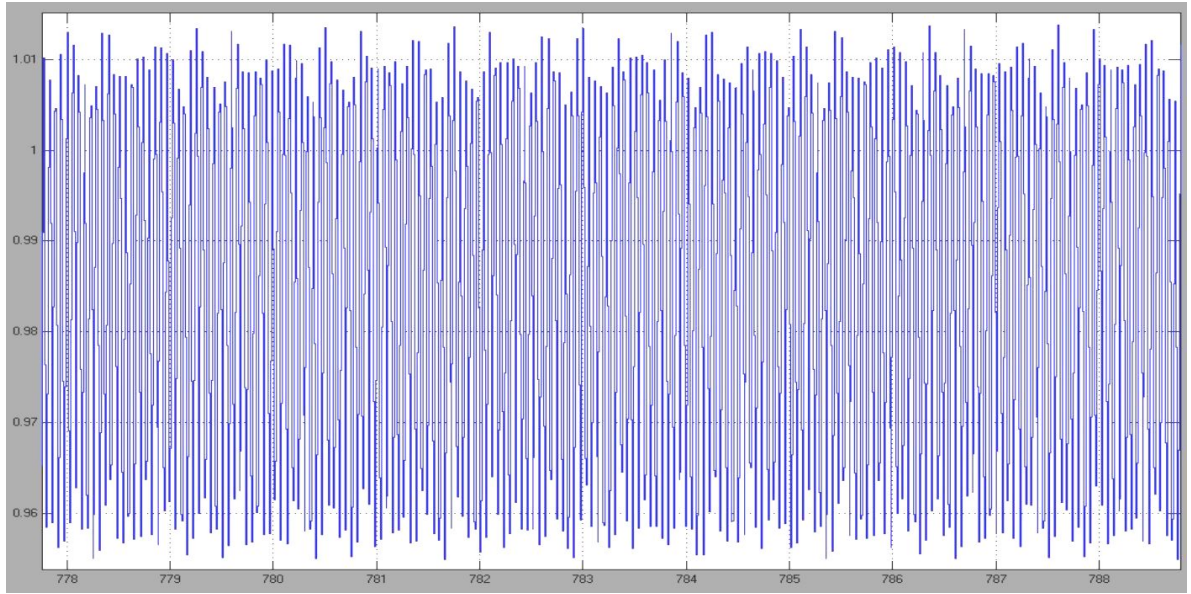


Figura 5.2. Forma de onda de la sensación instantánea de flicker para una frecuencia de 8,8 Hz. Prueba rectangular.

Tabla 5.2 Resultados de simulaciones del P_{inst} . Ensayo cambios de tensión rectangulares.

Frecuencia Moduladora [Hz]	$P_{inst,max}$ simulado	Error porcentual [%]
0,5	0,97	3,0
3,5	1,00	0,0
8,8	1,01	1,0
18,0	1,01	1,0
22,0	1,02	2,0
25,5	1,00	0,0
33 1/3	1,00	0,0
37,0	0,99	1,0
40,0	1,19	19,0

Como se puede observar en las tablas 5.1 y 5.2, los errores presentados en las simulaciones están dentro del rango de valores permitidos por el estándar IEC-61000-4-15 ($\pm 8\%$). Con excepción del valor obtenido para la frecuencia de la moduladora de 40 Hz, en este caso se sale del rango permitido por la norma debido

a que la frecuencia de corte de uno de los filtros del bloque 3 del flickermetro 3.6, del modelo trabajado por Montoya (Montoya A, 2014), es a 40 Hz y por ende se pierde parte de la medida.

5.2. Pruebas del índice de severidad de flicker P_{st} ante variaciones de tensión rectangulares

En el estándar IEC 61000-4-15 se definen una serie de ensayos para la prueba del clasificador y algoritmos de evaluación estadística, mostrados en la tabla de la figura 3.3. Los cambios por minutos, definidos en la prueba, vienen determinados por la frecuencia de la moduladora. El valor de la frecuencia de la moduladora dependerá del número de cambios por minutos deseados en la variación de tensión del flicker. El valor RMS de la portadora A_c es 120 V y la frecuencia de la moduladora f_m se calcula en función de los cambios por minuto deseados. Para cada caso de esta prueba, la norma establece un índice de severidad de flicker a corto plazo o P_{st} de 1,00 con una tolerancia de $\pm 5\%$.

Tabla 5.3 Resultados de simulaciones del Pst. Ensayo cambios de tensión rectangulares.

Cambios por minuto [CPM]	P_{st} simulado	Error porcentual [%]
1	1,020	2,0
2	1,013	1,3
7	1,015	1,5
39	0,981	1,9
110	1,014	1,4
1620	1,017	1,7
4800	0,968	3,2

Como se puede observar en la tabla 5.3, los errores presentados en las simulaciones están dentro del rango de valores permitido por el estándar IEC-61000-4-15 ($\pm 5\%$).

CAPÍTULO VI

MONTAJE EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la figura 6.1, se muestra el generador de eventos de calidad de energía eléctrica realizado por Arroyo (Arroyo, Noviembre 2016), cuyos equipos se encuentran debidamente identificados en la tabla 4.2; y el medidor de flicker dentro de la carcasa metálica. En la figura 6.3, se muestra en detalle el medidor de flicker implementado con el transformador de instrumentación, el circuito de adecuación de la señal con flicker y el DSP F28335. En la figura 6.4, se muestra el microcontrolador de la pantalla MSP430G2553 y la pantalla digital.

