

Calidad de la red eléctrica: ¿como medirla?

J. Balcells

Departament d'Enginyeria Electrònica UPC, Campus de Terrassa
C/Colom, 1, 08222 TERRASSA (Barcelona), Tel: 93 739 81 93; Fax: 93 739 80 16
E-mail: balcells@eel.upc.es

Resumen

La calidad de la red eléctrica se mide por la calidad de la onda de tensión según la norma EN-50.160. La obtención de datos sobre los distintos aspectos de la calidad de la red eléctrica implica la medida de un gran número de parámetros y el problema después suele ser, cómo resumir y compactar estos datos de forma un reducido número de parámetros sea representativo de dicha "calidad" y a la vez que contengan la máxima información de detalle sobre posibles perturbaciones. La velocidad de computo y la capacidad para almacenar datos que permitan a la vez ver el detalle y registrar durante largos períodos de tiempo son los problemas principales que deben superarse en el diseño de instrumentos destinados a la medida de calidad de red. Este artículo explica los parámetros más relevantes según/ Normas IEC y describe las características básicas de un instrumento dedicado a su medida.

1. Introducción

La calidad de suministro de energía eléctrica a través de la red pública es un tema de gran actualidad y que es motivo de preocupación, tanto por parte de los suministradores como por parte de los usuarios. Las definiciones básicas sobre el tema se dan en la Norma EN-50160. No obstante, la citada Norma se limita a dar una serie de definiciones y fija algunos límites de perturbación de la onda de tensión, sin especificar la forma de medir, ni los intervalos de promediado a aplicar, factor este último de primordial importancia. Es evidente que un sistema que pretenda medir y registrar la calidad de red no puede registrar las formas de onda de todos y cada uno de los ciclos, pues esto supondría ocupar tal cantidad de memoria que resulta impracticable. Para hacerse una idea basta indicar por ejemplo que la medida de las tres fases de tensión, más la tensión neutro-tierra (4 canales) con un instrumento digital a razón de 128 muestras por ciclo. Para una red a 60 Hz, y suponiendo que cada muestra ocupa 2 bytes, supone tener que registrar 61440 bytes por segundo. Evidentemente, si se pretende poder registrar la calidad durante períodos largos, digamos de un día o de una semana, como suele ser habitual, hay que buscar alguna forma de comprimir estos datos. A pesar de ello, para diagnosticar determinados eventos haría falta detectar detalles a nivel de ciclo y poder medir simultáneamente las corrientes de las tres fases más el neutro, es decir 4 canales más. Todo ello origina un problema de ¿como compactar datos y al mismo tiempo poder recuperar detalles o comportamientos singulares, fuera de tolerancias?

2.- Calidad de la tensión según proyecto de norma IEC-61000-4-30

En la definición de la calidad de red a nivel de valor eficaz de la tensión, el proyecto de norma IEC-61000-4-30 propone cuatro ventanas o intervalos de observación estándar:

- Ventana base de observación de 200 ms (10 ciclos para 50Hz y 12 ciclos para 60Hz), véase(1)
- Intervalos muy cortos: Promedios de 3 segundos, observando todos los ciclos
- Intervalos cortos: Promedios y estadísticos 10 minutos.
- Intervalos largos: Promedios y estadísticos 10 minutos

$$U_{RMS_200ms} = \sqrt{\frac{1}{200ms} \int_{-200ms} u^2(\tau) d\tau} \quad (1)$$

$$U_{RMS_3s} = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} U_{RMS_200ms}^2} \quad (2)$$

$$U_{RMS_10min} = \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} U_{RMS_3s}^2} \quad (3)$$

$$U_{RMS_2h} = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{200} U_{RMS_3s}^2} \quad (4)$$

Asimismo el proyecto de norma IEC-61000-4-30 propone medir distintos conceptos de forma separada, a saber:

- Medida de valores de tensión, basados en el valor eficaz de ½ ciclo, indicando intervalos de sobretensión ("swell"), baja tensión ("dip") e interrupción ("interruption").
- Medida de la frecuencia, promediando cada 10 segundos
- Medida de armónicos de tensión, según IEC-61000-4-7 Por lo general se indican estadísticos con 95% de probabilidad (valor que no ha sido rebasado más que en un 5% de los ciclos)
- Medida de Flicker, según IEC-61000-4-15, en intervalos de 10 minutos (Pst) y de 2 horas (Plt)
- Medida del % de desequilibrio, usando las componentes fundamentales de U_{12} , U_{23} , U_{31} . El resultado se da en estadísticos con 95% de probabilidad.

