

El fenómeno del parpadeo.

Introducción.

El parpadeo, en inglés “*flicker*”, se define como la “*impresión subjetiva de la fluctuación luminosa*”. La presencia de la palabra “subjetiva” en la definición indica que es un fenómeno fisiológico, en la medida que un determinado observador puede verse afectado por dichas variaciones luminosas cuando están presentes en el sistema de iluminación. La forma en que estos equipos de alumbrado afectan a los usuarios, depende del sistema de iluminación, de la naturaleza de la perturbación y del propio observador. Esto supone una dificultad añadida al estudio del fenómeno, ya que se han de realizar estudios poblacionales, para poder evaluar la molestia producida por el parpadeo a un observador medio en distintas condiciones de iluminación.

El origen del parpadeo está en el comportamiento de los sistemas de iluminación (lámparas de incandescencia y descarga, principalmente) ante fluctuaciones en la tensión de alimentación. Estas variaciones en la tensión se producen sobre todo por cambios bruscos en las cargas conectadas a la red de energía eléctrica, tal y como sucede durante el funcionamiento normal de un horno de arco, motores con cargas pulsantes, las máquinas de soldadura por arco,

Ante la creciente presencia de este fenómeno de parpadeo en las redes eléctricas se hace necesaria la existencia de un método que permita cuantificar, y por lo tanto limitar, su presencia en los distintos puntos de la red. Es necesario diseñar un equipo cuya entrada sea el valor instantáneo de la tensión, y a partir de esta medida obtener un valor numérico para el parpadeo. Esto es lo que abordan las normas CEI 868 y CEI 868-0, en ellas se hace una descripción de los distintos bloques que componen un medidor analógico de parpadeo, así como una descripción de sus exigencias funcionales.

Por otra parte, en la norma CEI 555-3 se hace referencia al medidor de parpadeo como un sistema de medida genérico para las fluctuaciones de tensión. Es por esto que con el medidor propuesto se obtienen valores coherentes con los límites indicados la norma CEI 555-3.

La fluctuación relativa de tensión.

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 la tensión eficaz no tenga un valor constante si no que oscila entre unos 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:

$$\frac{\Delta V}{V} \times 100 (\%)$$

Ecuación 1

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

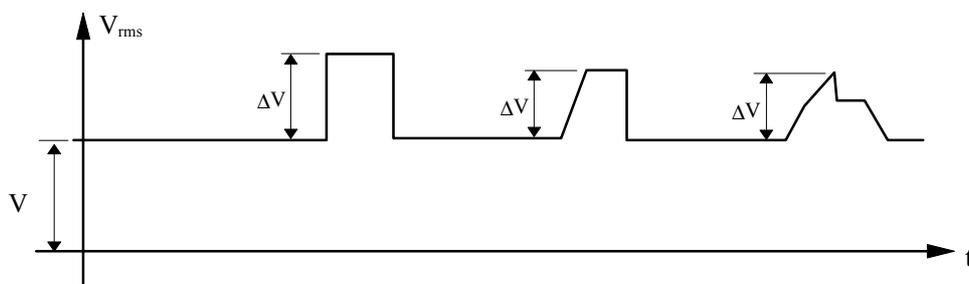


Ilustración 1: Fluctuaciones en el valor eficaz de la tensión.

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 de pico (ver Apéndice A), o sea:

$$\frac{\Delta V_p}{V_p} \times 100 (\%)$$

Ecuación 2

Donde las fluctuaciones están tomadas según las correspondientes en la Ilustración 2.

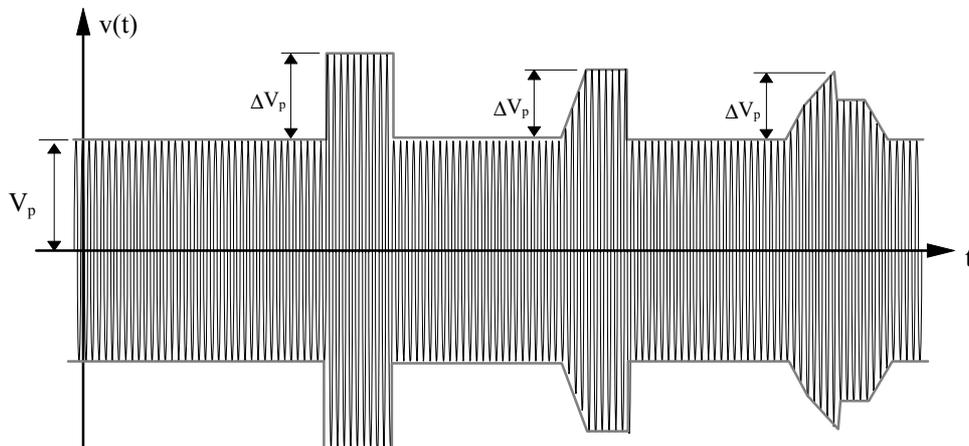


Ilustración 2: Fluctuaciones instantáneas en la tensión.

El medidor de parpadeo según la norma CEI 868.

Las normas CEI 868 y CEI 868-0 afectan a las especificaciones funcionales y de diseño de un aparato destinado a la medida del nivel de parpadeo a partir de la tensión en un punto de la red, cualquiera que sea su forma de onda. Es el medidor de parpadeo, en inglés *'flickermeter'*.

El diagrama de bloques

En la Ilustración 7 se puede ver el diagrama de bloques de un medidor de parpadeo según la norma CEI 868. Los distintas partes bloques de dicho medidor esencialmente son:

- **Transformador de Entrada.** El transformador se emplea para adaptar y aislar los niveles de tensión de entrada (red eléctrica) a los admisibles por la circuitería del medidor.
- **Bloque 1: Adaptación de la tensión de entrada y circuito de chequeo.** Este bloque tiene un generador de señal para calibración del equipo "in situ": Contiene, además, otro circuito en el que se adapta el nivel de tensión del secundario del transformador de entrada, a un nivel de referencia. De esta forma se consigue que las medidas no dependan de los valores de tensión existentes en el punto en el que se realiza la medida.
- **Bloque 2: Demodula.** El objetivo de este bloque es el de obtener una señal que represente las fluctuaciones lumínicas del sistema de alimentación. Se simula el comportamiento de una lámpara de incandescencia sometida a fluctuaciones en la tensión de alimentación.
- **Bloque 3: Filtros de simulación del ojo.** En este bloque se disponen de dos filtros en cascada que simulan el comportamiento del ojo ante fluctuaciones en la iluminación. A continuación (o antes) de los filtros, hay un bloque que es el encargado de ajustar el rango de medida.
- **Bloque 4: Simulación del cerebro.** Este bloque se compone de una fase en la que se eleva al cuadrado la señal de entrada, seguido de un filtro paso bajo de 1^{er} orden. La salida de este bloque representa la sensación de parpadeo instantánea a la que está sometido un observador medio.
- **Bloque 5: Análisis estadístico en línea.** Este bloque tiene como salida un valor o una serie de ellos que son una medida cuantitativa de la severidad de parpadeo. Estos resultados se obtienen a partir de un histórico de la evolución de la sensación de parpadeo instantáneo. Este análisis puede hacerse fuera de línea, y es por lo tanto necesario almacenar los valores instantáneos del parpadeo (ver salida del bloque 4 en la Ilustración 7). Según el período de

tiempo empleado en la confección del histórico tenemos el P_{st} (período corto) o el P_{lt} (período largo) como resultado del análisis del parpadeo.