Para el generador de eventos de calidad de energía eléctrica realizado por Arroyo (Arroyo, Noviembre 2016), se dispuso de una tarjeta de adquisición de datos (PCI) de National Instruments modelo PCI-MIO-16E-4 (6040E), que se utilizó en conjunto con el programa de LabVIEW SignalExpress, para generar satisfactoriamente señales contaminadas con flicker modificando fácilmente los parámetros de frecuencia y porcentaje de fluctuación de tensión del flicker como dicta la norma IEC 61000-4-15. Esta señal es amplificada por un amplificador de audio marca Pioneer GM-3602 y luego por un transformador de 1 kVA; 240/480, llevando su amplitud a un máximo de 80 V. A este nivel de tensión se pudo trabajar de manera satisfactoria ajustando los parámetros del circuito de entrada del medidor de flicker.

La señal amplificada en el secundario del transformador es reducida por el

circuito de adecuación de la señal de entrada del medidor de flicker mediante un transformador reductor de 120/30 y un par de amplificadores operacionales operando como inversores. Estos dispositivos ajustan la señal a la forma de onda que se muestra en la figura 4.6, de manera que pueda ser procesada correctamente por el DSP F28335.

En la figura 4.1, se presenta el esquema del montaje realizado.



Figura 6.1. Montaje experimental del flickermetro realizado en el laboratorio.

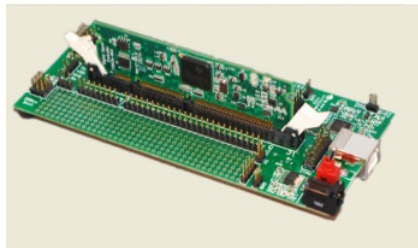


Figura 6.2. Procesador digital de señales Texas Instruments F28335.



Figura 6.3. Medidor dentro de la carcasa, conformado por transformador reductor, circuito acondicionador y DSP.

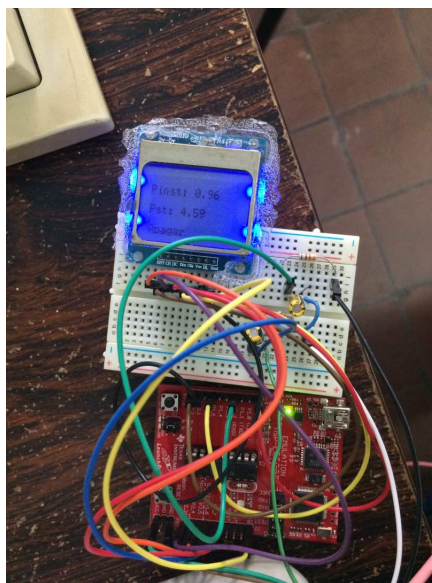


Figura 6.4. Pantalla digital conectada al launchpad MSP430G2553 operando como parte del flickermetro.

6.1. Prueba de la sensación instantánea de flicker P_{inst} ante cambios de tensión sinusoidales/rectangulares

En esta prueba se trabajó con la salida de la sensación instantánea de flicker P_{inst} del flickermetro, y se comparó con la medida realizada en la simulación mediante el modelo Simulink del flickermetro. En las tablas 6.1 y 6.2, se presentan los resultados de P_{inst} según la frecuencia de la moduladora para los ensayos obligatorios conforme a la norma mostrados en la tabla 3.2 (IEC-61000-4-15, 2010). Se debe destacar que según la norma IEC-61000-4-15, el valor que arrojan estos ensayos debe ser 1 con un error de $\pm 8\%$.

Tabla 6.1 Resultados del P_{inst} , ensayo cambios de tensión sinusoidales a 60 Hz. Pruebas obligatorias.

Frecuencia moduladora [Hz]	$P_{inst,max}$ experimental	$P_{inst,max}$ medidor Fluke	Error porcentual experimental [%]
0,5	1,08	1,00	8,0
1,5	1,16	0,97	16,0
8,8	0,92	1,00	8,0
20,0	1,06	0,94	6,0
25,0	0,91	0,96	9,0
33 1/3	0,99	0,96	1,0
40,0	1,08	0,95	8,0

Como se observa en las tablas 6.1 y 6.2, los resultados de los ensayos en cuestión no satisfacen los requerimientos de la norma, aunque, están muy cercanos. Esta desviación de los resultados se debe fundamentalmente a la sensibilidad que presentan los equipos de instrumentación ante el ruido. Se podría mitigar dicho efecto usando dispositivos de medida e instrumentación con menor sensibilidad al ruido. A pesar de esto, dichas medidas pueden servir para cuantificar con un error del 20 % la sensación instantánea de flicker.

Tabla 6.2 Resultados del P_{inst} , ensayo cambios de tensión rectangulares a 60 Hz. Pruebas obligatorias.

Frecuencia moduladora [Hz]	$P_{inst,max}$ experimental	$P_{inst,max}$ medidor Fluke	Error porcentual experimental [%]
0,5	1,22	0,98	22,0
3,5	1,20	0,97	20,0
8,8	1,17	1,04	17,0
18,0	1,18	1,05	18,0
22,0	1,23	1,07	23,0
25,5	1,26	0,90	26,0
33 1/3	1,16	0,95	16,0
37,0	1,20	0,98	20,0
40,0	1,17	0,96	17,0

Se debe indicar nuevamente que una fuente importante de error en las medidas es el ruido, que por los equipos y dispositivos de medida utilizados, distorsiona las medidas. El ruido podría reducirse si se utilizan dispositivos más adecuados en la instrumentación del medidor de flicker. Por ejemplo, podría reducirse con el uso de transductores de tensión de efecto Hall en vez del uso del transformador reductor.

Como se observa en la tabla 6.2, el error presente en las medidas con variaciones rectangulares es mayor respecto al obtenido con cambios sinusoidales de amplitud. Esto puede deberse al contenido armónico de la señal rectangular, es decir, el ruido afecta a cada armónico y por lo tanto, perturba en mayor proporción las medidas con estas componentes. Esta situación también puede corregirse con transductores de tensión de efecto Hall.