3. Instrumento para control de calidad: Hardware

Para realizar esta función de control de calidad se ha diseñado un instrumento dedicado, basado en el microprocesador H8S/2655 de Hitachi cuyo diagrama de bloques se da en la fig. 1.

El sistema implementado es capaz de medir 6 canales de forma simultánea con una frecuencia de muestreo de 128 muestras/ciclo. No se trata por tanto de un aparato de alta precisión, sino más bien de un aparato que pueda ser de uso muy generalizado y que permita dar respuesta al problema de medida y de registro de gran número de parámetros. Por ello se ha previsto una memoria RAM de 4Mbyte salvaguardada por batería, donde se almacenaran los datos de calidad.

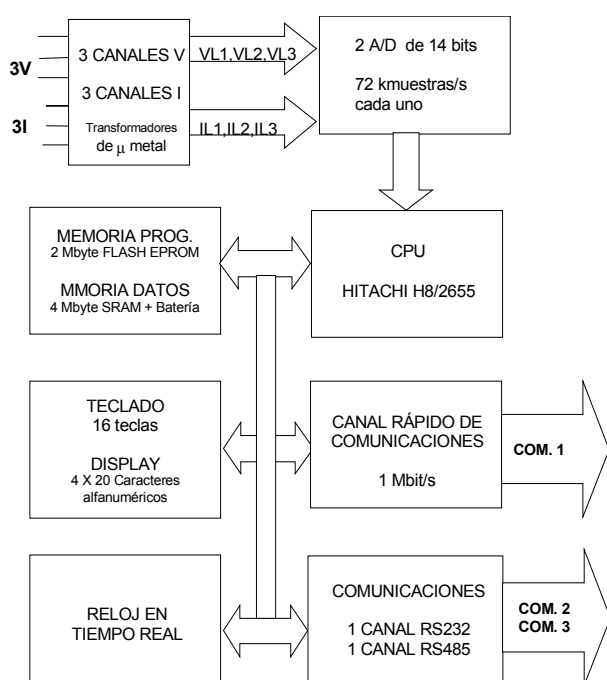


Fig. 1.- Estructura hardware del medidor

4. Parámetros de calidad

Estrictamente hablando, la norma EN-50160 pide medir únicamente parámetros relativos a las tensiones de las tres fases. No obstante para poder hacer un diagnóstico de las causas de la “no calidad” es muy conveniente registrar también las corrientes de las tres fases. Los parámetros básicos a medir se organizan en bloques de datos. En nuestro diseño se contemplan seis bloques: Parámetros básicos, Estadística de tensión y frecuencia, Armónicos, Flicker, Incidencias y Registros ON-OFF. A continuación se describe el contenido de cada uno de dichos bloques de datos.

El punto clave para comprimir datos es promediar las variables durante un determinado periodo. En el instrumento descrito, este periodo se ha dejado programable, de forma que puedan cumplirse los valores demandados por la Norma 61000-4-30. Puede normalmente elegirse entre 1 segundo 1 hora. Un valor que suele darse

como aceptable para medida de parámetros de calidad es de 10 minutos. Lógicamente el promedio en un período tan largo, dice poco acerca de los posibles transitorios de la red. Para paliar este defecto se registran también los valores máximos y mínimos de todas las variables y una tabla de datos estadísticos de la tensión y frecuencia. Al mismo tiempo se dota al instrumento de la capacidad de capturar dichos transitorios a través de un trigger y guardarlos en el registro de incidencias, que se comentará más adelante.