Mediante los bloques descritos se pretende que a partir de las fluctuaciones de la tensión de la red en un determinado punto, se detecten sus variaciones de amplitud. A partir de estos valores se simula su efecto en un lámpara eléctrica tomada como referencia y se da un valor de salida que represente la sensación visual que podría experimentar un observador medio. Este comportamiento permite su empleo para la medida de las fluctuaciones de tensión, cualquiera que sea la forma de onda de las mismas, y así, poder comprobar si se está dentro de los límites establecidos por la norma CEI 555-3.

A continuación se describen más en detalle cada uno de los bloques de los que está compuesto el medidor de parpadeo.

Transformador de entrada.

El transformador de entrada se ocupa de aislar al equipo del nivel de tensión de entrada, y adaptarlo a unos niveles de tensión admisibles. Debe aceptar un amplio rango de tensiones nominales de entrada. Además, el ancho de banda del transformador debe ser tal que no introduzca atenuaciones de consideración en $\pm 25\text{Hz}$ alrededor de la frecuencia nominal. El nivel de aislamiento debe ser de 2 kV r.m.s. durante un 1 minuto y 2 kV de pico para un impulso de duración de 1,2/50 μs .

Bloque 1: Adaptación de la tensión de entrada y circuito de chequeo.

Este bloque contiene un generador de señal para la calibración del medidor de parpadeo “in situ”, de forma que se puede conmutar y realizar las medidas en el secundario del transformador o con el generador de señal. Este generador proporciona una onda sinusoidal a la frecuencia de red modulada por una onda cuadrada de 2.94 Hz con un valor de fluctuación relativa de tensión, $\Delta V/V(\%)$, del 1%.

Por último, este bloque tiene un adaptador de niveles de tensión. Este circuito se encarga de adaptar el nivel de tensión en el secundario del transformador a un nivel de referencia constante, sin modificar la fluctuación relativa de tensión, $\Delta V/V(\%)$. Este circuito tiene un tiempo de respuesta de 1 minuto.

Bloque 2: Demodula.

En una lámpara de incandescencia la intensidad lumínica emitida se ajusta a la siguiente expresión:

$$\frac{J}{J_R} = \left(\frac{V}{V_R} \right)^\gamma$$

Ecuación 3

Donde:

- V_R es la tensión nominal de la lámpara.
- V es la tensión de alimentación de la lámpara.
- J_R y J son la intensidad lumínica a la tensión nominal de la lámpara y a la de alimentación, respectivamente.
- γ es una constante que está entre 3.4 y 3.8.

Si se admite que las fluctuaciones de tensión son pequeñas entonces la expresión de la Ecuación 3 queda de la forma:

$$\frac{\Delta J}{J_R} = \gamma \frac{\Delta V}{V_R}$$

Ecuación 4

Esto significa que la entrada al medidor de parpadeo puede ser la tensión, ya que sus fluctuaciones son proporcionales a las fluctuaciones en la luminosidad emitida por una lámpara de incandescencia. En este bloque se eleva la señal de entrada al cuadrado, para así recuperar el valor de la fluctuación de tensión de entrada.

La influencia de estas variaciones sobre un individuo de tipo medio se analizará en los siguientes bloques, ya que en éste el fenómeno simulado es el de las variaciones lumínicas de una lámpara de incandescencia.

Bloque 3: Simulación del ojo.

Como salida de este bloque se obtiene la sensación instantánea de parpadeo (ver salida 5 en Ilustración 7), y éste está compuesto por tres filtros en cascada más un selector de rango, que puede estar antes o después de los filtros.

El primero de los filtros es un paso-alto de Butterworth de 1^{er} orden, cuya frecuencia de corte es de 0.05Hz. Este filtro tiene como propósito eliminar la componente continua de la señal de entrada. La salida de este filtro va a un filtro paso-bajo de Butterworth de 6^o orden, cuya misión es la de eliminar las frecuencias cercanas a las del doble de la frecuencia de red (2·50Hz). Con estos dos primeros filtros se realiza un prefiltrado de aquellas fluctuaciones no perceptibles por el ojo humano. Además de los dos filtros anteriores se puede añadir un filtro rechazo-banda, sintonizado al doble de la frecuencia de red, para suplir las deficiencias de la demodulación.

En cascada con los filtros anteriores se tiene un filtro que pondera, en el dominio de la frecuencia, las fluctuaciones de tensión. Esta función se ha obtenido a partir de análisis estadísticos realizadas sobre poblaciones. Y representa la sensibilidad de un individuo medio al parpadeo producido por un lámpara de incandescencia (60W-230V) cuya tensión de alimentación está modulada sinusoidalmente. La función de transferencia de este filtro es:

$$F(s) = \frac{k\omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1^2} \cdot \frac{1 + s/\omega_2}{(1 + s/\omega_3)(1 + s/\omega_4)}$$

Ecuación 5

Donde:

$$\begin{aligned} k &= 1.74802 \\ \lambda &= 2\pi \cdot 4.05981 \\ \omega_1 &= 2\pi \cdot 9.15494 \\ \omega_2 &= 2\pi \cdot 2.27979 \\ \omega_3 &= 2\pi \cdot 1.22535 \\ \omega_4 &= 2\pi \cdot 21.9 \end{aligned}$$

La obtención de este filtro depende de la población seleccionada, y en mayor medida del sistema de iluminación empleado.

La respuesta de los filtros descritos es la representada en la Ilustración 3.

Por último (puede ser estar antes o después de los filtros) está el selector de rango. Encargado de escalar la salida (o la entrada) de los filtros anteriores para ajustar la sensibilidad del equipo al valor de la fluctuación relativa de tensión.