6.2. Pruebas del índice de severidad de flicker P_{st} ante variaciones de tensión rectangulares

En esta sección se presentan los resultados correspondientes a las pruebas del flickermetro de la norma (IEC-61000-4-15, 2010), de variaciones de tensión

rectangulares para el índice de severidad del flicker; en las cuales se espera que ante los cambios rectangulares de la señal moduladora flicker, el P_{st} sea 1,00 con una tolerancia de $\pm 5\%$.

Tabla 6.3 Resultados P_{st} para variaciones de tensión rectangulares y ensayos de funcionamiento.

Cambios por minuto [CPM]	P_{st} experimental	P_{st} medidor Fluke	Error porcentual experimental [%]
1	1,25	1,00	25,0
2	1,22	0,99	22,0
7	1,12	1,00	12,0
39	1,21	0,98	21,0
110	1,26	0,98	26,0
1620	1,24	1,00	24,0
4800	1,14	0,97	14,0

Como se aprecia en los resultados experimentales de la tabla 6.3, el error porcentual es mayor a lo permitido por la norma. Se puede observar que el error presente en las medidas es en términos cuantitativos similar a los mostrados en los resultados de la tabla 6.2. Esto se debe a que en ambos ensayos la variación de tensión flicker es rectangular y por tanto, cada armónico en dicha forma de onda aporta su perturbación debida al ruido a la medición final. En este caso, al igual que en el ensayo del P_{inst} , se puede reducir la perturbación de la presencia del ruido, utilizando transductores de tensión de efecto Hall.

La norma indica que el P_{st} debe poseer una naturaleza lineal con respecto al $\Delta V/V$. Esto quiere decir que, al multiplicar por un factor k los valores $\Delta V/V$ de la norma mostrados en la tabla 3.3, se debe obtener los correspondientes valores de P_{st} de la tabla 3.3 multiplicados por el factor k . Teniendo en cuenta esto, se realizaron las mediciones que se indican en la tabla 6.4.

En la tabla 6.4, se presentan los valores del P_{st} medidos para $k = 2, 3, 5, 7$,

8 y 10. En la figura 6.5, se presentan los valores del P_{st} medidos comparados con los valores ideales mostrados a través de la recta.

Tabla 6.4 Resultados P_{st} para variaciones de tensión rectangulares y ensayos de funcionamiento. Ensayo de linealidad.

Factor	$\Delta V/V$ [%]	Cambios por minuto [CPM]	P_{st} experimental	P_{st} ideal	Error porcentual experimen- tal [%]
2	6,362	1	1,63	$2,00 \pm 0,10$	18,5
	3,388	7	1,89		5,5
	1,688	110	1,95		2,5
3	7,692	2	2,97	$3,00 \pm 0,15$	1,0
	5,082	7	2,92		2,6
	3,12	39	2,96		1,3
5	8,47	7	5,13	$5,00 \pm 0,25$	2,6
	4,22	110	5,07		1,4
	24,185	4800	5,10		2,0
7	22,267	1	7,13	$7,00 \pm 0,35$	1,8
	11,858	7	6,97		0,4
	3,836	1620	6,95		0,7
8	20,512	2	8,13	$8,00 \pm 0,40$	1,6
	13,552	7	8,21		2,6
	6,752	110	7,94		0,7
10	16,94	7	10,01	$10,00 \pm 0,50$	0,1
	8,44	110	9,76		2,4
	5,48	1620	10,06		0,6

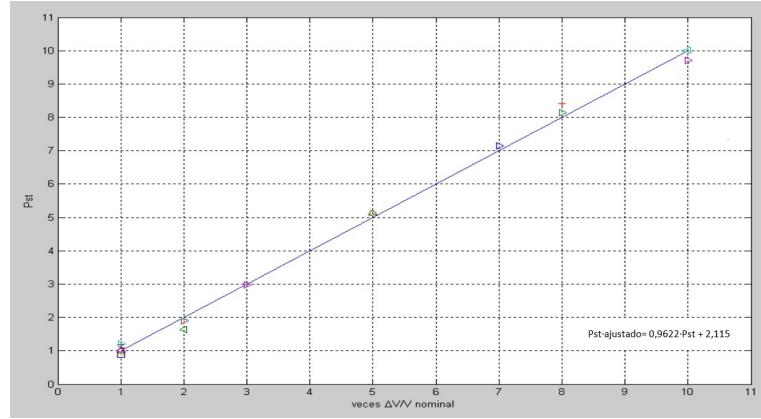


Figura 6.5. Linealidad del P_{st} obtenida experimentalmente.

Los resultados presentes en la tabla 6.4 y en la figura 6.5 satisfacen los requerimientos del estándar IEC-61000-4-15, reduciéndose el error a medida que aumenta k . Esto quiere decir que el error debido al ruido pierde importancia a medida que el $\Delta V/V$ de la fluctuación flicker aumenta. Es decir, y como es de esperarse, el ruido en términos relativos afecta más a las variaciones de tensión flicker de menor amplitud.

Esto queda plasmado en la figura 6.6, en donde el error porcentual se reduce a medida que k aumenta.