4.a. Parámetros básicos

Este bloque contiene los registros promedio, máximo y mínimo durante intervalos largos (típico 10 minutos) y una tabla de clasificación estadística programada en varios niveles (7 en el caso del diseño que nos ocupa) Un resumen de los principales parámetros registrados puede verse en la tabla 1.

Tabla 1.- Variables básicas en un periodo PERIOD1

Variables	Significado (i=1, 2, 3)
DATE	AAAA-MM-DD
TIME	HH-MM-SS
FREQ	Promedio de la frecuencia
Vi_AV	Promedio de Vi eficaz (3)
Vi_MAX	Máximo de Vi (3)
Vi_MIN	Mínimo de Vi (3)
Ii_AV	Promedio de Ii eficaz (3)
Ii_MAX	Máximo de Ii (3)
Ii_MIN	Mínimo de Ii (3)
Pi_AV	Potencia activa promedio (3)
Pi_MAX	Potencia activa máxima (3)
Pi_MIN	Potencia activa mínima (3)
Qi_AV	Potencia reactiva promedio (3)
Qi_MAX	Potencia reactiva máxima (3)
Qi_MIN	Potencia reactiva mínima (3)
VDRMS_AV	V de secuencia directa. Promedio
VDRMS_MAX	V de secuencia directa. Máximo
VDRMS_MIN	V de secuencia directa. Mínimo
VIRMS_AV	V de secuencia inversa. Promedio
VIRMS_MAX	V de secuencia inversa. Máximo
VIRMS_MIN	V de secuencia inversa. Mínimo
VHRMS_AV	V homopolar. Promedio
VHRMS_MAX	V homopolar. Máximo
VHRMS_MIN	V homopolar. Mínimo
IDRMS_AV	I de secuencia directa. Promedio
IDRMS_MAX	I de secuencia directa. Máximo
IDRMS_MIN	I de secuencia directa. Mínimo
IIRMS_AV	I de secuencia inversa. Promedio
IIRMS_MAX	I de secuencia inversa. Máximo
IIRMS_MIN	I de secuencia inversa. Mínimo
IHRMS_AV	I homopolar. Promedio
IHRMS_MAX	I homopolar. Máximo
IHRMS_MIN	I homopolar. Mínimo
CDV_AV	Coefficiente de asimetría V
CDI_AV	Coefficiente de asimetría I
CICLOS_Vi_CLASj	Frecuencia estadística (7 clases x 3 fases)
N_CICLOS_FREQ	Frecuencia estadística (3 clases x 1 fase)

4.b. Parámetros estadísticos

Se calculan datos estadísticos de las tensiones de las tres fases y de la frecuencia. Para cada una de las tensiones se calcula una clasificación del número de ciclos en que su valor ha estado dentro de una determinada franja. La clasificación se realiza en siete franjas delimitadas por seis niveles programables según se muestra en la figura 2. Una

clasificación parecida con sólo tres franjas se utiliza para la frecuencia.

Para obtener una resolución aceptable y guardando la mayoría de los parámetros no escalados para compactar al máximo la información, cada uno de los registros ocupa unos 300 bytes. Esto permitiría por ejemplo guardar registros de 31 días a intervalos de 10 minutos en un fichero de unos 1400 kbytes.

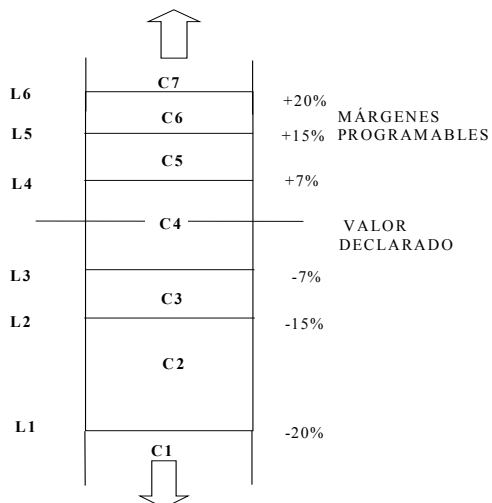


Fig. 2.- Clasificación estadística de la tensión (frecuencia estadística acumulada en 7 franjas)