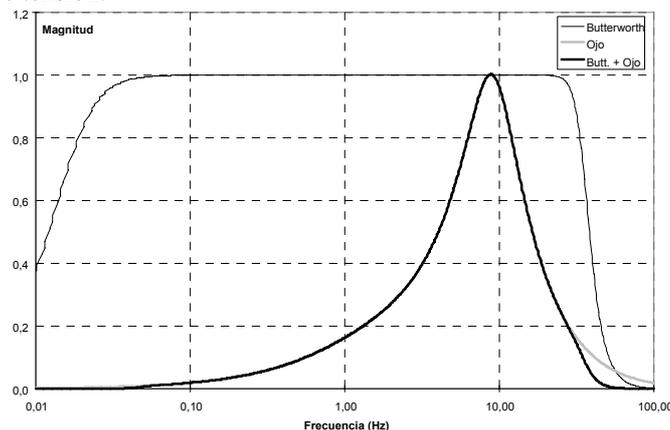


Ilustración 3: Respuesta en frecuencia del Bloque 3.

Bloque 4: Simulación del cerebro.

En este bloque se simula la sensación de parpadeo procesada por el cerebro. Para ello se dispone una parte en la que se eleva al cuadrado la señal de entrada para simular el comportamiento no lineal de la percepción del ojo y del cerebro conjuntamente. Seguidamente se tiene un filtro de 1^{er} orden que simula el efecto de almacenamiento o memoria de las sensaciones visuales. Este filtro es equivalente a un filtro paso bajo compuesto por una resistencia y un condensador (de 1^{er} orden) con una constante de tiempo de 300 ms (ver Ilustración 4).

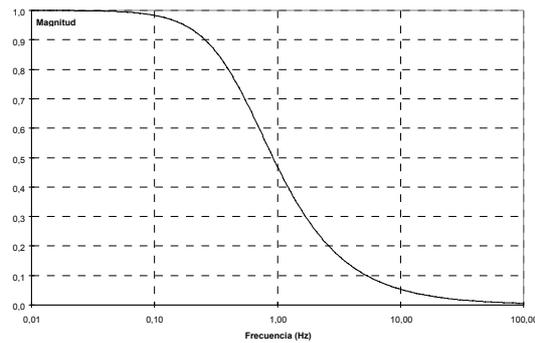


Ilustración 4: Respuesta del Filtro de 1^{er} Orden Asociado al Bloque 4

Bloque 5: Análisis estadístico en línea.

Debido a la carga de procesamiento de las operaciones realizadas en este bloque estas se pueden realizar fuera de línea.

La salida de este bloque será el nivel de severidad del parpadeo obtenido a partir de las medidas realizadas en la red eléctrica, severidad que se puede dar como: severidad en período corto o P_{st} y severidad en período largo o P_{lt} . El cálculo de estos parámetros se aclarará en los párrafos siguientes.

El primer paso para realizar este análisis es el discretizar la señal que llega a este bloque para poder ser tratada en una computadora. Para ello se emplea un convertidor A/D con al menos 6 bits (64 niveles) de resolución, y una frecuencia de muestreo mayor o igual que 50 muestras/sg.

La medida de parpadeo ha de abarcar los dos aspectos fundamentales de una fluctuación, que son la severidad de la fluctuación (obtenida a partir de la fluctuación de tensión) y su persistencia en el tiempo. Por lo tanto, en la salida del medidor de parpadeo no sólo queda reflejado el nivel del parpadeo instantáneo, si no que representa los porcentajes de tiempo durante los cuales se exceden determinados niveles de parpadeo instantáneo. Un parámetro importante para el funcionamiento de este bloque es la elección del período de observación, ya que ha de abarcar un período significativo para las fluctuaciones de tensión. Según la extensión del período elegido tenemos dos tipos de análisis:

- **De período corto:** El intervalo de tiempo escogido para el análisis es de 1, 5, 10 ó 15 minutos. En todo caso, el intervalo escogido ha de abarcar los sucesos significativos detectados en el punto de medida (conexión y desconexión de una máquina, ...). Generalmente se escoge el de 10 min. como una solución de compromiso aceptable. Ya que, por una parte, es suficientemente largo como para que las variaciones aisladas de tensión tengan poca importancia, y permitir a un observador se apercebirse del parpadeo. Mientras que, por otra parte, es suficientemente corto como para caracterizar máquinas con un ciclo de trabajo largo. Además la elección de este período tiene como ventaja que es el mismo que se emplea en la norma CEI 555-3.
- **De período largo:** En este caso los resultados del medidor de parpadeo se refieren a un período de observación que abarca un número entero de períodos cortos (por debajo de 10080). De esta forma, los resultados obtenidos para el período largo se basan en los obtenidos para los períodos cortos abarcados. En el peor caso se tendría un período de 7 días con un período corto de 10 minutos. Aunque el valor recomendado es de 2 horas, ya que con el se cubren la mayor parte de las aplicaciones industriales susceptibles de ser analizadas.

Una vez escogidos el período de muestreo y la longitud del período corto, el siguiente paso es llevar a cabo una clasificación de los valores instantáneos de parpadeo según su severidad, para así obtener su distribución de frecuencias. Cada vez que una muestra del parpadeo instantáneo se encuentre entre los dos niveles que delimitan una clase, se incrementa en un uno el valor de dicha clase. De esta forma, dada una clase dada k , el número de muestras (N_k) se puede obtener (ver Ilustración 5) mediante la expresión:

$$N_k = \frac{1}{T} \sum_n t_n^k$$

Ecuación 6

Donde T es el período de muestreo, y t_n^k es un intervalo de tiempo durante el cual el parpadeo instantáneo está entre los niveles que delimitan la clase k .

Un ejemplo de la obtención de N_k es el que se puede observar en la Ilustración 5.

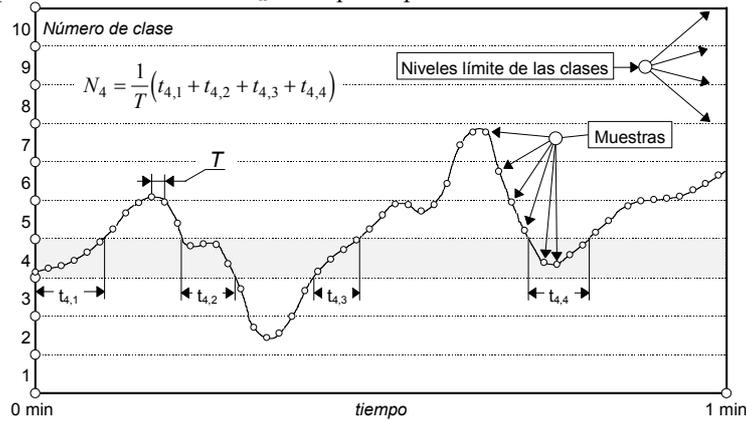


Ilustración 5: Método de clasificación del parpadeo instantáneo.