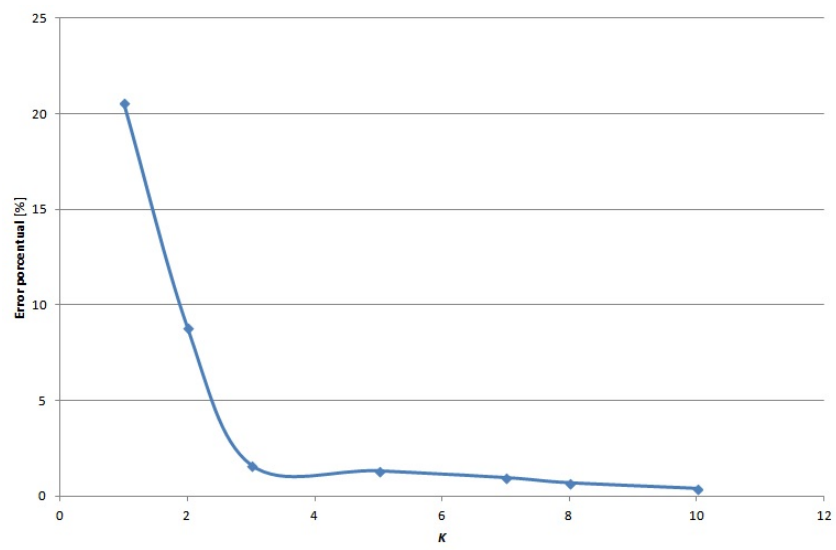


Figura 6.6. Gráfica del error porcentual contra el factor de linealidad k .

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo especial de grado tuvo como objetivo medir el evento de calidad de energía eléctrica conocido como flicker, mediante dos índices definidos en la norma IEC 61000-4-15: la sensación instantánea de flicker (P_{inst}) y la severidad de flicker a corto plazo (P_{st}). En este trabajo se presenta la implementación de estas medidas con limitaciones en cuanto a los equipos y herramientas disponibles.

A partir del desarrollo de este trabajo se concluye lo siguiente:

1. Se estimó cuantitativamente el flicker con los dispositivos utilizados en este trabajo. La medición presentó errores debido a la presencia de ruido, por encima en algunos casos a lo permitido por la norma, debido a que los equipos de instrumentación con los que se implementó el medidor no fueron los más adecuados.
2. Se midieron las variables P_{inst} y P_{st} del flicker según explica la norma (IEC-61000-4-15, 2010).
3. Las variables medidas fueron presentadas en una pantalla digital para poder medir de manera independiente sin necesidad de un pc.
4. Se pudo reducir el ruido mediante los siguientes pasos:
 - Verificando que todos los equipos utilizados en la generación y medición estén conectados con el neutro a una misma referencia. Esto hizo que se eliminara gran parte de las mediciones erradas obtenidas durante las pruebas

del funcionamiento del medidor de flicker.

- Conectando un único punto común de referencia, de esta forma se eliminan las corrientes circulantes las cuales generan gran cantidad de ruido, y perjudicaban dentro de un período de tiempo a la medida de los parámetros flicker.
- Conectando condensadores ($100\mu F$) en paralelo en las entradas de tensión DC (respecto al neutro) de la fuente conmutada de poder, en este trabajo se utilizaron las tensiones +12V y -12V para alimentar a los amplificadores operacionales del circuito acondicionador; y esta medida mejoró la medición.
- Colocando los equipos que compongan el medidor dentro de una carcasa metálica para aislarla de perturbaciones electromagnéticas externas.

Como recomendaciones para futuros trabajos en el área se tienen:

1. Se recomienda utilizar equipos transductores de tensión con menor sensibilidad al ruido, como los transductores de tensión de efecto Hall.
2. Es recomendable desarrollar en el code composer studio una librería para el manejo de la pantalla. De esta manera se puede prescindir del microcontrolador para el manejo de esta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arroyo, C. (Noviembre 2016). *Implementar un generador de forma de ondas de tensión acorde con eventos de calidad de energía del tipo flicker, armónicos y huecos de tensión.*
- Gaceta Oficial-37.825. (2003). *Normas de calidad del servicio de distribución de electricidad.*
- IEC-61000-2-2. (2002). *IEC 61000-2-2 International Standard. Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 2-4: Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes de suministro público en baja tensión.*
- IEC-61000-3-7. (2008). *IEC 61000-3-7 Technical Report. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-7: Límites: Evaluación de los límites de emisión para la conexión de instalaciones con fluctuaciones de tensión para sistemas de potencia MV, HV y EHV.*
- IEC-61000-4-15. (2010). *IEC 61000-4-15 International Standard. Basic EMC Publication. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-15: Testing and measurement techniques. Flickermeter. Functional and design specifications. Edition 2.0.*
- IEEE-141. (1993). *IEEE-141 Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants.*
- IEEE-519. (1992). *IEEE-519 Recommended Practices and Requirements for Harmonics Control in Electrical Power Systems.*
- J.G, L. (2005). *Flicker.* Technical Report, Universidad Simón Bolívar.
- Montoya A, D. E. A. (2014). *Apuntes de flicker.*
- Oviedo, S. J., y Rueda, L. M. (2008). *Diseño del prototipo del módulo para la monitorización del fenómeno flicker para una unidad constructiva de medición de parámetros de calidad de potencia eléctrica, con base en el estándar iec 61000-4-15. master's thesis.* Universidad Industrial de Santander - Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas.
- Santacana, J. (2009). *Modelado, simulación e implementación del flickermetro de*

la norma IEC-61000-4-15 usando el software de programación Labview.
Texas Instruments. (2007). Codecomposerstudio-v3.3. (< http :
//www.ti.com/lit/ml/sprueu7/sprueu7.pdf >)
Wierda, R. (2001). *Cuaderno Técnico No. 176. Flicker o Parpadeo de las Fuentes*
Luminosas. Technical Report, Schneider Electric.

ANEXO

Apéndice I

Modelos de Simulink y Código

1.1. Modelo Simulink del flickermetro

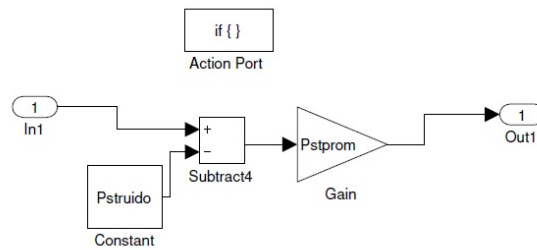


Figura-Anexo 1.1. Submodelo Simulink del flickermetro implementado - Bloque de cálculo del P_{st} .