4.c. Armónicos

Este bloque contiene información del análisis de armónicos. que se realiza a intervalos de 160 ms, aunque se guardan a intervalos como mínimo de 10s, dando normalmente el valor con probabilidad 95% de no ser sobrepasado. Un registro completo debería contener al menos los valores indicados en la tabla 2, que suponen un total de 1660 bytes por registro. Para el intervalo mínimo de 10 segundos marcado por la Norma IEC-61000-4-7 y supuesto que se dispone de aproximadamente 1,5 Mbytes de memoria, esto supone poder guardar unos 940 registros, es decir 157 minutos en registros de 10 segundos. Si se pretende obtener datos de períodos más largos hay que recurrir a datos promediados cada 10 minutos y guardar el caso peor bajo el criterio de $THD(I) \cdot I_{RMS}$ máximo.

Tabla 2.- Registro de armónicos

Variables	Significado
DATE	AAAA-MM-DD
TIME	HH-MM-SS
FREQ	Frecuencia fundamental
Vf THD	THD de tensión en fase "f" en %
Vf RMS	Tensión eficaz total en la fase "f"
Vf FHT[0]	Tensión fundamental en la fase "f"
Vf FHT[i]	$(V_{fn}/V_{f1})\%$, $i=1$ a 14; $n=(i+1)$
If THD	THD de Corriente en fase "f" en %
If RMS	Corriente eficaz total en la fase "f"
If FHT[0]	Corriente fundamental en la fase "f"
If FHT[i]	$(I_{fn}/I_{f1})\%$, $i=1$ a 14; $n=(i+1)$
V1n (n=1 a 40)	Armónico de V orden n, fase 1, módulo
V2n (n=1 a 40)	Armónico de V orden n, fase 2, módulo
V3n (n=1 a 40)	Armónico de V orden n, fase 3, módulo
I1n (n=1 a 40)	Armónico de I orden n, fase 1, módulo
I2n (n=1 a 40)	Armónico de I orden n, fase 2, módulo
I3n (n=1 a 40)	Armónico de I orden n, fase 3, módulo

4.d. Flicker

El flicker es un indicativo de las variaciones de tensión de baja frecuencia (0,5Hz a 25Hz). Un ejemplo de onda deformada por el flicker puede verse en la figura 2. La forma estándar de medirlo es el parámetro P_{ST} , que según EN-61000-4-15 debe medirse cada 10 minutos. El P_{ST} mide una media ponderada de la magnitud $\Delta U/U$. Un registro de flicker, incluyendo fecha y hora de registro ocupa sólo 12 bytes y por tanto, el registro de un mes a intervalos de 10 minutos ocupa sólo 53 kbytes.

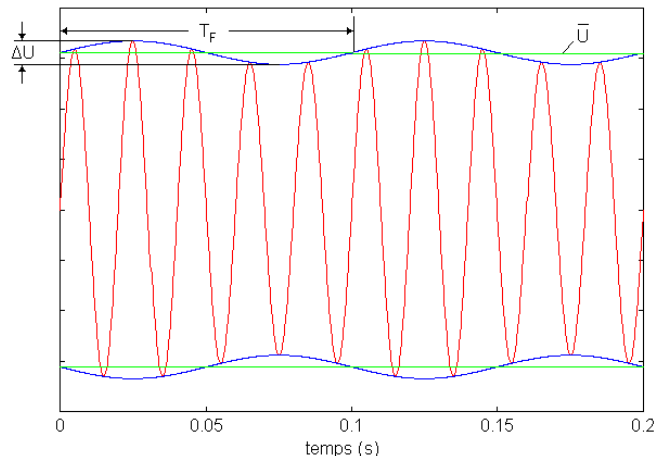


Fig. 2.- Onda deformada por el flicker

4.e. Registro de incidencias.