La clasificación se realiza durante el período de observación escogido (típicamente 10 min.). Una vez finalice este período de observación se obtiene, a partir de la distribución de frecuencias resultado del proceso de clasificación, la distribución de frecuencias acumulada. En la que, el valor de una determinada clase se obtiene acumulando los valores sin acumular de las clases anteriores, o sea:

$$N_{ac,k} = \sum_{n=k}^{N_c} N_n = N_k + N_{ac,k-1}$$

Ecuación 7

Donde:

- $N_{ac,k}$ es el valor acumulado de la clase k.
- N_k es el valor de la clase k.
- N_c es el número de clases.

La expresión recién obtenida permite la obtención de la distribución de frecuencias acumulada en valores absolutos de muestras, aunque puede ser más cómodo el empleo distribuciones que den el valor de la clase relativo al número total de muestras. En la Ilustración 6 se puede ver la distribución de frecuencias resultante del proceso de clasificación con $N_c = 10$ y su correspondiente distribución acumulada relativa de frecuencias.

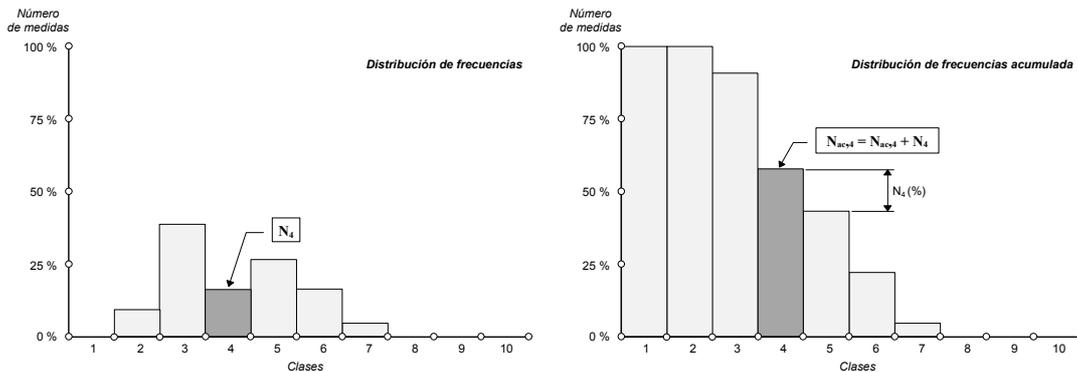


Ilustración 6: Resultado de la clasificación y obtención de la distribución de frecuencias acumulada.

La salida del bloque 5, y por lo tanto la del medidor de parpadeo es un número que cuantifica la severidad del parpadeo. El valor de dicha severidad está relacionado con la distribución acumulada recién obtenida mediante un algoritmo que opera con los percentiles¹. El algoritmo propuesto por la CEI para el cálculo del nivel de severidad de período corto o P_{st} es:

$$P_{st} = \sqrt{K_{0.1}P_{0.1} + K_1P_1 + K_3P_3 + K_{10}P_{10} + K_{50}P_{50}}$$

Ecuación 8

¹ Los percentiles dividen a la distribución de frecuencias acumulada en 100 partes iguales que representan cada una el 1% de los valores. Así el percentil 5% representa un nivel de parpadeo que sólo es superado por el 5% de las muestras, mientras que el 95% restante queda por debajo.

Donde:

- P_{st} es el nivel de severidad de parpadeo de período corto.
- $P_{0,1}$, P_1 , P_3 , P_{10} y P_{50} son los percentiles del 0.1%, 1%, 3%, 10% y 50% respectivamente.
- $K_{0,1}$, K_1 , K_3 , K_{10} y K_{50} son constantes definidas por la CEI y su valor es: 0.0314, 0.0525, 0.0657, 0.28 y 0.08.

La elección de dicho algoritmo no ha sido aleatoria si no que se ha pretendido con ella obtener unos valores de P_{st} cercanos a la unidad sobre la curva definida en la norma CEI 553-3 para variaciones de tensión rectangulares. El valor límite que puede alcanzar del P_{st} en instalaciones eléctricas no ha de ser necesariamente la unidad, pero se ha de tener en cuenta que en los experimentos realizados por la CEI una importante cantidad de observadores se ven afectados por el parpadeo en los sistemas de iluminación cuando se alcanza este valor.

Existen técnicas para mejorar la exactitud y la estabilidad del valor de P_{st} calculado, que no se incluyen aquí por estar detalladas claramente en la normas. Cabe destacar que en vez emplear directamente los percentiles indicados en la Ecuación 8, se pueden emplear unos promediados para evitar que pequeños cambios en el ciclo de trabajo de la máquinas que provocan las fluctuaciones afecten significativamente al valor del P_{st} . De esta forma los percentiles promediados y recomendados para el cálculo del P_{st} son:

$$P_{50S} = (P_{30} + P_{50} + P_{80})/3$$

$$P_{10S} = (P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17})/5$$

$$P_{3S} = (P_{2,2} + P_3 + P_4)/3$$

$$P_{1S} = (P_{0,7} + P_1 + P_{1,5})/3$$

$$P_{0,1S} = P_{0,1}$$

Ecuación 9

El valor del P_{st} con un período de observación de 10 minutos es adecuado para el estudio de perturbaciones producidas por fuentes individuales como motores, bombas de calor o equipos domésticos. Sin embargo a veces es necesario el estudio de la influencia de varias equipos perturbadores de la red eléctrica, que además pueden operar de forma aleatoria (por ejemplo los hornos de arco) y con ciclos de trabajo largos. Para el estudio de este tipo de fenómenos se emplea el parámetro recomendado por la CEI definido como severidad de período largo o P_{lt} , con un período de observación recomendado de 2 horas, es el que viene dado por la expresión:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{\sum_i^{N_{Pst}} P_{st,i}^3}{N_{Pst}}}$$

Ecuación 10

Donde:

- N_{Pst} es el número de períodos cortos tenidos en cuenta (hasta 1008).
- $P_{st,i}$ es el valor de la severidad de período corto para cada uno de los N_{Pst} intervalos tenidos en cuenta para el cálculo del P_{lt} .