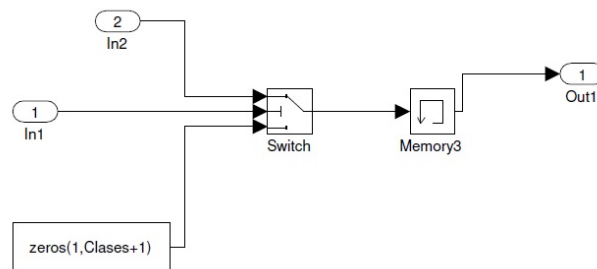


Figura-Anexo 1.2. Submodelo Simulink del flickermetro implementado - Bloque de cálculo del P_{st} .



Figura-Anexo 1.3. Modelo Simulink del flickermetro implementado.

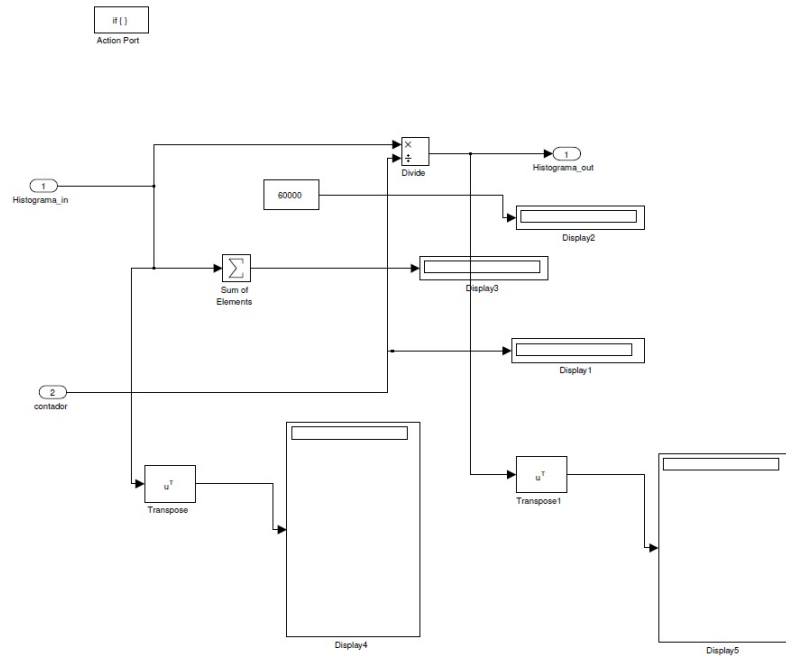


Figura-Anexo 1.6. Submodelo Simulink del flickermetro implementado - Bloque de cálculo del P_{st} .

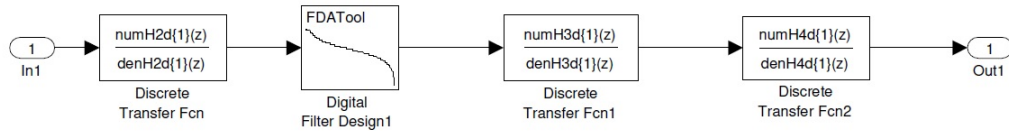


Figura-Anexo 1.7. Submodelo Simulink del flickermetro implementado - Bloque 3 Filtros Ponderadores.

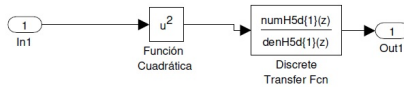


Figura-Anexo 1.8. Submodelo Simulink del flickermetro implementado - Bloque 3 Filtros ponderadores.

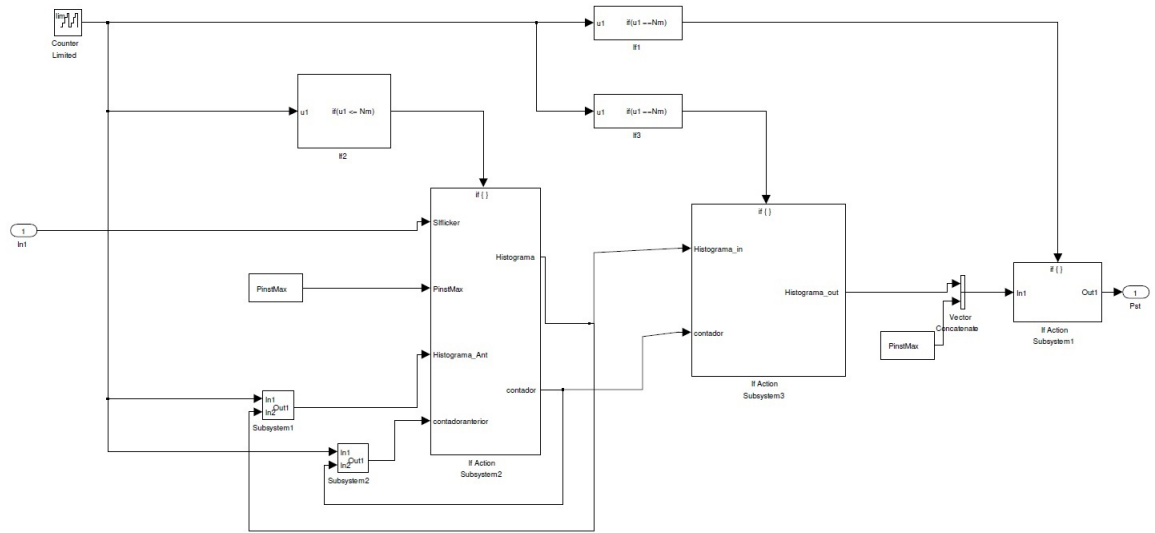


Figura-Anexo 1.9. Submodelo Simulink del flickermetro implementado - Bloque 4 Multiplicador cuadrático.