Entendemos por incidencia cualquier alteración transitoria de la forma de onda (picos, huecos, cambios bruscos de valor eficaz, etc.). A título de ejemplo mostramos algunos en las figuras 3 y

Para caracterizar este tipo de perturbaciones se plantean dos tipos de registros:

- Registro de huecos, sobretensiones e interrupciones.
- Registro de formas de onda de transitorios

Para el primer caso se registra una tabla de incidencias tal como la tabla 3, donde se indica el tipo de perturbación (hueco, sobretensión o interrupción) y su duración, junto con la fecha y hora:minuto:segundo que se ha producido.

Tabla 3.- Registro de incidencias valor RMS

Variables	Significado
DATE	AAAA-MM-DD
TIPO	Hueco, Sobretensión, Interrupción
DURACIÓN	ms

En el caso de captura de transitorios o espúreos, la mejor solución es registrar la forma de onda cuando se detecta alguna anomalía. Las condiciones de trigger que proponemos emplear para detectar dichas anomalías son dos: Cambio brusco del valor eficaz de dos semiciclos consecutivos y pendiente, dV/dt , entre muestras consecutivas.

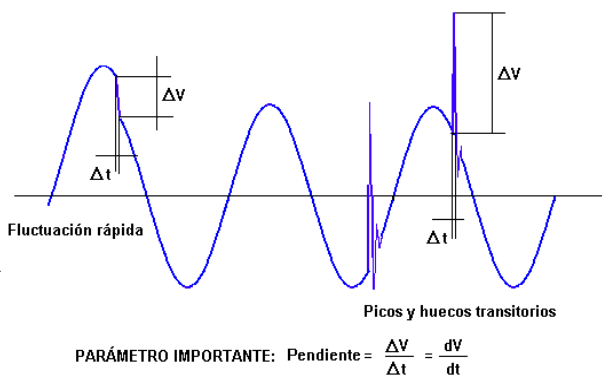


Fig. 3.- Incidencias transitorias más comunes

Los niveles de trigger se dejan programables, de forma que se pueda obtener mayor o menor sensibilidad. La experiencia en la aplicación de estos parámetros nos indica que los valores razonables son en valor eficaz un 15% del valor nominal y en dV/dt una pendiente tres veces superior a la máxima de la onda senoidal, que vale $(V_{pico} \cdot \omega)$, para una tensión de 220 V resulta ser de unos 100 V/ms. El registro de incidencias es totalmente aleatorio y por tanto prever, en términos absolutos, la cantidad de memoria consumida es imposible. De todas formas en un sistema trifásico, registrando para cada evento la fecha y hora y $(3 \text{ ciclos} \times 6 \text{ canales})$, el registro ocupa 4620 bytes. Esto implica que en 1 Mbyte caben aproximadamente unos 226 registros.

4.f. Registros ON-OFF

La caída de la tensión por debajo de límites muy bajos o la falta total de alimentación detienen la medida y registro de parámetros. En este caso la mayoría de cargas sufren un paro y por tanto no tiene interés registrar los parámetros durante estos intervalos. No obstante la pérdida de tensión y su recuperación deben ser registradas como una incidencia más, quizás la más importante. Por ello se almacenan en un registro la fecha y hora del instante de paro y del instante de recuperación. El equipo de medida y registro dispone de una batería que permite mantener el reloj en marcha y mantener los datos almacenados en RAM.

5.- Comunicaciones

Otro punto crítico para el sistema de medida y registro es el vaciado de datos a través de algún canal de comunicaciones. El sistema diseñado se ha dotado de un canal síncrono rápido que puede funcionar hasta 1Mbit por segundo, de esta forma se pueden volcar los datos registrados sin parar el sistema de adquisición y registro. De todas forma la gestión de memoria durante la operación de volcado de datos es complicada y dado que la prioridad está adjudicada al sistema de medida, la transferencia de los datos acumulados puede tardar alrededor de 1 minuto.

6. Software

Un aspecto importante en un instrumento de estas características lo constituye el software. En el desarrollo realizado podemos distinguir tres tipos de software:

6.a. Software de desarrollo.