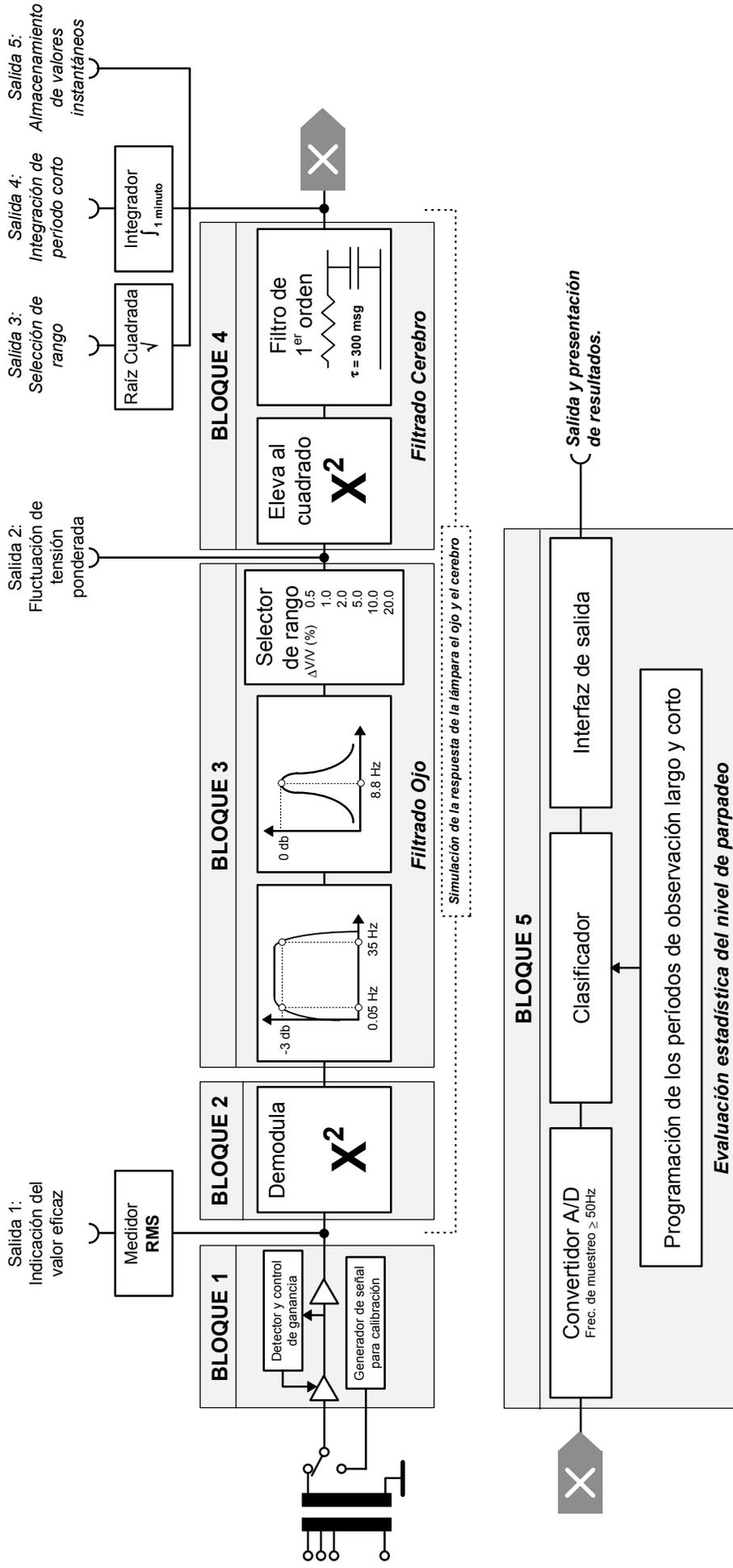


Ilustración 7: Diagrama de bloques de un medidor de parpadeo.

Caracterización de la respuesta.

En la norma CEI 868 se especifica cual será la respuesta del medidor de parpadeo cuando la tensión de entrada está modulada por una onda rectangular o una más suavizada.

La curva de la Ilustración 8 es la que define los valores de $\Delta V/V$ en función de la frecuencia Ω para que ha la salida del bloque 4 tengamos una unidad de percepción instantánea, siempre y cuando refiramos dicha salida a la obtenida cuando la entrada está modulada sinusoidalmente con los parámetros $\Omega = 2\pi \cdot 8.8 \text{ rad/seg}$ y $\Delta V/V = 0.250 \%$.

Frec. (Hz)	AU/U Sinusoidal	AU/U Cuadrada
0,5	2,34	0,514
1	1,432	0,471
1,5	1,08	0,432
2	0,882	0,401
2,5	0,754	0,374
3	0,654	0,355
3,5	0,568	0,345
4	0,5	0,333
4,5	0,446	0,316
5	0,398	0,293
5,5	0,36	0,269
6	0,328	0,249
6,5	0,3	0,231
7	0,28	0,217
7,5	0,266	0,207
8	0,256	0,201
8,8	0,25	0,199
9,5	0,254	0,2
10	0,26	0,205
10,5	0,27	0,213
11	0,282	0,223
11,5	0,296	0,234
12	0,312	0,246
13	0,348	0,275
14	0,388	0,308
15	0,432	0,344
16	0,48	0,38
17	0,53	0,421
18	0,584	0,461
19	0,64	0,506
20	0,7	0,552
21	0,76	0,603
22	0,824	0,657
23	0,89	0,713
24	0,962	0,767
25	1,042	

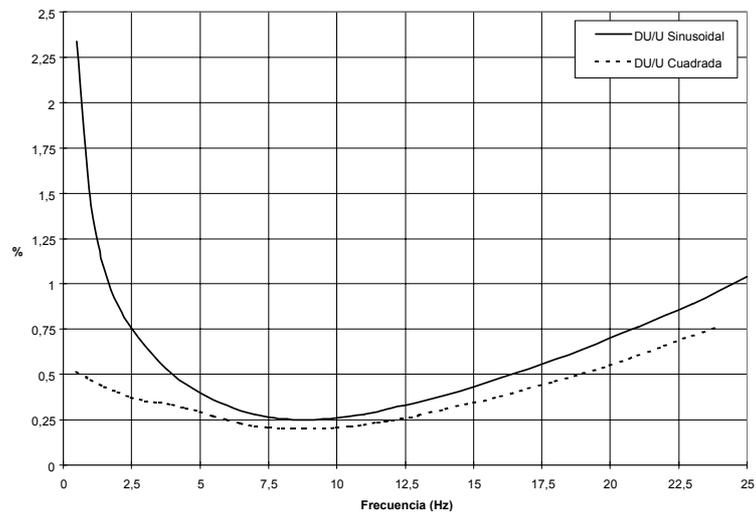


Ilustración 8: Curvas Límite de la Percepción Instantánea Unitaria.