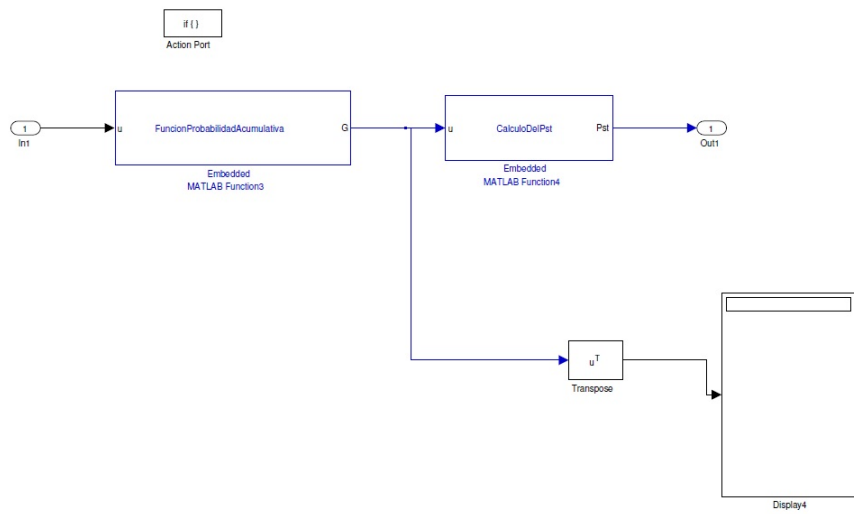


Figura-Anexo 1.10. Submodelo Simulink del flickermetro implementado - Bloque de cálculo del P_{st} .

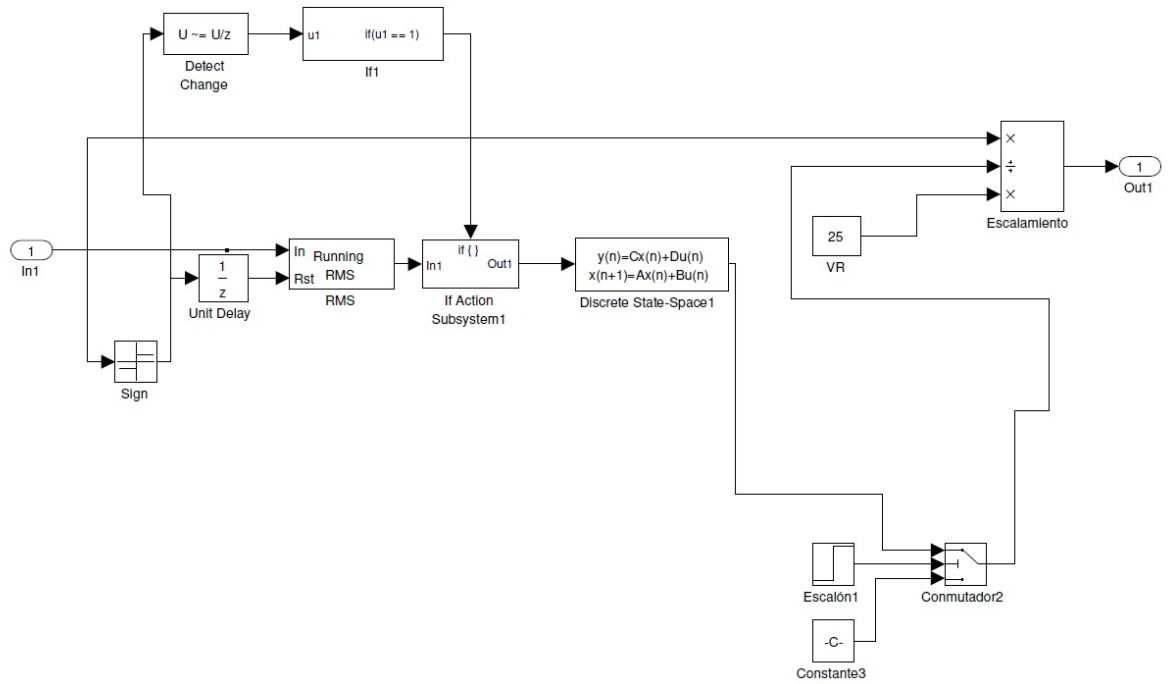


Figura-Anexo 1.11. Submodelo Simulink del flickermetro implementado - Bloque 1 Adaptador de señal.

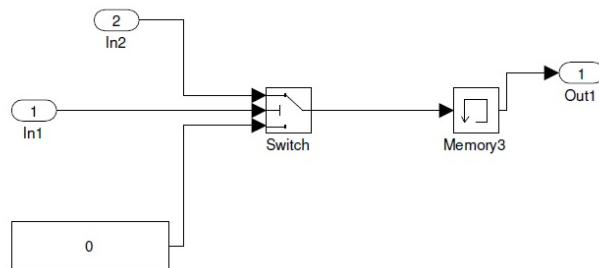


Figura-Anexo 1.12. Submodelo Simulink del flickermetro implementado - Bloque de cálculo del P_{st} .