El programa del microprocesador interno, que controla el instrumento de medida está grabado en memoria flash EPROM. Esto permite actualizar la forma de medir del instrumento y adaptarse a los posibles cambios de las normas. Se ha desarrollado un programa "loader" que permite desde PC realizar dicha actualización.

6.b. Software de calibración.

Un instrumento de medida de las características mencionadas debe permitir una calibración. Se ha previsto un software para introducir seis constantes de calibración, una para cada canal de medida. Dicha calibración se hace con una interpolación, midiendo varios puntos en cada canal, repartidos entre el 0,5% y el 100% de la escala.

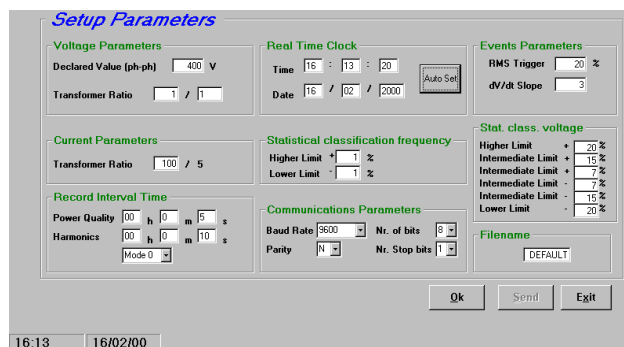


Fig. 4.- Pantalla principal del software para selección de parámetros de aplicación

6.c. Software de usuario.

Se ha creado un interfaz de software de usuario que permite dos tipos de funciones:

a) Selección de parámetros de aplicación del instrumento, por ejemplo: relaciones de los transformadores de medida, período de registro, nivel de trigger, etc. La pantalla principal de éste software puede verse en la fig. 4.

b) Lectura y presentación de resultados. Se ha desarrollado un interfaz para obtener los datos del instrumento en un formato compatible con el software CIRVISION™ de la firma CIRCUTOR™. Las figuras siguientes muestran algunas capturas obtenidas con el instrumento y procesadas con el mencionado software.



Fig. 5.- Ejemplo de gráfico de una variable (Evolución de la corriente I_1 con el tiempo)