La norma CEI 555-3 indica que el medidor de parpadeo puede emplearse para la cuantificación de la severidad de las fluctuaciones de tensión. Por lo tanto en el medidor descrito se debe dar un valor de parpadeo coherente con las exigencias de la 555-3. Esto se ha conseguido con la elección del algoritmo representado por la Ecuación 8 para la obtención del P_{st} . En la Ilustración 9 y en la Tabla 1 está representada la comparación entre los límites de las fluctuación de tensión dadas por la CEI 555-3 y los valores de fluctuación, ya sea sinusoidal o cuadrada, que hacen que la salida del medidor de parpadeo sea unitaria, o sea, $P_{st} = 1$. En este caso los valores de frecuencia de la modulación o variación se dan en cambios por minuto ($1 \text{ c/min} = 1/120 \text{ Hz}$) ya que es más adecuado para trabajar con variaciones lentas.

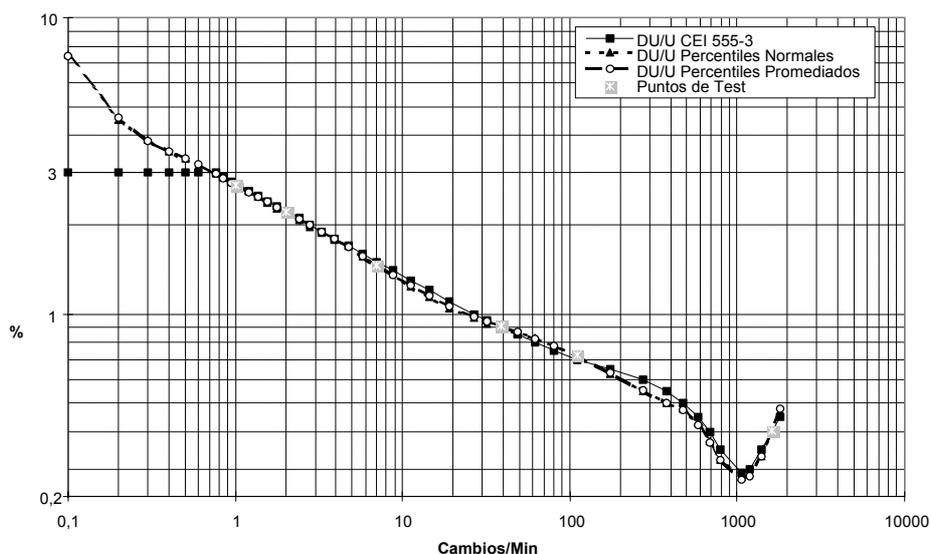


Ilustración 9: Comparación de Resultados del Medidor de Parpadeo con la Norma CEI 555-3

Tabla 1: Comparación de Resultados del Medidor de Parpadeo con la Norma CEI 555-3

c/min	$\Delta U/U$ CEI 555-3	$\Delta U/U$ Percentiles Normales	$\Delta U/U$ Percentiles Promediados
0,1	3	7,46	7,391
0,2	3	4,52	4,584
0,3	3	3,88	3,842
0,4	3	3,52	3,54
0,5	3	3,34	3,35
0,6	3	3,14	3,196
0,76	3	2,97	2,979
0,84	2,9	2,9	2,867
0,95	2,8	2,79	2,765
1,06	2,7	2,7	2,679
1,2	2,6	2,6	2,679
1,36	2,5	2,49	2,484
1,55	2,4	2,38	2,394
1,78	2,3	2,26	2,294
2,05	2,2	2,16	2,193
2,39	2,1	2,07	2,091
2,79	2	1,97	1,989
3,29	1,9	1,88	1,893
3,92	1,8	1,78	1,789
4,71	1,7	1,7	1,679
5,72	1,6	1,57	1,571
7,04	1,5	1,47	1,456
8,79	1,4	1,37	1,348
11,16	1,3	1,24	1,244
14,44	1,2	1,14	1,15
19,1	1,1	1,04	1,062
26,6	1	0,97	0,975
32	0,95	0,93	0,942
39	0,9	0,89	0,906
48,7	0,85	0,86	0,866
61,8	0,8	0,83	0,824
80,5	0,75	0,78	0,782
110	0,7	0,72	0,725
175	0,65	0,63	0,635
275	0,6	0,55	0,551
380	0,55	0,5	0,5
475	0,5	0,48	0,476
580	0,45	0,43	0,423
690	0,4	0,37	0,367
795	0,35	0,32	0,321
1052	0,29	0,28	0,276
1180	0,3	0,29	0,283
1400	0,35	0,33	0,331
1620	0,4	0,4	0,402
1800	0,45	0,47	0,48

La parte derecha de la curva es la que más discrepancia muestra entre el medidor de parpadeo y la 555-3, esto se debe a la exigencia por parte de esta última de no admitir fluctuaciones de tensión superiores al 3%.

La norma da unas condiciones de modulación con onda cuadrada con los que se ha de realizar un test para determinar la exactitud del medidor del parpadeo (ver Ilustración 9 y Tabla 2). Sobre cada uno de los puntos la salida del medidor ha de ser 1 ($P_{st} = 1$) con una exactitud de por lo menos el 5%.

Tabla 2: Puntos para Test del Medidor de Parpadeo.

c/min	Puntos de Test
1	2,724
2	2,211
7	1,459
39	0,906
110	0,725
1620	0,402

En la Ilustración 10 se puede ver una comparación entre las curvas de perceptibilidad unidad (Ilustración 8) dados por la norma CEI 868 frente a las fluctuaciones máximas permitidas por la norma CEI 555-3, que corresponden aproximadamente a una salida de $P_{st} = 1$ en el medidor de parpadeo.