1.2. Propiedades del modelo en Simulink implementado al DSP

Model Properties: InitFcn:

```
clear;
global Clases

Fm=100;
Tm=1/Fm;
Tref=10*60;
Nm=fix(Tref*Fm);
Clases=512;
ClaseUno=1e-10;
PinstMax=1.01*2000;
fmuestreo=2500;
Ts=1/fmuestreo;
Factor=fmuestreo/Fm;
Ttransitorio=120;
Tpst=720;
PstMax=20;
PinstMaxPWM=99;
Pinstfactor=1/16;
Pstruido=2.115;
Pstprom=1/0.9622;

H1c=tf([1],[27.3 1]);
H1d=c2d(H1c,Ts,'tustin');
[A, B, C, D, Ts] = ssdata(H1d)

H2c=tf([1 0],[1 0.05*2*pi]);
H2d=c2d(H2c,Ts,'tustin');
[numH2d, denH2d, Ts] = tfdata(H2d);
```

```

H3c = tf([1,6357 * 2 * pi * 9,071690], [12 * 2 * pi * 4,167375(2 * pi * 9,07169)^2]);
H3d=c2d(H3c,Ts,'tustin');
[numH3d,denH3d,Ts] = tfdata(H3d)

```

```

H4c=zpk([-2*pi*2.939902],[-2*pi*1.394468 -2*pi*17.31512],[2*pi*1.394468*2*pi*17.31512
/(2*pi*2.939902)]);
H4d=c2d(H4c,Ts,'tustin');
[numH4d,denH4d,Ts] = tfdata(H4d);

```

```

H5c=tf([1],[0.3 1]);
H5d=c2d(H5c,Ts,'tustin');
[numH5d,denH5d,Ts] = tfdata(H5d);

```

1.3. Código de la pantalla digital mediante el MSP430G2553

```

/ Codigo Pantalla Digital /

// incluimos las librerias necesarias

# include "SPI.h"
# include "LCD5110SPI.h"

# define ENTPINST A6 // entrada analogica
# define ENTPST A2

// creamos un objeto del tipo LCD5110SPI
LCD5110SPI myScreen;

```

```

    // variables que cambiaran
    boolean backlight = false;
    String YY;
    String XX;
    String AA;
    String BB;

    void setup() {

        // configuramos el periferico de SPI con
        // la configuracion para la pantalla:
        SPI.begin();
        SPI.setClockDivider(SPI_CLOCK_DIV2);
        SPI.setBitOrder(MSBFIRST);
        SPI.setDataMode(SPI_MODE0);
        pinMode(P16, INPUT);
        pinMode(P12, INPUT);
        // especificamos los pines que queremos
        // usar para el resto de lines de la pantalla.
        // El orden es: CE, DC, RST, BL, PB
        myScreen = LCD5110_SPI(P22, P23, P24, P21, PUSH2);

        myScreen.begin(); // iniciamos la pantalla
        myScreen.setBacklight(backlight); // encendemos la luz trasera
        myScreen.text(3, 2, "Iniciando"); // escribimos un texto en (3,2)
        delay(1000); // esperamos 1 segundo antes de
        myScreen.clear(); // limpiar la pantalla completa
        myScreen.text(0, 5, "Apagar"); // y escribimos en (0,5)

    }

    float Pinst = 0;

```

```

float Pst = 0;
float pwmValue1 = 0;
float pwmValue2 = 0;
int aux1=0;
int aux2=0;
float aux3=0;
int aux4=0;
int aux5=0;
float aux6=0;
void loop() {
  // el siguiente codigo actualiza el texto de (0,5)
  // en caso de que se pulse el boton
  if (myScreen.getButton()) {
    backlight = (backlight == 0);
    myScreen.setFont(0);
    myScreen.text(0, 5, backlight ? "Encender" : ".^pagar ");
    myScreen.setBacklight(backlight);
  }

  // cambiamos a la fuente grande y escribimos YY y XX
  myScreen.text(0, 1, "Pinst : ");
  myScreen.text(0, 3, "Pst : ");

  //leemos el valor del potenciómetro, convirtiendo el valor analogico
  //en digital con nuestro ADC

  Pinst = analogRead(ENTPINST);
  pwmValue1 = Pinst * 99/1023;
  aux1=pwmValue1;
  aux3=pwmValue1-aux1;
  aux2=aux3 * 100;
  if(aux3 <0.1){

```

```

YY=String(aux1);
XX=String(aux2);
myScreen.text(0,2,YY + "." + "0" + XX + "");
}
else{
YY=String(aux1);
XX=String(aux2);
myScreen.text(0,2,YY + "." + XX + "");
}
Pst = analogRead(ENTPST);

    pwmValue2 = Pst · 20/1023;
aux4=pwmValue2;
aux6=pwmValue2-aux4;
aux5=aux6 · 100;
if(aux6 <0.1){
AA=String(aux4);
BB=String(aux5);
myScreen.text(0,4,AA + "." + "0" + BB + "");
}
else{
AA=String(aux4);
BB=String(aux5);
myScreen.text(0,4,AA + "." + BB + "");
}
//asignamos el valor de la variable pwmValue
delay(200);
}

```

Apéndice II

Programas y equipos utilizados

2.1. Versiones de los programas utilizados

Tabla-Anexo 2.1 Versiones de programas utilizados.

Programa	Descripción	Versión
Code Composer Studio	Utilizado para carga y monitoreo del programa al DSP F28335	V3.3.83.19 Int. Development 5.98.0.419 BIOS 5.33.05 Code Generation Tools v5.2.1
SignalExpress LabVIEW	Utilizado para generación de señales contaminadas con flicker	DAQ Assistant V9.5 SignalExpress Components V2.5
MATLAB	Programación del flickermetro	v7.10.0.499 (R2010a) 32-bit
Simulink	Programación del flickermetro	v7.5 (R2010a)
Energia	Programación del M430G2553 de la pantalla digital	0101E0017 Modified Version of Arduino IDE for Texas Instruments

Tabla-Anexo 2.2 Especificaciones técnicas del computador utilizado en el laboratorio.

