



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPTO. INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

“ESTADO DEL ARTE EN METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS DE FLICKER Y SU RELACIÓN CON LOS INTERARMÓNICOS”

FRANCISCO JOSÉ FERNÁNDEZ FALETTO.
RODRIGO ANTONIO TOLEDO ARÉVALO.

SEMINARIO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO DE EJECUCIÓN EN ELECTRICIDAD

CONCEPCIÓN – CHILE
2010



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPTO. INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

“ESTADO DEL ARTE EN METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS DE FLICKER Y SU RELACIÓN CON LOS INTERARMÓNICOS”

FRANCISCO JOSÉ FERNÁNDEZ FALETTO.
RODRIGO ANTONIO TOLEDO ARÉVALO.

DOCENTE PATROCINANTE
JUAN CARLOS DELGADO NAVARRO

DOCENTE CORRECTOR
FABRICIO IVÁN SALGADO DÍAZ

ÍNDICE

RESUMEN	5
OBJETIVOS	6
INTRODUCCIÓN	7
1. CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN DEL EFECTO FLICKER	9
I.1.- Definición de flicker	9
I.2.- La fluctuación relativa de tensión	11
I.3.- Modelo matemático de flicker	12
I.4.- Variación de la intensidad luminosa	14
I.5.- Sensibilidad de la visión humana	15
I.6.- Curvas de tolerancia	16
<i>I.6.1 Curva de tolerancia (IEEE 141)</i>	16
I.7.- Severidad de parpadeo	17
2. CAPÍTULO II: CALIDAD DE LA ENERGÍA Y NORMATIVAS RELACIONADAS CON EL EFECTO FLICKER	18
II.1.- Interarmónicos	19
II.2.- Efectos de los interarmónicos	21
II.3.- Estándares asociados a la medida de armónicos e interarmónicos	22
<i>II.3.1- Estándar IEC 61000-4-30</i>	27
<i>II.3.2.- Agregación de intervalos de tiempo de medida</i>	28
<i>II.3.2.1.-Método clase A</i>	28
<i>II.3.2.2.-Método clase B</i>	29
<i>II.3.3.- Algoritmo de agregación de medidas</i>	29
II.4.- Aspectos generales sobre la normalización Chilena	30
<i>II.4.1.- Aspectos generales</i>	30
<i>II.4.2.- Aspecto de fondo sobre el desarrollo de los estándares</i>	31
II.5.- Norma técnica de seguridad y calidad de servicio	32

3. CAPÍTULO III: CARACTERÍSTICAS DEL EFECTO FLICKER Y LAS FUENTES QUE LO PRODUCEN	40
III.1.- Fuentes de flicker	40
III.1.1.- Detección de fuentes de flicker	41
III.1.2.- Fuentes industriales grandes	42
III.1.2.1.- Hornos de arco	42
III.1.2.2.- Motores con cargas alternativas y arranques múltiples	42
III.1.2.3.- Generadores	43
III.1.2.4.- Turbinas de viento	43
III.1.3.- Fuentes de menor tamaño	43
III.1.4.- Efecto	44
III.2.- Definición teórica de la molestia, cuantificación y medida del flicker	44
III.2.1.- Dosis de flicker, definición de la molestia	45
III.2.2.- Los parámetros Pst y Plt	46
III.2.2.1.- Definición del Pst	47
III.2.2.2.- Definición del Plt	48
III.2.3.- El medidor de flicker	49
III.2.4.- El $\Delta V10$	49
III.2.5.-Otras magnitudes de medida	50
III.3.- Límites	50
III.3.1.- Niveles de compatibilidad de Pst y Plt	51
III.3.2.- Límites de $\Delta V10$	52
III.4.- Determinación del flicker en una instalación	52
III.4.1.- Método cualitativo	53
III.4.2.- Método analítico	53
III.4.3.- Método para los hornos de arco	54
4. CAPÍTULO IV: ESTADO DEL ARTE EN METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS DE FLICKER Y SU RELACIÓN CON LOS INTERARMÓNICOS	57
IV.I. Un nuevo acercamiento del dominio de la frecuencia para la evaluación de flicker de hornos de arco	58
IV.1.1.- Bloque 1. Adaptador de tensión	59
IV.1.2.-Bloque 2. Demodulador de variación cuadrática	59
IV.1.3.- Bloque 3. Filtros	60
IV.1.4.-Bloque 4. Estimación no lineal de la variación	61

IV.1.5. Sensación instantánea del parpadeo para los hornos de arco	64
IV.1.6. Evaluación estadística	66
IV.1.7. Cálculo del parpadeo para las fluctuaciones sinusoidales y rectangulares de tensión	66
IV.1.8. Validación del método del dominio de la frecuencia	70
IV.1.1.-La validación en un horno de arco dc	70
IV.2. Detección del flicker causado por interarmónicos	75
IV.3. Flicker causado por interarmónicos	79
IV.4. Tensión de flicker causado por dos interarmónicos	84
IV.4.1. Frecuencia del parpadeo	85
IV.4.2. La desviación relativa máxima rms	85
IV.4.3. La desviación máxima peak	85
IV.4.4. La frecuencia del parpadeo causado por dos interarmónicos	86
IV.4.5. La forma de onda causada por dos interarmónicos	87
IV.4.5.1. La armónica de orden impar	87
IV.4.5.2. La armónica de orden par	87
IV.4.6. Magnitud del parpadeo (rms) causado por dos interarmónicos	88
IV.4.7. Magnitud del flicker causado por dos interarmónicos	90
IV.5. Estudio del flicker debido a la distorsión de interarmónicos producidos por las turbinas de viento	91
IV.5.1. Sistema de turbinas de viento	93
IV.6. Pruebas de lámparas fluorescentes por sus susceptibilidad parpadeante hacia tensiones interarmónicas	98
IV.7. Evaluación automatizada de la sensibilidad del flicker en lámparas fluorescentes causadas por tensiones interarmónicas	104
IV.7.1. Cabina de iluminación	105
IV.7.2. Trazado del circuito fotosensible	105
IV.7.3. Fuente programable de CA	105
IV.7.4. Sistema de adquisición de datos con entrada analógica (AI) y salida analógica (AO)	106
IV.8. Requisitos internacionales del flicker en redes de media y alta tensión en el mundo	110
5. CAPÍTULO V: ANÁLISIS CRÍTICO DEL ESTADO DEL ARTE	
V.1. Un nuevo acercamiento del dominio de la frecuencia para la evaluación del flicker de hornos de arco	114
V.2. Detección del flicker causado por interarmónicos	114
V.3. Flicker causado por interarmónicos	115

V.4. Tensión de flicker causado por dos interarmónicos	116
V.5. Estudio del Flicker debido a la distorsión de interarmónicos producidos por las turbinas de viento	117
V.6. Pruebas de lámparas fluorescentes por su susceptibilidad parpadeante hacia tensiones interarmónicas	117
V.7. Evaluación automatizada de la sensibilidad del flicker en lámparas fluorescentes causadas por tensiones interarmónicas	118
V.8. Requisitos internacionales del flicker en redes de media y alta tensión en el mundo	118
CONCLUSIÓN	119
REFERENCIAS	122
ANEXOS	128

RESUMEN

En el presente seminario de titulación se realizará una recopilación bibliográfica del tema flicker y con especial énfasis en su relación con los interarmónicos. Aquí se recopilará información de distintos autores expertos en este tema con el fin de proveer de información válida sobre este tema.

El tema de flicker consiste en las variaciones de tensión que sufren las redes eléctricas a nivel industrial y a nivel de consumidores. Cabe mencionar que esto afecta la calidad del suministro eléctrico.

En los primeros capítulos se abordará el tema de modo de poder entender el concepto y ver sus ecuaciones matemáticas, posterior a ello se realiza un estudio de las normativas relacionadas con el tema a nivel nacional e internacional

También se mencionan máquinas y/o artefactos que producen las fluctuaciones de tensión además de las posibles soluciones para este fenómeno

La meta principal de este escrito es realizar la recopilación de información y un análisis del tema, En estos párrafos se da una explicación teórica y matemática enfocándose en forma particular a cómo se logran medir los principales causantes de las fluctuaciones de tensión, viendo también los niveles de contaminación produce un horno de arco eléctrico usado comúnmente en las fundidoras de acero.

OBJETIVOS

Los principales objetivos del presente seminario son extender y profundizar el conocimiento en las metodologías para el análisis de flicker y su relación con los interarmónicos. Para esto se trabajara en los siguientes puntos:

- ✓ Estudiar el fenómeno de parpadeo o flicker y conocer sus características.
- ✓ Conocer las normativas relacionadas sobre el fenómeno flicker a nivel nacional e internacional.
- ✓ Revisar y analizar la recopilación bibliográfica de metodologías para el análisis de flicker y su relación con los interarmónicos.

Como objetivo secundario se busca analizar, comprender y comparar los resultados de la recopilación bibliográfica, además de desarrollar conclusiones objetivas respecto del tema en estudio.

INTRODUCCIÓN

En el análisis del comportamiento de las redes eléctricas, uno de los temas de mayor influencia en la calidad de energía eléctrica, entre otros, son los armónicos, las sub/sobre tensiones, las interrupciones y el flicker. Este último preocupa desde hace varios años a organizaciones y países del mundo por las consecuencias que generan.

Debido al costo asociado de tales efectos, es necesario desarrollar estudios de ingeniería que permitan evaluar la interacción de cargas no lineales que se encuentran en los sistemas de potencia, para asegurar que el nivel de distorsión armónica se encuentre dentro de la norma existente.

El flicker es el fenómeno de variación de la intensidad del flujo luminoso que afecta a la visión humana generado por fluctuaciones (modulaciones) en la tensión de la red eléctrica. Es un problema de percepción visual, puesto que el fenómeno depende principalmente de las personas que lo observan.

La molestia causada en la visión provoca cansancio prematuro en la vista e irritabilidad en las pupilas por estar en continua dilatación y contracción ajustándose al nivel de iluminación, especialmente cuando un lector recorre el texto de un libro. En estudios estadísticos se ha demostrado que el ojo humano es muy sensible al parpadeo consiguiéndose la máxima irritabilidad a frecuencias de 8,8 Hz [9].

Las frecuencias consideradas como flicker dependen de la tensión y frecuencia nominal de la red eléctrica. Para los sistemas de 50 Hz el rango de flicker es de 0,05 hasta 35 Hz a 230 V de tensión nominal y para 60 Hz es de 0,05 Hz hasta 42 Hz a 120 V. Ambos rangos de frecuencia de flicker se registraron con la iluminación en base a una lámpara incandescente de 60W, y surgen por la diferencia en las constantes de tiempo de los filamentos para cada tensión, que imprimen distintas respuestas en frecuencia.

Las principales causas son las conexiones de grandes motores de inducción, compresores, trenes laminadores, bancos de capacitores, soldadoras y hornos de arco (cargas no lineales) conectados a

redes eléctricas deficientes, de baja potencia de corto circuito, o en aquellas sin sistemas de control de inhibición de transitorios.

El flicker se puede clasificar según su naturaleza, en dos categorías: Sistemático o periódico y aleatorio o no periódico, pudiendo manifestarse simultáneamente. El flicker periódico puede ser consecuencia de cargas o servicios repetitivos como compresores, soldadoras de punto y de arco, en cambio, el flicker no periódico es provocado por la eventual conexión de grandes cargas. Ambos tipos de flicker pueden presentarse simultáneamente en presencia de cargas tales como hornos y soldadoras de arco.

1. CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN DEL EFECTO FLICKER

1.1.- Definición de flicker

Variación del valor eficaz o amplitud de la tensión en un rango menor al 10 % del valor nominal. Esta variación de la amplitud de la tensión produce fluctuación del flujo luminoso en lámparas, induciendo a su vez la impresión de inestabilidad en la sensación visual [1] (efecto de parpadeo visual).

Corresponde a una fluctuación cíclica (en el rango 0- 30 Hz) de la magnitud del tensión que origina una sensación de molestia o desagrado en las personas, como resultado del parpadeo en los elementos de iluminación y mal funcionamiento de otros dispositivos eléctricos conectados a la red. Se mide a través de dos índices: Índice de severidad de Parpadeo o Flicker de corto plazo (10 minutos) P_{st} y el índice de severidad de parpadeo o flicker de largo plazo (2 horas) P_{lt} [2].

El flicker depende fundamentalmente de la amplitud, frecuencia y duración de las variaciones de la tensión y se expresa como el cambio de la tensión rms dividido por la tensión promedio rms como muestra la ecuación (1.1).

Ocurre en un rango de frecuencias que va desde 0.5 a 25 Hz, demostrándose a través de pruebas y análisis, que el ojo humano es muy sensible a frecuencias moduladoras en el rango de 8 a 10 Hz con variaciones de tensión en el rango de 0.3 a 0.4 % de magnitud a estas frecuencias.

$$d(t) = \frac{\Delta V}{V} = \left[\frac{\Delta S(t)}{Sc(t)} \right] * \cos((\Psi - \varphi)) \quad (1.1)$$

Donde:

$d(t)$: Cambio relativo de tensión.

$\Delta S(t)$: Cambio de carga.

$Sc(t)$: Capacidad de cortocircuito.

Ψ : Angulo de Sc .

φ : Angulo del cambio de carga.

El factor humano complica la cuantificación de este problema. Por esta razón el flicker históricamente ha sido contemplado como un problema de “percepción”.

Estudios indican que la sensibilidad depende en que tanto cambia o varía la iluminación (magnitud) y en que frecuencias ocurren estos cambios.

Cambios repentinos de tensión de un ciclo al siguiente, son mayormente detectables que cambios graduales sobre varios ciclos. El flicker causa mayor molestia si ocurre frecuentemente y de manera cíclica.

El flicker depende de la operación de los consumidores (variaciones de carga – cargas fluctuantes) y de lo robusto del sistema que suministra energía eléctrica, es decir del nivel de cortocircuito de la red.

La Comisión Electrotécnica Internacional (CEI) clasifica las fluctuaciones de tensión en cuatro tipos:

- ✓ Tipo a: Variaciones de tensión de onda cuadrada de período constante. Por ejemplo, las ocasionadas por interrupciones de cargas resistivas.
- ✓ Tipo b: Escalones de tensión que se presentan de forma irregular en el tiempo y cuya magnitud varía tanto en sentido positivo, como negativo.
- ✓ Tipo c: Cambios en la tensión claramente separados que no siempre llevan aparejados escalones de tensión. Por ejemplo, las originadas por acoplamiento de cargas no resistivas.
- ✓ Tipo d: Series de fluctuaciones esporádicas o repetitivas. Por ejemplo, las producidas por cambios cíclicos o aleatorios de cargas. La figura 1.1 muestra los distintos tipos de fluctuación de tensión.

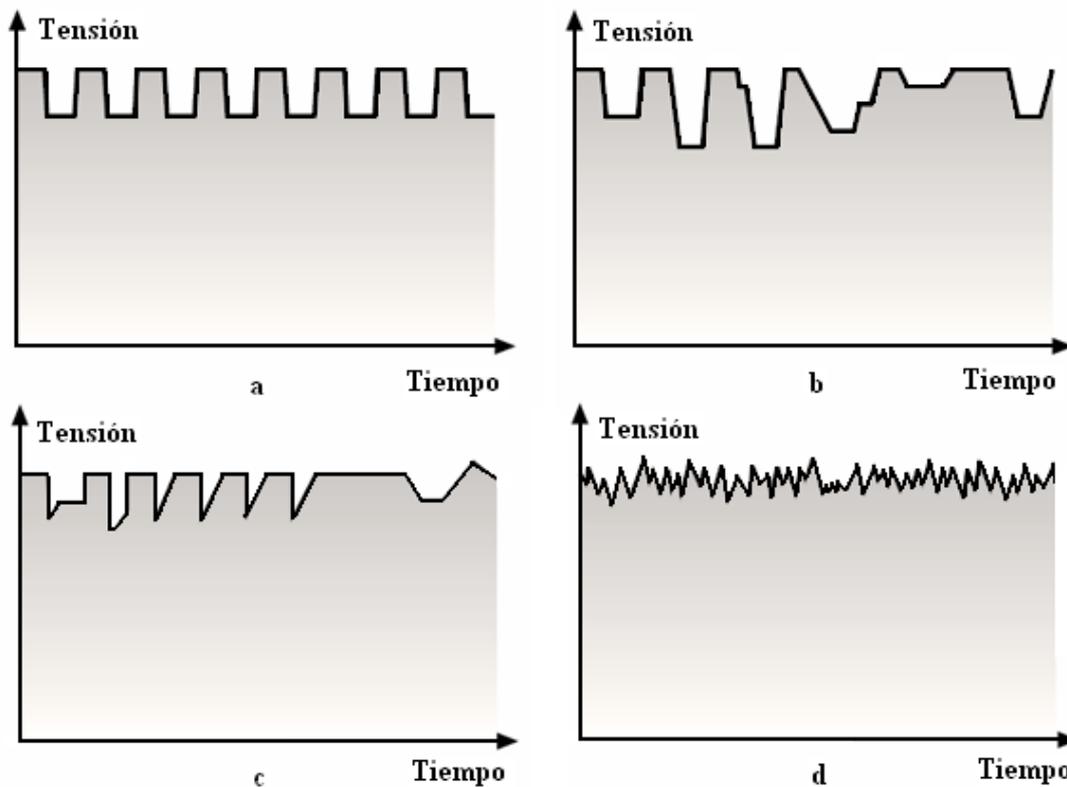


Figura n° 1.1. Tipos de fluctuaciones de tensión. a) Variaciones de onda cuadrada, b) Variaciones irregulares, c) Variaciones de escalones dispares, d) Variaciones esporádicas.

I.2.- La fluctuación relativa de tensión [10]

El fenómeno del parpadeo está relacionado con las variaciones del valor eficaz de la tensión y la frecuencia con la que estas ocurren. Es necesario, por lo tanto, definir dichas fluctuaciones. Las fluctuaciones de tensión se pueden suponer como una modulación de la tensión de la red, prácticamente sinusoidal, en un punto con otra señal de más baja frecuencia cuya forma es, en principio, aleatoria. Es la presencia de esta última la que hace que la tensión eficaz no tenga un valor constante si no que oscila entre determinados valores. Para medir la severidad de estas perturbaciones que se manifiestan en formas de variaciones en la tensión eficaz se define el término variación relativa de tensión, valor que se suele dar en tanto por ciento. Su expresión es la que sigue en la ecuación:

$$\frac{\Delta V}{V} * 100 (\%) \quad (1.2)$$

Donde V es la tensión cuando no hay perturbaciones, por ejemplo, la que hay en el punto de la red antes de conectar la carga que provoca las fluctuaciones de tensión. Mientras que, ΔV es la excursión de dichas fluctuaciones.

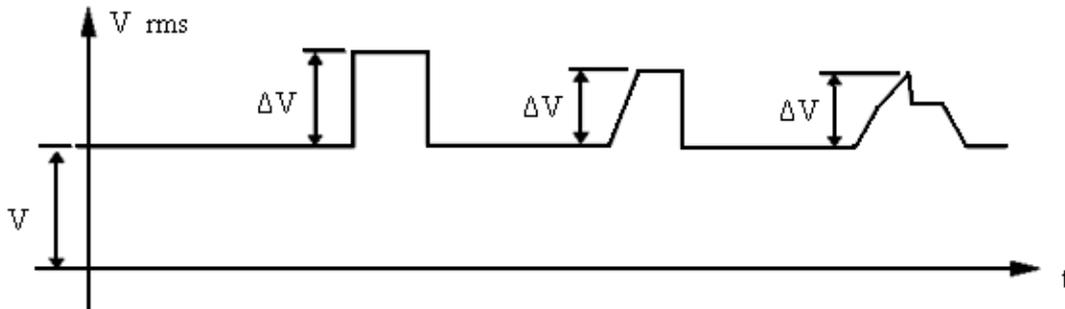


Figura n° 1.2. Fluctuaciones en el valor eficaz de la tensión.

En valor de la variación relativa de tensión también se puede calcular a partir de los valores de tensión instantáneos, tomando en vez de los valores eficaces los valores peak, como se muestra en la ecuación (1.3), o sea:

$$\frac{\Delta V_p}{V_p} * 100 (\%) \quad (1.3)$$

Donde:

ΔV_p : Variación relativa de la tensión. (V)

V_p : Valor instantáneo de tensión. (V)

I.3.- Modelo matemático de flicker

La variación de flujo luminoso periódico debido a fluctuaciones de la tensión de la misma naturaleza puede representarse matemáticamente, mediante ecuaciones que permitan modular la amplitud de la tensión (Ec. (1.4)), como también la representación en serie de subarmónicos.

$$u(t) = U * [1 + m(t) * \sin(\omega_0 t)] \quad (1.4)$$

Siendo U la amplitud máxima de la tensión, $m(t)$ la función matemática que modula la amplitud y ω_0 la pulsación angular de la red.

Las modulaciones sinusoidales y rectangulares de la tensión, son las utilizadas y requeridas por la norma IEC 61000-4-15.

Las ecuaciones (1.5) y (1.6) expresan ambos casos, siendo ωf la pulsación de la modulación de la amplitud.

$$U_1(t) = U * [1 + \Delta f * \sin(\omega f t) * \sin(\omega_0 t)] \quad (1.5)$$

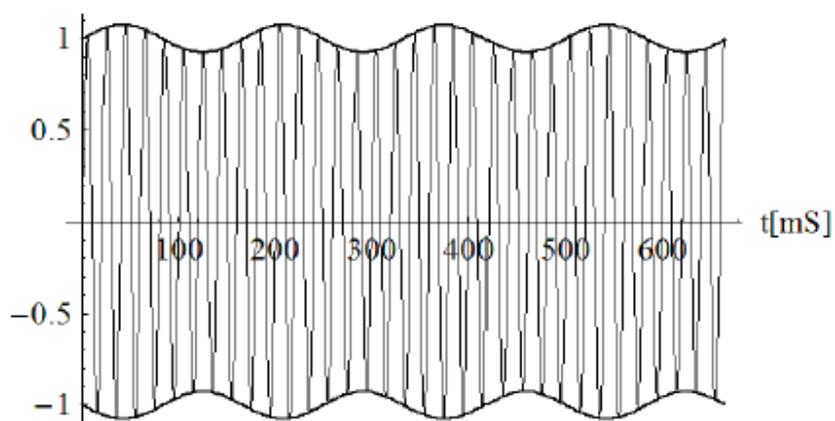


Figura n°1.4. Flicker sinusoidal $\omega f = 2 * \pi * 6 * 1/s$

$$U_2(t) = U * [1 + \Delta f * (\sin * \sin(\omega f t)) * \sin(\omega_0 t)] \quad (1.6)$$

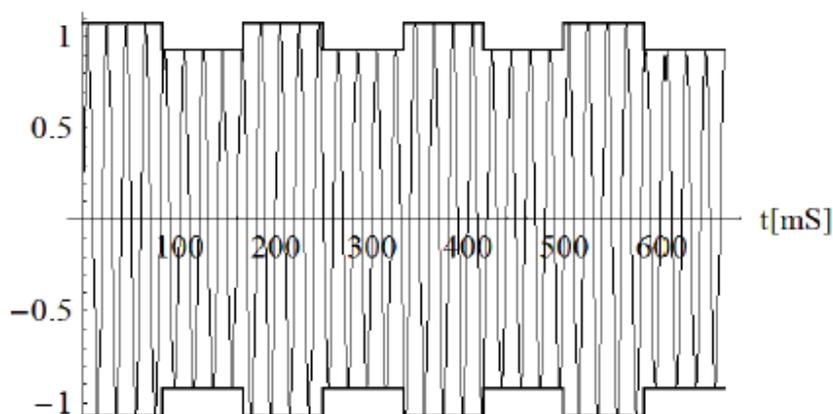


Figura n°1.5. Flicker rectangular $\omega f = 2 * \pi * 6 * 1/s$

I.4.- Variación de la intensidad luminosa [2]

Los instrumentos medidores de flicker procuran cuantificar la relación entre las fluctuaciones de tensión y la perceptibilidad del ojo humano frente a la observación de una lámpara de filamento (tungsteno) de 60 W. La intensidad de luz de una lámpara de este tipo es una función exponencial del valor efectivo de tensión:

$$\frac{J}{J_N} = \frac{V_{rms}^\gamma}{V_{n\ rms}^\gamma} \quad (1.7)$$

Donde:

J : Intensidad de la luz emitida por la lámpara.

V_{rms} : Valor efectivo de tensión (V).

$V_{n\ rms}^\gamma$: Valor efectivo nominal de tensión (V).

J_N : Intensidad de la luz emitida a tensión $V_{n\ rms}$.

γ : Coeficiente del orden de 3.4 a 3.8 (determinado de manera experimental).

Para cambios pequeños del valor efectivo de tensión, se producirán cambios en la intensidad luminosa que se registrarán por:

$$\frac{\Delta J}{J_N} \approx \gamma * \frac{\Delta V}{V_{n\ rms}} \quad (1.8)$$

Donde:

ΔJ : Variación de la intensidad luminosa.

ΔV : Variación del valor efectivo de tensión (V).

Una variación de tensión no produce una variación instantánea de intensidad luminosa. Para considerar la respuesta dinámica de la lámpara, se puede emplear:

$$\frac{\Delta J}{J_N} \approx \gamma * \frac{\Delta V}{V_{n\ rms}} * \frac{1}{\sqrt{(1 + \omega_f^2 \tau^2)}} \quad (1.9)$$

Donde:

ω : Frecuencia de la red.

τ : Constante de tiempo de la lámpara.

Este modelo se utiliza comúnmente en los instrumentos que miden el efecto de cambios lentos de tensión en la intensidad lumínica del alumbrado en ciudades.

La presencia de flicker en sistemas eléctricos no es un problema nuevo. En 1937 se plasmó en una curva que represento el ciclo de pulsación de tensión al cual era perceptible la fluctuación rápida de tensión en una lámpara de filamento de tungsteno [1].

En 1930 General Electric condujo resultados sobre estudios de fluctuaciones rápidas de tensión que fueron dirigidos a la producción de las fronteras de visibilidad e irritación causadas por tales fluctuaciones. Esta curva fue incluida en el libro de distribución de General Electric y ha sido adoptada ampliamente por las empresas de suministro eléctrico.

En 1959 Westinghouse publicó los resultados de unos estudios sobre límites de fluctuaciones rápidas de tensión utilizados por las empresas suministradoras de electricidad que suplen a más de un millón de usuarios.

Otro interesante estudio de percepción de fluctuaciones rápidas de tensión fue hecho en Inglaterra. En este trabajo se mostró menor sensibilidad que la curva de General Electric. En este estudio, se investigó la manera en la cual el ojo humano percibe las fluctuaciones rápidas de tensión causado por múltiples perturbaciones sinusoidales de tensión.

I.5.- Sensibilidad de la visión humana

El ojo humano tiene una respuesta de frecuencia característica, por cuanto, si la variación de tensión corresponde a una cierta frecuencia será fácilmente perceptible. Se ha comprobado que una variación de tensión superior al 0.25% produce un parpadeo visible de los sistemas de iluminación para una frecuencia de 8.8 Hz [9].

I.6.- Curvas de tolerancia

Por muchos años, IEEE (particularmente los std. 141 y 519) ha publicado curvas que recomiendan límites para las fluctuaciones de tensión, e indican la magnitud de variación de tensión aceptable y números de veces que ocurre esta variación, para lámparas incandescentes de 60 W, 120 V. Estas curvas están basadas en pruebas con base estadística a diferentes personas, para determinar el borde de irritabilidad de la visión y han sido utilizadas ampliamente por las empresas de servicio eléctrico.

La proliferación del uso de equipos de electrónica de potencia, ha contribuido a la presencia de complejas fluctuaciones de tensión que no son fácilmente tratadas por el std. 141 y el std. 519. Por esta razón la IEEE ha trabajado en cooperación con la International Union for Electroheat (IUE) y la Internacional Electrotechnical Commission (IEC) para mejorar los estándares existentes.

I.6.1.- Curva de tolerancia (IEEE 141)

La figura nº 6 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, muestra la frontera a partir de la cual el ser humano comienza a detectar el flicker. La curva superior, indica la frontera a partir de la cual el ser humano comienza a ser perturbado por el flicker. Por ejemplo observando las curvas, para 10 perturbaciones por hora, el flicker es detectado desde fluctuaciones de tensión del 1 %, mientras que si estas fluctuaciones alcanzan el 3 % el flicker comienza a perturbar al ser humano.

La iluminación requerida en espacios cerrados de trabajo requiere límites de flicker cercanos a la curva de visibilidad, mientras que para el uso de iluminación de áreas en general, los límites de flicker deben estar cercanos a la curva de irritabilidad.

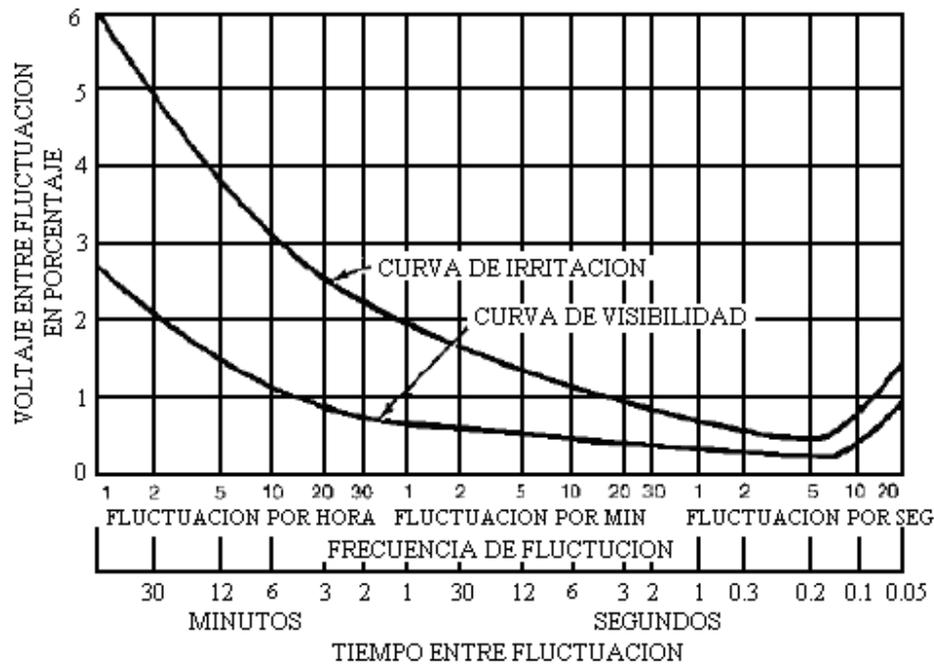


Figura n° 1.6: Rango de flicker observable y perturbador en razón del tiempo.

Cuando ocurre flicker que causa irritabilidad, la carga que causa el flicker debe ser reducida o eliminada, o la capacidad del sistema suplidor de electricidad debe ser mejorada. En sistemas industriales, las cargas que originan el flicker deben ser segregadas a transformadores y alimentadores exclusivos que no alimenten a cargas o equipos sensibles al flicker.

I.7.- Severidad de parpadeo

El índice de severidad de parpadeo o flicker, será evaluado estadísticamente en intervalos consecutivos de 10 minutos durante un período de registro de mediciones de una semana cualquiera del año o de siete días consecutivos, y no deberá exceder 1.00 para tensiones iguales o inferiores a 110 kV ni exceder 0.79 para tensiones superiores a 110 kV.

El índice de severidad de flicker, evaluado estadísticamente en intervalos consecutivos de dos horas durante un período de registro de mediciones de una semana cualquiera del año o de siete días consecutivos, no deberá exceder 0.74 para tensiones iguales o inferiores a 110 kV ni exceder 0.58 para tensiones superiores a 110 kV.

2. CAPÍTULO II: CALIDAD DE LA ENERGÍA Y NORMATIVAS RELACIONADAS CON EL EFECTO FLICKER

La generación de energía eléctrica en los centros de producción y su suministro en los puntos de consumo se hace mediante la red de distribución eléctrica. Para su adecuado funcionamiento, en términos generales, la primera necesidad es que los centros de generación satisfagan la demanda de los usuarios. Superado el problema del suministro debemos considerar el de la calidad de la energía suministrada.

La calidad de la energía eléctrica es un término global que no tiene una definición exacta y que abarca tanto la disponibilidad del suministro eléctrico junto con la calidad de la tensión y la corriente suministradas. La mala calidad de la energía eléctrica en el punto de suministro al consumidor puede generar problemas importantes en las instalaciones y equipos conectados a la red.