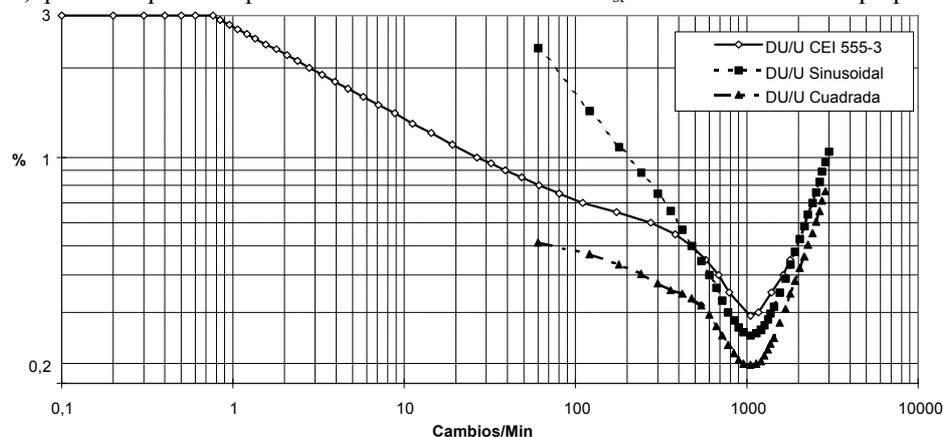


Ilustración 10: Comparación entre los Límites de Perceptibilidad y la Norma CEI 555-3

Con las especificaciones descritas en este apartado queda definido cual es el comportamiento esperado de un medidor de parpadeo realizado siguiendo las indicaciones dadas por la norma CEI 868 y su relación con norma CEI 555-3.

Ejemplo Numérico.

En este apartado se verá un ejemplo de la actuación de cada uno de los bloques del medidor de parpadeo propuesto en la norma CEI 868. La señal de entrada, tensión en el punto de la red en el que se quiera estudiar el fenómeno de parpadeo, se supone con variaciones rectangulares de tensión equidistantes. O sea, tiene la expresión:

$$v(t) = A[1 + M P_{r,\Omega}(t)] \cos \omega_0 t$$

Ecuación 11

Donde $P_{r,\Omega}(t)$ es la función definida en la Ilustración 15.

A modo de ejemplo se puede tomar un valor de fluctuación de la Tabla 2, por ejemplo el correspondiente a $\Omega = 110$ c/min y $M = 0,725\%$. La correspondientes actuaciones del medidor de parpadeo se muestran en la siguientes figuras.

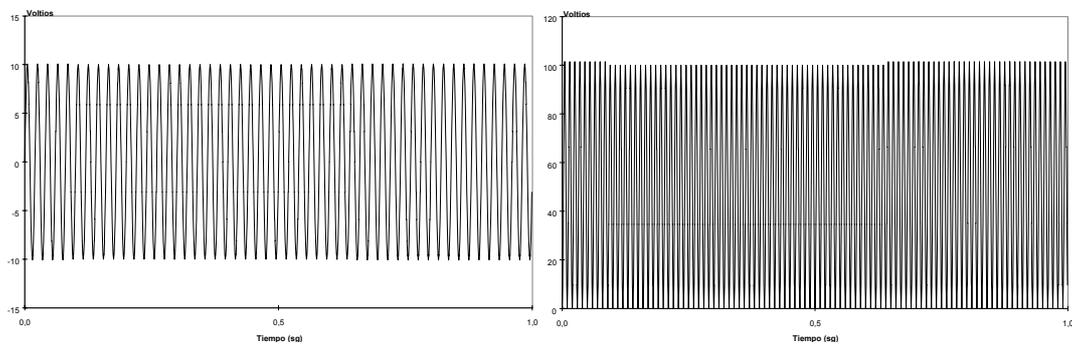


Ilustración 11: Tensión de Entrada y Modulada.

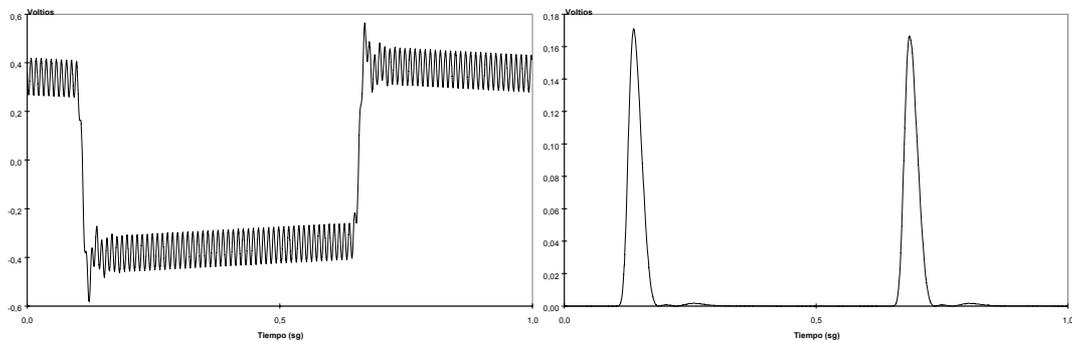


Ilustración 12: Salida del filtros de Butterworth y del filtro que simula el Ojo.

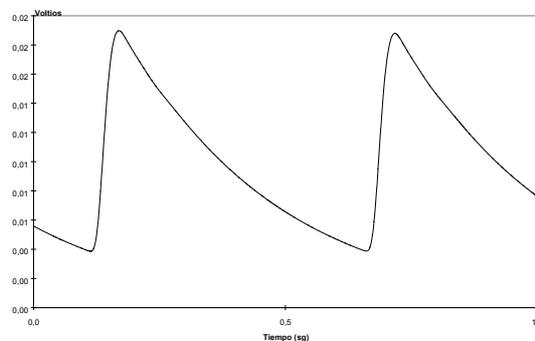


Ilustración 13: Salida del bloque que simula al cerebro.

El último paso es el del proceso de clasificación de la salida del bloque correspondiente al ojo, esto se puede ver en la Ilustración 14. Es en esta gráfica donde se calculan los percentiles, a partir de los cuales se obtiene un $P_{st} = 1,03$ ($1 \pm 5\%$).