Software	Hardware
Microsoft Windows XP Profesional Versión 2002 Service Pack 2	Intel(R) Pentium(R) 4 CPU 1.70 GHz 1.0 GB RAM

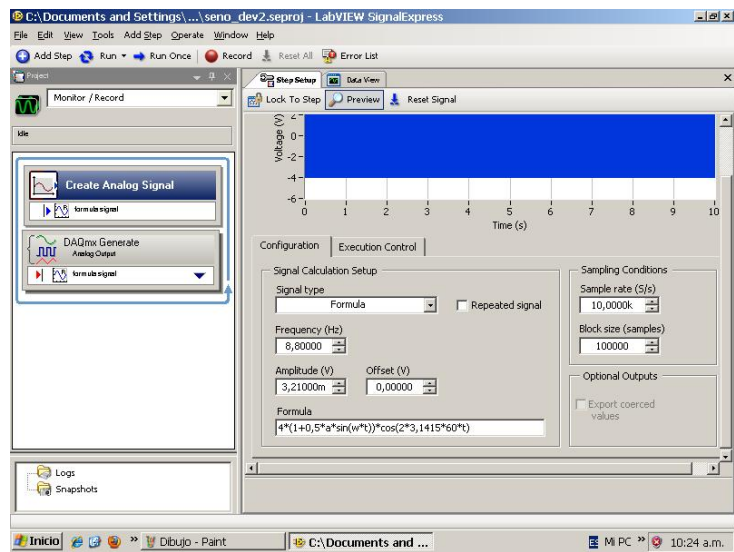


Figura-Anexo 2.1. Programa SignalExpress LabVIEW - Configuración para P_{inst} .

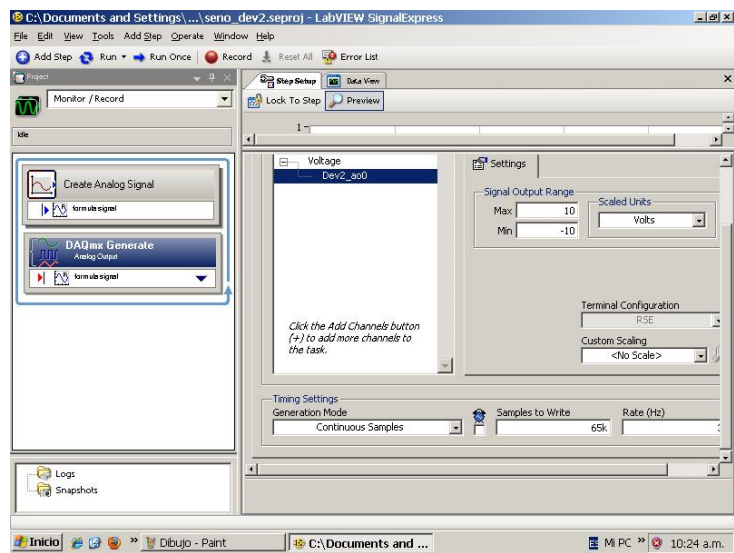


Figura-Anexo 2.2. Programa SignalExpress LabVIEW - Configuración para P_{inst} .

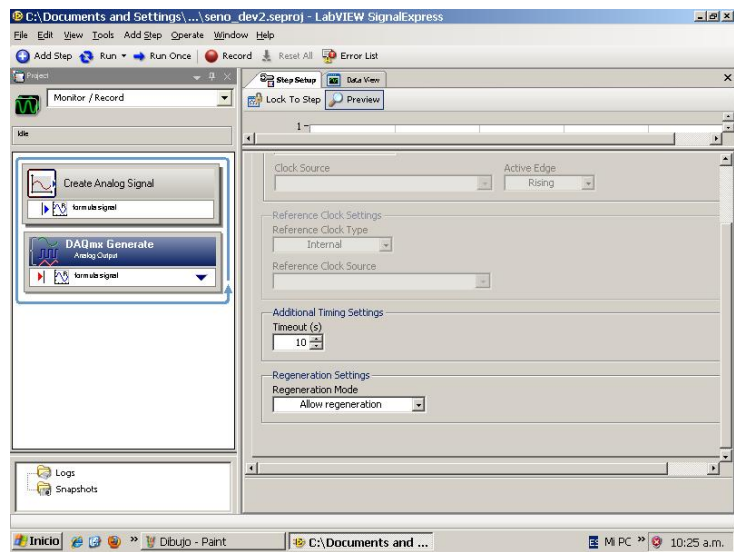


Figura-Anexo 2.3. Programa SignalExpress LabVIEW - Configuración para P_{inst} .

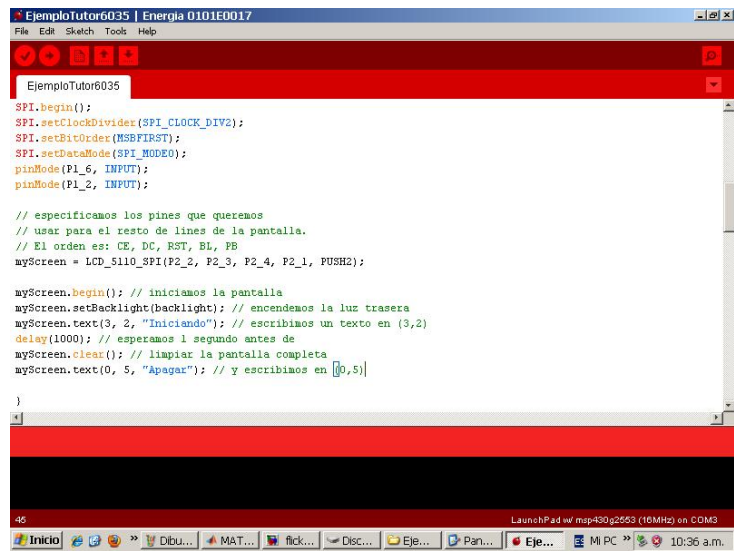


Figura-Anexo 2.4. Programa Energia - Ventana de programación.