



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

**MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**  
**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**  
**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**Detección de eventos de calidad eléctrica en una  
instalación hospitalaria**

Autor: D. Adrián Reyes Cristín  
Tutor: D. Oscar Duque Pérez  
Departamento Ingeniería Eléctrica  
Valladolid, Septiembre, 2017



## ***Resumen***

---

El término calidad de onda se ha convertido en una de las palabras más en auge en la industria eléctrica desde finales de los ochenta. Se trata de un concepto que engloba diferentes tipos de perturbaciones en los sistemas de distribución de energía eléctrica y, de entre todas esas perturbaciones que afectan a la calidad de la onda de tensión, hacemos especial hincapié en los huecos de tensión.

Especial importancia cobra la calidad de la energía cuando hablamos de estancias hospitalarias, debido a que en caso de fallo de uno de los equipos, las consecuencias que generan van mucho más allá del simple fallo de una máquina, ya que generalmente, detrás hay vidas humanas que dependen directamente del correcto funcionamiento.

La calidad de onda tiene otro factor fundamental para su estudio, y es el punto de vista económico, ya que cualquier tipo de perturbación que sufra la red es una pérdida económica importante que siempre va a existir, motivo por el cual se realizan acciones de mitigación como las estudiadas en el presente proyecto.

## ***Palabras clave***

---

Calidad, energía, onda, perturbaciones, huecos de tensión, hospital



## ***Abstract***

---

The term wave quality has become one of the most booming words in the electrical industry since the late 1980s. It is a concept that encompasses different types of disturbances in the distribution systems of electrical energy and, among all those disturbances that affect the quality of the voltage wave, we emphasize the voltage gaps.

Especially important is the quality of energy when we talk about hospital stays, because in the event of failure of one of the equipment, the consequences they generate go far beyond the simple failure of a machine, since generally there are human lives behind which depend directly on the correct functioning.

The quality of the wave has another fundamental factor for its study, and it is the economic point of view, since any type of disturbance that the network suffers is a significant economic loss, which will always exist unless mitigation actions such as studied in the present project.

## ***Keywords***

---

Quality, energy, wave, disturbances, sags, hospital



## Contenido

ÍNDICE ILUSTRACIONES.....	
1. Introducción .....	1
2. Calidad de la energía .....	5
2.1. Introducción .....	5
2.2. Antecedentes .....	6
2.3. Importancia actual .....	6
2.4. Normativa aplicable .....	7
2.5. Concepto de calidad de energía.....	8
2.6. Continuidad del suministro.....	9
2.6.1. Índices TIEPI y NIEPI .....	10
2.6.2. Calidad de suministro individual.....	12
2.7. Calidad de la energía en hospitales.....	12
2.8. Eficiencia energética en hospitales .....	14
3. Tipos de perturbaciones .....	19
3.1. Introducción .....	19
3.2. Cortes de tensión .....	21
3.3. Variaciones de tensión .....	22
3.4. Armónicos .....	23
3.5. Sobretensiones temporales.....	26
3.6. Sobretensiones transitorias.....	27
4. Huecos de tensión .....	33
4.1. Introducción .....	33
4.2. Caracterización de un hueco de tensión .....	33
4.3. Causas que originan huecos de tensión .....	36
4.4. Clasificación de huecos según el evento .....	37
4.4.1. Monofásico .....	37
4.4.2. Bifásico.....	38
4.4.3. Trifásico .....	39
4.5. Huecos de tensión en serie.....	40
4.6. Prevención y mitigación .....	41
5. Sistemas de corrección de perturbaciones .....	45
5.1. Dispositivos de corrección específicos .....	45
5.1.1. Variaciones de tensión lentas .....	45
5.1.2. Fluctuaciones de tensión .....	47
5.1.3. Impulsos de tensión .....	48