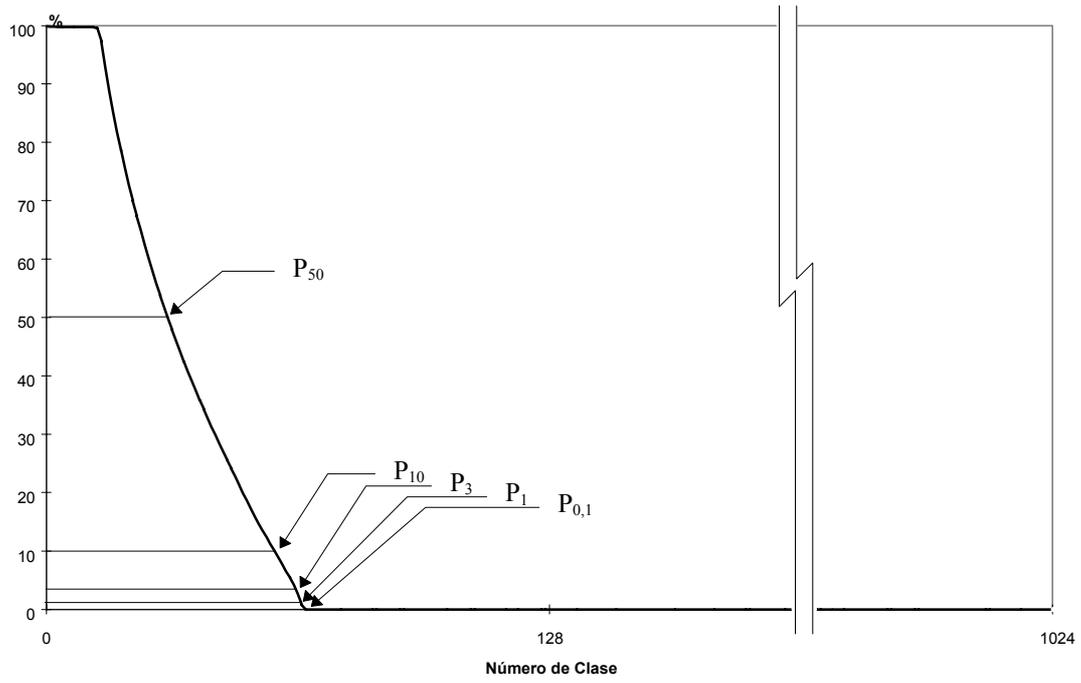


Ilustración 14: Resultado del proceso de clasificación. Distribución acumulada.

Apéndices.

Apéndice A: Valor Eficaz de una Señal Fluctuante.

Cuando se estudia el fenómeno de parpadeo se analizan las fluctuaciones de tensión y se da una estimación de la molestia que éstas podrían provocar en un observador medio. El valor escogido para la fluctuación es igual de significativo si se mide a partir de los valores instantáneos como si las cuentas se hacen sobre los valores eficaces. En este apartado se demostrará la equivalencia entre ambas medidas. Como paso previo se supone que la tensión fluctuante se ajusta a la ecuación:

$$v(t) = A[1 + M u_{\Omega}(t)] \cos \omega_0 t$$

Ecuación 12

Donde:

- A es el valor de pico de la tensión de red antes de que apareciesen las fluctuación. Por ejemplo, en un sistema trifásico, un valor típico sería $380\sqrt{2}$ Voltios.
- ω_0 es la frecuencia de la tensión de red. En Europa este valor es 50 Hz (100π rad/sg).
- $u_{\Omega}(t)$ está representando la señal de frecuencia Ω que modula la tensión de red, y cuya amplitud es M. Es la que provoca la aparición de las fluctuaciones y, por lo tanto, del fenómeno de parpadeo. Su amplitud es la unidad, o sea, varía entre 0 y 1. En el caso la norma 555-3 es una onda cuadrada como la de la Ilustración 15.
- M es la amplitud de la señal moduladora $u_{\Omega}(t)$.

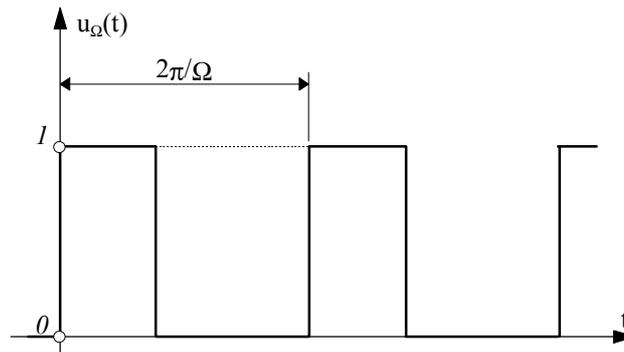


Ilustración 15: Ejemplo de Onda Moduladora Cuadrada..

Para el cálculo del valor eficaz es necesario resolver la integral:

$$V_{rms}(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T}^t v^2(t) dt}$$

Ecuación 13

Donde $T (=2\pi/\omega_0)$ es el período de la portadora o de la tensión de red. En Europa éste es de 20msg ($=1/50$).

El valor de la tensión al cuadrado o tensión demodulada se puede poner como:

$$v^2(t) = \frac{A^2}{2} [1 + u_{\Omega}(t)]^2 (1 + \cos 2\omega_0 t)$$

Ecuación 14

El siguiente paso es el cálculo de la integral:

$$\int_{t-T}^t v^2(t) dt = \frac{A^2}{2} [1 + u_{\Omega}(t)]^2 \int_{t-T}^t (1 + \cos 2\omega_0 t) dt = T \frac{A^2}{2} [1 + u_{\Omega}(t)]^2$$

Ecuación 15

Al hacer la integración, el término $u_{\Omega}(t)$ se ha supuesto constante durante un período de la tensión de red, o sea, que su variación es mucho más lenta que el valor instantáneo de la tensión. Esto es

válido siempre y cuando $\Omega \ll \omega_0$, que es cierto en prácticamente todas las situaciones en las que se estudia el parpadeo.

Entonces el valor eficaz queda con la siguiente expresión:

$$V_{RMS}(t) = \frac{A}{\sqrt{2}} [1 + M u_{\Omega}(t)]$$

Ecuación 16

Si se comparan la Ecuación 12 y la Ecuación 16 se concluye que la Ecuación 1 y la Ecuación 2 son equivalentes. O sea:

$$\frac{\Delta V_p}{V_p} \times 100 (\%) = \frac{\Delta V}{V} \times 100 (\%) = 100M$$

Ecuación 17

La tensión instantánea demodulada (ver Ecuación 14) tiene dos tipos de grupos de frecuencias. Las que estarían asociadas al fenómeno de parpadeo, y están representada de una forma aproximada por:

$$\frac{A^2}{2} [1 + u_{\Omega}(t)]^2$$

Ecuación 18

Y, por otra parte, las que son de más alta frecuencia, estando en el entorno al doble de la frecuencia de red. Estas están representadas por:

$$\frac{A^2}{2} [1 + u_{\Omega}(t)]^2 \cos 2\omega_0 t$$

Ecuación 19

Estas componentes de alta frecuencia desaparecen, prácticamente por completo, después del primer filtro de Butterworth Paso Bajo del medidor de parpadeo, ya que su frecuencia de corte es de 35 Hz, muy por debajo de los correspondientes 100 Hz.. Esto significa que tanto el valor eficaz al cuadrado (ver Ecuación 16) y la tensión instantánea sin las componentes de alta frecuencia (ver Ecuación 18) producen la misma salida en el medidor de parpadeo, ya que son iguales. O dicho de otra forma, *como entrada al medidor se pueden tomar indistintamente tanto el valor instantáneo de la tensión como su valor eficaz.*