El estándar IEEE 1159-1995 define siete categorías distintas de fenómenos electromagnéticos en las redes eléctricas: transitorios, variaciones de corta duración, variaciones de larga duración, desequilibrio de la tensión, distorsión de la forma de onda, fluctuaciones de tensión y variaciones de la frecuencia.

El problema de la calidad de la energía eléctrica es de naturaleza compleja. La energía eléctrica se genera como un sistema de tensiones trifásico equilibrado y se hace llegar al consumidor por medio de un sistema de transporte y distribución. En este proceso, la energía eléctrica sufre una serie de alteraciones que pueden afectar a los usuarios. Además, la conexión de los aparatos de los clientes al sistema de distribución de energía eléctrica da origen a que circulen corrientes eléctricas proporcionales a la demanda de los mismos. Estas corrientes al circular por la red van a dar origen a caídas de tensión, haciendo que la amplitud de la tensión suministrada en un determinado punto y en un determinado instante sea función de las caídas de tensión acumuladas en todos los elementos de la red por la que se alimenta el cliente. Por tanto, para asegurar niveles mínimos de calidad en el suministro eléctrico es necesaria la cooperación de todos los agentes que intervienen en el proceso, el generador, el distribuidor y el propio consumidor.

La disminución de la calidad de la energía eléctrica produce pérdidas, calentamientos y otros efectos, pero el más importante es el mal funcionamiento o la avería de los equipos conectados a la red de distribución. Esto puede derivar en problemas importantes en un entorno residencial o comercial, pero en los procesos industriales, los efectos económicos que pueden producir por la parada o la avería de los equipos pueden llegar a ser muy graves.

II.1.- Interarmónicos

Los interarmónicos en las ondas de tensión y de corriente son componentes de frecuencia que no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.

Principalmente son producidos por cicloconvertidores, convertidores estáticos de frecuencia, convertidores subsincrónicos, motores de inducción, hornos de arco y equipos de soldadura de arco, pero en general, cualquier carga no pulsante sincrónicamente con la frecuencia fundamental es una fuente potencial de interarmónicos [15].

Hasta el momento han sido un tipo de perturbación poco estudiada, pero el incremento que están experimentando actualmente en las redes de distribución y los efectos que producen, hace que haya crecido el interés por su medida y análisis.

La medida de interarmónicos es una tarea compleja. Una señal con componentes interarmónicas no es necesariamente periódica y además, dependiendo del intervalo de observación, la señal puede aparecer como no simétrica. La figura 2 representa 10 períodos de una señal de 50 Hz con componentes armónicas e interarmónicas [16] cuyas frecuencias y amplitudes se muestran en la tabla 4.

Como se puede ver, la forma de onda representada no es ni periódica ni simétrica en el intervalo de tiempo indicado. Si esta señal se muestrease empleando una ventana de adquisición cuya duración fuese un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la red, se obtendrían errores importantes en la medida de sus componentes espectrales. Sería necesario aumentar la duración de la ventana de muestreo hasta conseguir que esta fuese sincrónica con la señal a analizar. Esto se conseguiría si la duración de la ventana ofreciese una resolución frecuencial igual al mínimo común múltiplo de las

distintas componentes de frecuencia que contiene la señal, de este modo cada una de las componentes presentes en la señal sería una de las frecuencias de salida que suministraría el análisis de Fourier. Sin embargo, al aumentar la duración de la ventana de muestreo, debido a la naturaleza no estacionaria de los interarmónicos de la red, se obtendrían de nuevo resultados erróneos ocasionados por el carácter no estacionario de la señal.

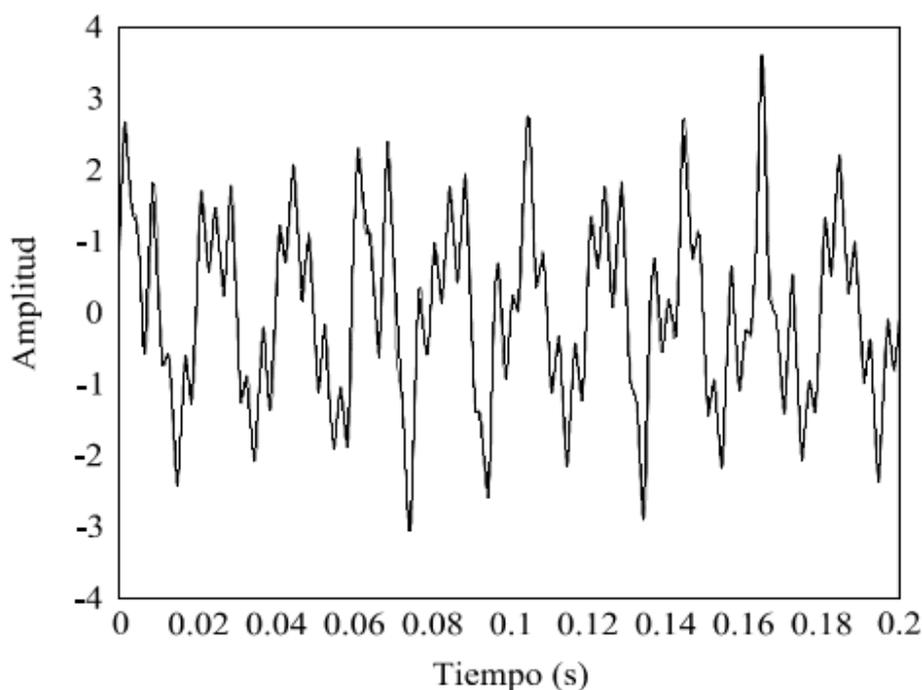


Figura n° 2.1. Señal con componentes armónicas e interarmónicas.

Frecuencia (Hz)	Amplitud (p.u.)
50	1
104	0.3
117	0.4
134	0.2
147	0.3
250	0.5

Tabla n° 2.1. Componentes frecuenciales de la señal de la figura n°2.1.

La magnitud de las componentes interarmónicas actualmente es muy reducida y su medida en presencia de otras componentes armónicas y de la propia componente fundamental puede quedar casi totalmente enmascarada. Sin embargo, el creciente número de equipos de electrónica de consumo conectados a la red cada vez introducen más de estas componentes interarmónicas y en conjunto se van aumentando sus niveles.

II.2.- Efectos de los interarmónicos

La propagación de interarmónicos en la red de distribución puede producir efectos nocivos en los equipos a los que se suministra energía eléctrica como:

- ✓ Efectos térmicos.
- ✓ Oscilaciones de baja frecuencia en sistemas mecánicos.
- ✓ Oscilaciones torsionales en máquinas eléctricas.
- ✓ Interferencias en señales de control y protección en líneas eléctricas.
- ✓ Sobrecargas en filtros paralelos para armónicos de alto orden.
- ✓ Interferencias en señales de telecomunicación.
- ✓ Perturbaciones acústicas.
- ✓ Saturación en transformadores de corriente.
- ✓ Flicker en sistemas de iluminación.

Desde un punto de vista técnico resultan de mayor interés los estándares y normas que debe cumplir la señal de la red, los límites de armónicos de tensión y de corriente, cómo deben ser medidos. Estos estándares provienen de diferentes fuentes de la que destacaremos dos: IEEE e IEC. El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, IEEE, es de origen norteamericano. La Comisión Electrotécnica Internacional, en adelante IEC, es de origen europeo y propone normas que más tarde son adoptadas por los países miembros de la Unión Europea, a través, del Comité Europeo de Normalización Electrotécnica, CENELEC. Cada país puede adoptar los estándares que

desarrollan estas instituciones y además desarrollar normativa propia e incorporarla a su legislación.

II.3.- Estándares asociados a la medida de armónicos e interarmónicos

El estándar IEC 61000-3-2 [17] establece los límites de corriente armónica para equipos con corriente de entrada inferior a 16 A por fase. El estándar IEC 61000-3-4 [6] lo hace para los equipos con corriente de entrada superior a 16 A por fase.

El estándar IEC 61000-3-3 [19] establece los límites de las fluctuaciones de tensión y del flicker en redes de baja tensión que pueden producir los equipos con corriente de entrada inferior a 16 A. El estándar IEC 61000-3-5 [20] lo hace para los de corriente de entrada superior a ese mismo valor.

El estándar IEC 61000-2-2 [21] establece los niveles de compatibilidad para las perturbaciones de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes de suministro público en baja tensión. Los niveles de compatibilidad que especifica se aplican al punto de conexión común (PCC).

El estándar IEC 61000-2-4 [22] se refiere a las perturbaciones en el rango de 0 a 9 kHz y sistemas de distribución hasta 35 kV y frecuencia nominal de 50 y 60 Hz. Los niveles de compatibilidad se especifican para las perturbaciones electromagnéticas que se puede esperar en cualquier punto común de acoplamiento dentro de las plantas industriales o de las redes públicas de distribución, para la orientación en:

- a) Los límites que se establece para la emisión de perturbaciones en los sistemas de energía de suministro industrial.
- b) La elección de niveles de protección para los equipos dentro de estos sistemas.

En cuanto al efecto de los subarmónicos junto con los interarmónicos sobre el efecto de flicker lumínico debemos señalar la existencia del medidor de flicker propuesto en IEC 61000-4-15 [23].

La IEC ha fijado niveles máximos de armónicos para la interconexión de equipos y su conexión a la red de distribución. Para las medidas de estos niveles ha desarrollado otros estándares que se centran en el proceso de medida.

La IEC establece un método de medida de armónicos e interarmónicos en su std. IEC 61000-4-7 [25]. Este estándar se aplica a la instrumentación destinada a la medida del espectro frecuencial de la señal en redes eléctricas para componentes espectrales inferiores a 9 kHz que se superponen a la componente fundamental, diferenciando entre armónicos, interarmónicos y componentes por encima del margen de frecuencias de los armónicos hasta 9 kHz.

Se establece un método de adquisición de muestras y se elige la Transformada Discreta de Fourier, DFT, como herramienta básica de análisis para conocer el contenido espectral de la señal. Se propone una estructura general del instrumento de medida que comprende un convertidor A/D que incluye una unidad de muestreo y retención, un sistema de sincronización y una ventana de ponderación junto con un procesador que realice la DFT y suministre los coeficientes de Fourier, amplitud y fase, de cada componente frecuencial de la señal en la salida 1 de la figura 2.2. Para la ventana de observación de la señal se establece una duración de 10 ciclos de la componente fundamental de la red de 50 Hz, es decir, 200 ms. En consecuencia la componente fundamental de la ventana y la resolución espectral de los datos que suministra es de 5 Hz. De este modo la componente fundamental de la red se corresponde con la décima línea espectral de la salida 1 [3].

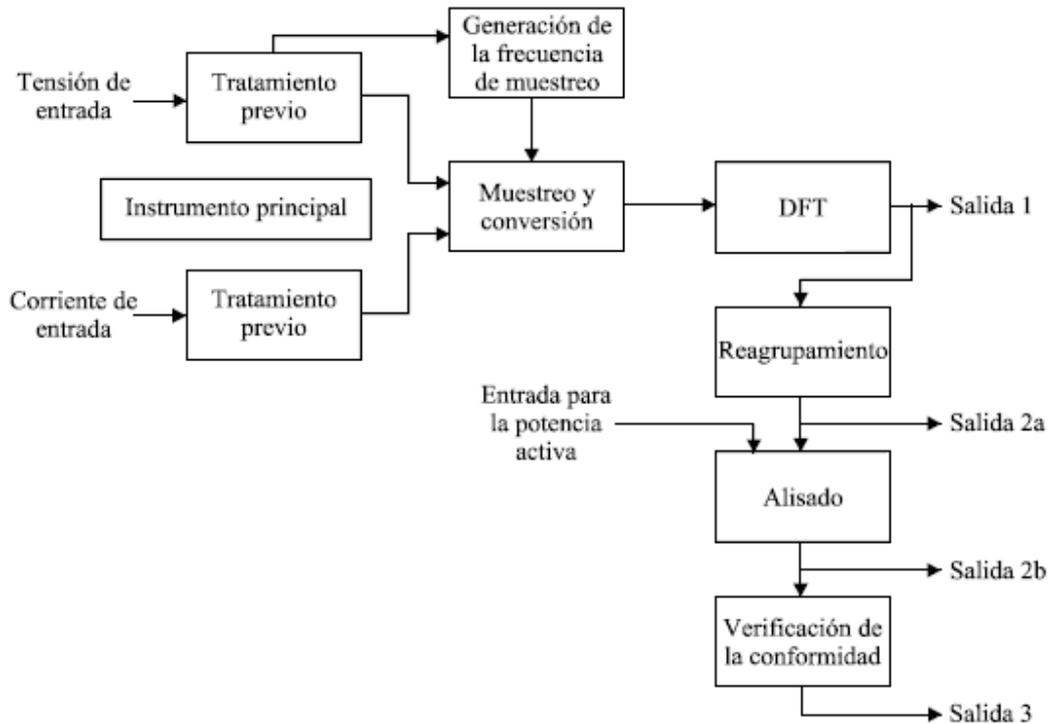


Figura 2.2. Estructura general del instrumento de medida del std. IEC 61000-4-7.

El std. IEC 61000-4-7 define cuatro agrupaciones de líneas espectrales, el grupo armónico, el subgrupo armónico, el subgrupo interarmónico centrado y el grupo interarmónico, con el objetivo de mejorar la medida del espectro de la señal, tratando de minimizar el efecto en la medida de las limitaciones del análisis de Fourier DFT.

El número de operaciones necesarias para realizar los cálculos de la DFT es de orden N^2 siendo N el número de muestras a procesar. El tamaño N de la muestras debe ser par y potencia de dos para obtener resultados correctos. La DFT suele ser implementada con un algoritmo estandarizado Transformada Rápida de Fourier o FFT, que aumenta la eficiencia computacional ya que el número de operaciones a realizar queda reducido a $N \log_2 N$ cuando N es par y potencia de 2. De este modo se optimiza el tiempo de cálculo necesario para el análisis de las señales.

El estándar IEC 61000-4-7 establece la definición de diferentes agrupaciones de las líneas espectrales resultantes de aplicar la DFT a la señal de una línea eléctrica. A cada una de estas

agrupaciones de líneas espectrales le corresponde un valor eficaz calculado a partir de los valores eficaces de las líneas que integran la agrupación.

Se define el valor eficaz de una componente armónica, G_n , como el valor eficaz de una de las componentes con una frecuencia armónica en el análisis de una onda no sinusoidal.

Habitualmente, una componente armónica se denomina armónica y se corresponden con la amplitud de una línea frecuencial con frecuencia múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la señal.

Se define el valor eficaz de un grupo armónico, $G_{g,m}$, como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados del valor eficaz de un armónico y de las componentes espectrales adyacentes a él dentro de la ventana temporal, sumando así el contenido energético de las barras espectrales vecinas a las del propio armónico.

$$G_{g,m}^2 = \frac{C_{k-5}^2}{2} + \sum_{i=-4}^4 C_{k+i}^2 + \frac{C_{k+5}^2}{2} \quad (2.1)$$

Donde C_{k+i} es el valor eficaz de la componente espectral correspondiente a una línea espectral.

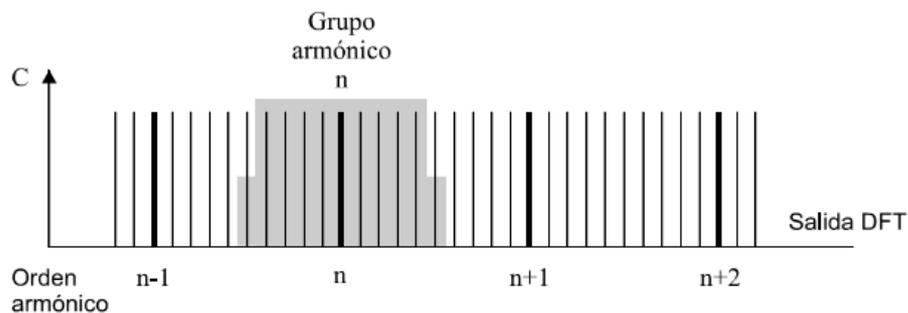


Figura n° 2.3. Líneas espectrales del grupo armónico.

Se define el valor eficaz de un subgrupo armónico, $G_{sg,m}$, como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados del valor eficaz de un armónico y de las dos componentes espectrales inmediatamente adyacentes a él.

$$G_{sg,n}^2 = \sum_{i=-1}^1 C_{k+i}^2 \quad (2.2)$$

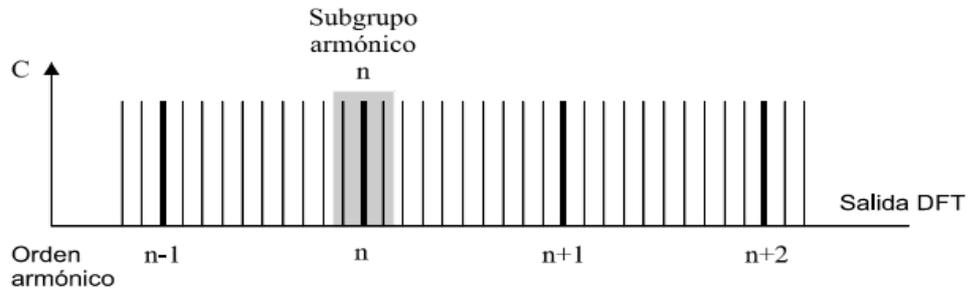


Figura n° 2.4. Líneas espectrales del subgrupo armónico.

Se define el valor eficaz de un grupo interarmónico, $G_{ig,m}$, como el valor eficaz de todas las componentes interarmónicas comprendidas en el intervalo entre dos frecuencias armónicas consecutivas.

$$G_{ig,m}^2 = \sum_{i=1}^p C_{k+i}^2 \quad (2.3)$$

Se denota $G_{ig,m}$ al valor eficaz del grupo interarmónico comprendido entre los armónicos n y $n+1$.

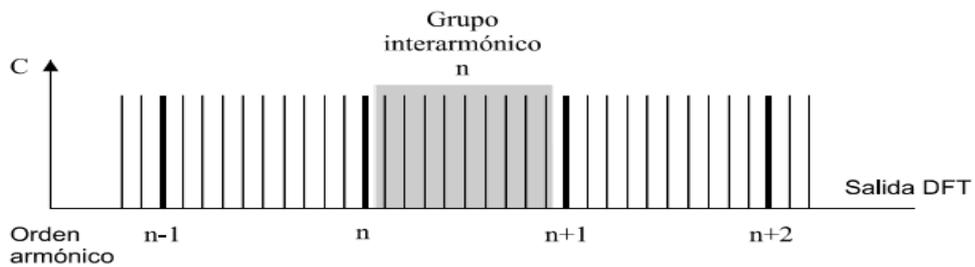


Figura n° 2.5. Líneas espectrales del grupo interarmónico.

Se define el valor eficaz de un subgrupo interarmónico centrado, $G_{isg,m}$, como el valor eficaz de todas las componentes interarmónicas comprendidas en el intervalo entre dos frecuencias armónicas consecutivas, excluyendo las componentes de frecuencias directamente adyacentes a las frecuencias armónicas.

$$G_{isg,n}^2 = \sum_{i=2}^6 C_{k+i}^2 \quad (2.4)$$

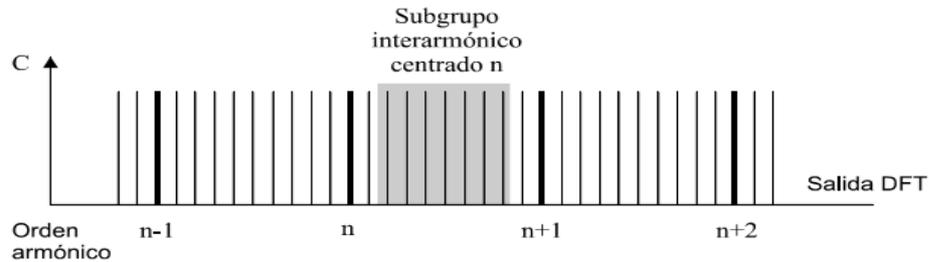


Figura n° 2.6. Líneas espectrales del subgrupo interarmónico centrado.

Después de realizar los agrupamientos definidos, estos deben ser suministrados en la 2ª salida del instrumento general de medida de la figura 2.2.

II.3.1- Estándar IEC 61000-4-30

El std. IEC 61000-4-30 [24] define los métodos de medida de los parámetros de calidad de suministro de las redes de corriente alterna y el modo de interpretar los resultados obtenidos. Los parámetros de calidad de suministro que considera son la frecuencia, la amplitud de tensión de alimentación, el flicker, los huecos de tensión y las sobretensiones temporales de suministro, las interrupciones de tensión, las tensiones transitorias, el desequilibrio, los armónicos e interarmónicos de tensión y de corriente, las señales transmitidas en la red y las variaciones rápidas de tensión.

La norma define los métodos de medida pero no expone ninguna especificación para su realización, de tal manera que los requisitos funcionales de los aparatos de medida quedan determinados por los márgenes de incertidumbre que la norma asigna a cada parámetro.

Describe los métodos de medida aplicable a cada tipo de parámetro de modo que sea posible la obtención de resultados fiables, reproducibles y comparables, cualquiera que sea el instrumento utilizado de acuerdo con la norma y cualesquiera que sean las condiciones de entorno en que se toman las medidas de la señal.

El std. IEC 61000-4-30 [24] define dos clases de método de medida, el método clase A y el método clase B. Dentro de cada uno define unos márgenes de incertidumbre en la medida de cada parámetro a evaluar.

El método clase A se aplica cuando se desean medidas precisas. El estándar indica como ejemplo de aplicación de este método las de carácter contractual, la verificación de la conformidad con las normas o las medidas para resolución de litigios.

Diferentes equipos que midan la misma señal cumpliendo los requisitos de la clase A producirán las mismas medidas dentro de los márgenes de incertidumbre que la norma específica. Los equipos que cumplan con los requisitos de clase A requieren un ancho de banda y una frecuencia de muestreo suficientes para la incertidumbre específica de cada parámetro.

El método clase B se aplica cuando no se requiere una gran precisión como puede ser el caso de estudios estadísticos.

II.3.2.- Agregación de intervalos de tiempo de medida

El std. IEC 61000-4-30 [24] establece que las medidas obtenidas de cada uno de los parámetros de calidad de la energía eléctrica deben ser promediadas a lo largo del tiempo. Los intervalos temporales de agregación están definidos para cada uno de los dos métodos.

II.3.2.1.- Método clase A

El intervalo de tiempo básico de medida de los parámetros de calidad de energía eléctrica debe ser de 10 periodos para una red de distribución eléctrica de 50 Hz, es decir la duración de la ventana de adquisición de muestras definida por IEC 61000-4-7 para la medida de armónicos e interarmónicos. Los intervalos de fluctuaciones de tensión son medidos en el tiempo y se utilizan tres intervalos diferentes:

- ✓ Intervalos de fluctuación de tensión de 3 segundos.
- ✓ Intervalos de fluctuación de tensión de 10 minutos.

- ✓ Intervalos de fluctuación de tensión de 2 horas.

II.3.2.2.- Método clase B

La norma deja al fabricante del aparato de medida de esta clase la elección del método, el número y la duración de los intervalos de agregación. No obstante, deberá dar indicaciones al usuario del aparato de estas características con el fin de que este pueda utilizar consecuentemente las medidas que obtenga.

El estándar, expone qué intervalos son de especial interés para cada uno de los parámetros de calidad de la energía eléctrica que contempla, es decir, indica los intervalos temporales de agregación en que queda caracterizado cada parámetro en el punto de medida. Por ejemplo, para la amplitud de tensión de suministro, entre otras consideraciones, sugiere utilizar como intervalo de medida un periodo de evaluación mínimo de una semana y tener en cuenta los valores de 10 minutos. Además aporta criterios de evaluación como, por ejemplo, contar el número de valores consecutivos que sobrepasen los valores contractuales máximos y mínimos.

II.3.3.- Algoritmo de agregación de medidas

Las agregaciones se calculan con la raíz cuadrada de la media aritmética de los cuadrados de los valores de entrada. Hay tres categorías de agregación:

- ✓ Agregación de periodos.

Son intervalos de 150 periodos de la frecuencia fundamental de la red que deben agruparse a partir de quince intervalos de 10 periodos y esto hace que la duración de este intervalo sea de 3 segundos.

- ✓ Agregación de periodos en tiempo de reloj.

Se calculan a partir de agrupaciones de 10 periodos y comprenden valores de 10 minutos, los cuales tienen que identificarse con el tiempo absoluto final de ese intervalo de agregación.

Al inicio de las medidas, el intervalo de 10 periodos debe comenzar en el límite absoluto de reloj de 10 minutos y debe ser sincronizado sucesivamente en cada límite siguiente del periodo de 10 minutos absoluto. Si el último valor de 10 periodos de una agregación de 10 minutos bordea el

límite absoluto final del periodo de reloj de 10 minutos, este valor de 10 periodos se incluirá en la agregación del intervalo.

- ✓ Agregación en tiempo de reloj.

Los datos de los intervalos de 2 horas se calculan a partir de la agregación de doce intervalos de 10 minutos.

II.4.- Aspectos generales sobre la normalización Chilena

II.4.1.- Aspectos generales

Desde principios de la década de 1960, con el desarrollo de los dispositivos de electrónica de potencia en rectificadores, accionamientos de motores, y fuentes de alimentación de tipo conmutadas, el crecimiento de niveles armónicos en los sistemas eléctricos ha preocupado a los especialistas. Desde 1980 el número de cargas no lineales y la presencia de armónicas en sistemas de distribución se han incrementado en forma preocupante. Con el correr del tiempo, la expansión del uso de accionamientos de velocidad variable de motores, y ballast electrónicos en sistemas comerciales y domiciliarios ha agravado esta situación. Por otra parte mantener los índices significativos de distorsión armónica hace necesario conocer el estado en el cual se encuentra el sistema eléctrico bajo todas las condiciones posibles de operación [4].

El siguiente es un listado de las normas técnicas que reglamentarán la calidad de suministro y en las que actualmente se encuentra trabajando la Comisión Nacional de Energía:

1. Procedimiento de mediciones y registros para determinar la calidad de suministro (artículo 241° del DS N°327/97);
2. Magnitudes de la tensión nominal de 50 Hz. (artículo 243° del DS N°327/97);
3. Interrupciones y fluctuaciones de tensión de duración inferior a tres minutos (artículo 243° y 245° del DS N°327/97);
4. Índices de continuidad de suministro (artículo 246° del DS N°327/97);
5. Índices de contaminación por inyección de armónicas de tensión y corriente (artículo 250° del DS N°327/97);

6. Factor de potencia (artículo 250° del DS N°327/97);
7. Índices de severidad de parpadeo o flicker (artículo 250° del DS N°327/97);
8. Valor efectivo máximo de la componente de secuencia negativa de tensión (artículo 244° del DS N°327/97).

II.4.2.- Aspecto de fondo sobre el desarrollo de los estándares

Los primeros estándares sobre inyección de armónicos llegaron desde Europa, en 1969, a través del comité europeo para la estandarización electrotécnica (CENELEC) y la comisión electrotécnica internacional (IEC) formando comités para investigar efectos de armónicas causadas por fuentes transistorizadas en los sistemas domiciliarios. La idea de tener normas que limiten los contenidos armónicos en los sistemas eléctricos se debe a la necesidad de:

- ✓ Controlar la distorsión de corriente y de tensión de un sistema eléctrico a niveles tales que no afecten la operación del sistema de distribución.
- ✓ Asegurar a los usuarios que puedan disponer de una fuente de alimentación de calidad aceptable.
- ✓ Prevenir que las distorsiones de tensión presentes en el sistema eléctrico afecte la operación de equipos de protección, medición, comunicación y/o computación.
- ✓ Limitar el nivel de distorsión en corriente que un cliente puede introducir a la red.

A raíz de esto, y de acuerdo con las características propias de los sistemas eléctricos de cada país, es que han surgido recomendaciones y normas diferentes, tanto en el espíritu para enfrentar el problema, como los valores límites tolerados. En estos momentos, en Chile se está estudiando la normalización sobre los niveles de tolerancia para la generación de armónicas que regirán al sistema eléctrico nacional. Sin embargo, mientras no se establezca esta norma técnica, existen disposiciones transitorias presentes en el reglamento eléctrico, que se asemejan a las recomendaciones prácticas propuestas por el std. 519 –1992 del IEEE [8], en cuanto a límites para distorsión de corriente, y al std. CENELEC en cuanto a límites para distorsión de tensión.

II.5.- Norma técnica de seguridad y calidad de servicio [45]

En la norma chilena 2009 se establecen los siguientes artículos:

Artículo 5-84.

Los usuarios deberán dar cumplimiento a los estándares de calidad de producto eléctrico del presente título, con el fin de limitar su contribución a la contaminación de la red.

Artículo 5-85.

Los clientes deberán operar sus instalaciones de modo de asegurar el funcionamiento dentro de los rangos aceptables exigidos en el presente artículo.

a) Armónicas de corriente

En condiciones normales de operación, se deberá cumplir para un período de registro de mediciones de una semana cualquiera del año o de siete días consecutivos que: el 95% de los valores estadísticos de las armónicas de corrientes y de su índice de distorsión total, cumplan con lo indicado en la tabla 2.2.

Orden de los armónicos (solo los impares) Expresada como porcentaje del valor de corriente máxima de carga a frecuencias fundamentales						
Isc/IL	h<11	Entre 11 ≤ h <17	Entre 17 ≤ h <23	Entre 23 ≤ h <35	h ≤ 35	Índice TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Tabla 2.2. Máxima distorsión armónica de corriente en el sistema eléctrico.

Las armónicas pares están limitadas al 25% de los límites establecidos para las armónicas impares. Se deberá controlar hasta la armónica 50.

Donde:

ISC es la máxima corriente de cortocircuito en el punto común de conexión (PCC).

PCC es el nudo más cercano de la red donde uno o más clientes obtienen energía eléctrica a través de sus instalaciones de conexión. En el caso de un sólo cliente en el extremo de una línea radial de alimentación debe elegirse el extremo de carga como PCC.

IL es la máxima corriente de carga (valor efectivo) de frecuencia fundamental en el PCC. Se calcula como el promedio de los doce valores previos de las máximas demandas mensuales.

TDD es la distorsión total de la demanda en % de la demanda máxima.

Además, debe tenerse en cuenta las siguientes situaciones:

- ✓ Para el caso de clientes en puntos comunes de conexión comprendidos sobre 69 kV, los límites son el 50% de los límites establecidos en la tabla 2.3.
- ✓ Si la fuente productora de armónicas es un convertidor con un número de pulsos "q" mayor que seis, los límites indicados en la tabla deberán ser aumentados por un factor igual a la raíz cuadrada de un sexto de "q".

El valor estadístico de las armónicas de corrientes y de su índice de distorsión será obtenido para cada intervalo de diez minutos, como resultado de evaluar estadísticamente un conjunto de mediciones efectuadas en dicho intervalo. Donde el índice de distorsión de corriente total está dado por:

$$THD_I = \left[\left(\sqrt{\sum_{k=2}^{50} I_k^2} \right) / I_1 \right] * 100 \% \quad (2.5)$$

Donde:

THD_I: es la distorsión total de corriente (%).

I_k: es la componente armónica de corriente de orden k.

I₁: es la componente fundamental de corriente.

b) Fluctuaciones de tensión

Las fluctuaciones de tensión se clasificarán en dos categorías de acuerdo a su duración: corta duración, desde 10 milisegundos hasta un minuto y larga duración, superiores a un minuto.

Las fluctuaciones de corta duración se clasificarán en:

- ✓ Instantáneas, de duración típica entre 10 milisegundos y 600 milisegundos y de magnitud típica entre 10% y 92,5% de la tensión nominal y entre 107,5% y 180%.
- ✓ Momentáneas, de duración típica entre 600 milisegundos y 3 segundos y de magnitud típica entre 10% y 92,5% de la tensión nominal y entre 107,5% y 140%.
- ✓ Temporales, de duración típica entre 3 segundos y un minuto y de magnitud típica entre 10% y 92,5% de la tensión nominal y entre 107,5% y 120%.

Las fluctuaciones de larga duración se clasificarán en:

- ✓ Caída de tensión de duración típica mayor que un minuto y de magnitud típica entre 80% y 92,5% de la tensión nominal.
- ✓ Subida de tensión de duración típica mayor que un minuto y de magnitud típica entre 107,5% y 120%.