5.1.4.	Distorsión armónica .....	49
5.2.	Sistemas de corrección universales .....	50
5.2.1.	Sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI) .....	50
6.	Estudio de huecos de tensión .....	53
6.1.	Creación de ondas .....	53
6.2.	Resultados.....	56
	Análisis semana 1.....	57
	Análisis semana 2.....	72
7.	Conclusiones .....	81
8.	Bibliografía .....	85
9.	Anexos .....	i
9.1.	Código Matlab.....	i
9.2.	Software Didáctico de Calidad de Onda de Alex McEACHERN.. Edición 3.0.3 ....	iv



## ÍNDICE ILUSTRACIONES

Ilustración 2.1.- Onda sin defectos. Fuente: Propia .....	5
Ilustración 2-2.- Equipo médico con parte aplicada. Fuente: [9] .....	13
Ilustración 2-3.- Equipo médico sin parte aplicada. Fuente: [9] .....	13
Ilustración 3-1.- Definición gráfica de los distintos tipos de perturbaciones. Fuente: [11] .....	20
Ilustración 3-2.- Usuario conectado a MT. Fuente: [4] .....	21
Ilustración 3-3.- Corte de tensión hasta su posterior reparación. Fuente [4] .....	21
Ilustración 3-4.- Esquema unifilar de un usuario conectado a MT. Fuente: [4] .....	23
Ilustración 3-5.- Descomposición de Fourier. Fuente: [17] .....	24
Ilustración 3-6.- Onda de tensión fundamental, deformada y quinto armónico. Fuente: [2] .....	24
Ilustración 3-7.- Representación gráfica de una sobretensión temporal. Fuente: [17] .....	27
Ilustración 3-8.- Sobretensión transitoria. Fuente: [17] .....	28
Ilustración 4-1.- Definición de hueco de tensión según la norma UNE 50610. Fuente: [3] .....	33
Ilustración 4-2.- Profundidad y duración de un hueco de tensión. Fuente [5] .....	34
Ilustración 5-1.- Esquema regulador de tensión. Fuente: [3] .....	46
Ilustración 5-2.- Esquema regulador Zener. Fuente: [13] .....	46
Ilustración 5-3.- Esquema de un motor-generador. Fuente [3] .....	47
Ilustración 5-4.- Representación gráfica de un diodo Zener, varistor y descargador de gas. Fuente: [16] .....	49
Ilustración 5-5.- Combinaciones de filtros pasivos. Fuente [16] .....	50
Ilustración 6-1.- Onda monofásica. Fuente: Propia .....	53
Ilustración 6-2.- Onda monofásica con ruido. Fuente: Propia .....	53
Ilustración 6-3.- Onda monofásica con huecos de tensión. Fuente: Propia .....	54
Ilustración 6-4.- Onda monofásica con hueco de tensión aleatorio. Fuente: Propia .....	54
Ilustración 6-5.- Señal trifásica con huecos de tensión. Fuente: Propia .....	55
Ilustración 6-6.- Esquema eléctrico de las estancias en las que se han colocado las tarjetas. Fuente: Hospital de Ávila .....	56
Ilustración 6-7.- Caída de tensión en la T4. Fuente: Propia .....	57
Ilustración 6-8.- Hueco de tensión en una fase en T1. Fuente: Propia .....	58
Ilustración 6-9.- Caída de tensión en T1. Fuente: Propia .....	58
Ilustración 6-10.- Hueco de tensión en fase 1 registrada en T1. Fuente: Propia .....	59
Ilustración 6-11.- Hueco de tensión en la fase 2 registrada en T2. Fuente: Propia .....	60
Ilustración 6-12.- Hueco de tensión en fase 2 registrada en T3. Fuente: Propia .....	60
Ilustración 6-13.- Hueco de tensión en fase 2 registradas en T4. Fuente: Propia .....	61
Ilustración 6-14.- Sobretensión en fase 1 registradas en T1. Fuente: Propia .....	61
Ilustración 6-15.- Caída de tensión en fase 2 registrada en T2. Fuente: Propia .....	62
Ilustración 6-16.- Caída de tensión en fase 2 registrada en T3. Fuente: Propia .....	62
Ilustración 6-17.- Caída de tensión en fase 2 registrada en T4. Fuente: Propia .....	63
Ilustración 6-18.- Caída de tensión en fase 3 registradas en T1. Fuente: Propia .....	63
Ilustración 6-19.- Hueco de tensión trifásico registrado en T2. Fuente: Propia .....	64
Ilustración 6-20.- Hueco de tensión en la fase 1 registrado en T1. Fuente: Propia .....	65
Ilustración 6-21.- Hueco de tensión en fase 2. Fuente: Propia .....	65
Ilustración 6-22.- Hueco de tensión en la fase 3. Fuente: Propia .....	66
Ilustración 6-23.- Hueco de tensión trifásico registrado en T3. Fuente: Propia .....	67
Ilustración 6-24.- Hueco de tensión en fase 1 registrados en T3. Fuente: Propia .....	67