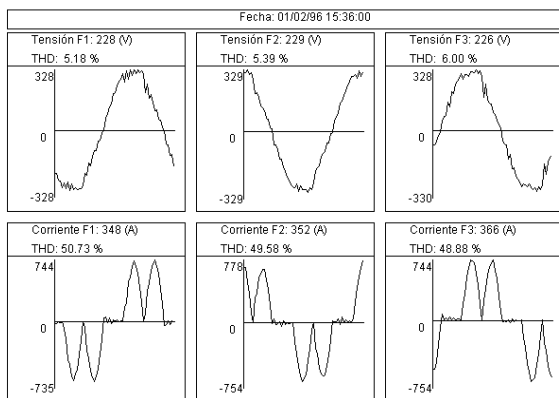


Fig. 6.- Ejemplo de captura de forma de onda en modo armónicos

Fecha: 01/02/96 15:36:00											
Vrms: 229 (V) V1: 228 (V)				Vrms: 229 (V) V2: 229 (V)				Vrms: 227 (V) V3: 226 (V)			
THD: 5.18 %				THD: 5.39 %				THD: 6.00 %			
2	0.09 %	9	0.28 %	2	0.06 %	9	0.24 %	2	0.06 %	9	0.15 %
3	0.84 %	10	0.14 %	3	0.80 %	10	0.09 %	3	0.67 %	10	0.15 %
4	0.12 %	11	1.65 %	4	0.02 %	11	0.88 %	4	0.04 %	11	1.09 %
5	4.20 %	12	0.50 %	5	4.01 %	12	0.32 %	5	4.56 %	12	0.25 %
6	0.56 %	13	1.04 %	6	0.24 %	13	1.30 %	6	0.26 %	13	1.50 %
7	1.99 %	14	0.11 %	7	3.11 %	14	0.03 %	7	3.32 %	14	0.07 %
8	0.07 %	15	0.29 %	8	0.11 %	15	0.33 %	8	0.02 %	15	0.52 %
Irms: 406 (A) I1: 348 (A)				Irms: 407 (A) I2: 352 (A)				Irms: 422 (A) I3: 366 (A)			
THD: 50.73 %				THD: 49.58 %				THD: 48.88 %			
2	0.95 %	9	1.40 %	2	1.37 %	9	0.70 %	2	0.86 %	9	0.42 %
3	3.42 %	10	0.45 %	3	3.70 %	10	0.46 %	3	1.12 %	10	0.38 %
4	0.53 %	11	7.95 %	4	0.93 %	11	6.85 %	4	0.50 %	11	7.03 %
5	53.61 %	12	0.77 %	5	51.65 %	12	0.52 %	5	51.01 %	12	0.47 %
6	0.66 %	13	4.77 %	6	0.63 %	13	6.04 %	6	0.43 %	13	4.97 %
7	22.10 %	14	0.37 %	7	22.14 %	14	0.27 %	7	21.40 %	14	0.48 %
8	0.23 %	15	1.02 %	8	0.28 %	15	0.94 %	8	0.39 %	15	1.01 %

Fig. 7.- Ejemplo de registro numérico en modo armónicos

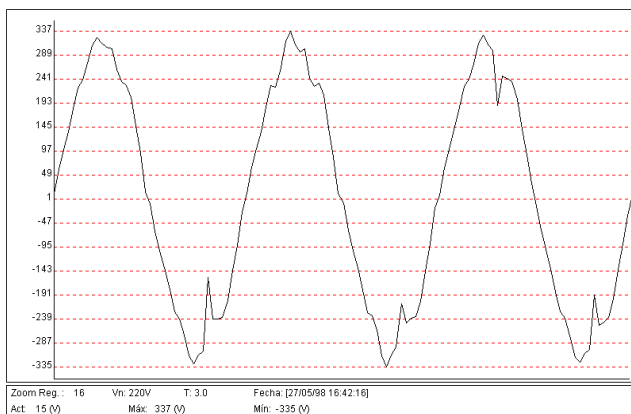


Fig. 8.- Ejemplo de registro de formas de onda, capturadas con trigger de dV/dt

6. Conclusiones

En este artículo se ha presentado el problema de la gran cantidad de datos que se requieren para dar una indicación completa de la calidad de suministro de la red eléctrica. Hemos visto que en muchos casos, a pesar de limitarnos a tomar datos a intervalos ciertamente largos, la cantidad de memoria necesaria para guardar los registros durante tiempos largos es enorme. Por ello se intenta concentrar la información en distintas categorías de perturbaciones y representar valores promedio, máximos, mínimos, estadísticos y buscar parámetros que aporten la máxima información sobre las perturbaciones, sin ocupar excesiva memoria. Lógicamente la solución no es única y admite muy diversas formas de planteo, pero la presentada aquí cuenta con una dilatada experiencia de campo y ha demostrado ser eficaz en el diagnóstico de distintos problemas de calidad de suministro.

Agradecimientos

El instrumental para la realización de este trabajo ha sido financiado por la CICYT en el proyecto TIC98-1092. El trabajo forma parte del proyecto Europeo CRAFT, Ref. BRST-CT98-5494 financiado por la UE y por un grupo de 7 empresas Europeas.

Referencias.

- [1] Balcells, J, Emmanuel A et al.; Practical Definitions for Powers in systems with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads: A discussion, IEEE Transactions on Power Delivery (Pags 97-99)
- [2] Normas EN 50160; Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems. CENELEC, distribuye en España AENOR.
- [4] Norma EN 61000-4-7; EMC. Part 4. Testing and measurement techniques. Sect.7 General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation..... CENELEC, distribuye en España AENOR.
- [5] Norma EN 61000-4-15; EMC. Part 4. Testing and measurement techniques. Sect. 15. Flickermeter. CENELEC, distribuye en España AENOR.
- [6] Norma IEC 61000-4-30 (Draft); EMC. Part 4. Testing and measurement techniques: Power Quality measurement methods.