Las disminuciones de tensión de magnitud típica bajo el 10% de la tensión nominal, serán interrupciones de tensión clasificadas según lo siguiente:

- ✓ Momentáneas: de duración típica entre 10 milisegundos y 3 segundos.
- ✓ Temporal: de duración típica entre 3 segundos y un minuto.
- ✓ Sostenida: de duración típica mayor que un minuto y de magnitud típica nula.

Para las fluctuaciones de tensión de corta duración, no se establece un límite máximo admisible. El CDEC podrá determinar un límite máximo a partir de estudios específicos. El límite máximo se deberá comunicar con un año de anticipación a su vigencia.

c) Severidad de flicker

Las instalaciones deberán ser operadas de modo de cumplir con los límites severidad de flicker de las normas internacionales IEC 868, EN 60868 y EN 61000-4-15.

- ✓ El parpadeo se mide en base a índices de severidad de corto plazo (P_{st}) y de largo plazo (P_{lt}), de la magnitud del flicker según establecen las normas indicadas.
- ✓ Las variables de medición en cada nudo deberán ser las tensiones fase-fase o fase-neutro, según corresponda, medidos en forma simultánea. A partir de las mediciones de las tres tensiones se deberá evaluar las variables calculadas: P_{st} (10 minutos) y P_{lt} (2 horas).
- ✓ A partir de las tensiones medidas se deberá proceder a determinar la magnitud del índice P_{st} para cada período de 10 minutos.

Una vez completado un intervalo de dos horas midiendo el índice P_{st} (doce valores del índice P_{st}) se procede a evaluar el índice P_{lt} (2 horas).

Al terminar el período de mediciones y registros, se procederá a determinar en cada uno de los nudos de medición y para cada una de las tres tensiones, el valor estadístico percentil 95 % para los índices P_{st} y P_{lt} . Entre los valores estadísticos correspondientes al percentil 95 % de P_{st} y P_{lt} , de cada fase, se elegirá el valor de mayor magnitud para ser comparado con los respectivos valores límites que se indican a continuación.

El índice de severidad de flicker, será evaluado estadísticamente en intervalos consecutivos de diez minutos, durante un período de registro de mediciones de una semana cualquiera del año o de siete

días consecutivos, y no deberá exceder en el sistema eléctrico, el valor de 1,0 para tensiones iguales o inferiores a 110 kV ni exceder 0,8 para tensiones superiores a 110 kV.

El índice de severidad de flicker, evaluado estadísticamente en intervalos consecutivos de dos horas durante un período de registro de mediciones de una semana cualquiera del año o de siete días consecutivos, no deberá exceder de 0.8 para tensiones iguales o inferiores a 110 kV ni exceder 0,6 para tensiones superiores a 110 kV.

d) Cargas desequilibradas

Para puntos de entrega a clientes en tensiones iguales o inferiores a media tensión, se deberá cumplir que el 95 % de los valores estadísticos registrados en una semana cualquiera del año o de siete días consecutivos, de la componente de secuencia negativa de la tensión, no deberá exceder el 2 % de la correspondiente componente de secuencia positiva. El valor estadístico de la componente de secuencia negativa de la tensión, será obtenido en cada intervalo de 10 minutos, como resultado de procesar un conjunto de mediciones efectuadas en dicho intervalo.

Para puntos de entrega en tensiones superiores a media tensión a clientes concesionarios de servicio público de distribución, que abastezcan usuarios sometidos a regulación de precios, se deberá cumplir que el 95 % de los valores estadísticos registrados en una semana cualquiera del año o de siete días consecutivos, de la componente de secuencia negativa de la tensión, no deberá exceder el 1.5 % de la correspondiente componente de secuencia positiva.

Artículo 5-86.

Las instalaciones de transmisión deberán limitar la contribución a la contaminación de la red operando sus sistemas de modo que la distorsión de armónicas de tensión esté en los rangos que se establecen en la norma IEEE 519-1992 y que se indican a continuación.

En todo sistema eléctrico, en condiciones normales de operación, se deberá cumplir para un período de registro de mediciones de una semana cualquiera del año o de siete días consecutivos, que el 95% de los valores estadísticos de las tensiones armónicas y de su índice de distorsión total, cumplen con lo indicado en la tabla siguiente. El valor estadístico de las tensiones armónicas y de

su índice de distorsión es obtenido para cada intervalo de diez minutos, como resultado de evaluar estadísticamente un conjunto de mediciones efectuadas en dicho intervalo. Se deberá controlar hasta la armónica 50.

Armónicas Impares no múltiplos de tres			Armónicas Impares múltiplos de tres			Armónicas Pares		
Orden	Vk(%)		Orden	Vk(%)		Orden	Vk(%)	
	≤110 kV	>110 kV		≤110 kV	>110 kV		≤110 kV	>110 kV
5	6	2	3	5	2	2	2	1.5
7	5	2	9	1.5	1	4	1	1
11	3.5	1.5	15	0.3	0.3	6	0.5	0.5
13	3	1.5	21	0.2	0.2	8	0.5	0.2
17	2	1	>21	0.2	0.2	10	0.5	0.2
19	1.5	1				12	0.2	0.2
23	1.5	0.7				>12	0.2	0.2
25	1.5	0.7						
>25	0.2+(1.3 *25/h)	0.2+(0.5 *25/h)						

Tabla 2.3. Máxima distorsión de armónicas individuales de tensión.

Los valores de tensiones armónicas se expresan en porcentaje de la tensión nominal. Respecto al índice de distorsión armónica se establece que al aplicar la estadística del 95 % a los valores registrados del índice de distorsión total armónica, se debe cumplir, para un período de registro de mediciones de una semana cualquiera del año o de siete días consecutivos y para tensiones iguales o inferiores a 110 kV, que este índice deberá ser inferior a 8%. Al aplicar la estadística del 95 % a los valores registrados del índice de distorsión total armónica, se debe cumplir, para un período de registro de mediciones de una semana cualquiera del año o de siete días consecutivos y para tensiones superiores a 110 kV, que este índice deberá ser inferior a 3% y se calculará de acuerdo con la siguiente expresión:

$$THD_V = \left[\left(\sqrt{\sum_{k=2}^{50} V_k^2} \right) / V_1 \right] * 100 \% \quad (2.6)$$

Donde:

THD_V: es la distorsión total de tensión (%).

V_k : es la componente armónica de tensión de orden n.

V₁ : es la componente fundamental de tensión.

En el caso de las instalaciones de alta tensión en corriente continua deberán limitar la contribución a la contaminación de la red según los estándares siguientes:

- ✓ Armónicas de corrientes según lo indicado en el Artículo 5-85 a) para el nivel de tensión que corresponda.
- ✓ Fluctuaciones de tensión según lo indicado en el Artículo 5-85 b) para el nivel de tensión que corresponda, llevará una estadística que se informara al CDEC.
- ✓ Severidad del parpadeo según lo indicado en el Artículo 5-85 c), para el nivel de tensión que corresponda.
- ✓ Armónicas de tensión según lo indicado en el presente artículo.

Artículo 5-87.

Las instalaciones de generación deberán limitar la contribución a la contaminación de la red de modo que las distorsiones de armónicas de tensión estén en los rangos que se indican en él.

Artículo 5-86.

Tratándose de unidades eólicas, éstas deberán limitar además la contribución a la contaminación de la red según los estándares siguientes:

- ✓ Armónicas de corrientes según lo indicado en el artículo 5-85 a) para el nivel de tensión que corresponda.
- ✓ Fluctuaciones de tensión según lo indicado en el artículo 5-85 b) para el nivel de tensión que corresponda. Solo se llevará una estadística que se informará al CDEC.
- ✓ Severidad del flicker según lo indicado en el artículo 5-85 c), para el nivel de tensión que corresponda.
- ✓ Armónicas de tensión según lo indicado en el artículo 5-86 para el nivel de tensión que corresponda.

Artículo 5-88.

La medición y el control de la calidad de producto eléctrico de los coordinados se realizarán mediante auditorías técnicas establecidas por la dirección de operación (DO) en el desarrollo de auditorías técnicas en el CDEC-SIC para cada caso. Las auditorías técnicas podrán ser solicitadas frente a una denuncia formal que reciba la DO al respecto de otro coordinado en cuanto a que no se estarían cumpliendo los estándares exigidos. En caso, que la auditoría técnica demuestre que la denuncia no era fundada, los costos de la auditoría recaerán en quien la formuló, en caso contrario los costos serán de quien esté incumpliendo los estándares, sin perjuicio de su obligación de ajustarse a los estándares de calidad de producto eléctrico.

La exactitud de las mediciones deberá ser compatible con la exigencia que se necesita controlar. Para controlar armónicas y pulsaciones de tensión se deberá usar instrumentación que cumpla con la condición de tener una exactitud mejor que el 5 % del límite de distorsión permitida.

3. CAPÍTULO III: CARACTERÍSTICAS DEL EFECTO FLICKER Y LAS FUENTES QUE LO PRODUCEN

III.1.- Fuentes de flicker

Existen equipos que producen fluctuaciones rápidas de tensión a nivel residencial, comercial e industrial.

A continuación se definirá compatibilidad electromagnética y el punto de acoplamiento común para desarrollar el tema de fuentes de flicker.

Compatibilidad electromagnética (CEM):

Capacidad de un aparato o de un sistema para funcionar en su entorno electromagnético, de forma satisfactoria y sin producir perturbaciones electromagnéticas intolerables para todo aquello que se encuentra en este entorno.

Punto de acoplamiento común (PCC):

Punto común entre el usuario o carga perturbadora y los posibles afectados. Este es el punto de la red de distribución, más próximo (eléctricamente) de un usuario, al que están o pueden ser conectados otros usuarios. El PCC se puede encontrar en el primario o secundario del transformador según donde se encuentre la carga perturbadora.

El flicker depende ampliamente de la impedancia de la red en el punto de acoplamiento común (PCC), el cual está clásicamente relacionado con el nivel de cortocircuito. El valor de la potencia de cortocircuito debe ser mayor que la potencia de las cargas conectadas para que no ocurra este fenómeno. Es por esto que cuando se tiene una fuente con una alta potencia de cortocircuito y baja impedancia se obtiene menores fluctuaciones de tensión ante fluctuaciones en la corriente de la carga.

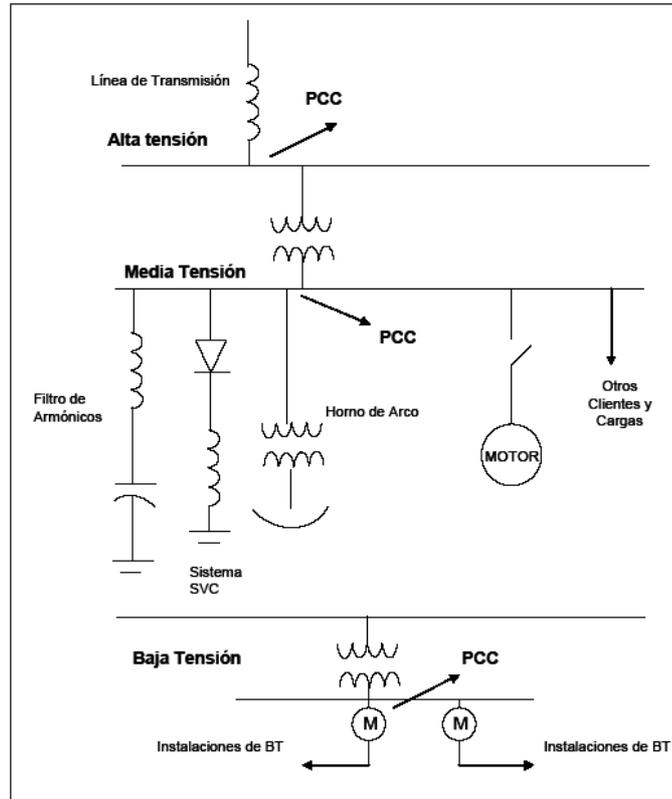


Figura n° 3.1. Diagrama unilineal de un sistema donde se observan varias localidades donde es posible observar fluctuaciones rápidas de tensión

III.1.1.- Detección de fuentes de flicker

El primer paso para detectar una fuente de fluctuaciones rápidas de tensión, es determinar el punto de medición (PCC), aguas arriba o aguas debajo de dicha fuente. Esta puede ser determinada examinando la variación en la magnitud de la corriente en el momento que fluctuaba la tensión.

Si la variación de corriente es pequeña con respecto a la variación de tensión entonces la perturbación está probablemente aguas arriba del punto de medición. Por el contrario una variación grande en la corriente acompañada por la fluctuación de tensión señalaría que la perturbación esta aguas abajo del punto de medición [1].

En general el flicker, tiene características variables en el tiempo y es necesario fijar un período de observación significativo y evaluar en modo estadístico la variación de la sensación instantánea en el mismo período.

III.1.2.- Fuentes industriales grandes

Es importante observar que las fluctuaciones de tensión causadas por las cargas industriales grandes podrían afectar a una gran cantidad de otros consumidores conectados a la misma red eléctrica. De estos equipos los que más comúnmente provocan este tipo de perturbación son: hornos de arco, soldadoras eléctricas, motores con cargas alternativas y arranques múltiples. En el caso de los hornos de arco y las soldadoras de arco las fluctuaciones de tensión causadas pueden ser pensadas como componentes interarmónicas de baja frecuencia.

III.1.2.1.- Hornos de Arco [6]

Esta carga a menudo representa el usuario más grande que pueda tener una compañía distribuidora de energía eléctrica. Se encuentran en industrias siderúrgicas y generalmente la distribuidora les provee más de 100 MVA. Este tipo de horno es considerado como el mayor productor de fluctuaciones de tensión ya que posee un alto factor de carga y de potencia durante su operación.

Dicha operación tiene dos períodos: fundición y refinación, pero es en el primer período cuando las fluctuaciones de tensión producidas por esta carga pueden afectar el funcionamiento del sistema eléctrico, además de producir flicker.

Existen dos parámetros que determinan las fluctuaciones de tensión producidas por el horno como lo son: la impedancia del sistema por arriba del PCC y la impedancia del transformador del horno.

III.1.2.2.- Motores con cargas alternativas y arranques múltiples

En esta categoría se incluyen principalmente grandes motores asíncronos (inducción): ventiladores, bombas, compresores, refrigeradores, ascensores, máquinas herramienta y grúas.

En el momento del arranque un motor absorbe una corriente tan grande que puede llegar a siete veces la corriente nominal, desarrollando a su vez un gran torque que puede llegar a ser 160% de su valor nominal. Esto trae como consecuencia caídas momentáneas de tensión en el sistema de distribución principal, dependiendo de las características de la red eléctrica y de otros equipos conectados.

Estas caídas de tensión pueden ocasionar el mal funcionamiento de los equipos que estén conectados al sistema eléctrico, pudiendo llegar a la interrupción total del servicio debido al disparo de protecciones de sobrecorriente.

III.1.2.3.- Generadores

Para el caso de generadores movidos por motor, el origen de las fluctuaciones de tensión del generador se arraiga en el cambio de fuerzas tangenciales y la velocidad angular.

Recientemente, este problema se confina a sistemas de potencia muy pequeños o donde existan casos de generadores movidos por motor usados como reserva.

III.1.2.4.- Turbinas de viento

Las turbinas de viento, al igual que cualquier generador eléctrico, son elementos electromecánicos que introducen la energía generada a la red. Se utilizan en forma aislada o en una granja de viento, cuando la conexión eléctrica a la subestación más cercana de electricidad sea débil, y donde la demanda local de electricidad pueda ser mucho menor que la capacidad de generación del viento.

La causa principal de flicker se debe a la conmutación entre encendido-apagado cuando el viento lleva al generador a una velocidad cercana a la velocidad de corte.

III.1.3.- Fuentes de menor tamaño

Incluye todos los elementos de estado sólido gracias a los cuales es posible obtener fuentes de poder ininterrumpidas, inversores, rectificadores, controladores de velocidad para motores.

A estos se le agregan: máquinas de rayos X, máquinas fotocopadoras, conmutación de bancos de condensadores para corrección del factor de potencia y algunas clases de equipos residenciales de BT.

III.1.4.- Efectos

Estas fluctuaciones pueden afectar el funcionamiento de equipos sensibles (sin llegar a daños irreparables), como lo son: sistemas digitales de control, electro medicina, PLC, instrumentación, anomalías en los sistemas de iluminación, en especial en lámparas incandescentes y de descarga. Los monitores y receptores de televisión tienen cierta sensibilidad a las fluctuaciones rápidas de tensión. Esta sensibilidad varía según el aparato.

Debido a que la sensación de fluctuaciones rápidas de tensión (Flicker) es acumulativa, se puede presentar cansancio visual y dependiendo de la frecuencia del fenómeno y de la sensibilidad de la persona que lo percibe, puede ocasionar cefaleas, migrañas, ser causa de estrés y hasta llegar a ser un riesgo de salud, particularmente para las personas propensas a la epilepsia debido a que puede ocasionar crisis convulsivas.

III.2.- Definición teórica de la molestia, cuantificación y medida del flicker

La cuantificación y la medida del fenómeno del flicker resultan bastante complejas, puesto que al mismo tiempo hacen intervenir factores técnicos, fisiológicos y psicológicos. ¿Cómo cuantificar y medir la sensación de molestia experimentada por el hombre? Se han llevado a cabo muchos estudios profundos sobre el análisis y la cuantificación del flicker en diversos países.

En este capítulo se presentan, en orden cronológico, las distintas etapas que han permitido que el flicker sea un fenómeno bien definido y cuantificado [7].

- ✓ Análisis experimental de la molestia notada por el hombre sometido a un flicker debido a fluctuaciones de tensión.
- ✓ Cuantificación del flicker y definición de unidades de medida: flicker instantáneo, dosis de flicker.

- ✓ Realización de un aparato de medida: el medidor de flicker.
- ✓ Introducción de los parámetros que definen la molestia por flicker: P_{st} (a corto plazo) y P_{lf} (a largo plazo).

Estas definiciones y parámetros son las que se utilizan actualmente. Otro parámetro, el $\Delta V10$, se utiliza habitualmente en Japón y en otros países.

III.2.1.- Dosis de flicker, definición de la molestia [5]

La “Dosis de flicker”, primer parámetro de cuantificación del flicker, utilizado en Francia, se ha establecido a partir de experimentaciones:

- ✓ La sensación de molestia es función del cuadrado de la amplitud de la fluctuación de la tensión y de la duración de ésta,
- ✓ La sensibilidad del observador medio a las fluctuaciones de iluminación es máxima alrededor de 10 Hz (8,8 Hz).

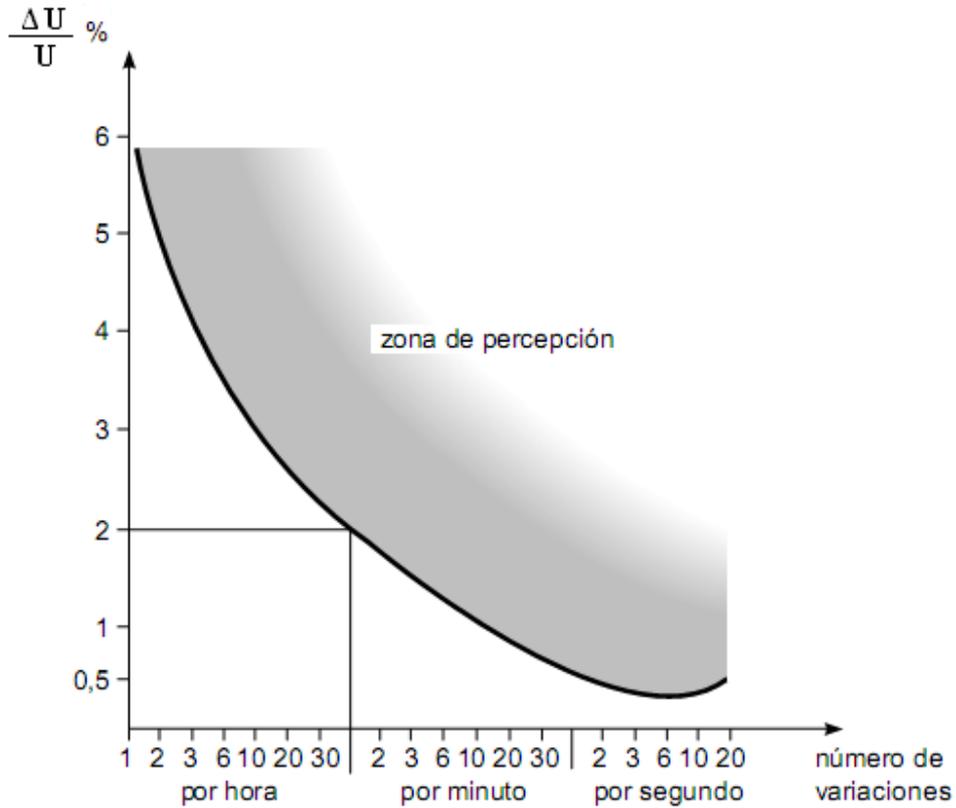


Figura n° 3.2. Límite de sensibilidad del ojo a las variaciones de iluminación causadas por fluctuaciones de tensión, en lámparas de incandescencia.

III.2.2.- Los parámetros P_{st} y P_{lt} [10]

La evaluación final de la severidad del flicker según la CEI 868 se expresa por dos parámetros: el P_{st} (corta duración) y el P_{lt} (larga duración). P_{st} y P_{lt} son las unidades de medida del flicker; magnitudes sin dimensiones físicas, a las cuales se les denomina parámetros. Mientras que el P_{st} se determina con un algoritmo utilizando los 5 puntos P0.1, P1, P3, P10 y P50 leídos sobre la FPC (Función de probabilidad acumulada), el P_{lt} se calcula a partir de varios valores de P_{st} . Así, el P_{st} se calcula sobre un período de 10 minutos, y el P_{lt} se calcula para 12 valores de P_{st} en un período de 2 horas. Estos parámetros valoran las distintas formas de FPC.

Este método de cuantificación del flicker tiene la ventaja de ser universal: independiente del tipo de fluctuación y por tanto independiente del tipo de perturbación.

Estos parámetros se calculan y se guardan a lo largo de todas las mediciones. Por ejemplo, para un cálculo de P_{st} en 10 minutos y con 2 horas para el P_{it} : después de un día de mediciones se dispone de 144 valores de P_{st} .

III.2.2.1.- Definición del P_{st} [5]

El P_{st} se define por la ecuación:

$$P_{st} = \sqrt{K_{0,1} * P_{0,1} + K_1 * P_1 + K_3 * P_3 + K_{10} * P_{10} + K_{50} * P_{50}} \quad (3.1)$$

Donde:

- ✓ P_n = niveles en la curva FPC que tienen una probabilidad n% de que sean superados.
- ✓ K_n = coeficientes de ponderación dados por la norma y que permiten que la curva límite de la CEI (figura nº 3.2) se corresponda con un $P_{st} = \text{constante} = 1$ (la curva CEI se determinó experimentalmente mucho antes de la definición del P_{st} . Así, el P_{st} representa la curva CEI.

La severidad de corta duración de un flicker, definida por la norma CEI 868-0, queda expresada por la ecuación:

$$P_{st} = \sqrt{0,0314 * P_{0,1} + 0,0525 * P_1 + 0,0657 * P_3 + 0,28 * P_{10} + 0,08 * P_{50}} \quad (3.2)$$

Donde:

- ✓ $P_{0,1}$ = Nivel superado solamente durante el 0,1% del período de observación.
- ✓ P_1 = Nivel superado solamente durante el 1% del período de observación.

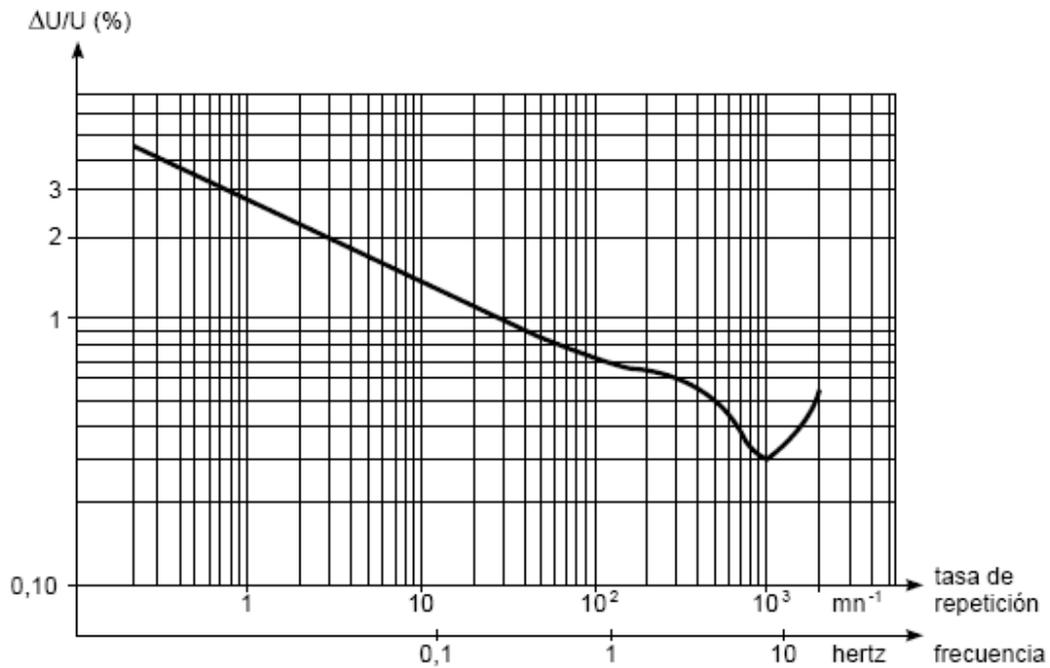


Figura n° 3.3. Curva límite de la molestia del flicker. Indica la amplitud de las fluctuaciones de tensión, en función de su frecuencia de repetición, para una severidad del flicker $P_{st} = 1$ (según CEI 868).

III.2.2.2.- Definición del P_{it} [5]

La severidad de un flicker de larga duración P_{it} se deduce de los P_{st} por la fórmula:

$$P_{it} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N P_{st_i}^3}{N}} \quad (3.3)$$

Donde P_{st_i} ($i=1,2,3, \dots$) son los valores consecutivos obtenidos de P_{st} . El P_{it} se ha de calcular a partir de los valores Pst en una duración adecuada según el ciclo de funcionamiento de la carga, o en un período durante el cual un observador pueda ser sensible al flicker, por ejemplo algunas horas (normalmente 2 horas).

El orden de magnitud del límite tolerable es $P_{lt} = 0,74$. Cuando hay distintos elementos contaminantes conectados a una misma red, el parámetro P_{st} global encontrado en un punto dado se calcula según la regla de suma siguiente:

$$P_{st} = \sqrt[m]{\sum_i (P_{st_i}^m)} \quad (3.4)$$

Habitualmente $m = 3$, pero pueden utilizarse otros valores.

III.2.3.- El medidor de flicker

Las fluctuaciones de tensión como las anteriormente descritas se pueden analizar con un aparato de medida: el medidor de flicker de la UIE (Unión Internacional de Electrotecnia). La norma CEI 868 describe las especificaciones funcionales de este aparato (figura 4.1) que son las siguientes:

- ✓ Adaptación de la tensión de entrada (bloque 1),
- ✓ Simulación de la respuesta lámpara - ojo -cerebro o cálculo del flicker instantáneo (tensión a la salida del bloque 4),
- ✓ Cálculo de la dosis de flicker (salida 4),
- ✓ Opcionalmente, valoración estadística del nivel de flicker; cálculo del FPC (función de probabilidad acumulada que se analizará en capítulos posteriores), Pst y P_{lt} (bloque 5).

Un primer medidor de flicker numérico totalmente estático lo realizó P. Duveau en 1971. Los medidores de flicker actuales proporcionan un gran número de parámetros distintos de medidas o de análisis: valor eficaz de la señal, sensación de flicker instantáneo, dosis de flicker por minutos, FPC, análisis estadístico, cálculos de los valores P_{st} y P_{lt} .

III.2.4.- El ΔV_{10} [12]

El parámetro ΔV_{10} se basa en la utilización de lámparas a 110 V. Se utiliza mucho en países del lejano Oriente, especialmente en Japón.

El ΔV_{10} es el valor de la amplitud de una fluctuación de tensión equivalente a una frecuencia de 10 Hz que produce la misma sensación de molestia que la fluctuación real. Se expresa como porcentaje de la tensión nominal.

Para una fluctuación de tensión idéntica, el flicker producido por las lámparas alimentadas a 110 V es ligeramente inferior al producido por las lámparas comparables alimentadas a 220 V.

En efecto, una lámpara de mayor potencia necesita una corriente más elevada, lo que requiere un filamento más grueso, de donde resultará una mayor inercia térmica frente a las variaciones.

La relación $\Delta V_{10}/P_{st}$ es de aproximadamente 1/3. Esta relación depende mucho de los tipos de perturbación y de las hipótesis de cálculo. Para los flickers debidos a los hornos de arco de corriente continua, esta relación varía entre 1/3,3 y 1/4,4 respectivamente.

III.2.5.- Otras magnitudes de medida

En los últimos años, la CEI ha hecho grandes esfuerzos para estandarizar la medida y la evaluación del flicker que se obtiene con la utilización de los parámetros P_{st} y P_{Tf} , pero existen otros parámetros de flicker además de los mencionados arriba. Sea porque provienen de reglamentaciones específicas (por ejemplo en los Estados Unidos) sea porque se utilizaban antes (por ejemplo el FGH-meter en Alemania, o el Gauge point en Gran Bretaña, o la Dose de flicker en Francia).

III.3.- Límites

Cada distribuidor de energía eléctrica vela por la calidad de la electricidad que suministra. Para cada tipo de perturbación, exigirá límites a la perturbación aportada por cada uno de sus clientes a

fin de asegurar un buen funcionamiento de toda su red. Los textos 1000-3-3, 1000-3-5 de la IEC fijarán los límites respecto al flicker; la norma IEC 1000-2-2 fija límites de compatibilidad.

III.3.1.- Niveles de compatibilidad de P_{st} y P_{lt}

La calidad de la electricidad frente al flicker se expresa según las dos magnitudes: P_{st} y P_{lt} . A cada uno de estos parámetros y a los tres niveles de tensión BT, MT y AT se les asigna un nivel de compatibilidad, o límite teórico tolerable (tabla 3.1). Estos valores expresan los niveles que no hay que sobrepasar en una red para evitar un flicker molesto.

Observaciones:

- ✓ Estos valores no son los límites aceptables de flicker de un único perturbador o de una única fábrica.
- ✓ Estos valores son niveles de compatibilidad teórica y están destinados a servir como valores de referencia en caso de molestia probada y con una finalidad de planificación, pero un distribuidor siempre puede imponer otros límites a sus clientes.

En BT, estos valores de límites aceptables tienen un significado físico. Están basados en sensaciones de molestia real: El valor $P_{st} = 1$ corresponde a un umbral de molestia experimentada por un observador medio.

En la práctica, el flicker se atenúa a menudo por el efecto estabilizador de la tensión debido a los motores y generadores conectados a todos los niveles de tensión aguas abajo de la red de AT considerada. El factor de atenuación varía entre 0,5 y 0,8, según la potencia de los motores y de los generadores instalados.

Límites aceptables de flicker para planificación			
	BT ≤ 1000 V	1 kV ≤ MT ≤ 35 kV	AT > 35 kV
P_{st}	1.00	1.00	0.79
P_{lt}	0.74	0.74	0.58

Tabla 3.1. Límites aceptables y niveles de compatibilidad teórica de P_{st} y P_{lt} para distintos niveles de tensión, según publicación de la UIE.

III.3.2.- Límites de ΔV_{10}

El valor eficaz del ΔV_{10} , medido durante 1 minuto se define como ΔV_{10s} (short time, es decir, corta duración), con los siguientes límites:

- ✓ Umbral de percepción: $\Delta V_{10s} = 0,32\%$.
- ✓ Umbral de molestia: $\Delta V_{10s} = 0,45\%$ (Igual a 1 p.u. ΔV_{10}). El cuarto valor mayor de ΔV_{10} se compara con el límite a corto plazo exigido. La media de los resultados de una hora se compara con el límite a largo plazo exigido.

III.4.- Determinación del flicker en una instalación [11]

La primera y más sencilla determinación previa de flicker se realiza analizando la relación entre la potencia de la carga perturbadora y la potencia de cortocircuito de la red. Como norma general, el flicker no provoca ninguna molestia si la potencia aparente del conjunto de las cargas perturbadoras es inferior al 1% de la potencia de cortocircuito de la red en el punto común de conexión (PCC).

Entre el 1% y el 2% hay una zona de incertidumbre donde la molestia admisible depende en gran parte del tipo de carga, de la proximidad a las redes de alumbrado.

Existen varios métodos aproximados basados principalmente en la extrapolación de medidas de flicker tomadas de instalaciones semejantes o basadas en un método analítico que calcula el parámetro P_{st} de una instalación a partir de las características de la variación de tensión.

III.4.1.- Método cualitativo

El método cualitativo especifica que:

- ✓ Como norma general, el flicker no provoca ninguna molestia si la potencia aparente del conjunto de las cargas perturbadoras es inferior al 1% de la potencia de cortocircuito de la red en el punto común de conexión.

- ✓ Entre el 1 y el 2% hay una zona de incertidumbre donde la molestia admisible depende en gran parte del tipo de carga y de la proximidad a las redes de alumbrado.
- ✓ Por encima del 2% hay que tomar medidas para reducir el flicker al nivel admisible. En la zona de incertidumbre y más arriba, es necesario conocer la tasa de flicker de la carga a instalar a fin de evaluar la necesidad de reducción del flicker. Se han propuesto varios métodos aproximados basados principalmente en la extrapolación de medidas de flicker tomadas de instalaciones semejantes o basadas en un método analítico que calcula el parámetro P_{st} de una instalación a partir de las características de la variación de tensión.

III.4.2.- Método analítico

Este método [23] puede utilizarse de manera general para perturbaciones repetitivas. Como punto principal, incluye un coeficiente que depende de la forma de la variación de tensión.

El P_{st} puede estimarse según la fórmula:

$$P_{st} = 0,365 * \Delta * F * r^{0,81} * R \quad (3.5)$$

Donde:

- ✓ Δ : variación relativa de la tensión en %.
- ✓ r : tasa de repetición de la variación de tensión.
- ✓ R : coeficiente dependiente de la tasa de repetición ($R \approx 1$ para $r \leq 1000$ y disminuye muchísimo para $r > 1000$).
- ✓ F : factor de equivalencia, dependiente de la forma de la fluctuación de la tensión ($F \approx 1$ para las fluctuaciones bruscas: escalones u ondas cuadradas, y $0,9 < F < 1$ para fluctuaciones suaves: sinusoides, rampas).

III.4.3.- Método para los hornos de arco [4]

Se proponen dos métodos para la estimación del flicker:

- ✓ El primero se basa en la dosis de flicker antiguamente utilizada en Francia.
- ✓ El segundo método calcula el valor de P_{st} .

Dosis de flicker

La dosis de flicker generada por un horno de arco de corriente alterna (esquema eléctrico equivalente dado en la figura 3.4 se obtiene por la ecuación:

$$G = k^2 * \left(\frac{X_n}{X_n + X_f} \right)^2 * t \quad (3.6)$$

Donde:

- ✓ X_n : la reactancia de cortocircuito aguas arriba de la red de alimentación, vista desde el Punto Común de Conexión (PCC).
- ✓ X_f : toda la reactancia de cortocircuito aguas abajo vista desde el PCC hasta el horno en cortocircuito, cuando los electrodos del horno están inmersos.
- ✓ k : coeficiente experimental (determinado a partir de una cincuentena de instalaciones: $k = 11,25$).
- ✓ t : duración de la observación; por ejemplo 1 minuto.

El límite máximo de la dosis de flicker estimada considerada habitualmente como admisibles es: $G = 0,09$ (%).

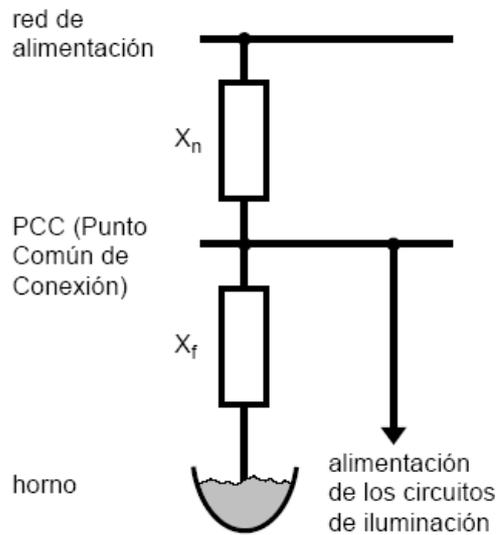


Figura 3.4. Esquema eléctrico equivalente de la alimentación eléctrica de un horno de arco.

De aquí proviene la siguiente regla: el riesgo de perturbaciones molestas debidas a un horno de arco de corriente alterna se estima como casi nulo:

- ✓ Si la reactancia de cortocircuito de la red X_n y la reactancia de cortocircuito del horno X_f están en una relación tal que $X_f/X_n > 36$.
- ✓ Si la potencia de cortocircuito de la red (S_{ccn}) y la potencia de cortocircuito del horno (S_{ccf}) están en una relación tal que $S_{ccn}/S_{ccf} > 36$.

Recordatorio: en AT, las resistencias son despreciables frente a las reactancias. Mediante el método actual puede obtenerse una estimación del valor de P_{st} para un horno de arco de corriente alterna con la ayuda de la fórmula experimental:

$$P_{st} = K_{st} * \frac{S_{ccf}}{S_{ccn}} * \frac{1}{R_{SVC}} \quad (3.7)$$

Donde:

- ✓ K_{st} : coeficiente experimental (comprendido entre 48 y 85, con un valor medio igual a 61, y un valor aconsejado igual a 75).
- ✓ S_{ccf} : potencia de cortocircuito del horno.
- ✓ S_{ccn} : potencia de cortocircuito de la red a nivel del PCC.
- ✓ R_{SVC} : factor de reducción aportado por una instalación de compensación estática.
- ✓ $\frac{C_{HT}}{BT}$: coeficiente de atenuación para la transmisión del flicker de la AT hacia la BT (entre 0,5 y 1).

El nivel de flicker generado por un horno de arco de corriente continua es aproximadamente la mitad del emitido por un horno comparable de corriente alterna.

4. CAPÍTULO IV: ESTADO DEL ARTE EN METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS DE FLICKER Y SU RELACIÓN CON INTERARMÓNICOS

Hemos planteado en capítulos anteriores que en las redes de distribución de energía eléctrica son varios los tipos de distorsión de las señales de tensión y/o corrientes que pueden afectar directa o indirectamente a los consumidores finales de energía eléctrica.

Uno de estos fenómenos es el llamado flicker o parpadeo, que se define como el cambio en los niveles de iluminación debido a las fluctuaciones de tensión, sensibles a la mayoría de las personas. Por tanto, estos cambios en los niveles de iluminación pueden afectar en la eficacia en el trabajo de las personas, en su salud y seguridad [26]. La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) especifica un instrumento capaz de medir la severidad del parpadeo que se denomina medidor de flicker [27].

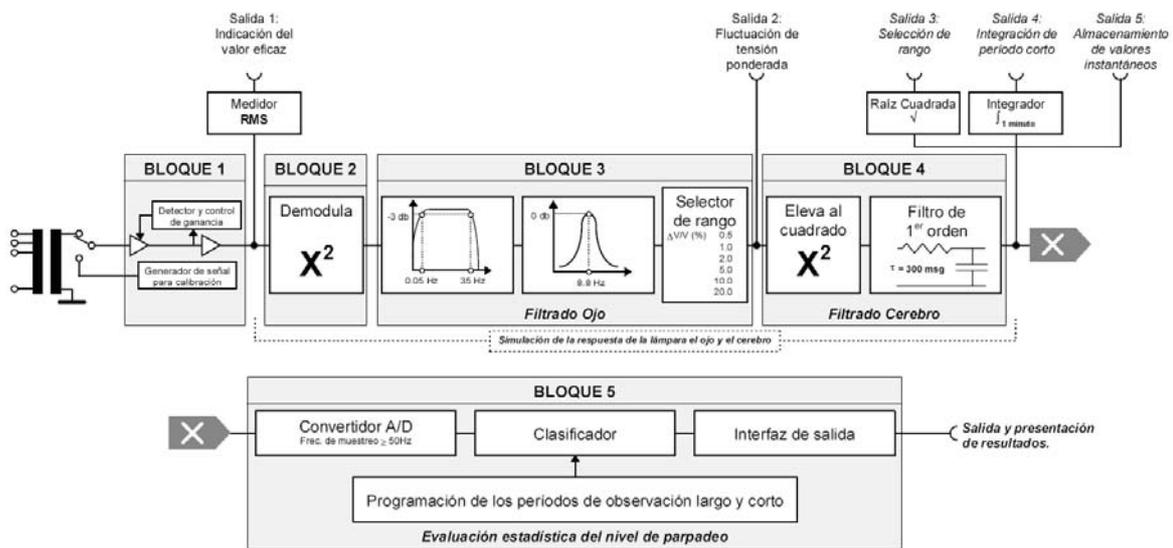


Figura 4.1. Diagrama de bloques del medidor de flicker de la IEC.

IV.1. - Un nuevo acercamiento del dominio de la frecuencia para la evaluación de flicker de hornos de arco [13]

Autores: Araceli Hernández, Julio G. Mayordomo, Rafael Asensi, and Luis F. Beites.

En este estudio se aborda el tema del análisis que se ha propuesto en distintos estudios realizados con el medidor de flicker de la IEC [33], en donde además se estudiara el planteamiento matemático de este, que se conoce como método del dominio de la frecuencia. También, se realiza un estudio para validar este método y llevarlo a la práctica en un horno de arco.

El std. IEC 61 000-4-15 [30] proporciona las especificaciones del funcionamiento para el medidor de flicker, así como el método para la medición de la severidad del parpadeo de los datos de salida del medidor de flicker. La arquitectura de medidor de flicker es descrita por el diagrama de bloques de la figura 4.1 y se puede dividir en dos porciones, cada uno que realiza las siguientes tareas:

- ✓ Simulación de la respuesta lámpara-ojo-cerebro;
- ✓ El análisis estadístico de la señal de parpadeo y la presentación de los resultados.

La primera tarea es realizada por los bloques 2, 3, y 4 de la figura 4.1., mientras que la segunda tarea es lograda por el bloque 5.

El método propuesto simula el comportamiento de los bloques 1, 2, 3 y 4 donde la tensión de entrada se puede expresar como:

$$u(t) = U_0 \text{sen}(w_0 t + \phi_0) + \sum_{i=1}^{\infty} U_i \text{sen}(w_i t + \phi_i) \quad (4.1)$$

Donde:

- ✓ U_0 : Amplitud fundamental.
- ✓ w_0 : Frecuencia fundamental.
- ✓ U_i : Amplitud armónica e interarmónica.
- ✓ w_i : Frecuencias armónicas e interarmónicas.

Para este análisis se utilizarán las frecuencias interarmónicas cerca de la fundamental que producen la modulación de una frecuencia en la gama de perceptibilidad humana.

En los párrafos siguientes, la respuesta de cada bloque será analizada si se asumen ciertas simplificaciones, permitiendo de esta manera el cálculo directo de parámetros significativos como el P_{st} y el P_{it} .

IV.1.1.- Bloque 1. Adaptador de tensión

El bloque 1 adapta la tensión de entrada a una escala menor para que el instrumento sea capaz de medir al valor rms de la tensión. Por lo tanto, la salida del bloque se expresa como:

$$u_{B1}(t) = U_0' \text{sen}(w_0 t + \phi_0) + \sum_{i=1}^{\infty} U_i' \text{sen}(w_i t + \phi_i) \quad (4.2)$$

Donde:

U_0' y U_i' son amplitudes relativas de tensión.

IV.1.2.- Bloque 2. Demodulador de variación cuadrática

El propósito de este bloque es extraer la fluctuación de tensión de la señal ajustada a la entrada, al nivel de referencia. Así, la salida de este bloque es:

$$u_{B1}^2(t) = (U_0' \text{sen}(w_0 t + \phi_0) + \sum_{i=1}^{\infty} U_i' \text{sen}(w_i t + \phi_i))^2 \quad (4.3)$$

$$u_{B2}(t) = u_{B1}^2(t) = \frac{1}{2} U_0'^2 (1 - \cos 2(w_0 t + \phi_0)) +$$

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{\infty} U_i'^2 (1 - \cos 2(w_i t + \phi_i)) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{\infty} U_i' U_0'$$

$$\times [\cos(w_{0i} t + \phi_{0i}) - \cos((w_0 + w_i)t + \phi_0 + \phi_i)]$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{\substack{j=1 \\ \text{for } j \neq i}}^{\infty} U_i' U_j' \times [\cos(w_{ij}t + \phi_{ij}) - \cos((w_i + w_j)t + \phi_i + \phi_j)] \quad (4.4)$$

Con:

$$w_{oi} = w_0 - w_j ; \quad \phi_{oi} = \phi_0 - \phi_i$$

$$w_{ij} = w_i - w_j ; \quad \phi_{ij} = \phi_i - \phi_j$$

Donde i y j son el índice para la frecuencia armónica o interarmónica utilizada, excepto para la frecuencia fundamental w_0 .

IV.1.3.- Bloque 3. Filtros

Este bloque está compuesto de un filtro demodulador y de un filtro de carga. El filtro demodulador consiste en un filtro de primer orden pasa alto y un filtro de sexto orden pasa bajo (Butterworth). De acuerdo con las recomendaciones de la IEC [30], el filtro pasa alto tiene 0.05 frecuencias de corte para eliminar la componente dc., mientras que el filtro pasa bajo tiene una frecuencia de corte de 35 Hz. La respuesta de amplitud de estos filtros se aprecia en la figura 4.2.

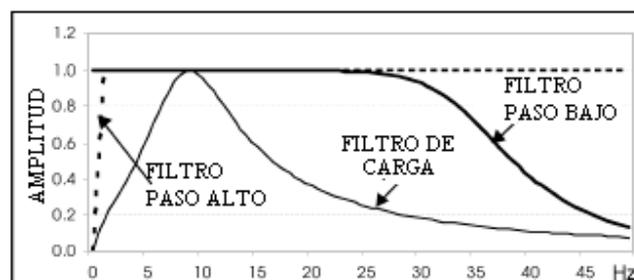


Figura 4.2. Respuesta de amplitud de los filtros del demodulador y del filtro de carga.

El efecto combinado de estos filtros atenúa las frecuencias fuera del rango de 0.05 – 35 Hz. Por lo tanto, la componente dc de la ecuación (4.4) así como los términos que incluyen frecuencias de $2w_0$, w_i y w_0 se suprimen. Por otra parte, si se asume que los términos afectados con el producto

de U_i' y U_j' o $U_i'^2$ son muy pequeños comparados al valor del producto de $U_0'U_i'$ se le eliminan en la ecuación (4.4) todos los valores despreciables, lo cual lleva a la siguiente expresión:

$$u_{B2}'(t) \cong \sum_{i=1}^{\infty} U_0'U_i' \cos(\omega_{0i}t + \phi_{0i}) \quad (4.5)$$

Donde:

- ✓ $u_{B2}'(t)$: Representa la salida del filtro del demodulador.

El filtro de la carga simula la respuesta de frecuencia a las fluctuaciones de una lámpara combinada con las características del sistema visual humano. Este filtro se puede representar en el dominio de frecuencia por su función de transferencia compleja $Fw(w) = Fw(w)\angle\theta$.

Entonces, la salida del bloque 3 se puede expresar como:

$$U_{B3}'(t) = \sum_{i=1}^{\infty} Fw(\omega_{0i})U_0'U_i' \cos(\omega_{0i}t + \phi_{0i} + \varphi w(\omega_{0i})) \quad (4.6)$$

El término $Fw(\omega_{0i})$ alcanza su valor máximo para $f_{0i} = 8.8$ Hz.

Por lo tanto, el interarmónico más significativo para la evaluación del parpadeo serán las frecuencias que están cercanas a $f_0 \pm 8.8$ Hz.

IV.1.4.- Bloque 4. Estimación no lineal de la variación

Se compone de un multiplicador y de una función de integración cuyo objeto es simular el efecto del almacenaje del cerebro humano. Esta función es ejecutada por un filtro de primer orden pasa bajo con una constante de tiempo igual a **300ms**, es decir, una frecuencia de corte de 0.53 Hz. La función de transferencia de este filtro es:

$$F_{LP}(w) = \frac{1}{1 + j0.3w} = F_{LP}(w) \angle \varphi_{LP}(w)$$

El uso del multiplicador y del filtro de pasa bajo se expresa en (4.7):

$$\begin{aligned} u_{B4}(t) &= \frac{U_0'^2}{2} \sum_{i=1}^{\infty} F_W^2(w_{0i}) U_i'^2 \times [1 + F_{LP}(2w_{0i}) \cos 2(w_{0i}t + \theta_{0i})] \\ &+ \frac{U_0'^2}{2} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{\infty} F_W(w_{0i}) F_W(w_{0j}) U_i' U_j' \\ &\times [F_{LP}(w_{ij}^+) \cos(w_{ij}^+t + \theta_{ij}^+) + F_{LP}(w_{ij}^-) \cos(w_{ij}^-t + \theta_{ij}^-)] \quad (4.7) \end{aligned}$$

Donde:

$$w_{ij}^+ = w_{0i} + w_{0j} = 2w_0 - w_i - w_j$$

$$w_{ij}^- = w_{0i} - w_{0j} = w_j - w_i$$

$$\theta_{0i} = \phi_{0i} + \varphi_W(w_{0i}) + \varphi_{LP}(w_{0i});$$

$$\theta_{0j} = \phi_{0j} + \varphi_W(w_{0j}) + \varphi_{LP}(w_{0j});$$

$$\theta_{ij}^+ = \phi_{0i} + \phi_{0j} + \varphi_W(w_{0i}) + \varphi_W(w_{0j}) + \varphi_{LP}(w_{ij}^+);$$

$$\theta_{ij}^- = \phi_{0i} - \phi_{0j} + \varphi_W(w_{0i}) - \varphi_W(w_{0j}) + \varphi_{LP}(w_{ij}^-);$$

Así, $u_{B4}(t)$ debe ser escalar para ser expresado en unidades de la perceptibilidad para:

$$S(t) = K u_{B4}(t) \quad (4.8)$$

Donde:

- ✓ $S(t)$ representa una estimación de la sensación instantánea del parpadeo.

En la ecuación (4.8) se consideran las simplificaciones adoptadas en el bloque 3. Una salida de la unidad para $S(t)$ corresponde al umbral humano de la perceptibilidad del parpadeo de la referencia.

El valor de k se elige de modo que la sensación instantánea del parpadeo deba ser igual a la unidad para las fluctuaciones sinusoidales y rectangulares de tensión que se indican en [30].

El filtro de paso bajo atenúa considerablemente la componente de la ondulación de $S(t)$. Por lo tanto, el componente más relevante de la ecuación (4.7) es el componente dc. El componente dc (S_{dc}), de la sensación instantánea de parpadeo, $S(t)$ se puede obtener a partir de las ecuaciones (4.7) y (4.8) y toma la siguiente forma:

$$S_{dc} = \frac{KU_e^2}{2} \left(\sum_{i=1}^{\infty} F_W^2(w_{0i}) U_i'^2 + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{\substack{j=1 \\ w_{ij}^{\neq 0}}}^{\infty} F_W^2(w_{0i}) U_i' U_j' \cos(\phi_{0i} + \phi_{0j}) \right) \quad (4.9)$$

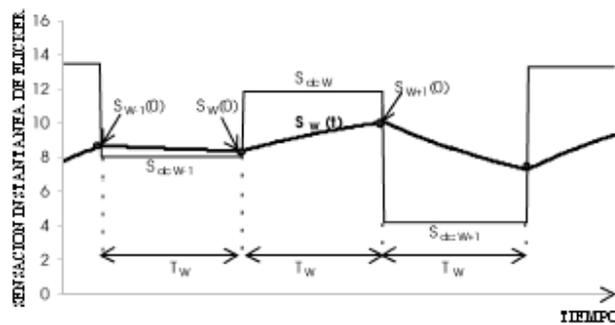


Figura 4.3. Evolución de $S(t)$, con $T_w = 200ms$.

Es importante observar que el segundo término de la ecuación (4.9) toma un valor solo cuando el término $w_{ij}^{\neq 0}$ es igual a cero. En este caso, se deben satisfacer las siguientes condiciones:

Donde:

- ✓ Las frecuencias w_i, w_j son equidistantes de la frecuencia fundamental w_0 , esto se expresa como $w_0 - w_i = -(w_0 - w_j)$.
- ✓ La función de transferencia del filtro pasa bajo es $F_{LP}(0) = 1L0^0$.

- ✓ El par de interarmónicos equidistantes i, j , satisfacen las condiciones:

$$F_W(w_{0i}) = F_W(w_{0j}) \quad \text{y} \quad \varphi_W(w_{0i}) = -\varphi_W(w_{0j})$$

Por lo tanto, la ecuación (4.9) representa una forma para evaluar directamente la sensación instantánea del parpadeo de componentes de tensión interarmónica. Particularmente, el primer término de la ecuación (4.9) es debido a la contribución individual de cada uno de los interarmónicos, mientras que el segundo término es debido a la contribución de un sistema de pares del interarmónicos equidistantes. En esta fórmula, la base del cálculo es la magnitud de las tensiones interarmónicas.

IV.1.5.- Sensación instantánea del parpadeo para los hornos de arco

La ecuación (4.9) relaciona el valor del componente dc de la sensación instantánea, S_{dc} con el espectro interarmónico de la señal de tensión de entrada. En el caso de hornos de arco, el espectro armónico de tensión varía considerablemente en las ventanas consecutivas del tiempo. Por lo tanto, el comportamiento transitorio del medidor de flicker de la IEC se asoció al S_{dc} a los valores diferentes obtenidos en cada una de las ventanas, se debe reproducir según lo indicado en figura 4.3, se domina este transiente para el momento en que la constante $\tau = 300ms$ en el filtro de pasa bajo del bloque 4. La respuesta de este filtro puede ser dada como:

$$S_W(t) = S_W(0)e^{-t/\tau} + S_{dcW}(1 - e^{-t/\tau}) \quad (4.10)$$

$$\text{Con } 0 \leq t \leq T_W$$

Donde $S_W(0)$ es el valor inicial de la ventana W de tiempo, que corresponde al valor final de la ventana de tiempo anterior, tomando en consideración el interruptor $S_W(0) = S_{W-1}(T_W)$ según las indicaciones de la figura 4.3.

De acuerdo con este análisis, es posible caracterizar la evolución del interruptor $S_W(t)$, sabiendo solamente el valor de S_{acW} adentro de cada ventana de tiempo T_W . Por lo tanto, si una prueba del período T_{sc} en un tiempo n de observación de las ventanas ($T_{sc} = nT_W$), se consideran sólo los valores de n que son necesarios para reproducir la sensación instantánea de parpadeo $S(t)$. Por ejemplo, con $T_W = 200ms$ (como se recomienda adentro [23]), y $T_{sc} = 10$ minutos, se almacenan 3000 valores de S_{acW} para evaluar $S(t)$ en un análisis fuera de línea. Para un índice de muestreo típico de 400 Hz, el uso de la ecuación (4.10) a éstos valores de S_{acW} proporcionan 240.000 valores intermedios dentro del intervalo $T_{sc} = 10$ minutos. Este último cálculo puede acelerar la evolución lineal de $S(t)$ sabiendo que:

$$S_W(t) \cong S_W(0) + \frac{t}{T_W} (S_{W+1}(0) - S_W(0)) \quad (4.11)$$

Con $0 \leq t \leq T_W$

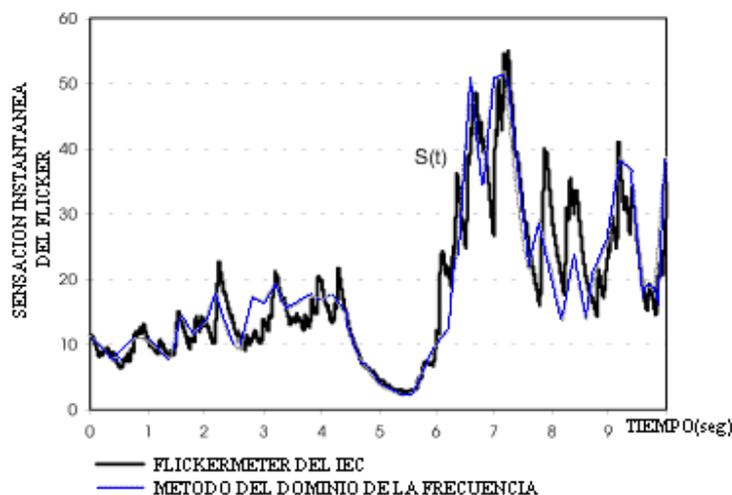


Figura 4.4. La sensación instantánea estándar del parpadeo que se midió en un horno de arco durante 10 s usando el medidor de flicker de la IEC y el método del dominio de frecuencia.

La ecuación (4.11) constituye una alternativa de la ecuación (4.10) si la ventana del tiempo es bastante corta. Por ejemplo, la ecuación (4.11) proporciona los resultados muy buenos para la evaluación del parpadeo del horno de arco y $T_W = 200ms$.

El proceso para obtener la sensación instantánea del parpadeo dentro de cada ventana se puede resumir en los puntos siguientes:

- ✓ Calcula vía FFT (transformada rápida de Fourier) los componentes interarmónicas de la tensión de entrada en la ventana seleccionada del tiempo.
- ✓ De este espectro interarmónico, se obtiene el valor del S_{dc} usando la ecuación (4.9).
- ✓ Calcula el valor de $S_W(t)$ usando (4.10) o (4.11).

El uso de este algoritmo instantáneo de tensión medido en un horno de arco se representa en la figura 4.4. Para este caso se han considerado, un sistema de 4 pares del interarmónicos (45 Hz – 55 Hz, 40 Hz – 60 Hz, 35 Hz – 65 Hz, y 30 Hz – 70 Hz). Esta medición se calcula en una ventana de $T_W = 200ms$ de tiempo con la carga rectangular especificado en [35]. Puede ser visto que el resultado obtenido con este método demuestra un buen acuerdo con la sensación instantánea medida por el medidor de flicker de la IEC [34].

IV.1.6.- Evaluación estadística

De acuerdo con IEC 61000-4-15 [30], el medidor de flicker debe calcular la función de probabilidad acumulada (FPA) de la sensación instantánea del parpadeo. La severidad del parpadeo se deriva de los niveles instantáneos de la sensación del parpadeo, excedidos en cierto porcentaje del tiempo durante el período de observación. La medida de severidad, basada en un minuto del período de observación $T_{sc} = 10$ se señala P_{sc} semejantemente, la instrumentación prevista para medir armónicos debe poder realizar análisis estadístico en base a [36]. Para ese propósito, esta instrumentación debe proporcionar un clasificador lineal para calcular la función de probabilidad acumulada de los armónicos seleccionados.

Aplicando el método propuesto del dominio de la frecuencia, el equipo previsto para medir armónicos e interarmónicos que se conforma con [35] y [36] son capaces de estimar la sensación instantánea del parpadeo usando los componentes interarmónicos medidos. Además, el clasificador

accesible de este equipo puede ser aplicado, con pequeñas modificaciones para calcular niveles de la severidad del parpadeo.

IV.1.7.- Cálculo del parpadeo para las fluctuaciones sinusoidales y rectangulares de tensión

Dos casos particulares de fluctuación de estado estacionario pueden ser considerados: Modulación sinusoidal y rectangular de tensión. En ambos casos, los componentes interarmónicos son constantes en ventanas sucesivas del tiempo. Para estos casos, [30] da la fluctuación necesaria de tensión de entrada para obtener una perceptibilidad de la unidad en la salida del bloque 4. Para la modulación sinusoidal, la expresión de tensión de entrada es:

$$u(t) = U_0' \text{sen}(w_0 t) (1 + m \cos(w_F t)) \quad (4.12)$$

Donde w_F es la modulación de la frecuencia y $U_0' = 1$, de la modulación de la ecuación (4.12) se puede expresar como:

$$u(t) = \text{sen}(w_0 t) + \frac{m}{2} \text{sen}(w_0 - w_F)t + \frac{m}{2} \text{sen}(w_0 + w_F)t \quad (4.13)$$

Por lo tanto, hay dos componentes de frecuencia de tensión de entrada además de la frecuencia principal w_0 . Las magnitudes y las discusiones de estos componentes interarmónicos son iguales y sus frecuencias satisfacen la condición de ser equidistantes de w_0 . Bajo estas condiciones, la ecuación (4.9) se puede simplificar como:

$$S_{dc} = K \frac{m^2}{2} F_W^2(w_F) \quad (4.14)$$

El std. IEC 61000-4-15[19] especifica la sensación como $S = 1 \text{ p.u.}$ para $f = 8.8 \text{ Hz}$ y un cambio relativo de tensión $d = 0.25\%$. Eso significa $S_{dc} = 1 \text{ p.u.}$, $m = 0.00125 \text{ p.u.}$, $F_W(2\pi \times 8.8) = 1$ y, por lo tanto, un factor de escala $K \cong 1,28 \cdot 10^6$.

Las condiciones para la modulación de una onda rectangular de tensión son similares. En ese caso, la ecuación (4.12) se puede expresar como:

$$u(t) = \text{sen}(w_0 t) (1 + m \times \text{sign}(\text{sen}(w_F t))) \quad (4.15)$$

De donde el análisis de Fourier se expresa como:

$$u(t) = \text{sen}(w_0 t) \left[1 + \frac{4}{\pi} m \sum_{\substack{k=1 \\ k=1,3,5 \text{ etc.}}}^{\infty} \frac{\text{sen}(k w_F t)}{k} \right] \quad (4.16)$$

Por lo tanto, para variación rectangular de tensión de amplitud m y de frecuencia w_F son equivalentes a las modulaciones sinusoidales infinitas de las amplitudes m_k y de la frecuencia $k w_F$, donde:

$$m_k = \frac{4m}{\pi k} \text{ para } k = 1, 3, 5, \text{ etc.} \quad (4.17)$$

Por lo tanto, la combinación de (4.11) y (4.16) se expresa como:

$$S_{dc} = K \left(\frac{8m^2}{\pi^2} \right) \sum_{\substack{k=1 \\ k=1,3,5, \text{ etc.}}}^{\infty} \frac{F_W^2(k w_F)}{k^2} \quad (4.18)$$

Las contribuciones individuales de cada par de interarmónicos de S_{dc} se pueden calcular con este método, para determinar por ejemplo, cuál es el más relevante.

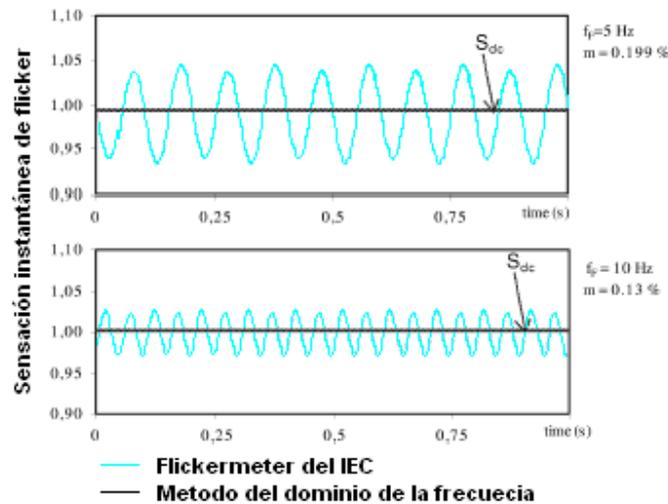


Figura 4.5. Sensación instantánea del parpadeo para las fluctuaciones sinusoidales de tensión.

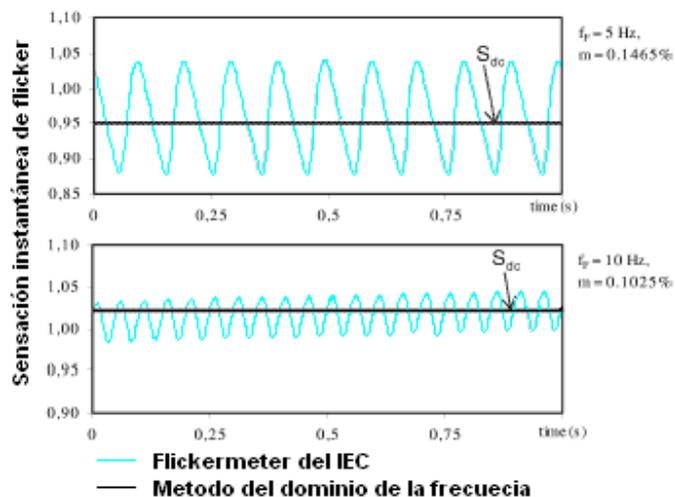


Figura 4.6. Sensación instantánea del parpadeo para las fluctuaciones rectangulares de tensión.

La sensación $S(t)$ se representa en las figuras 4.5 y 4.6 cuando el método de la IEC y el método del dominio de frecuencia son aplicados. En esta última situación, $S(t) = S_{dc}$ puesto que los componentes interarmónicos son constantes en ventanas sucesivas de tiempo de 200 ms. La discrepancia entre los valores máximos de $S(t)$ y S_{dc} aumenta con el nivel de la ondulación de

$S(t)$. La severidad P_{st} del parpadeo del breve periodo de tiempo se ilustra en la tabla n°4.2 para todos los casos. Los resultados demuestran un buen acuerdo con el método de la IEC.

Modulación de la frecuencia	Modulación Sinusoidal		Modulación Rectangular	
	5Hz	10Hz	5Hz	10Hz
P_{st} Medidor de Flicker de la IEC	0.66	0.66	0.66	0.66
P_{st} del método dominio de frecuencia	0.64	0.65	0.64	0.65

Tabla n°4.1. P_{st} para modulación senoidal y rectangular.

IV.1.8.- Validación del método del dominio de la frecuencia

Para validar el método propuesto, una grabación digital [37] de las formas de onda del voltaje se ha realizado en el lado medio de tensión de dos instalaciones del horno de arco situadas en la red española. Las muestras de tensión se han introducido en un medidor de flicker de la IEC ejecutado por la simulación usando el algoritmo digital descrito en [29]. La sensación instantánea $S(t)$ se muestrea con una frecuencia de 400 Hz y se clasifica con el mismo clasificador en ambos métodos (Dominio de frecuencia y del medidor de flicker de la IEC) en vista de 256 clases.

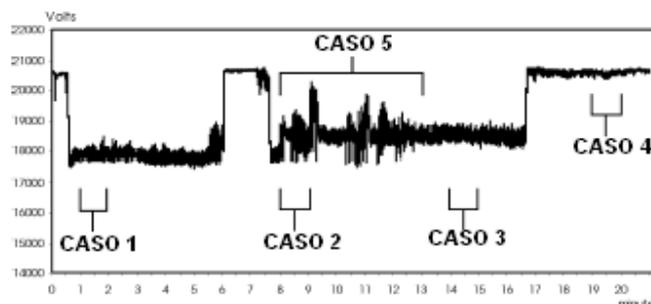


Figura 4.7. La evolución de tensión fundamental rms medido en la barra de distribución (MV) de un horno de arco dc.

	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Medidor de flicker de la IEC	3.93	10.02	4.33	1.31	11.08
DOMINO DE FREC.	3.75	10.48	4.28	1.28	11.17
ERROR(%)	4.75	-4.65	1.19	2.31	-0.80

Tabla n° 4.2. Severidad a corto plazo de parpadeo P_{st} que considera una ventana de 200ms y considera cuatro pares de interarmónicos en el método del dominio de la frecuencia.

IV.1.9.- La validación en un horno de arco dc

La fase instantánea a tensión neutral en la barra de distribución de un horno de arco dc, se ha colocado por 20 minutos. Varios casos se han seleccionado según lo indicado en la figura 4.7. En los casos 1, 2, 3 y 4 un intervalo de breve periodo de tiempo de 1 minuto se considera para los cálculos, mientras que en el caso 5, un intervalo de tiempo de 5 minutos. Los resultados se demuestran en la tabla n°4.2. Una ventana del tiempo del **200 ms** (según lo especificado en [35]) se ha considerado en el método del dominio de frecuencia. Eso significa una resolución de la frecuencia de 5 Hz entre los componentes consecutivos de la frecuencia. Cuatro pares de interarmónicos equidistantes se han seleccionado de 30 Hz a 70 Hz. Estos pares interarmónicos (45 Hz – 55 Hz, 40 Hz – 60 Hz, 35 Hz – 65 Hz y 30 Hz – 70 Hz) proporcionan, respectivamente, las frecuencias de la modulación de 5 hertzios, 10 hertzios, 15 hertzios y 20 hertzios para los cuales el filtro de la carga presenta un alto aumento. Eso explica los buenos resultados de la tabla n°4.3 que revela las fluctuaciones amplias del interarmónico. La figura 4.8 ilustra la evolución de los componentes interarmónicos de 45 hertzios y de 55 hertzios en el caso 2.

Una característica importante del método del dominio de frecuencia es su capacidad para calcular la contribución individual de cada par de interarmónicos equidistantes. La tabla n°4.3 demuestra la severidad del parpadeo obtenida en el caso 5 considerando a partir de cuatro pares de interarmónicos. Puede ser visto que la contribución de los primeros dos pares, de 45 Hz – 55 Hz y de 40 Hz – 60 Hz, representa más el de 90% del P_{st} total obtenido.

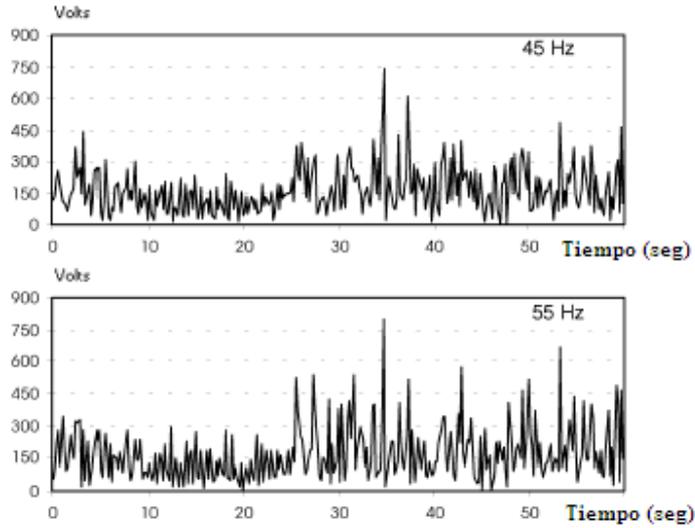


Figura 4.8. Evolución del tiempo de un interarmónico de tensión para el caso 1, 45 Hz y el caso 2, 55 Hz, para una ventana de tiempo de 200ms.

P_{st} con el medidor de flicker de la IEC	P_{st} Método del dominio de la frecuencia			
	1 par (Hz) 45 - 55	2 pares (Hz) 45 - 55 40 - 60	3 pares (Hz) 45 - 55 40 - 60 35 - 65	4 pares (Hz) 45 - 55 40 - 60 35 - 65 30 - 70
11.08	6.53	10.04	10.86	11.17

Tabla n°4.3. Influencia de cada par de interarmónico al P_{st} en el caso 5 considerando cuatro pares de interarmónicos y una ventana de tiempo de 200ms.

P_{st} con el medidor de flicker de la IEC	P_{st} Método del dominio de la frecuencia			
11.08	1 par (Hz) 45 - 55	1 par (Hz) 40 - 60	1 par (Hz) 35 - 65	1 par (Hz) 30 - 70
	6.53	8.24	4.70	2.91

Tabla n° 4.4. Contribución de cada par de interarmónico al P_{st} en el caso 5 considerando cuatro pares de interarmónicos y una ventana de tiempo de 200ms.

	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4	CASO 5
Medidor de flicker de la IEC	3.93	10.02	4.33	1.31	11.08
Método del dominio de la frecuencia	3.85	10.26	4.22	1.26	11.12
Error (%)	2.05	-2.46	2.43	3.99	-0.44

Tabla n° 4.5. Severidad a corto plazo del parpadeo (P_{st}) en el caso 5 considerando 8 pares de interarmónicos en una ventana de tiempo de 400ms trabajando con el método del dominio de la frecuencia.

El medidor de flicker de la IEC de la tabla n°4.5 demuestra la contribución individual de cada par de interarmónicos al P_{st} , considerado individualmente, el par 40 Hz – 60 Hz que es la mayor influencia. Comparando los resultados de las tablas n°4.4 y 4.5, está claro que el efecto de los diversos pares interarmónicos sobre la severidad del parpadeo no es aditivo.

Para probar el funcionamiento del método con un diverso sistema de pares de interarmónicos, se ha seleccionado una ventana de tiempo de 400 ms. En este caso, una resolución de la frecuencia de 2.5 Hz y 8 pares de interarmónicos. Los resultados se demuestran en las tablas n° 4.5 y 4.6. De los resultados de la tabla n°4.6 son generalmente más exactos que los de la tabla n°4.2, solamente la selección de una ventana del tiempo de 200 ms coincide con las recomendaciones de la IEC [35] para la evaluación armónica e interarmónica y proporciona resultados aceptables. En la tabla n°4.7 indica que los pares más significativos son 42.5 Hz – 57.5 Hz y 40 Hz – 60 Hz.

P_{st} según medidor de flicker IEC	P_{st} Método del dominio de la frecuencia			
11.08	1 par (Hz) 47.5 - 52.5	2 pares (Hz) 47.5 - 52.5 45 - 55	3 pares (Hz) 47.5 - 52.5 45 - 55 42.5 - 57.5	4 pares (Hz) 47.5 - 52.5 45 - 55 42.5 - 57.5 40 - 60
	3.13	5.16	7.61	9.44
	5 pares 47.5 - 52.5 45 - 55 42.5 - 57.5 40 - 60 37.5 - 62.5	6 pares 47.5 - 52.5 45 - 55 42.5 - 57.5 40 - 60 37.5 - 62.5 35 - 65	7 pares 47.5 - 52.5 45 - 55 42.5 - 57.5 40 - 60 37.5 - 62.5 35 - 65 32.5 - 67.5	8 pares 47.5 - 52.5 45 - 55 42.5 - 57.5 40 - 60 37.5 - 62.5 35 - 65 32.5 - 67.5 30 - 70
	10.27	10.73	10.99	11.12

Tabla n°4.6. Influencia de los pares de interarmónico al P_{st} en el caso 5 con ocho pares de interarmónicos y una ventana de tiempo de 400ms.

P_{st} según el medidor de flicker IEC	P_{st} Método dominio de la frecuencia			
11.08	1 par (Hz) 47.5 - 52.5	1 par (Hz) 45 - 55	1 par (Hz) 42.5 - 57.5	1 par (Hz) 40 - 60
	3.13	4.45	6.08	6.04
	1 par (Hz) 37.5 - 62.5	1 par (Hz) 35 - 65	1 par (Hz) 32.5 - 67.5	1 par (Hz) 30 - 70
	4.52	3.61	2.84	2.02

Tabla n°4.7. Contribución de cada par de interarmónico al P_{st} en el caso 5 con ocho pares de interarmónicos y una ventana de tiempo de 400ms.

De acuerdo con las especificaciones de la IEC [30], el nivel P_{st} de la severidad del parpadeo se calcula de la ecuación (4.19), como se muestra a continuación:

$$P_{st} = \sqrt{K_{0.1}P_{0.1} + K_{1s}P_{1s} + K_{3s}P_{3s} + K_{10s}P_{10s} + K_{50s}P_{50s}} \quad (4.19)$$

$$k_{0.1} = 0.0314; k_{1s} = 0.0525; k_{3s} = 0.0657;$$

$$k_{10s} = 0.28; k_{50s} = 0.08$$

Donde los porcentajes $P_{0.1}, P_{1s}, P_{3s}, P_{10s}, P_{50s}$ son los niveles del parpadeo excedidos para 0.1%, el 1%, el 3%, el 10%, y el 50% del tiempo durante el período de observación. El sufijo S en la fórmula indica que los valores que deben ser utilizados se obtienen usando las ecuaciones siguientes:

$$P_{1s} = \frac{(P_{0.7} + P_1 + P_{1.5})}{3}$$

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

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

$$P_{50s} = \frac{(P_{30} + P_{50} + P_{60})}{3}$$

IV.2.- Detección del flicker causado por interarmónicos [14]

Autores: Taekhyun Kim, Student Member, IEEE, Edward J. Powers, Fellow, IEEE, W. MackGrady, Fellow, IEEE, and Ari Arapostathis, Fellow, IEEE.

Hemos planteado en capítulos anteriores que en las redes de distribución de energía eléctrica son varios los tipos de distorsión de las señales de tensión y/o corrientes que pueden afectar directa o indirectamente a los consumidores finales de energía eléctrica.

Uno de estos fenómenos es el llamado flicker o parpadeo, que se define como el cambio en los niveles de iluminación debido a las fluctuaciones de tensión, sensibles a la mayoría de las

personas. Por tanto, estos cambios en los niveles de iluminación pueden afectar en la eficacia en el trabajo de las personas, en su salud y seguridad [38]. La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) especifica un instrumento capaz de medir la severidad del parpadeo que se denomina medidor de flicker [39].

Estudios recientes aseguran que el medidor de flicker de la IEC no detecta el parpadeo o flicker causado por interarmónicos cuyas frecuencias superan los 102 Hz para los sistemas de 60 Hz y 85 Hz para sistemas de 50 Hz.

Además se plantea que en base al análisis y experimentos realizados por los autores, en presencia de interarmónicos cuyas frecuencias están por debajo de la diferencia entre la frecuencia fundamental y la frecuencia de corte de un filtro sintonizado del medidor de flicker estándar de la IEC, las frecuencias de percepción demoduladas detectadas por el medidor de flicker no igualan las frecuencias de percepción reales asociadas al interarmónicos.

El medidor de flicker de la IEC estima la severidad del parpadeo usando una señal de entrada de tensión. El proceso de la valoración del parpadeo se basa en el modelo de la lámpara incandescente. En la figura 4.1 se especifica en diagrama de bloques el funcionamiento del medidor de flicker de la IEC.

Según lo mencionado en párrafos anteriores, el medidor de flicker actual de la IEC no es capaz de detectar el parpadeo causado por los interarmónicos de alta frecuencia [40], [41], [42]. Según [41], la deficiencia es debido a los procedimientos en los bloques 2 y 3 en figura (4.1), respectivamente. Se presentara además, otra deficiencia del medidor de flicker de la IEC con respecto al parpadeo causado por el interarmónicos de baja frecuencia, cuyas frecuencias están debajo de la diferencia entre la frecuencia fundamental y la frecuencia de corte de un filtro sintonizado del medidor de flicker del estándar de la IEC, en donde las frecuencias de la modulación representadas por el medidor de flicker de la IEC no son constantes con la frecuencia de modulación real.

El proceso de la evaluación de la oscilación en presencia de interarmónicos se puede examinar usando un modelo de la señal con un término de la frecuencia fundamental y un término interarmónico, es decir:

$$u(t) = \text{sen}(2\pi f_1 t) + m \text{sen}(2\pi f_{IH} t + \theta_{IH}) \quad (4.20)$$

Donde:

- ✓ f_1 : Frecuencia fundamental.
- ✓ m : Magnitud relativa interarmónica.
- ✓ f_{IH} : Frecuencia interarmónica.
- ✓ θ_{IH} : Fase del interarmónico.

Según estudios analíticos y experimentales [4], la frecuencia de salida f_B debido al interarmónico es:

$$f_B = |f_{IH} - hf_1| = |f_{IH} - (2m + 1) * f_1|, \quad m = 0,1,2, \quad (4.21)$$

De donde, h indica el armónico impar más cercano a la f_{IH} .

Según el estándar del medidor de flicker de la IEC, la señal de tensión de entrada primero se ajusta, y entonces la entrada al filtro sintonizado en el bloque 3 provoca que la señal ajustada de la tensión de entrada en la ecuación (4.20) se convierta en:

$$u^2(t) = [\text{sen}(2\pi f_1 t) + m \text{sen}(2\pi f_{IH} t + \theta_{IH})]^2$$

$$u^2(t) = \frac{1}{2}(1 + m)^2 - \frac{1}{2} \cos(2\pi * 2f_1 * t) - \frac{1}{2} m^2 \cos(2\pi * 2f_{IH} * t + 2\theta_{IH}) + m \cos[2\pi * (f_1 - f_{IH}) * t - \theta_{IH}] - m \cos[2\pi * (f_1 + f_{IH}) * t + \theta_{IH}]$$

(4.22)

Dependiendo del valor de la f_{IH} y de la respuesta correspondiente del medidor de flicker de la IEC, la gama de frecuencia se puede dividir en tres regiones, por lo que observaremos en la figura 4.8 la respuesta del medidor de flicker de la IEC en cada región de la frecuencia.

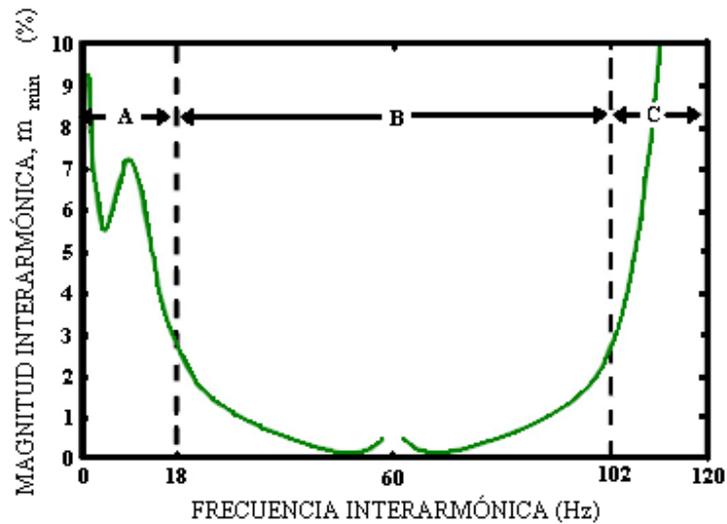


Figura 4.8. Interarmónico de magnitud mínima necesaria para producir una PU, (Sensación instantánea de parpado) de la respuesta del medidor de flicker de la IEC contra las frecuencias interarmónicas que se extienden a partir de los 0 a 120 Hz, para un sistema con f_1 de 60 Hz.

En la región A de la figura 4.9, la frecuencia de percepción debido a un interarmónico no es representada correctamente por el medidor de flicker de la IEC. Se observa que el punto mínimo en la región A está en 4.4 Hz., que es la mitad de la frecuencia máxima de la respuesta (8.8 Hz.) del filtro de carga en el bloque 3 del medidor de flicker de la IEC.

El medidor de flicker de la IEC parece trabajar correctamente para los interarmónicos en la región B, pero como la frecuencia interarmónica llega a ser mayor de 102 Hz en la región C, la magnitud interarmónica requerida para generar el parpado perceptible crece rápidamente, y va más allá del 10% de la magnitud de la frecuencia fundamental después de los 110 Hz. Sin embargo, en los estudios de este análisis y experimentos numéricos (MATLAB), el parpado de la luz fue observado por clientes residenciales cuando estaban presentes frecuencias de interarmónicos de 180 a 200 Hz. De tal modo se confirma la deficiencia del estándar del medidor de flicker de la IEC en la gama de alta frecuencia. Además, los resultados del análisis y estudios que se realizaron sugieren que ciertos tipos de lámparas (lámparas incandescentes, lámparas fluorescentes compactas) serán más sensibles a las fluctuaciones del valor máximo de la tensión de entrada, que a fluctuaciones de valor rms.

Como hemos mencionado, el parpadeo de la luz debido a las fluctuaciones del valor máximo es causado por la modulación impuesta ante el valor absoluto de la señal de tensión, que tiene el segundo armónico de la frecuencia fundamental como el término dominante de la frecuencia. Por lo tanto, la idea básica de este estudio es examinar la fluctuación máxima impuesta solamente ante el segundo armónico de la frecuencia fundamental. Se proponen bloques alternativos para el tratamiento de las señales en la detección de las fluctuaciones máximas para la evaluación del flicker, para lo cual se utiliza un filtro pasa-alto de primer orden cuya frecuencia de corte es 0,05 Hz, y un filtro pasa-bajo de sexto orden cuya frecuencia de corte es de 60 ó 50 Hz según corresponda el sistema.

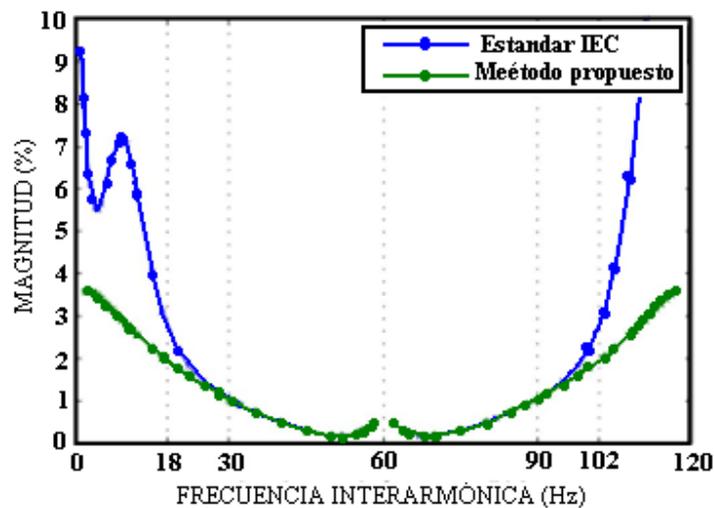


Figura 4.9. Interarmónico de magnitud mínima m_{min} necesario para producir una PU para la respuesta del medidor de flicker de la IEC y el método propuesto contra frecuencias interarmónicas.

De acuerdo con el análisis y experimentos numéricos, fue demostrado que el método propuesto representa correctamente la frecuencia de percepción real asociada a los interarmónicos en cualquier gama de frecuencia. Consecuentemente, el método propuesto puede prolongar la gama interarmónica más allá de la gama limitada actual del medidor de flicker de la IEC. Puesto que el método se basa en la evaluación de fluctuaciones del valor máximo, es particularmente conveniente para determinar el parpadeo de las lámparas sensibles a fluctuaciones máximas como lámparas incandescentes y lámparas fluorescentes.

IV.3. Flicker causado por interarmónicos [18]

Autores: M. de Koster - E. de Jaeger – W.Vancoetsem, Laborelec Rodestraat, 125 - B-1630 Linkebeek – Belgium.

En ciertas circunstancias, interarmónicos en la tensión de la fuente puede ocasionar un flujo luminoso oscilante y causar el parpadeo ligero. Este fenómeno se puede observar con las lámparas de filamento así como con las lámparas fluorescentes.

En el presente estudio fueron analizados dos tipos de dispositivos de iluminación:

- ✓ Equipos tradicionales con ballast externo y las lámparas económicas compactas. Los ballast externos corresponden a dos tipos: electrónico y de hierro (magnéticos).
- ✓ Las lámparas compactas son de dos tipos: lámparas económicas tradicionales (equipadas de ballast magnético) como una lámpara fluorescente ordinaria y lámparas electrónicas económicas.

Los autores realizaron el experimento que consiste en instalar una lámpara en un cuarto oscuro. El parpadeo fue observado en tres diversos fondos: gris, blanco y negro. Se sabe que la recepción del parpadeo por el ojo humano en los diversos colores varía con la frecuencia del parpadeo. El parpadeo causado por interarmónicos se puede observar con las lámparas de filamento así como con las lámparas fluorescentes. Sin embargo, los mecanismos y la gama de frecuencia implicada así como las amplitudes son absolutamente diferentes.

La luminosidad de una lámpara de filamento es dependiente de la temperatura del filamento, que alternadamente se relaciona directamente con la energía disipada en la lámpara (o la tensión rms). Cuando la tensión aplicada es una onda sinusoidal pura, el flujo luminoso se compone de un componente medio de estado estacionario y de un componente doble de la frecuencia de la fuente, que no se pueden detectar por el ojo humano. El componente medio del flujo luminoso se modula en amplitud con una frecuencia de modulación igual a:

$$f_m = f_0 - f_{IH} \quad (4.23)$$

Donde:

- ✓ f_m : Frecuencia de modulación.
- ✓ f_0 : Frecuencia fundamental.
- ✓ f_{IH} : Frecuencia interarmónica.

Cuando f_{IH} es menor o igual a $2 f_0$, y más particularmente para la f_{IH} alrededor de la frecuencia fundamental ($f_0 \pm 15\text{Hz}$) [44], esta modulación provoca suficientes fluctuaciones de tensión rms para generar el parpadeo ligero. En todo caso, esta clase de parpadeo se debe detectar por el medidor de flicker de la IEC.

Por una parte, la salida del parpadeo ligero de una lámpara o equipo fluorescente, en adelante TL, es fuertemente dependiente en la energía media disipada en la lámpara [46]. Ésta se relaciona con el retardo necesario para que la tensión de la fuente alcance la tensión de arco (dependiendo de la geometría de la lámpara y de las características físicas del gas interno de la lámpara).

Las diferencias entre los cuatro tipos de dispositivos probados aparecen evidentemente en la figura 4.10 que se muestra a continuación.

Identificación de cada tipo de curva para la figura 4.10.

—	—	—	—
TL 58 W con ballast electrónico externo	TL con ballast tradicional externo	Lámpara tradicional compacta (ballast magnético)	Lámpara compacta electrónica

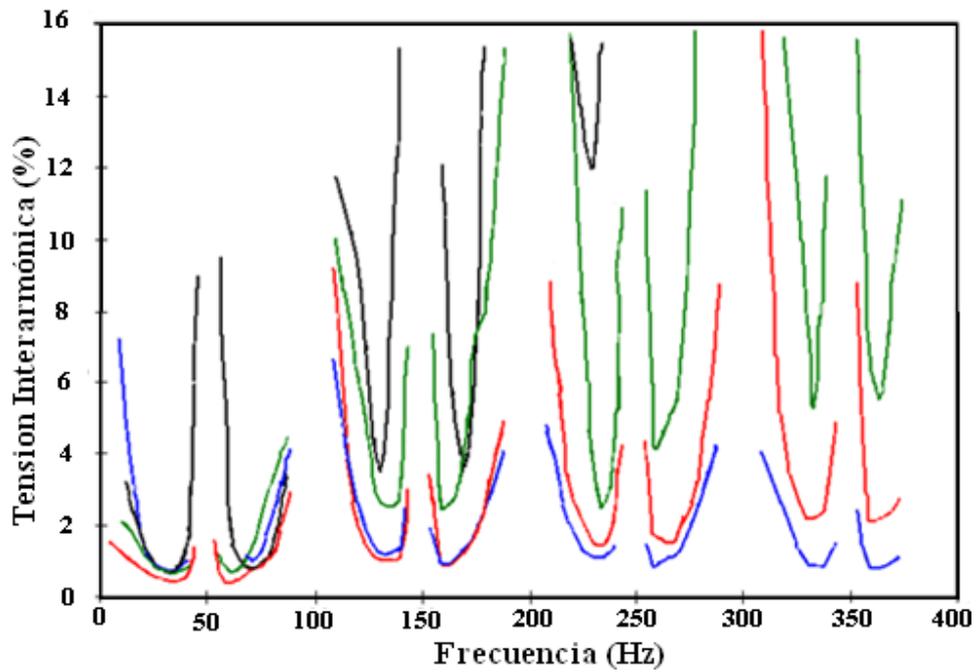


Figura 4.10. Curvas de la sensibilidad para diversos tipos de dispositivos luminosos.

El ojo humano es más sensible para los parpadeos causados por las frecuencias interarmónicas que corresponden a los mínimos de las curvas de la sensibilidad. Esto puede ser observado como sigue:

$$f_{IH} = [f_{ni} \pm (10 \rightarrow 15)]\text{Hz} \quad (4.24)$$

Donde:

- ✓ f_{IH} : Frecuencia interarmónica
- ✓ f_{ni} : Frecuencia armónica impar

También puede ser observado que la sensibilidad alrededor de las frecuencias armónicas impares disminuye para casi todos los dispositivos probados en los análisis, cuando la fila armónica aumenta (H_3, H_5, H_7, \dots). Para las frecuencias interarmónicas debajo del segundo armónico, todos los dispositivos demuestran una sensibilidad importante. Por ejemplo, los ballast electrónicos parecen ser muy sensibles entre frecuencias de 30 y 70 Hz, pero el filtro mejora las frecuencias interarmónicas entre 130 y 170 Hz. Pueden incluso ser considerados insensibles a las frecuencias superiores a 170 Hz. Sin embargo, las lámparas electrónicas compactas siguen siendo sensibles para frecuencias más altas.

Puesto que las curvas de la sensibilidad confían en un factor de opinión humana, que puede variar considerablemente en distintas personas, es interesante desarrollar una experimentación, que considera la información publicada por un ojo electrónico, el fotodiodo (La anchura de banda del fotodiodo, así como su filtro cromático permite obtener las características de respuestas casi idénticas al ojo humano).

El factor del aumento, que se definirá a continuación, permitirá la cuantificación y una comparación de la sensibilidad de los diversos dispositivos de iluminación [43]. Se verifica experimentalmente que para todos los dispositivos de iluminación, la relación entre la variación relativa del flujo luminoso y la fluctuación correspondiente de tensión sea bastante lineal, por lo tanto, para una frecuencia dada de modulación [45], se define el factor del aumento como sigue:

$$G. F. = \frac{\frac{\Delta\phi}{\phi}}{\frac{\Delta U}{U}} \quad (4.25)$$

Donde:

- ✓ $\Delta\phi$: La diferencia entre los extremos del valor medio del flujo luminoso. El valor medio se calcula en 10 ms, con una ventana de desplazamiento, en pasos de 2 ms.
- ✓ ϕ : Valor medio del flujo luminoso.

- ✓ ΔU : Diferencia entre los extremos del valor máximo de la fuente de tensión rectificadora (1 s).
- ✓ U : Valor medio del valor máximo de la fuente de tensión rectificadora (1 s).

El ojo humano no puede detectar las fluctuaciones del flujo luminoso superiores a 30 Hz. Por lo tanto, se consideran las fluctuaciones del flujo luminoso medio. Los valores promedio de la tensión rms se calculan en una ventana de 10 ms, con un paso de 2 ms. La fluctuación de los valores máximos de tensión parece ser el factor que más fuertemente se relaciona a la producción del parpadeo en el caso de las lámparas de descarga. Los resultados experimentales explican la ausencia de parpadeo en las lámparas de filamento para una f_{iH} mayor a 100 Hz, porque su iluminación es proporcional a la tensión rms (principio de medición del medidor de flicker). El factor de aumento varía dependiendo de la frecuencia interarmónica inyectada, pero depende poco o nada de los niveles de disturbio del flujo lumínico (Medido en lumen; 1 Watt-luz a 555 nm = 683 lm, entendiéndose que nm=nanómetro y lm=lumen). Para establecer comparaciones válidas entre los dispositivos, es necesario fijar frecuencias y, menos importante, fijar niveles del disturbio del flujo lumínico. Las frecuencias seleccionadas para las pruebas son, 65, 165 y 260 Hz.

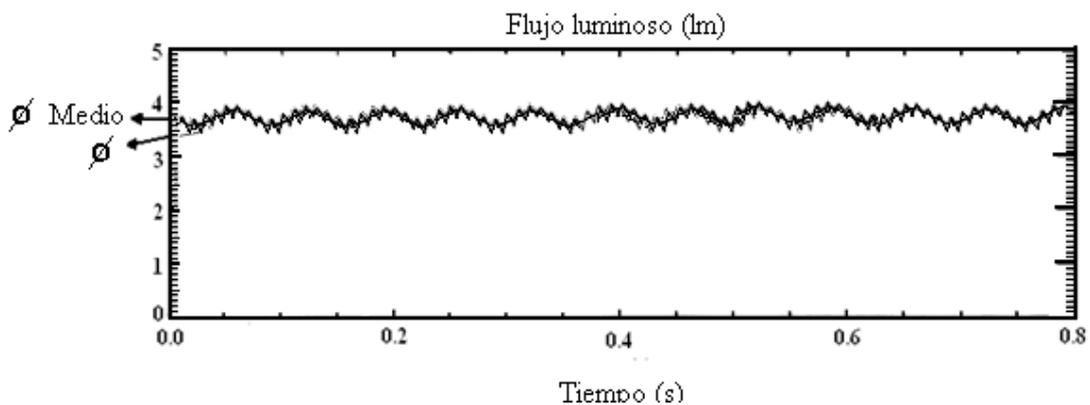


Figura 4.11. Flujo luminoso con interarmónico de 65 Hz, para una lámpara compacta electrónica.

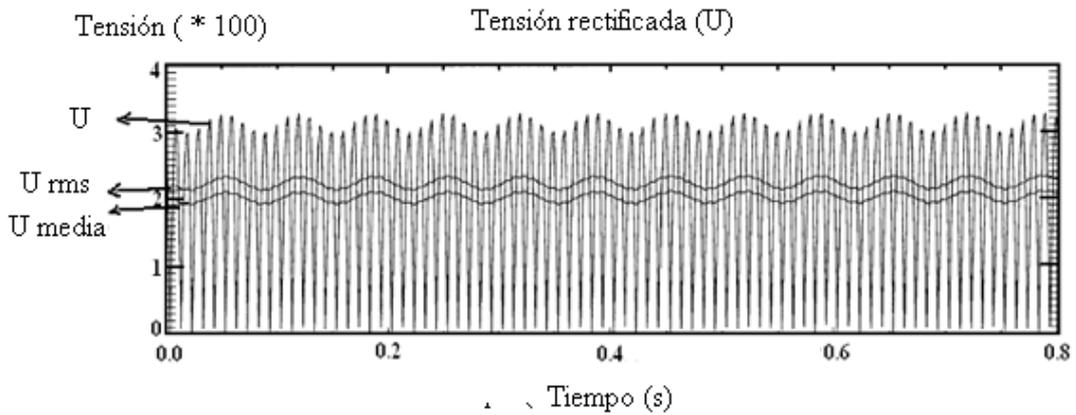


Figura 4.12. Variación de tensión de 4.4%, para una lámpara compacta electrónica a 65 Hz.

Todos los dispositivos probados tienen generalmente un factor importante de aumento, lo que provoca una sensibilidad también importante, para las frecuencias interarmónicas inferiores a 100 Hz. Sobre 100 Hz, se puede hacer una clasificación de los diversos dispositivos, dependiendo de las sensibilidades como muestra la tabla 4.7.

Tipo de lámpara	65 Hz	165 Hz	260 Hz
Ballast tradicional	0,75	0,3	0,05
Ballast electrónico	0,3 - 0,7	< 0,05	< 0,05
Tradicional compacta	1	0,35	0,3
Electrónica compacta	0,75 - 0,9	0,65 - 0,9	0,6 - 0,8

Tabla n° 4.7. P_{sc} Equivalente para los distintos dispositivos a distintas frecuencias interarmónicas.

IV.4. Tensión de flicker causada por dos interarmónicos [47]

Autores: Jing Yong, Caixin Sun Chongqing University, China, Wilsun Xu Fellow Member, IEEE, año 2006.

En el documento los autores plantean la relación entre los parpadeos e interarmónicos, además del estudio de un interarmónico, dos interarmónicos y que efecto produce.

Parpadeo de tensión evaluado con un interarmónico:

$$v(t) = \sqrt{2}V(\text{sen}(2\pi f_1 t) + m\text{sen}(2\pi f_{IH} t + \varphi)) \quad (4.26)$$

Donde V, f_1, m, f_{IH} y φ son la magnitud fundamental rms, la frecuencia fundamental, la magnitud relativa interarmónica, la frecuencia interarmónica y la fase del ángulo respectivamente.

IV.4.1.- Frecuencia del parpadeo

La frecuencia del parpadeo también se llama la frecuencia de la modulación, que se puede determinar cómo:

$$f = |f_{IH} - hf_1| \quad (4.27)$$

Donde: f_{IH} es la frecuencia interarmónica y h es el armónico más cercano a f_{IH} .

Si f es igual a cero, solo existen componentes armónicos. En este caso no hay magnitud de la fluctuación. Si f no es igual a cero, la componente interarmónica causa fluctuación y su frecuencia es f .

IV.4.2.- La desviación relativa máxima rms

La desviación relativa máxima del rms es:

$$\left(\frac{dV}{V}\right)_{rms} = \frac{2mf_1^2 |\text{sen}(\pi f_{IH}/f_1)|}{|\pi(f_{IH}^2 - f_1^2)|} \quad (4.28)$$

Se puede deducir que un interarmónico con una frecuencia cercana a un armónico impar producirá un parpadeo más significativo. También una baja frecuencia interarmónica puede producir un parpadeo más significativo que una alta frecuencia interarmónica.

IV.4.3.- La desviación máxima peak

La desviación máxima peak:

$$\left(\frac{dv}{v}\right)_{peak} = m \quad (4.29)$$

La desviación máxima relativa es independiente de la frecuencia interarmónica.

IV.4.4.- La frecuencia del parpadeo causada por dos interarmónicos

Se considera una forma de onda con dos componentes interarmónicos:

$$v(t) = \sqrt{2}V[\text{sen}(2\pi f_1 t) + m_1 \text{sen}(2\pi f_{IH1} t + \varphi_1) + m_2 \text{sen}(2\pi f_{IH2} t + \varphi_2)] \quad (4.30)$$

Donde m_1 y m_2 son las magnitudes relativas, f_{IH1} y f_{IH2} son frecuencias interarmónicas y φ_1 y φ_2 son las fases angulares de dos frecuencias interarmónicas.

Las frecuencias de dos interarmónicos son:

$$f_{IH1} = h_1 f_1 + f \quad \text{y} \quad f_{IH2} = h_2 f_2 + f \quad (4.31)$$

Donde: $h_2 = h_1 + 2k$, k es un número entero, f_{IH1} y f_{IH2} son frecuencias de dos interarmónicos y h_1 y h_2 son armónicos cercanos a f_{IH1} y f_{IH2} respectivamente.

Las frecuencias de dos interarmónicos tienen la misma distancia con f y es igual a la distancia del interarmónico y su frecuencia armónica más cercana. Considerar que $m_1 m_2 \ll 1$, con $t = (4n + 1)/(4f_1)$, la componente fundamental alcanza valor máximo. El valor máximo por el ciclo fundamental del voltaje tiene la forma siguiente:

$$v(t) = \sqrt{2}V[1 + m_1 \text{sen}(2\pi f t) + m_2 \text{sen}(2\pi f t + \varphi_2)] \quad (4.32)$$

Donde

$$\varphi_1' = \varphi_1 + \frac{\pi h_1}{2} \quad \varphi_2' = \varphi_2 + \frac{\pi h_1}{2}$$

IV.4.5.- La forma de onda causada por dos interarmónicos

IV.4.5.1.- Las armónicas de orden impar

Cuando el armónico más cercano es par, la forma de onda crece en direcciones positivas y negativas en los extremos del período.

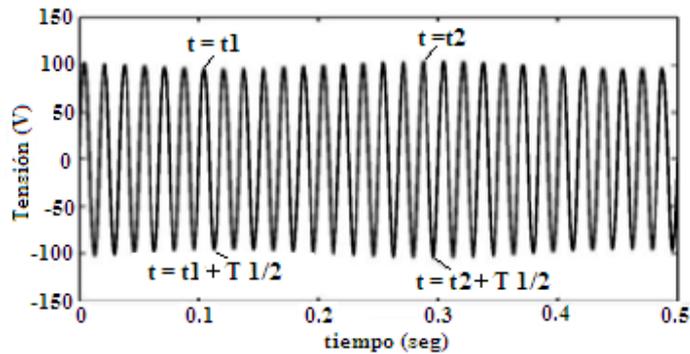


Figura 4.13. Cuando la orden armónica es impar, la forma de onda se expande en direcciones positivas y negativas.

En el caso 1 los componentes de frecuencia fundamental alcanzan el máximo positivo y los componentes interarmónicos tienen valores negativos que disminuyen la magnitud. Después de medio ciclo, el componente de la frecuencia fundamental alcanza un máximo negativo, y los componentes interarmónicos tienen valores positivos que también disminuyen la magnitud.

En caso de $t=t_2$, los componentes de la frecuencia fundamental alcanzan un máximo positivo y los componentes interarmónicos tienen valores positivos que aumenten la magnitud. Después de medio ciclo, el componente de la frecuencia fundamental alcanzará un máximo negativo y los componentes interarmónicos tienen valores negativos que también aumentan la magnitud.

IV.4.5.2.- La armónica de orden par

Cuando el armónico más cercano es par, la forma de onda cambia en su forma sinusoidal, el cambio de la forma de onda se demuestran en la figura 4.14.

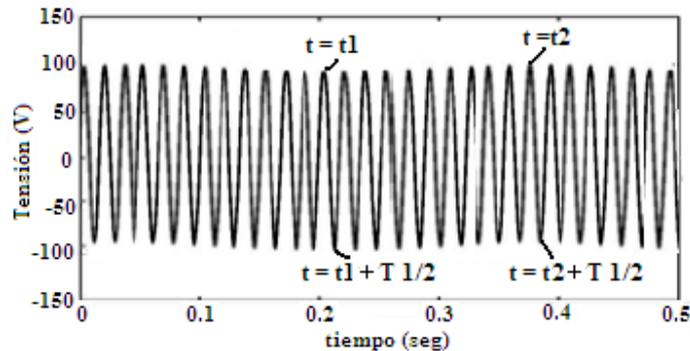


Figura 4.14. Cuando la orden armónica es número par, cambia su forma sinusoidal.

En caso de $t=t_1$, las componentes de frecuencia fundamental alcanzan el máximo positivo y los componentes interarmónicos tienen valores negativos que disminuyen la magnitud. Después de medio ciclo, el componente de la frecuencia fundamental alcanza su máximo negativo y los componentes interarmónicos tienen valores negativos que aumentan la magnitud.

En caso de $t=t_2$, la componente de frecuencia fundamental alcanza el máximo positivo y los componentes interarmónicos tienen valores positivos que aumentan la magnitud. Después de medio ciclo, el componente de la frecuencia fundamental alcanzará el máximo negativo y los componentes interarmónicos tienen valores positivos que disminuyen la magnitud.

IV.4.6.- Magnitud del parpadeo (rms) causado por dos interarmónicos

La definición para el valor de la tensión rms es:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_1} \int_{t_0}^{t_0+T_1} 2V^2 [\text{sen}(2\pi f_1 t) + m_1 \text{sen}(2\pi f_{IH1} t + \varphi_1) + m_2 \text{sen}(2\pi f_{IH2} t + \varphi_2)]^2 dt} \quad (4.33)$$

Puesto que las magnitudes interarmónicas son típicamente mucho más pequeñas que la fundamental, se debe saber que $m_1 m_2 \ll 1$, m_1, m_2, m_1^2, m_2^2 son términos pequeños y pueden ser ignorados.

El límite superior de la desviación relativa rms se puede determinar cómo:

$$\left(\frac{dV}{V}\right)_{rms} = \left| \frac{2f_1^2 \text{sen}(\pi f_{IH1}/f_1)}{\pi(f_{IH1}^2 - f_1^2)} \right| \left(m_1 + m_2 \left| \frac{f_{IH1}^2 - f_1^2}{f_{IH1}^2 - f_1^2} \right| \right) \quad (4.34)$$

$$m_{eq} = m_1 + m_2 \left| \frac{f_{IH1}^2 - f_1^2}{f_{IH1}^2 - f_1^2} \right| = m_1 + m_2 q \quad (4.35)$$

Donde m_{eq} es la magnitud relativa equivalente y q se puede considerar un valor importante de m_2 en la expresión de la magnitud relativa equivalente m_{eq} .

$$q = \frac{|f_{IHh}^2 - f_1^2|}{|[f_{IHh} + (2h-1)f_1][f_{IHh} + (2h+1)f_1]|} \quad (4.36)$$

La relación entre la magnitud interarmónica q y f_{IH} , se demuestra en la figura 4.16 con diferentes valores de armónicos (h).

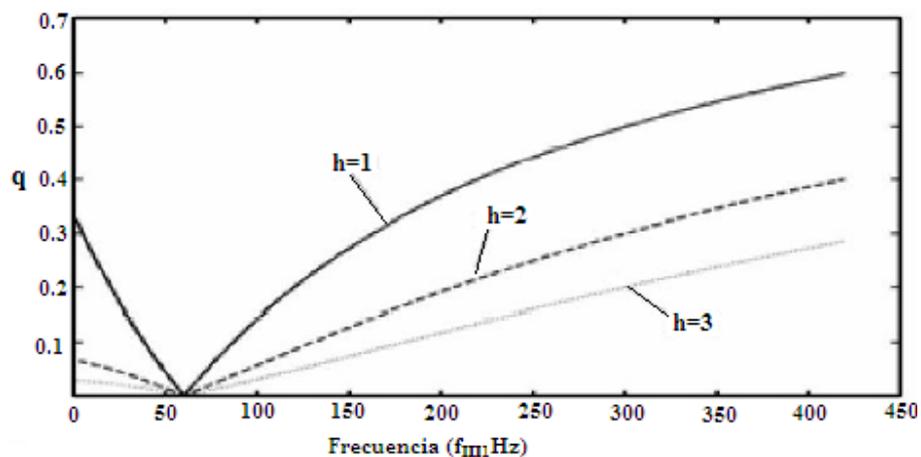


Figura 4.15. La relación entre q y f_{IH} con la ecuaciones (4.26) y (4.30) están en función de la frecuencia y magnitud interarmónica.

La desviación relativa rms causada por dos interarmónicos, se puede expresar por la baja frecuencia de un interarmónico o del par de estos. Se puede apreciar en la figura 4.15 que cuando:

$$f_{IH1} \rightarrow \infty, \quad q \rightarrow 1$$

El valor de m_2 es mayor en la ecuación (4.38) cuando f_{IH1} es más grande. Sin embargo, mientras que la desviación relativa del rms llega a ser más pequeña cuando el f_{IH1} aumenta, si dos interarmónicos tienen la misma magnitud, una frecuencia más baja desempeña un papel más importante en la desviación relativa del rms mientras que la más alta tiene poco impacto en él.

La figura 4.16 demuestra las relaciones entre la frecuencia interarmónica más baja y la desviación relativa del rms cuando $m_1 = m_2 = 0.3$. Las desviaciones relativas del rms causadas por dos interarmónicos se pueden superponer linealmente.

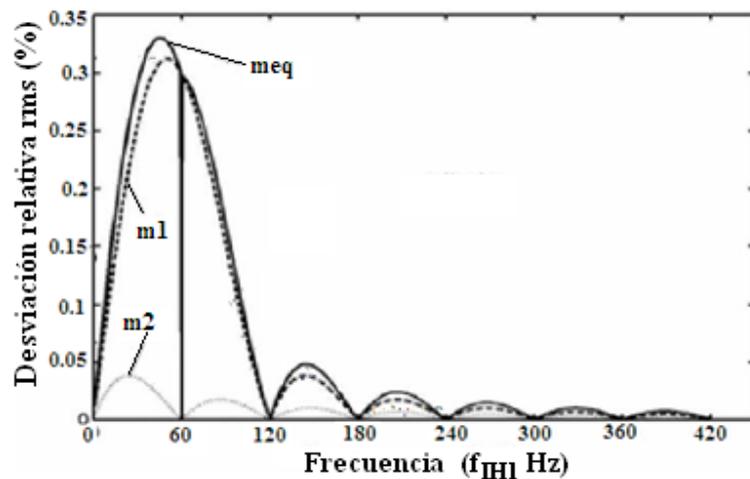


Figura 4.16. Relaciones de la desviación relativa del rms y la baja frecuencia interarmónica.

IV.4.7.-Magnitud de flicker causada por dos interarmónicos

En la ecuación es fácil ver el máximo y el mínimo de la tensión peak:

$$v_{max} = V[1 - m_1 - m_2], \quad v_{min} \cong V[1 - (m_1 + m_2)] \quad (4.37)$$

El límite superior de la desviación máxima relativa de la forma de onda que contiene los dos interarmónicos es:

$$\left(\frac{dV}{V}\right)_{peak} = m_1 + m_2 = m_{eq} \quad (4.38)$$

Es claro que la desviación máxima relativa no está relacionada con la frecuencia interarmónica. La relación de la desviación máxima relativa y de la frecuencia se demuestra en figura 4.17.

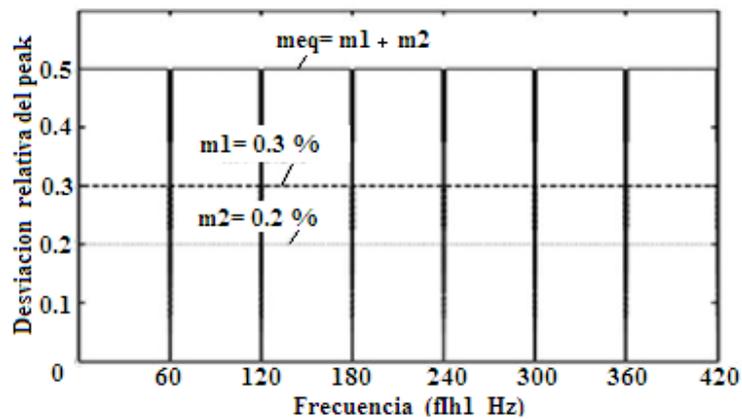


Figura 4.17. Relación de la desviación máxima relativa y de la baja frecuencia interarmónica.

IV.5. Estudio del flicker debido a la distorsión de interarmónicos producidos por las turbinas de viento [48]

Autores: Roberto Langella, Member, IEEE, Felice Liccardo, Pompeo Marino, Alfredo Testa, Senior Member, IEEE and Mariel Triggianese, Student Member, IEEE, Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Aversa (CE) (Italy).

En este documento los autores plantean una formulación matemática para la salida del medidor de flicker, cabe decir que estas formulas son aproximadas a los cálculos realizados por el medidor de flicker. Además de un estudio en las turbinas de viento y el parpadeo que producen, comienzan con el planteamiento matemático de la IEC para el medidor de flicker.

La sensación instantánea de parpadeo, es planteada a continuación:

$$PU^{GF} \cong \frac{1}{2} G^2 [G_{\Delta w}^2 (\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + 2\alpha_1 \alpha_2 \cos(\varphi_{i1} + \varphi_{i2})) + G_{2\Delta w}^2 \alpha_1^2 \alpha_2^2] \quad (4.39)$$

- ✓ $G_{\Delta w}$ y $G_{2\Delta w}$ se introduce dependiendo de la distancia de las frecuencia interarmónicas
- ✓ α es la amplitud es la amplitud del interarmónico.
- ✓ G se simplifica y se aproxima al valor $G = \sqrt{1238400}$.

Las expresiones analíticas de la sensación instantánea de parpadeo y del P_{st} se desarrollan tomando en cuenta tres situaciones:

i) Pares de tonos interarmónicos produciendo la modulación de amplitud (AM); ii) Solo un tono interarmónico (ST); iii) Pares de tonos interarmónicos produciendo la modulación de fase (PM)

$$PU^{AM} \cong G^2 G_{\Delta w}^2 2\alpha^2 \quad (4.40)$$

$$PU^{ST} \cong G^2 G_{\Delta w}^2 \frac{\alpha^2}{2} \quad (4.41)$$

$$PU^{PM} \cong G^2 G_{\Delta w}^2 \frac{\alpha^4}{2} \quad (4.42)$$

Los resultados obtenidos con las formulas analíticas (círculos negros), junto con los resultados obtenidos con puesta en práctica numérica del medidor de flicker de la IEC (líneas negras) se aprecian en figura (4.18). La exactitud de la fórmula analítica es muy buena a partir del 22.5 a 50 hertzios que es la gama de interés máximo. A partir las estimaciones de 15 a 22.5 Hz. Cuando más de un par de tonos interarmónicos está presente en una señal, su efecto acumulativo, en términos de la sensación instantánea de parpadeo y P_{st} , pueden ser asumidos como la suma de las contribuciones correspondientes:

$$PU \cong \sum_k PU_k,$$

$$P_{st} \cong 0.7139 \sqrt{\sum_k PU_k} \quad (4.43)$$

En caso verdadero, el efecto sinérgico depende también de los cambios de ángulo de fase relativa entre los tonos dentro de los diversos pares y no puede explicar este efecto. Constituye una fórmula para una primera evaluación rápida.

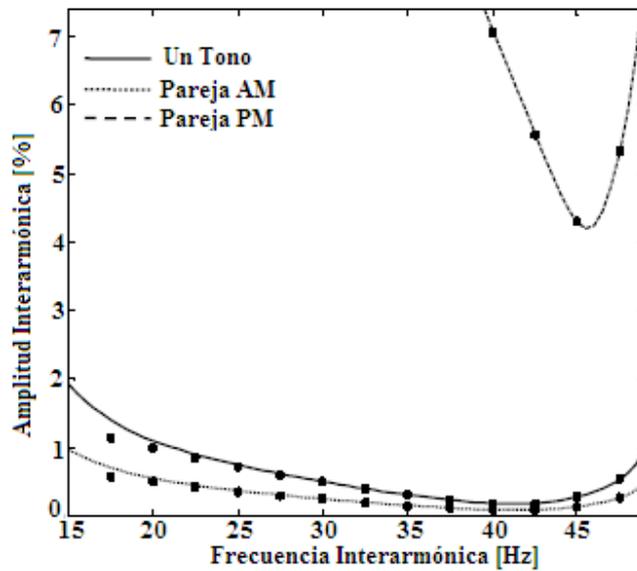


Figura 4.18. Comparación de los resultados obtenidos por una puesta en práctica numérica del medidor de flicker con los de las fórmulas analíticas.

IV.5.1.-Sistemas de turbinas de viento

Dos tipos principales de turbinas de viento están siendo instalados hoy en día: las turbinas de viento de velocidad fija con un generador conectado directamente con la red eléctrica y las turbinas de viento de velocidad variable con un generador sincrónico, con un convertidor en el circuito del estator o un generador de anillos deslizantes de inducción y un convertidor en el circuito del rotor.

Las turbinas de velocidad variable son de grado de inclinación regulable, torsión regulable en el rotor para llegar a su máximo punto de energía, además las turbinas de velocidad fija son de detención regulada o de detención activa regulada. La regulación de parada activa significa que el grado de inclinación del ángulo está ajustado levemente para obtener siempre un nivel de energía correcto. La energía reactiva (consumo o producción) de una turbina de viento es esencial para determinar el impacto en el nivel de tensión de estado estacionario.

Con este fin, la energía reactiva se debe especificar como valores medios en función de la potencia de salida de la turbina de viento. Las turbinas de viento de velocidad fija emplean los generadores de inducción. Éstos consumen energía reactiva mientras que producen energía activa. Comúnmente, el consumo de energía reactiva es compensado por la instalación de condensadores. Estos condensadores pueden ser regulables para eliminar el consumo de potencia reactiva en todo momento de operación.

Las turbinas de viento que emplean los convertidores de frecuencia para la operación a la velocidad rotatoria variable, pueden consumir o producir energía reactiva dependiendo del diseño y de la estrategia operacional del convertidor. Típicamente el convertidor se ajusta para acercarse al consumo de reactivo cero, o para compensar variaciones de tensión. Ambos casos se consideran en este documento.

a.- Una turbina de viento de velocidad fija con un generador de inducción conectado directamente con la red, ha sido simulada en el dominio del tiempo. Los resultados son expuestos en la tabla 4.8.

Potencia nominal	P _{nom}	275 kVA
Tensión Línea a Línea	V _n	480 V
Frecuencia	f	50 Hz
Par de Polos	P	2
Resistencia del rotor	R _r	0.015(pu)
Impedancia del rotor	L _r	0.06(pu)
Resistencia del Estator	R _e	0.016(pu)
Impedancia del Estator	L _e	0.06(pu)
Inductancia Mutua	L _m	3.5(pu)
Potencia del Condensador	P _c	75 kVAr

Tabla 4.8. Caso de estudio 1. Simulación de parámetros del motor.

b.- La turbina de viento de velocidad variable está conectada con la red por un convertidor conectado en serie, se considera el caso 2a con control de tensión en el punto común de acoplamiento y el caso 2b sin control de tensión en el punto común de acoplamiento.

El control de tensión se modela por medio de un inversor de fuente de tensión. Los parámetros del filtro de la salida del inversor fuente de tensión son:

$$R = 1m\Omega \text{ y } L = 5mH$$

El inversor tipo fuente de tensión es controlado por medio de un modelo simplificado del punto de energía máximo del sistema. Se asume que para cada valor del viento la energía activa de la turbina entrega su máximo valor de potencia. El modelo de la red es igual en ambos estudios.

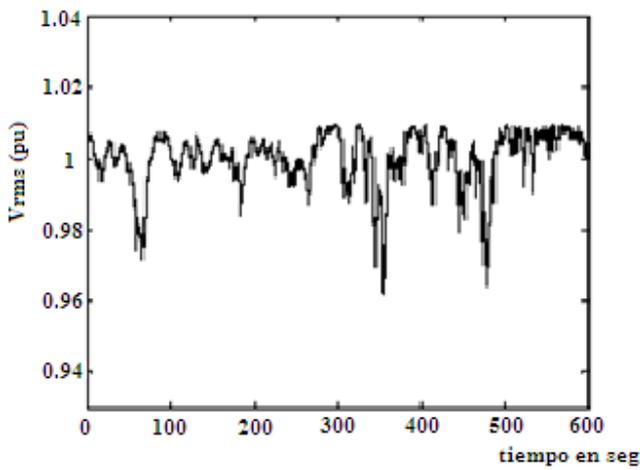


Figura 4.19. Caso 1 tensión línea a neutro.

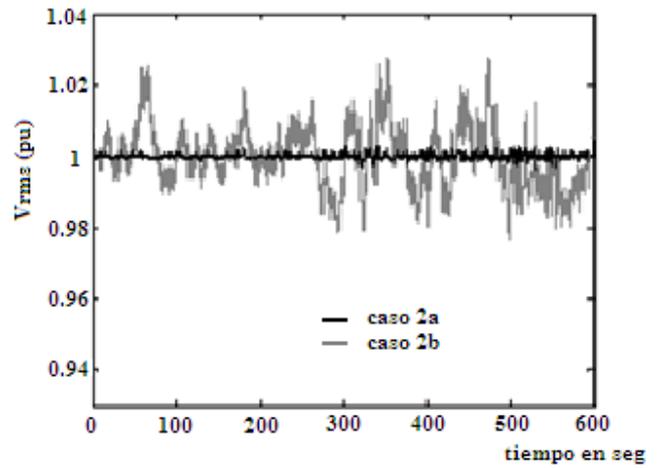


Figura 4.20. Caso 2 tensión rms v/s tiempo.

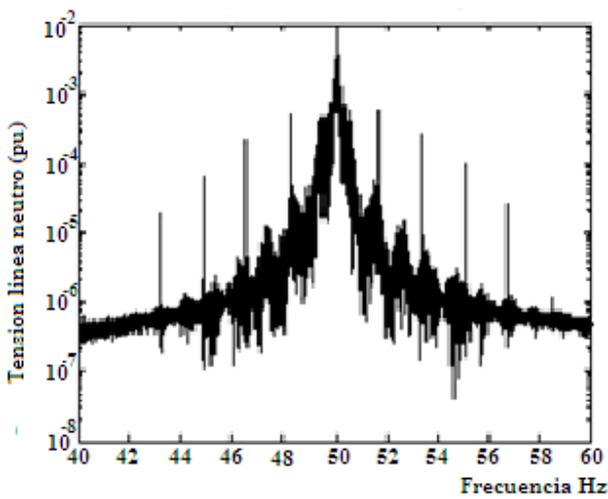


Figura 4.21. Caso 1 espectro de tensión de línea a neutro.

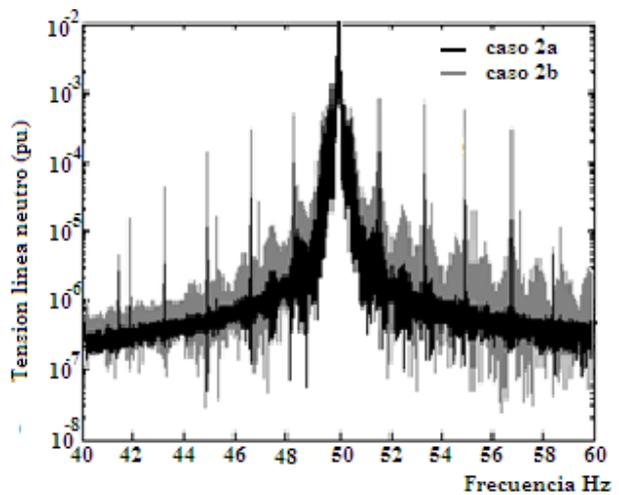


Figura 4.22. Caso 2 espectro de tensión de línea a neutro.

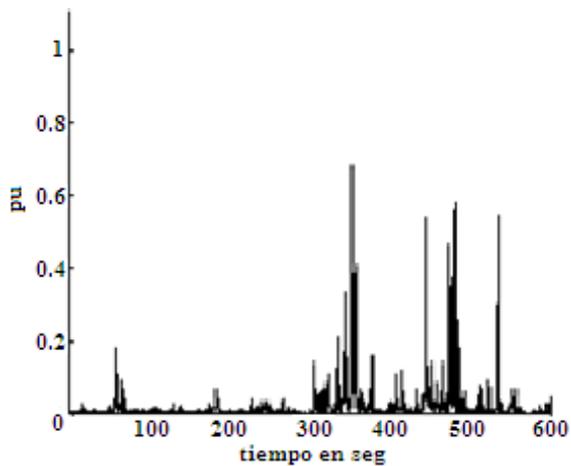


Figura 4.23. Caso 1 Medidor de flicker salida en pu v/s tiempo.

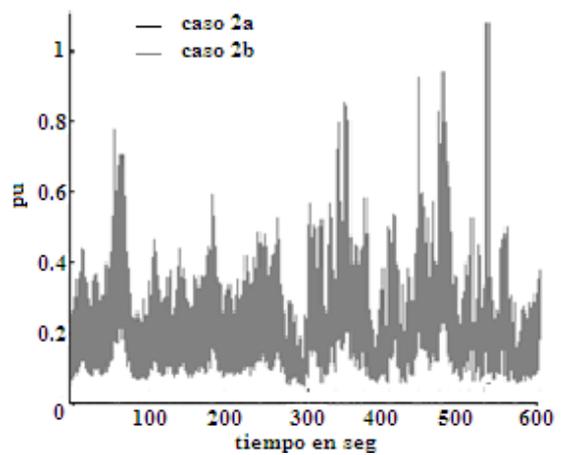


Figura 4.24. Caso 2 Medidor de flicker salida en pu v/s tiempo.

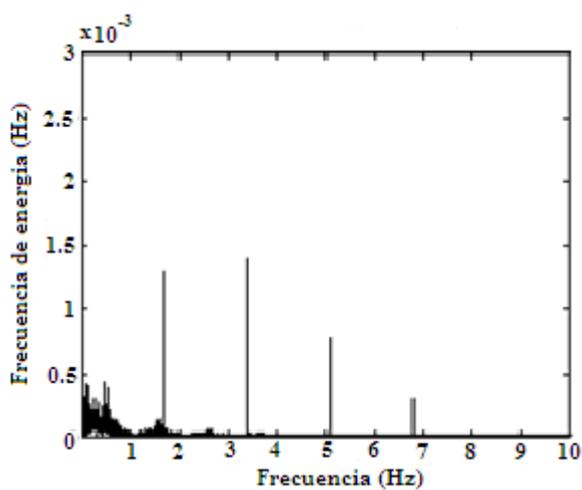


Figura 4.25. Caso 1 Espectro de frecuencia de energía fundamental.

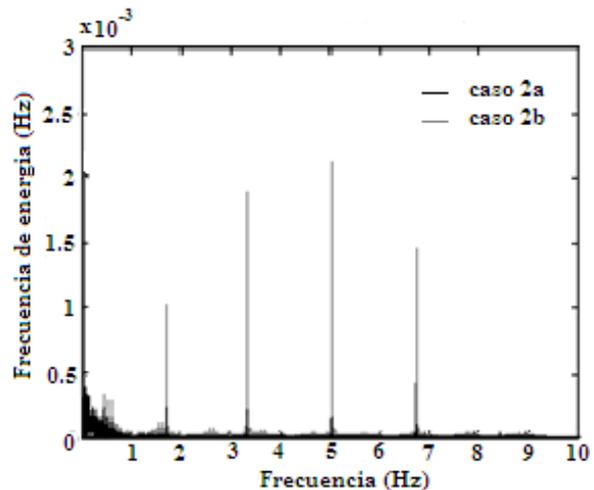


Figura 4.26. Caso 2 Espectro de frecuencia de energía fundamental.

Resultados de la simulación.

La figura 4.19 muestra el valor línea a neutro del valor rms de la tensión de salida en el PCC en el PU de 480 dividido por la raíz cuadrada de la ecuación (4.39) V para 10 minutos para el casos 1. Es evidente que el generador de inducción conectado directamente con la red sigue el comportamiento de la velocidad del viento.

La figura 4.21 muestra el espectro de tensión línea a neutro en el PCC realizado en el intervalo de 10 minutos con respecto de la PU a la fundamental. Es posible observar la presencia de interarmónicos con el valor $50 \pm k \cdot 1.7$ Hz, con $k=1, 2, 3, 4, 5$. Esta se relaciona con la modulación introducida en la serie de tiempo del viento.

La figura 4.23 muestra la sensación instantánea del parpadeo y una puesta en práctica numérica del medidor flicker de la IEC. El valor correspondiente del P_{st} también se aprecia en la figura. Es posible observar que el bajo valor del P_{st} está relacionado con la distancia de la frecuencia fundamental con los dos componentes interarmónicos y también con sus bajas amplitudes.

La figura 4.24 muestra el espectro de valores instantáneos de la frecuencia, medida en un intervalo de 10 minutos, con tensión de línea a neutro en el punto de común acoplamiento. Es posible observar componentes en $k \cdot 1.7$ Hz con $k=1, 2, 3, 4, 5$, y los distintos valores de k se relacionan con los componentes contenidos en la serie de tiempo del viento.

Figuras 4.20-4.26 son el equivalente de figuras 4.19-4.25 para el estudio de caso 2.

Es interesante observar que el sistema de control de la tensión del VSI del estudio de casos 2a se reduce fuertemente las oscilaciones del valor rms (figura 4.20) y los componentes interarmónicos alrededor de la fundamental (fig. 4.22). Por el contrario, cuando el control de tensión del inversor de fuente de tensión es desconectado, en el estudio de casos 2b, se aprecia la presencia de oscilaciones interarmónicas alrededor de la fundamental (fig. 4.22). Se aprecia mayor distorsión que en el caso 1. Esta última observación refleja también el doble del valor del P_{st} comparado con el estudio del caso 1. Finalmente, el espectro de frecuencia medido (figura (4.26)) contiene componentes en las mismas frecuencias del estudio del casos 1, muy pequeñas para el estudio de casos 2a y más alto para el estudio de casos 2b.

En la tabla 4.9 se aprecian los valores de P_{st} evaluados por la puesta en práctica digital del medidor de flicker de la IEC y del uso de la formulación de la IEC para el caso 1 y 2. La tabla 4.10 presenta

los errores de porcentaje introducidos por las fórmulas a la puesta en práctica digital del medidor de flicker de la IEC. Comparando los resultados es evidente que:

- ✓ Las fórmulas simplificadas introducen errores notables; la fórmula (4.41), que atribuye a cada par del interarmónicos una situación perfecta de la modulación de amplitud, presenta los resultados más cercanos al medidor de flicker de la IEC, parcialmente compensando la evaluación optimista de los efectos sinérgicos introducidos por (4.43);
- ✓ La fórmula (4.41), que atribuye a cada par de interarmónicos una situación perfecta de la modulación de fase implica que los resultados son inexactos;
- ✓ Las fórmulas (4.40), (4.41), y (4.42) permiten la comparación relativa entre diversos casos considerados con los errores más bajos que los relacionados con los valores absolutos.

	Caso 1	Caso 2	
		a	b
Pst del IEC	0.228	0.0055	0.485
Pst de (4.43) y (4.40) GF	0.178	0.031	0.306
Pst de (4.43) y (4.41) AM	0.192	0.032	0.372
Pst de (4.43) y (4.42) ST	0.137	0.023	0.3

Tabla 4.9. P_{st} para valores del medidor de flicker de la IEC y la aplicación de formulas de (4.40) a (4.43) para ambos casos.

	Caso 1	Caso 2	
		a	b
Pst de (4.43) y (4.40) GF	-22%	-44%	-33%
Pst de (4.43) y (4.41) AM	-16%	-42%	-19%
Pst de (4.43) y (4.42) ST	-40%	-58%	-34%

Tabla 4.10. Porcentaje de error respecto al medidor de flicker de la tabla 4.9.

IV.6. Pruebas de lámparas fluorescentes por su susceptibilidad parpadeante hacia tensiones interarmónicas [28]

Autores: S. Chen, Senior Member, IEEE, C. M. Lo, M. K. Foo, and K.T. How, non-members, 2007.

Este artículo describe los resultados de una investigación experimental frente a la sensibilidad que presentan los tubos fluorescentes ante el flicker. Los autores investigaron tres grandes categorías de tubos fluorescentes ampliamente usados. Los resultados y conclusiones mencionadas se basan en estudios de respuesta humana al parpadeo de la luz en lámparas incandescentes de 60W. Además, la causa de la luz parpadeante se limita a los cambios rectangulares y sinusoidales de la magnitud RMS de la fuente de tensión. Los tubos fluorescentes con ballast trabajan a una corriente constante y son generalmente considerados de ser inmunes a estas variaciones de tensión. Sin embargo, estudios recientes han mostrado que los tubos fluorescentes son también susceptibles al parpadeo bajo ciertas condiciones. Específicamente, el parpadeo en tubos fluorescentes corresponde a la presencia de tensiones interarmónicas, teniendo frecuencias que están cerca de ser la frecuencia fundamental o armónicas extrañas [49] [50].

El principio sobre el cual opera el tubo fluorescente básicamente es a través del flujo de los electrones. Un tubo fluorescente es construido con un filamento similar a una ampolleta de luz incandescente, excepto que existe una capa de un material fosforescente en el interior del vidrio. El tubo en si contiene una cantidad de mercurio y gas argón.

Cuando el tubo fluorescente se prende, la corriente llega a ambos lados del tubo. Los electrones se moverán de un lado (cátodo) al otro (ánodo). Esto energiza el gas argón, causando que se activen los átomos de mercurio. Esta energía causa que algunos átomos de mercurio en el tubo cambien de estado líquido a gaseoso. Eventualmente algunos electrones y átomos cargados van a colisionar con los átomos de mercurio en estado gaseoso. Estas colisiones provocan que los electrones de los átomos salten a un nivel de energía más alto. Cuando los electrones vuelven a su nivel de energía original, ellos liberan protones livianos que quedan entre el rango ultravioleta de 200nm a 400nm. Esto sin embargo no es visible al ojo humano. El proceso denominado fluorescencia a través de la interacción entre la capa fosforosa y protones de luz luego convierte la energía en una rango diferente, un rango más visible de 500nm a 700nm [51] [52].

El parpadeo es difícil de cuantificar, ya que es un problema de percepción. Actualmente, el estándar más relevante y mayormente adoptado para la medición del parpadeo es el IEC 61000-4-15 [51]. Por lo tanto, para asegurar que este estudio es relevante, es necesario caracterizar la medición del parpadeo en alguna unidad de acuerdo a este estándar.

El medidor de parpadeo de la IEC se basa en la percepción de observadores sometidos al estándar de la ampollita incandescente de 60 W con variaciones de tensión.

El sistema de medición del parpadeo puede ser separado en 3 partes:

- ✓ Generando interarmónicas con fluctuación de tensión.
- ✓ Sintiendo la respuesta de la lámpara.
- ✓ Cuantificando la intensidad del parpadeo o percepción.

Para realizar el estudio o prueba, se implementa el siguiente modelo:

Dos cabinas luminosas fueron construidas para este estudio. El propósito de la cabina es almacenar el tubo fluorescente o la ampollita incandescente bajo prueba, y atrapar el máximo posible de fotones de luz producidos por la lámpara. La intensidad de la luz es medida por un foto detector y un sensor.

La pared interna de la cabina de luz número uno es pintada de negro para reducir el reflejo. Las aberturas de la cabina de luz son tapadas y una tela negra es preparada para cubrir su superficie. Esto es para prevenir que entre cualquier rayo de luz cuando el experimento se esté ejecutando. Una segunda cabina de luz es necesaria para probar el buen acomodamiento de los tubos fluorescentes convencionales en forma tubular. Un foto sensor es usado para ambas cabinas de luz. Sin embargo, el interior de la cabina número dos no es pintada negra, entonces así se analizara cuán significativo son los reflejos en la influencia del parpadeo de luz. El procedimiento para realizar la prueba consta de cuatro pasos que se mencionan a continuación:

Paso 1. Generación de la tensión de parpadeo

Un sistema de generación de parpadeo es necesario para crear la variación de la tensión y la frecuencia interarmónica. Un sistema de chequeo de calibración es necesario para regular la señal

de parpadeo dentro de un rango permitido por el instrumento de medida. Se sostiene un rango de tensión de 0-300 Vrms ac. y 0-424 V dc. En la unidad también puede intervenir un PC vía RS-232 permitiendo ser controlado por un software.

Paso 2. Circuito foto sensible

El objetivo principal de este estudio es detectar interarmónicas que causen parpadeos de luz perceptible. Los ojos humanos reaccionan de manera diferente hacia la luz de distintas ondas. Si una persona con una visión normal tiene alta sensibilidad de onda de 555nm, un sistema de detección de luz tiene que ser elegido para trabajar bien alrededor de esa región. Después de estudios exhaustivos de sensores de luz comercialmente disponibles, se elige un “fotodiodo” (Un fotodiodo es un semiconductor sensible a la incidencia de la luz visible o infrarroja) BPW21. Este “fotodiodo” está bien situado en el conjunto lámpara-ojo-cerebro desde que su sensibilidad espectral es la más cercana a lo que el ojo humano percibe. Aparte de esto, el “fotodiodo” tiene una gran capacidad que reduce el ancho de banda. El “diodo” puede medir la intensidad de luz sobre 105 Lux. Lo más importante, es que se muestra una relación lineal entre la salida de la corriente y la intensidad de la luz, haciéndolo mucho más fácil de medir.

Paso 3. Evaluación del parpadeo de luz perceptible

La luminosidad de las lámparas testeadas por el circuito foto sensor se evaluó por el parpadeo de luz perceptible. En este estudio, la potencia espectral de la medición de la señal de luminosidad es computarizada y después medida de acuerdo a la perceptibilidad especificada en el std. IEC 61000-4-15. En otras palabras, el sistema de recolección de información es conformada como el conjunto lámpara-ojo-cerebro.

Paso 4. Calibración según el std. IEC 61000-4-15

Como no es muy práctico repetir los tediosos experimentos de testeo de percepción del parpadeo causado por tubos fluorescentes, el sistema de evaluación es en principio calibrar la referencia establecida por lámparas incandescentes como se establece en el std. IEC 61000-4-15. Esto asume que la percepción del parpadeo de luz es igualmente válido, independientemente de la lámpara

testeada sea incandescente o fluorescente. Por consiguiente, el sistema de medición tiene que primero ser calibrado a este estándar.

Inicio de las pruebas.

Primero una lámpara incandescente de 60 W es puesta en la cabina de luz y sometida a fluctuaciones de tensión. La magnitud y frecuencia de las variaciones de tensión son definidas en la IEC, donde el parpadeo de luz perceptible es considerado de ser observable por el 50% de los participantes del experimento. Como era de esperarse, esto muestra una tendencia similar a otros estudios ante la variación de la magnitud de la tensión, con el más bajo valor registrado fluctuando a los 8.8 Hz. Pruebas similares son realizadas en ambas cabinas de luz y ellas muestran resultados similares. Esto implica que el efecto de los reflejos de las paredes internas de la segunda cabina no es significativo. Por lo tanto, el sistema de medición, una vez calibrado, es igualmente aplicable por el uso de cualquier cabina.

Con el sistema de medida calibrado al std. IEC 61000-4-15, muchas lámparas fueron testeadas por su susceptibilidad para tensiones interarmónicas. Las pruebas fueron hechas asumiendo que hay un solo componente interarmónico en la fuente de tensión. El procedimiento es ajustar la magnitud de cada tensión interarmónica hasta que el parpadeo de luz medido se combine con el valor calibrado. Esto es una ardua tarea y es necesario que la lámpara y al sistema de instrumentos vuelvan a la normalidad antes de efectuar nuevas mediciones.

Los resultados del experimento se muestran a continuación en las figuras 4.27, 4.28, 4.29 y 4.30 respectivamente.

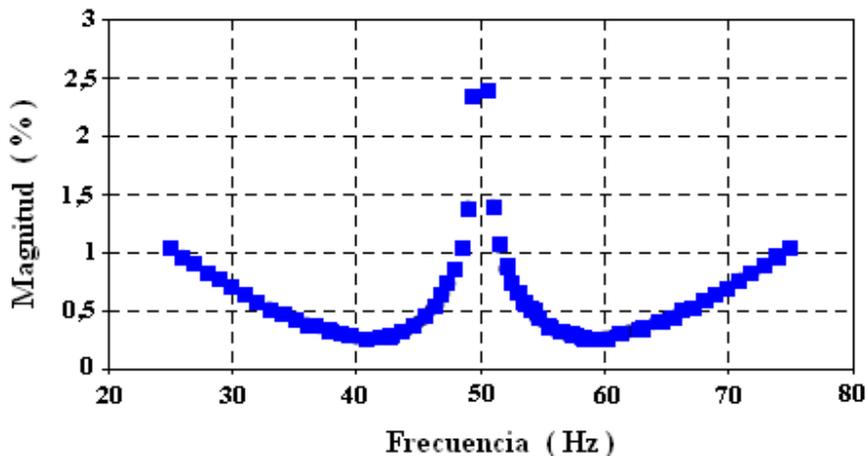


Figura 4.27. Tensión interarmónica para lámpara incandescente.

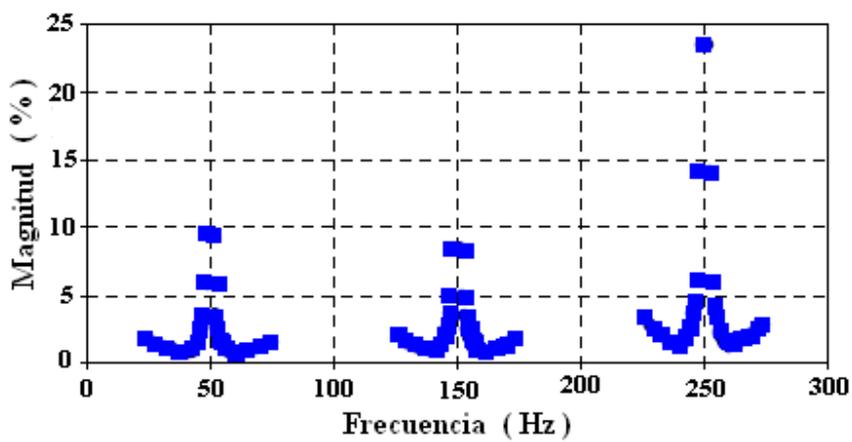


Figura 4.28. Tensión interarmónica para lámpara fluorescente compacta de 11W.

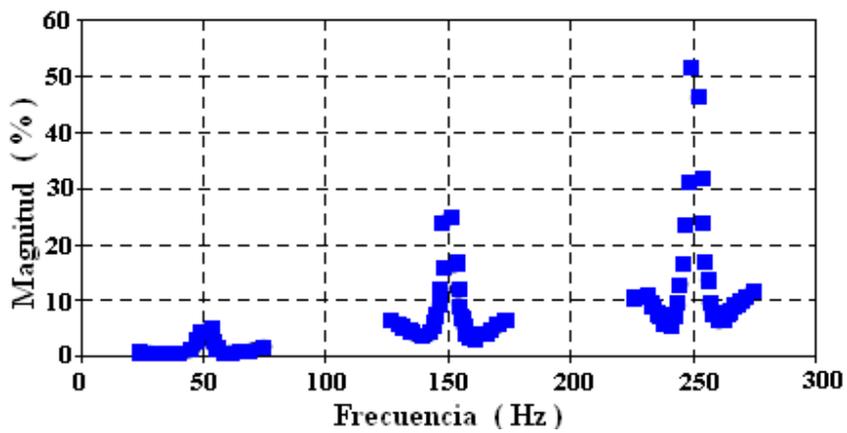


Figura 4.29. Tensión interarmónica para lámpara fluorescente con ballast magnético.

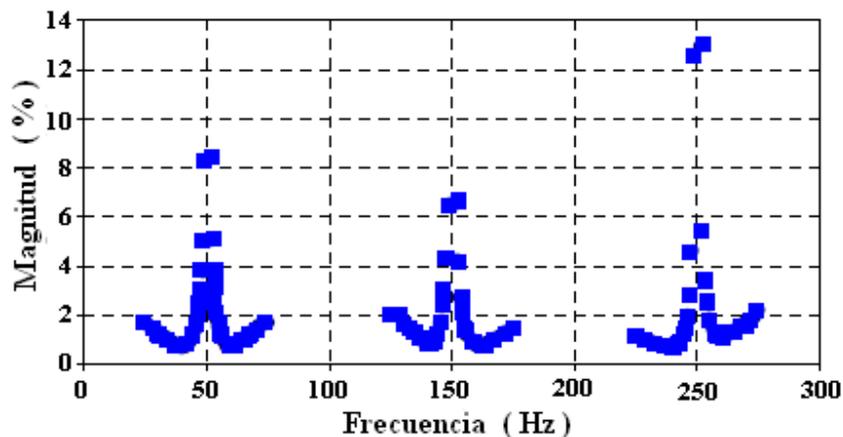


Figura 4.30. Tensión interarmónica para lámpara fluorescente con ballast electrónico.

Los autores afirman que el parpadeo de luz no está solamente relacionado al uso de lámparas incandescentes. Los tubos fluorescentes, especialmente los que usan ballast electrónicos han de ser susceptibles de producir parpadeo. Aunque el uso de ballast magnéticos convencionales ayuda a atenuar el problema, el incremento de popularidad de las versiones electrónicas puede exasperar el problema. Esto se deba a la creciente cantidad de interarmónicos presentes en las redes de energía, debido a la creciente proliferación de los artefactos o aparatos electrónicos. Más esfuerzos son necesarios para confirmar el comportamiento de las lámparas en pos de desarrollar aún mejores soluciones.

La desventaja en el uso de tubos fluorescentes con ballast magnético radica en que no proporciona una luz continua, sino que muestran un parpadeo que depende de la frecuencia de la corriente eléctrica aplicada. Las lámparas fluorescentes consumen más electricidad y ven reducida su vida útil si son encendidas y apagadas de manera continua, ya que en el encendido les cuesta mucho más trabajo que al permanecer encendidas. Cabe recalcar que este tipo de luz, que es difusa, no es aconsejable para la lectura (lo que incluye las tareas o trabajos escolares) u otro tipo de trabajos, debido a que impide una apropiada fijación de la vista sobre el objeto [53].

IV.7. Evaluación automatizada de la sensibilidad del flicker en lámparas fluorescentes causadas por tensiones interarmónicas [31]

Autores: S. Chen, Senior Member, IEEE, M. Y. Heah, A. B. Then and M. K. Foo, non-members, 2008.

El autor de este documento afirma que los estudios y pruebas de laboratorio recientes demuestran que las lámparas fluorescentes están propensas a oscilaciones de luminosidad causados por niveles de interarmónicos que van en aumento en las redes de distribución de electricidad. Estas pruebas fueron realizadas manualmente, y por lo tanto resultaban laboriosas y con un alto grado de desperdicio de tiempo.

Por todo lo anterior, se propone un sistema automatizado para realizar la medición del parpadeo basado en el std. de la IEC 61000-4-15 en pos de un ahorro de tiempo y mano de obra.

La disposición del hardware de la fig.4.31 que se propone en el sistema automatizado de medida del parpadeo se detalla a continuación:

IV.7.1.-Cabina de iluminación

Un gabinete gris-coloreado se utiliza como la cabina de la iluminación. El propósito de la cabina es contener la lámpara bajo prueba, y atrapar tanto cuanto sea posible la luminosidad producida por la lámpara. La intensidad de luz es medida por un circuito detector y un sensor.

IV.7.2.-Trazado del circuito foto sensible

El criterio crucial en las pruebas es considerar solamente los parpadeos ligeros que son perceptibles. Por lo tanto, el sistema de medida debe demostrar un tipo de respuesta de manera similar a cómo el ojo humano reacciona a la oscilación luminosa. El ojo humano reacciona en forma diferente hacia la propagación de la luz en diversas longitudes de onda. Puesto que una persona con visión normal tiene especialmente alta sensibilidad a la longitud de onda de 555 nm, se ha propuesto el fotodiodo BPW21, que exhibe tales características y se utiliza para construir el trazado del circuito de detección [53]. Este fotodiodo es el más adecuado para cumplir con la relación Lámpara-Ojo-Cerebro [54], puesto que su sensibilidad espectral está más cercana a la del

ojo humano. Más importante aún es que se demuestra una relación lineal entre la corriente de salida y la intensidad de luz, por lo que la hace mucho más fácil de medir.

IV.7.3.-Fuente programable de CA

Para generar las formas de onda de la fuente de tensión necesaria en las pruebas, se utiliza una fuente programable de CA. Esta fuente es capaz de producir tensiones interarmónicas de la magnitud y de la frecuencia definidas por el usuario. La unidad también se puede interconectar con un PC permitiendo que sea controlado por el software para requisitos particulares.



Figura 4.31. Componentes físicos del sistema propuesto de medida del parpadeo.

IV.7.4.-Sistema de adquisición de datos con entrada analógica (AI) y salida analógica (AO)

Para proveer de un interfaz entre la medida, el software, el foto sensor y la fuente de energía, se elige un sistema de adquisición de datos con AI y AO.

Antes de que se utilice el sistema de medida del parpadeo, éste necesita ser calibrado para detectar el parpadeo perceptible. Una lámpara incandescente de 60 W se pone en la cabina de iluminación y se somete a las fluctuaciones de tensión según lo definido en el std. IEC 61000-4-15 [56]. El nivel registrado del parpadeo en la frecuencia respectiva se registra como valor de referencia.

El software de prueba automatizado se desarrolla usando LabVIEW™ (Programa que se utiliza para la prueba, medida y control de datos a partir de un hardware definido). Para automatizar el sistema de prueba del parpadeo, hay básicamente tres funciones para que el programa se realice:

- ✓ Crear y generar la tensión de la fuente de prueba.
- ✓ Analizar el nivel de flicker.
- ✓ Comparar el porcentaje del parpadeo y tomar la decisión apropiada ajustando hacia arriba la magnitud, si el porcentaje del parpadeo es más bajo que la referencia o hacia abajo si es más alto que la referencia.

Con el sistema de medida calibrado al std. IEC 61000-4-15, varias lámparas fluorescentes compactas fueron probadas para analizar la sensibilidad a las tensiones interarmónicas. La lámpara incandescente de 60 W también fue probada para establecer su sensibilidad ante la presencia de interarmónicos.

Los resultados obtenidos en las pruebas a los distintos tipos de lámparas fueron los siguientes:

- ✓ Lámpara incandescente 60 W

Si la frecuencia interarmónica está alrededor de ± 30 Hz de la frecuencia fundamental, esta tensión llevaría al parpadeo perceptible de las lámparas incandescentes. Los niveles más bajos de parpadeo varían entre los 8 Hz y 10 Hz (Frecuencia de fluctuación o frecuencia modulada) al rededor de la frecuencia fundamental.

Esto da como resultado un parpadeo ligero perceptible como se muestra en la figura 4.33.

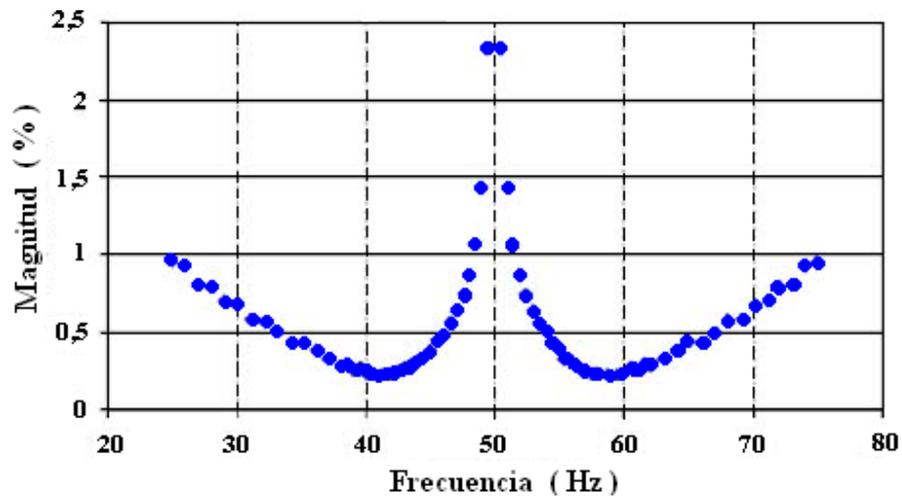


Figura 4.32. Tensiones interarmónicas dando por resultado parpadeos ligeros perceptibles de la lámpara incandescente de 60 W.

✓ Lámpara fluorescente compacta

Las pruebas se desarrollaron a partir de lámparas fluorescentes compactas de 5 W, 11 W y 15 W. Las pruebas se realizan entre los 0,5 y 25 Hz, alrededor de la armónica fundamental (50 Hz), la tercera armónica (150 Hz) y la quinta armónica (250 Hz), lo que explica y da como resultado que las lámparas fluorescentes compactas tienen una tolerancia levemente más alta contra interarmónicos de alta frecuencia. Se vislumbra además que existe una pequeña diferencia de resultados de sensibilidad de parpadeo alrededor de la componente de quinta armónica. Los resultados se muestran gráficamente en las figuras 4.33, 4.34 y 4.35 respectivamente.

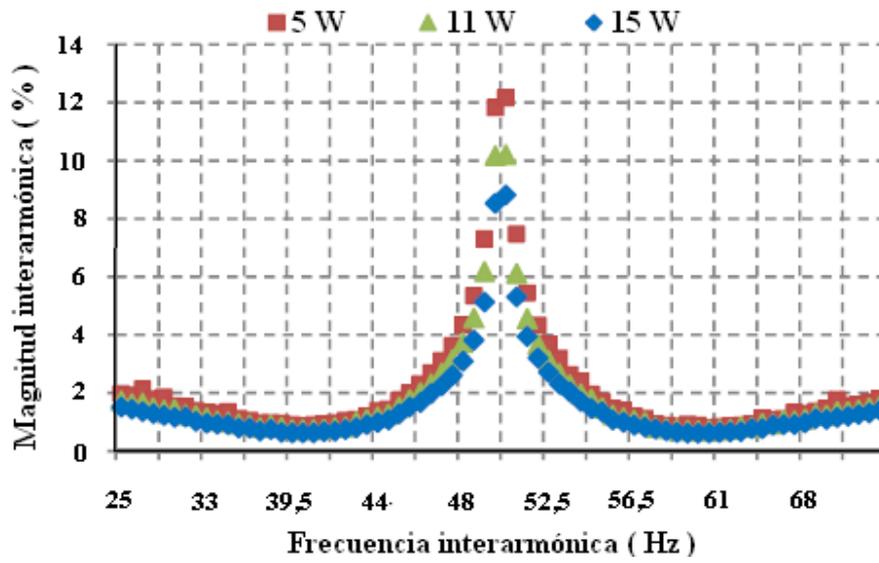


Figura. 4.33. Flicker causado por interarmónicos alrededor de la frecuencia fundamental.

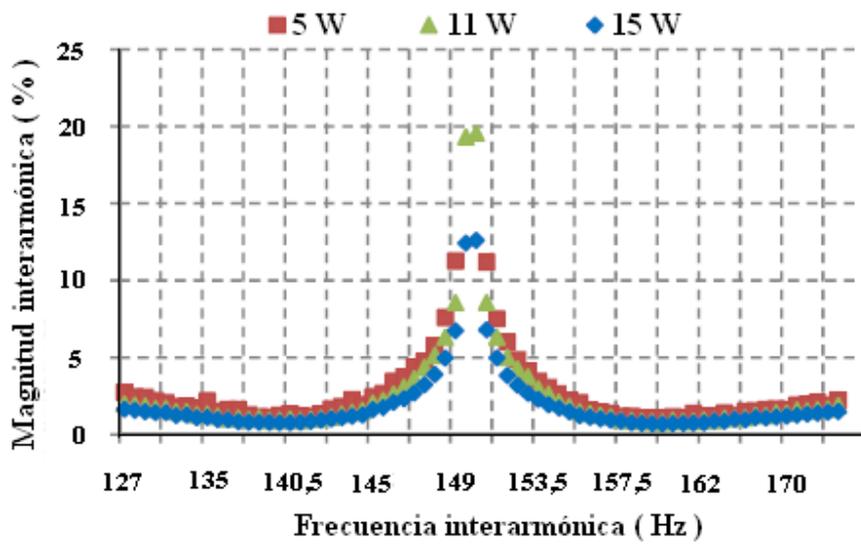


Figura 4.34. Flicker causado por interarmónicos alrededor de la componente de tercera armónica.

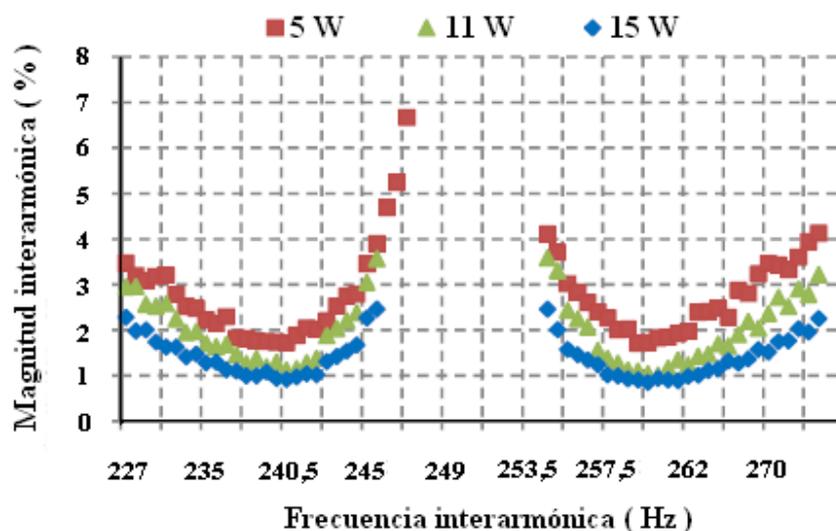


Figura 4.35. Flicker causado por interarmónicos alrededor de la componente de quinta armónica.

✓ Tubo fluorescente convencional con ballast electrónico

Los resultados obtenidos en las pruebas de los tubos fluorescentes convencionales se asimilan a las lámparas fluorescentes compactas de 11 W, en donde las dos curvas se sobrepone en muchas frecuencias, lo que confirma que los dos tipos de lámparas tienen sensibilidades similares a las tensiones interarmónicas, como se muestra en la figura 4.36.

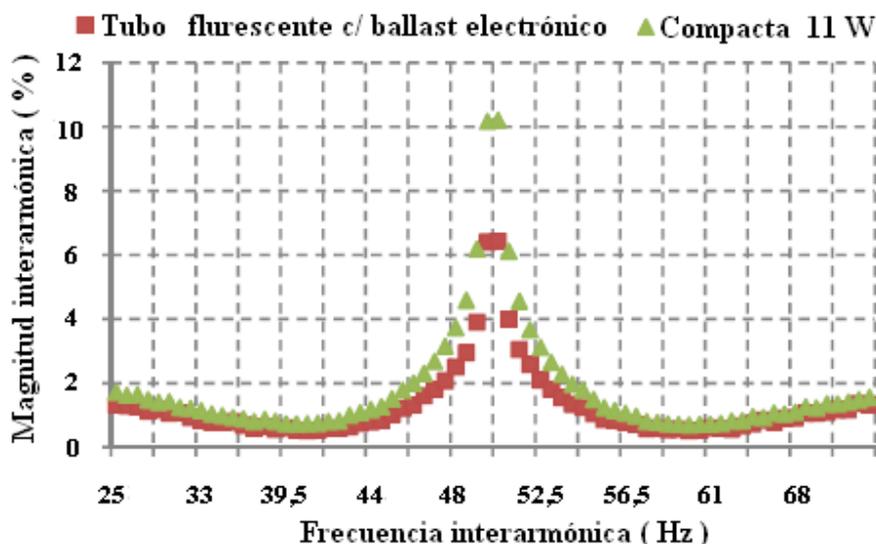


Figura 4.36. Sensibilidad del tubo fluorescente con ballast electrónico comparado con la lámpara compacta de 11 W.

IV.8. Requisitos internacionales del flicker en redes de medida y alta tensión en el mundo [32]

Autores: Detmar Arlt, Prof. Dr.-Ing. Dept. of Electrical Engineering University of Applied Sciences Duesseldorf, Germany. Maïke Stark, B. Sc. Dept. of Electrical Engineering University of Applied Sciences Duesseldorf, Germany. Christian Eberlein, Dipl.-Ing. SMS Demag Duesseldorf and Hilchenbach, Germany, 2007.

Es de común conocimiento que las compañías o industrias consumen niveles de energía muy superiores a los que consume un cliente residencial. Entre estas compañías podemos citar el ejemplo de plantas siderúrgicas, con sus hornos de arco eléctrico, conectadas o suministradas por niveles de alta o media tensión, lo que provoca un comportamiento inestable debido al funcionamiento de cargas fluctuantes conectadas a la red.

Así, para las empresas de distribución de energía, estas plantas tienen que satisfacer requisitos especiales con respecto a la calidad de la energía, porque sus equipos pueden causar variaciones periódicas de tensión en las redes de suministro, que se podrían transferir vía el punto común de conexión (PCC) a las redes de baja tensión que están suministrando a clientes residenciales. En redes de baja tensión las fluctuaciones periódicas de tensión producen el flicker.

Se podría esperar que los niveles de planeación o requerimiento en base a los estándares internacionales de parpadeo adoptados por los países no se diferencien mucho unos de otros. Sin embargo existen grandes diferencias en los niveles del planeamiento del parpadeo y los requisitos dados en el mundo por las empresas de servicio público a sus clientes.

Se compara el planeamiento internacional y nacional que nivela el parpadeo en redes de alta tensión y demostrar que hay diferencias notables.

Además, los resultados de las medidas del parpadeo “en el mundo real” serán utilizados para demostrar que hay casos en los cuales los valores medidos del parpadeo en las redes de alta tensión, que están suministrando áreas industriales, son mucho más altos que los niveles comunes de planeamiento dados en varios estándares. Sin embargo no hay quejas de los consumidores privados.

Los niveles dados por estándares internacionales y nacionales o por las empresas eléctricas a escala nacional pueden diferenciar mucho unas de otras, aunque todos estén utilizando la misma definición del parpadeo, que es dada por la IEC 61000.

Los estándares utilizados para la medida del parpadeo son el P_{st} y el P_{1f} estudiados y analizados en capítulos anteriores. Las medidas del parpadeo se hacen generalmente durante un plazo de una semana, porque los valores de P_{st} difieren generalmente mucho de un intervalo de tiempo a otro. Algunos de los valores medidos tienen que estar por debajo de un nivel requerido. Algunos ejemplos se demuestran en la tabla 4.11.

Estándar de empresa eléctrica	Requerimiento
Alemania/Grid code (VDEW)	$P_{st} < 0,8$; $P_{1f} < 0,59$
Inglaterra/P28	$P_{st} \text{ max} < 1$
Rusia/GOST 13109/97	$P_{st} < 1,3$
China/GB12326/2000	$P_{st} 95 \leq 0,8$; $P_{1f} 95 \leq 0,6$
Korea/ KEPCO	$\Delta v_{10} < 0,45$
Taiwan/TPC	$\Delta v_{10} < 0,45$
Francia	$P_{st} < 1$; $P_{1f} < 1$

Tabla. 4.11. Estándares de empresas eléctricas en distintos países con respecto a niveles de P_{st} y P_{1f} en redes de alta tensión.

País	Ciudad	Empresa	Requerimiento
Bosnia-Herzegovina		BH-Steel	$P_{sc} < 1$
China		Zuijang	$\Delta v_{10} < 0,28$
China		Xingjang Baji	$\Delta v_{10} < 0,4$
Brasil		CSC	$P_{sc} < 0,8$
Luxemburgo	Differdingen	Arbed	$P_{sc} < 1$
Luxemburgo	Belval	Arbed	$P_{sc} < 0,8$
Polonia	Sceczin	Boest Alpine	$P_{ic} < 1$
Alemania		Neue Maxhutte	$P_{ic} < 1,2$
Korea	Pohang	Posco	$\Delta v_{10} < 0,54$
Korea		KIA	$\Delta v_{10} < 0,45$
Italia	Génova	Riva	$P_{sc} < 1,2$
Bélgica	La louviere	Boel	$P_{sc} < 0,8$
Portugal		Siderurgia National	$P_{sc} < 1,1 ; P_{ic} < 0,8$

Tabla 4.12. Requerimientos de medidas de P_{sc} y P_{ic} en redes de alta tensión.

En este documento se destaca que los niveles reales de P_{sc} y P_{ic} medidos en el mundo, prueban que los valores de flickers en sistemas de alta tensión pueden ser generalmente mucho más altos que los niveles requeridos en los estándares, sin causar quejas de los clientes residenciales, los cuales se suministran con baja tensión.

País	Fuente de flicker	Nivel de tensión y nivel de flicker	Referencia
Noruega		132kV Pst99 2	[57]
Bélgica	6 Hornos de arco	Pst99 > 1,7 ;Plt99 > 1,19	[58] [64]
España	2 Hornos de arco	Pst99 > 1,7 ;Plt95 > 1,2	[59]
Suiza	Ciudad industrial	400 kV Pst99 1,7 145 kV Pst99 2,84	[60]
Irlanda	Laminador	110 kV Pst99 1,05	[61]
Irlanda	Horno de arco	110 kV Pst99 1,4	[62]
Italia	Horno de arco	220 kV Pst99 1,26	[63]

Tabla 4.13. Medidas reales de niveles de flicker en distintos países.

Este hecho prueba que desafortunadamente todavía no se ha encontrado el acceso a los estándares o a las recomendaciones nacionales e internacionales. En este campo todavía hay mucho trabajo por hacer.

5. CAPITULO V: ANÁLISIS CRÍTICO DEL ESTADO DEL ARTE

V.1. Un nuevo acercamiento del dominio de la frecuencia para la evaluación de flicker de hornos de arco

En el estudio realizado en las páginas anteriores, se puede decir que el método del dominio de la frecuencia presenta una herramienta rápida para comprender el efecto flicker o parpadeo y una manera de analizar el aporte de cada interarmónico a una medición o estudio. Se probó que este método es confiable al momento de realizar un análisis de hornos de arco eléctrico, pero hay que tener en consideración que es un acercamiento a la medición ya que al momento de evaluar el P_{st} se debe tomar como referencia la medición del medidor de flicker de la IEC.

Un tratamiento detallado en el dominio de frecuencia del parpadeo producido por los hornos de arco se ha desarrollado en base del medidor de flicker estándar del IEC. Los aspectos claves de este análisis son:

- ✓ Cálculo del componente dc de la sensación del parpadeo.
- ✓ Evaluación de la respuesta transitoria de este componente por medio de un algoritmo muy simple.

El uso de una ventana de 10 ciclos, es decir, 200ms y cuatro pares de interarmónico proporciona resultados satisfactorios, por lo tanto según la recomendación de la IEC 61000-4-7, un tratamiento unificado de las medidas armónicas, interarmónicas y de parpadeo se pueden realizar con la transformada rápida del Fourier (FFT). Con este valor se puede lograr una mejor aproximación de señal en el tiempo y en la frecuencia en el programa Matlab. De esta forma sería sencillo agregar una salida para el valor del parpadeo.

V.2. Detección del flicker causado por interarmónicos

El flicker corresponde al centelleo de los dispositivos de iluminación a medida que varía o fluctúa la tensión en determinados instantes de tiempo. Se entiende de tal forma el análisis y estudio del

flicker sobre los cuatro dispositivos de iluminación comúnmente usados por la mayoría de las personas en todo tipo de lugares (casas, oficinas).

La ondulación de las señales de control y equipos de soldadura pueden causar el parpadeo en los dispositivos de iluminación muy sensibles como las lámparas económicas y los tubos fluorescentes equipados con ballast magnético o de hierro. Los disturbios se observan a menudo en las oficinas equipadas con los viejos dispositivos de iluminación (ballast magnético). En los tubos fluorescentes con los ballast electrónicos es casi siempre insensible, ya que estos dispositivos trabajan a mayores frecuencias que las lámparas de filamento comunes o compactas como se pudo apreciar en la figura 4.7., en donde se comparan los cuatro dispositivos analizados. En el estudio realizado se advierte que las frecuencias interarmónicas afectan la sensibilidad del ojo ante la percepción del flujo luminoso fluctuante.

Cabe destacar que hoy en día, la mayoría de las personas comúnmente utilizan lámparas comunes o de filamento en sus instalaciones domiciliarias, en general por su bajo costo y fácil instalación o reposición, lo que deja de manifiesto un alto grado de contaminación por efecto flicker ente fluctuaciones inesperadas de la tensión de la red de alimentación.

V.3. Flicker causado por interarmónicos

En este estudio se analiza la deficiencia del medidor de flicker actual de la IEC con respecto a interarmónicos de baja frecuencia y se propone un nuevo acercamiento basado en el muestreo de la señal de la fluctuación de tensión. Usando el método propuesto basado en el muestreo de la señal de tensión, las fluctuaciones de valor máximo de la tensión de entrada fue examinado para determinar el parpadeo causado por interarmónicos. De acuerdo con los análisis y experimentos numéricos, fue demostrado que el método propuesto representa correctamente la frecuencia de percepción real asociada a interarmónicos en cualquier gama de frecuencia. Consecuentemente, el método propuesto puede prolongar la gama interarmónica relacionada con la detección de la oscilación más allá de la gama limitada actual del medidor de flicker de la IEC. Puesto que el método se basa en la evaluación de fluctuaciones del valor máximo de tensión, es particularmente conveniente para determinar el parpadeo de las fluctuaciones máximas de lámparas sensibles, como lámparas incandescentes y lámparas fluorescentes. En este sentido, el método se puede considerar

satisfactorio para ser complementario al estándar de la IEC que se centra en la determinación del parpadeo de las lámparas incandescentes, que son sensibles a las fluctuaciones del valor rms de la tensión. Además, los bloques propuestos en el tratamiento de las señales se pueden combinar adecuadamente con el estándar actual del medidor de flicker para tratar las limitaciones interarmónicas relacionadas.

V.4. Tensión de flicker causado por dos interarmónicos

En este estudio de la tensión de parpadeo, sobre las características causadas por dos interarmónicos (un par de interarmónicos) se presentan y se comparan con la que es causada por un interarmónico.

Las formas de onda de tensión que contienen a los interarmónicos, ya sea uno o dos, tienen las mismas frecuencias del parpadeo y formas de onda.

La forma de onda depende de la paridad de la orden armónica más cercana. Si la frecuencia interarmónica está cerca de un armónico de orden impar, la forma de onda se expande en direcciones positivas y negativas. Si la frecuencia está cerca de un armónico de orden par, cambia en un perfil sinusoidal, es decir que la onda se desplaza completamente hacia valores más altos y hacia valores más bajos alternadamente.

Las desviaciones relativas máximas rms se pueden considerar como la combinación lineal de las desviaciones causadas por más bajas frecuencia y más alta interarmónica. La desviación relativa del rms causada por dos interarmónicos se relaciona con la frecuencia interarmónica.

Las frecuencias interarmónicas más bajas juegan un papel importante en la desviación total. Es decir la frecuencia más baja interarmónica tiene más incidencia que la más grande. Si $f_{IH1} < f_1$, el valor de las frecuencias interarmónica aumenta cuando f_{IH1} disminuye. Si $f_{IH1} > f_1$, los valores de frecuencia disminuyen cuando f_{IH1} aumenta.

La desviación máxima relativa causada por dos interarmónicos no se relaciona con la frecuencia interarmónica. El interarmónico en un par tiene el mismo valor en la desviación máxima relativa.

V.5. Estudio del flicker debido a la distorsión de interarmónicos producidos por las turbinas de viento

Se ha revisado un estudio anterior para el desarrollo de una metodología del dominio de frecuencia, que está dirigido para predecir el parpadeo en la red eléctrica debido a la distorsión interarmónica producido por las turbinas de viento. A partir de los modelos numéricos de dos esquemas de la turbina de viento, se ha probado la velocidad fija y variable, las fórmulas analíticas simplificadas para la evaluación de P_{st} basada en análisis espectral de la tensión.

Las fórmulas simplificadas parecen capaces de determinar la orden de la cantidad de luz valores del parpadeo y, particularmente, las variaciones relativas entre diversos casos, pero no de evaluar los valores absolutos exactos.

Otros progresos podían introducir modificaciones oportunas simplificadas de las fórmulas para hacerlas capaces de considerar los efectos sinérgicos de diversos pares de interarmónicos, relacionados con sus fases y ángulos.

V.6.- Pruebas de lámparas fluorescentes por su susceptibilidad parpadeante hacia tensiones interarmónicas

En especial, las lámparas de incandescencia, al tener una constante térmica de los filamentos muy pequeña, responden rápidamente a variaciones en su tensión de alimentación, por lo que son muy sensibles a pequeñas variaciones de tensión repetidas.

Los ensayos y pruebas realizados en este documento afirman que los niveles de parpadeo de ampollitas de 60 W son mucho más perjudiciales para el ojo humano en comparación con los tipos de tubos fluorescentes que se sometieron a prueba, no obstante, si hacemos una comparación de los resultados entre los equipos fluorescentes con ballast magnético v/s equipos fluorescentes con ballast electrónico que fueron testeados, podemos decir que los equipos fluorescentes con ballast magnético presentan un mayor grado de parpadeo frente a fluctuaciones en la tensión del sistema.

Así también si comparamos la ampolleta de 60 W v/s los equipos fluorescentes con ballast magnético, diremos que este último presenta menores niveles de parpadeo frente a idénticas variaciones de tensión con la que fueron evaluadas. El sistema de ensayo o prueba y la metodología propuesta pueden ser utilizados como herramienta para definir los niveles de perceptibilidad adecuados para cada tipo de lámpara.

V.7.- Evaluación automatizada de la sensibilidad del flicker en lámparas fluorescentes causadas por tensiones interarmónicas

Este documento dado a conocer en el año 2008, en donde Qingsha S. Chen, confirma que las lámparas fluorescentes con ballast electrónico atenúan de buena manera frente al parpadeo causado por tensiones interarmónicas. Estos estudios han resultado satisfactorios a la hora de su evaluación final y reflejan plenamente las medidas esperadas debido a la presencia de componentes interarmónicos en la fuente de tensión. Debemos destacar que el sistema de prueba automatizado que fue desarrollado e implementado para las mediciones descritas, convergen a cabalidad con los patrones observados por otros investigadores. Con este sistema automatizado de medición de parpadeo, la determinación del comportamiento de las lámparas frente a tensiones interarmónicas resulta ser más fácil, pudiendo establecer que se puede llegar a futuro a desarrollar e implementar soluciones más simples frente a problemas más complejos que resultan de la aparición de nuevos factores que afectan a las redes de energía.

V.8.- Requisitos internacionales del flicker en redes de media y alta tensión en el mundo

En este documento, se nos da a conocer una imagen real de lo que sucede a nivel mundial, con respecto a los niveles de parpadeo o flicker aceptados y requeridos por distintos países y ciudades. Los datos comparativos que se exponen, nos dan una idea clara de las diferencias que existen frente al tema, a la hora de basar y de incorporar las medidas que proponen los estándares. Entendemos que a nivel mundial, los países adecuan la normativa internacional a su propia realidad, por cuanto todas las redes de energía en el mundo son completamente distintas en relación a la generación, niveles de tensión y características del tipo de instalación a las que se suministra la energía eléctrica.

CONCLUSIÓN

Mediante el trabajo de seminario hemos estudiado los principales aspectos técnicos y teóricos que inciden en las causas del efecto flicker. Nos hemos centrado en el problema de los armónicos y principalmente en el tema de los interarmónicos en la red de distribución de energía, sus efectos sobre los sistemas conectados a la red, los estándares internacionales más importantes que regulan este fenómeno, cuáles son sus niveles máximos admisibles, con que magnitudes evaluarlos y como medir esas magnitudes.

Con respecto al tema de flicker, hemos encontrado que la medida de armónicos e interarmónicos en el marco de los estándares de IEC se basa en el análisis de Fourier con una ventana rectangular de duración 10 ciclos de la frecuencia fundamental de la red.

Ese término, flicker o parpadeo, se deriva del impacto de las fluctuaciones de tensión en lámparas, de forma tal que ellas se comportan y son percibidas por el ojo humano como una especie de “parpadeo”. Para ser técnicamente correctos, la fluctuación de la tensión es un fenómeno electromagnético, mientras que el “flicker” es un resultado indeseable de la fluctuación de tensión en algunas cargas. Sin embargo, los dos términos están frecuentemente enlazados entre sí en estándares.

Los armónicos son corrientes y tensiones sinusoidales que tienen una frecuencia que corresponden al múltiplo entero impar o par de la frecuencia fundamental (frecuencia a la cual el sistema de alimentación está diseñado para operar, generalmente 50 Hz o 60 Hz). Las formas de onda distorsionadas pueden ser descompuestas en una suma de la frecuencia fundamental y las frecuencias armónicas asociadas.

La distorsión armónica se origina en las características no lineales de los dispositivos y cargas en el sistema de potencia. Los interarmónicos son tensiones o corrientes que tienen componentes con frecuencias que no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. Los interarmónicos pueden encontrarse en redes de todas las clases de tensión. No han sido estudiados ni conocidos a profundidad todos los aspectos de causas y efectos de los interarmónicos. Las principales fuentes de formas de distorsión de formas de onda de interarmónicos son:

- a.- Convertidor de frecuencia estático.
- b.- Ciclo convertidores.
- c.- Motores de inducción.
- d.- Hornos de arco.

El tema de la calidad de servicio es complejo por la interacción entre los diversos agentes: generadores, distribuidores y clientes conectados a un mismo sistema interconectado. Se hace notable el problema cuando es necesario hacer inversiones para reducir los efectos indeseables que perjudican la calidad de servicio. En general cada situación debe estudiarse específicamente. Entre las medidas más comunes están:

- ✓ Planificar la incorporación de consumos no lineales e intermitentes con una configuración de red eléctrica con una división de las cargas no lineales que permita una superposición favorable, con una alta relación de la potencia de cortocircuito sobre la potencia no lineal en el punto de acoplamiento común.
- ✓ En lo posible, se trata de reducir las exigencias simultáneas al sistema de compensación tratando de compatibilizar la necesidad de compensar potencia reactiva, reducción de distorsión armónica y flicker.

A pesar de que no todos los equipos conectados a la red responden por igual a este tipo de perturbación, se ha observado que algunos tipos de luminarias son especialmente sensibles. En especial, las lámparas de incandescencia, al tener una constante térmica de los filamentos (de wolframio o tungsteno) muy pequeña, responden rápidamente a variaciones en su tensión de alimentación, por lo que son muy sensibles a pequeñas variaciones de tensión repetidas. Los tubos fluorescentes, necesitan fluctuaciones de un orden cuatro veces superior en magnitud que las requeridas por las lámparas de incandescencia, para que sea observable la variación del flujo luminoso. Esta mayor inmunidad puede estar justificada por la remanencia que tiene la capa fluorescente.

Hoy en día existen múltiples instancias de comunicación sobre distintos temas de investigación y avances que realiza la ciencia. Quizás sea este un tema (flicker) del que pudiésemos estar informados en forma más regular y permanente, ya que se verifica en el presente seminario, la molestia que produce al ser humano el parpadeo de las lámparas incandescentes.

La visión es un órgano vital para nuestro desarrollo, por cuanto debe asumirse la responsabilidad en la mejora de la calidad de equipos, materiales y suministro eléctrico.

REFERENCIAS

- [1]. José León, Universidad Simón Bolívar de Venezuela, “Calidad del servicio eléctrico”, Julio 2005.
- [2]. J. Cidrás y C. Carrillo Dpto. Ingeniería Eléctrica Universidad de de Vigo, 2002.
- [3]. “Análisis wavelet aplicado a la medida de armónicos, interarmónicos y subarmónicos en redes de distribución de energía eléctrica”. Tesis doctoral Autores Ramón Ignacio Diego García, Julio Barros Guadalupe, Universidad de Cantabria. Depto. de Electrónica y Computadores, 2006.
- [4]. Esteban Hermosilla Montecino, Universidad Católica de Valparaíso, escuela de ingeniería eléctrica, “Pauta para la medición de armónicas e interarmónicas”, enero 2004.
- [5]. Cuaderno Técnico nº 176, “Flicker o parpadeo de las fuentes luminosas”, Schneider Electric, septiembre 2001.
- [6]. A New Frequency Domain Approach for Flicker Evaluation of Arc Furnaces, Araceli Hernandez, Julio G. Mayordomo, Member, IEEE, Rafael Asensi, and Luis F. Beites.
- [7]. Detection of Flicker Caused by Interharmonics, Taekhyun Kim, Student Member, IEEE, Edward J. Powers, Fellow, IEEE, W. Mack Grady, Fellow, IEEE, and Ari Arapostathis, Fellow, IEEE, IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 58, NO. 1, JANUARY 2009.
- [8]. International Coordination for Flicker Standards, Reuben F. Burch IV, Senior Member, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-15, No. 6, pp. 644-655, Nov/Dec, 1979. IEEE Standard 519-1992. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, April, 1993. IEEE Standard 141-1993. IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants.
- [9]. Analysis of the Effects of Flicker on the Blood-Flow Variation in the Human Eye, Lorenzo Peretto, Senior Member, IEEE, Charles E. Riva, Luigi Rovati, Member, IEEE, Giorgia Salvatori, and Roberto Tinarelli, Member, IEEE, IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 58, NO. 7, JULY 2009.

- [10]. A Model of the Flickermeter for Frequency Modulation of the Input Voltage, Grzegorz Wiczyński, IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 58, NO. 7, JULY 2009.
- [11]. A Digital Implementation of Flickermeter in the Hybrid Time and Frequency Domains, Gary W. Chang, Senior Member, IEEE, Cheng-I Chen, Student Member, IEEE, and Ya-Lun Huang, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 24, NO. 3, JULY 2009 1475.
- [12]. Measurement and testing specifications of voltage flicker in 220 V/60 Hz power systems, S.-H. Cho G. Jang S.-H. Kwon S.-K. Joo School of Electrical Engineering, Korea University, Anam-dong 5-ga, Seongbuk-gu, Seoul 136701, South Korea, Published in IET Science, Measurement and Technology Received on 11th July 2008 Revised on 7th October 2008 doi: 10.1049/iet-smt:20080105.
- [13]. A New Frequency Domain Approach for Flicker Evaluation of Arc Furnaces Araceli Hernández, Julio G. Mayordomo, *Member, IEEE*, Rafael Asensi, and Luis F. Beites.
- [14]. Detection of flicker caused by Interharmonics, *Taekhyun Kim, Student Member, IEEE, Edward J. Powers, Fellow, IEEE, W. MackGrady, Fellow, IEEE, and Ari Arapostathis, Fellow, IEEE, 2009.*
- [15]. R. Yacamini, “Power System harmonics, Part 4. Interharmonics”, Power Engineering Journal, Vol. 10, No. 4, 1996, pp. 185-193.
- [16]. IEEE Interharmonic Task Force, Cigré 36.05/CIREN 2 CC02 Voltage Quality Working Group, “Interharmonics in Power Systems”, 1997.
- [17]. IEC Standard 61000-3-2. IEC 61000: Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 3: Limits, Section 2: Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase). November, 2005.
- [18]. Light flicker caused by Interharmonics, *M. de Koster - E. de Jaeger – W.Vancoetsem, Laborelec Rodestraat, 125 - B-1630 Linkebeek – Belgium, 1999.*
- [19]. IEC Standard 61000-3-3. IEC 61000: Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 3: Limits, Section 3: Limitation of voltage fluctuations and flicker in low-voltage supply systems for equipment with rated current ≤ 16 A. January, 2001.
- [20]. IEC Standard 61000-3-5. IEC 61000: Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 3: Limits, Section 5: Limitation of voltage fluctuations and flicker in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A. December, 1994.

- [21]. IEC Standard 61000-2-2. IEC 61000: Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 2: Environment, Section 2: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public supply systems. March, 2002.
- [22]. IEC Standard 61000-2-4. IEC 61000: Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 2: Environment, Section 4: Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances. June, 2002.
- [23]. IEC Standard 61000-4-15. IEC 61000: Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 4: Testing and measurement techniques, Section 15: Flickermeter - Functional and design specifications. February, 2003.
- [24]. IEC Standard 61000-4-30. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods.
- [25]. IEC Standard 61000-4-7. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected.
- [26]. A. A. Girgis, J.W. Stephens, and E. B. Makram, "Measurement and prediction of voltage flicker magnitude and frequency," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 10, pp. 1600–1605, July 1995.
- [27]. L. Tang, S. Kolluri, and M. F. McGranaghan, "Voltage flicker prediction for two simultaneously operated ac arc furnaces," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 12, pp. 985–992, Apr. 1997.
- [28]. Testing of fluorescent lamps for its flickering susceptibility towards interharmonics voltages, *S Chen, Senior Member, IEEE, C. M. Lo, M. K. Foo, and K.T. How, non-members, 2007.*
- [29]. W. Mombauer, "Neuer digitaler flickermeteralgorithmus," *EtzArchiv Bd. 10 H. 9*, pp. 289–293, 1988. IEC Report: Flickermeter. Functional and Design Specifications, IEC 80 868-0, 1986.
- [30]. Electromagnetic Compatibility (EMC)—Part 4: Testing and Measurement Techniques. Section 15: Flickermeter— Functional and Design Specifications, IEC 61 000-4-15. Ed 1. (1997-06-15).
- [31]. Automatic evaluation of flickering sensitivity of fluorescent lamps caused by interharmonics voltages , *S. Chen, Senior Member, IEEE, M. Y. Heah, A. B. Then and M. K. Foo, non-members, 2008.*

- [32]. Examples of international flicker requirements in high voltages networks and real world measurements, *Detmar Arlt, Prof. Dr.-Ing. Dept. of Electrical Engineering University of Applied Sciences Duesseldorf, Germany. Maike Stark, B. Sc. Dept. of Electrical Engineering University of Applied Sciences Duesseldorf, Germany. Christian Eberlein, Dipl.-Ing. SMS Demag Duesseldorf and Hilchenbach, Germany, 2007.*
- [33]. M. Sakulin and H. Renner, Strategy for Worldwide Applicability of the UIE/IEC Flickermeter, Austria: Inst. Elect. Power Syst., Univ. Technol. Graz, 1994.
- [34]. Committee Draft for Vote Part 4–15: Amendment to Add Specifications for Flickermeters for 120 V Systems and More Closely Define the Specification of a Filter in the Instrument According to Standard IEC 61 000-4-15, IEC 61 000-4-15 Amd. 1 Ed. 1.0 (2001-11-16).
- [35]. Committee Draft Revision of 61 000-4-7: Electromagnetic Compatibility (EMC)—Part 4: Testing and Measurement Techniques. Section 7: General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation, for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto, IEC 77A/61 000-4-7 Ed 2. (1997-07-18).
- [36]. Electromagnetic Compatibility (EMC)—Part 4: Testing and Measurement Techniques. Section 7: General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation, for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto, IEC 1000-4-7. Ed 1. (1991-07).
- [37]. J. Ruiz, J. Ortuondo, N. Palacios, J. Izquierdo, L. A. Leturiondo, E. Aramendi, and J. Amantegui, “Real time power supply quality measurement and monitoring multichannel system,” *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 10, pp. 1190–1199, July 1995.
- [38]. S. Clippingdale y H. Isono, fotosensibilidad “ pautas y supervisión video ” de la difusión en Proc. IEEE internacional. Conf. Sistema., hombre, Cybern., Tokio, Japón, el octubre de 1999, – 27 de págs. 22.
- [39]. Compatibilidad electromagnética (EMC). Parte 4: Prueba y técnicas de medida. Sección 15: Flickermeter. Especificaciones funcionales y del diseño, estándar 61 000_4_15, 2003 del IEC.
- [40]. M.D. Koster, E.D. Jaiger, y W. Vancoistem, parpadeo ligero causado por Interharmonics. [En línea]. Disponible: [armónicos/iharm/doc./ihflicker.pdf](#).
- [41]. W. Xu, deficiencia “ del metro del parpadeo del IEC para medir los parpadeos interharmonic caused del voltaje, ” en Proc. Inglés de la energía de IEEE. Soc. Generador Reunión, el junio de 2005, – 2288 de págs. 2285.

- [42]. T. Tayjasanant y W. Xu, estudio de caso del “ A del parpadeo/de los problemas interharmonic causados por una impulsión variable de la frecuencia, ” en Proc. 11mo Internacional. Conf. Energía de la calidad de los armónicos, el septiembre de 2004, – 76 de págs. 72.
- [43]. EPRI Power Electronics Applications Center, *Lamp Flicker Predicted by Gain-Factor Measurements*, Brief n°36, July 1996 [Magazine Article].
- [44]. IEC, *61000-4-15 - CEM - Part 4 : Testing and measurement techniques – Section 15: Flickermeter – Functional and design specifications*, November-1997 [International standard].
- [45]. Diario oficial de la república de Chile N° 39.613 miércoles 17 de Marzo de 2010, Norma técnica Chilena 2009, titulo 5-14 estándares de calidad de producto eléctrico.
- [46]. W. Mombauer, *Flicker caused by interharmonics*, etzArchiv, Bd.12 H.12, 1990 [Magazine Article].
- [47]. 2006_Voltage Flicker Caused by Two Interharmonics, Jing Yong, Caixin Sun Chongqing University, China, Wilsun Xu Fellow Member, IEEE.
- [48]. 2007_On the Assessment of Light Flicker due to the Interharmonic Distortion Produced by Wind Turbines, Roberto Langella, Member, IEEE, Felice Liccardo, Pompeo Marino, Alfredo Testa, Senior Member, IEEE and Mariel Triggianese, Student Member, IEEE, Dipartimento di Ingegneria dell’Informazione, Aversa (CE) (Italy).
- [49]. Thacatchai Tayjasanant, Wencong Wang, Chun Li Wilson Xu, Intherarmonics-Flicker Curves IEEE Trans. Power Delivery, vol. 20 n° 2 pp.1017-1020, Apr.2005.
- [50]. Thomas Keppler, Neville R. Watson, Jos Arrillaaga, Shuin Chen ‘Theoretical Assessment of Light Flicker Caused by Sub-and Intherarmonic Frequencies’ IEEE Trans. Power Delivery, vol 18 n° 1, Jan 2003.
- [51]. Available: <http://home.howstuffworks.com/fluorescent-lamp.htm>.
- [52]. A.E. Emanuel, L. Peretto ‘The response of Fluorescent Lamp with Magnetic Ballast to Voltage Distortion’, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 12, n° 1, Jan 1997.
- [53]. Available: [http://es.wikipedia.org/wiki/Luminaria_fluorescente\(X\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Luminaria_fluorescente(X)).
- [54]. A. E. Emanuel and L. Peretto, “A simple lamp-eye–brain model for flicker observation,” IEEE Trans. Power Del., vol. 19, no. 3, pp. 1308–1313, Jul. 2004.

- [55]. S. Chen, C. M. Lo, M. K. Foo and K. T. How “Testing of Fluorescent Lamps for its Flickering Susceptibility towards Interharmonic Voltages” The 8th International Power Engineering Conference, IPEC2007 3-6 December 2007, pp. 418-422.
- [56]. IEEE Std. 1453-2004, IEEE Recommended Practice for Measurement and Limits of Voltage Fluctuations and Associated Light Flicker on AC Power Systems.
- [57]. SINTEF, Sintef Energy research, Trondheim, Norway, unpublished.
- [58]. A. Robert, M. Couvreur; Recent Experience of connection of big arc furnaces with reference to flicker level; CIGRE 1994, paper 36 – 305 (CC02 IWD 9516).
- [59]. Confidential paper , UIEPQ-9442, unpublished.
- [60]. S. Elvin, Measurements of flicker levels, UIE paper UIEPQ-9446, unpublished.
- [61]. T.D. Brosnan, M. A. Murray; Voltage fluctuation monitoring in an ESB Transmission station, Irish colloquium on DSP & Control, Dublin, June 1993.
- [62]. T.D. Brosnan, M. A. Murray; Flicker Severity Measurements on an Electric Arc Furnace during Switched Changes in an Transmission Network, First International Conference on Power Quality, Paris 1991.
- [63]. D. Arlt, Ch. Eberlein; Network Disturbances caused by Ultra High Power Electric Arc Furnaces and possible reduction Methods; 4th International Conference of Electrical Power Quality and Utilisation, Cracow 1997.
- [64]. P. Goossens, A. Robert, E. De Jaeger, Assessment of the Flicker Emission of Fluctuating Loads, CC02 Paper 0112, unpublished.

ANEXOS