Ilustración 6-25.- Hueco de tensión registrado en la fase 2. Fuente: Propia .....	68
Ilustración 6-26.- Hueco de tensión registrado en la fase 3. Fuente: Propia .....	69
Ilustración 6-27.- Hueco de tensión trifásico registrado en T4. Fuente: Propia .....	69
Ilustración 6-28.- Hueco de tensión registrado en la fase 1. Fuente: Propia .....	70
Ilustración 6-29.- Hueco de tensión registrado en fase 2. Fuente: Propia .....	71
Ilustración 6-30.- Hueco de tensión registrado en la fase 3. Fuente: Propia .....	71
Ilustración 6-31.- Hueco de tensión bifásico en fase 2 y 3. Fuente: Propia.....	73
Ilustración 6-32.- Hueco de tensión en la fase 2 . Fuente: Propia .....	73
Ilustración 6-33.- Hueco de tensión en la fase 3. Fuente: Propia .....	74
Ilustración 6-34.- Caída de tensión en T2. Fuente: Propia.....	75
Ilustración 6-35.- Hueco bifásico en fases 2 y 3. Fuente: Propia.....	75
Ilustración 6-36. Hueco de tensión en la fase 2. Fuente: Propia .....	76
Ilustración 6-37.- Hueco de tensión en la fase 3. Fuente: Propia .....	76
Ilustración 6-38.- Hueco de tensión bifásico en fases 2 y 3. Fuente: Propia .....	77
Ilustración 6-39.- Hueco de tensión en la fase 2. Fuente: Propia .....	77
Ilustración 6-40.- Hueco de tensión en la fase 3. Fuente: Propia .....	78

# **1. INTRODUCCIÓN**



## 1. Introducción

El sistema eléctrico hace referencia a aquellos elementos que forman el sistema de suministro, entre los que principalmente destacan las fuentes de generación, transporte y distribución.

El suministro de energía eléctrica en el sistema trifásico de tensiones se realiza mediante señales de tipo sinusoidal. A la hora de caracterizar la onda de tensión existen cuatro parámetros básicos que nos darán el grado de pureza que presenta dicha señal y son: frecuencia, amplitud, forma y simetría.

La producción de electricidad tiene distintas formas en función de la fuente de energía utilizada, pero siempre se produce una onda sinusoidal de 50 Hz que puede llegar a considerarse casi perfecta. Por lo tanto, dichos parámetros no sufren variaciones importantes a la hora de realizar el suministro. Sin embargo, el problema reside en el proceso de transporte y su posterior distribución desde el lugar de producción hasta el punto de consumo, ya que dichos parámetros sufren cambios importantes que pueden llegar a afectar a los usuarios.

Ante esta situación, las inversiones en sistemas de distribución se han enfocado a estos dos problemas, con el único objetivo de asegurar la continuidad en el suministro. A su vez, hay que sumar la aparición de elementos electrónicos que han hecho que la red se haya vuelto cada vez más sensible, por lo cual se ha tenido que rediseñar gran parte del sistema ante el uso generalizado de ordenadores y sistemas de control en prácticamente cualquier tipo de edificio. De ahí que desde hace unos años se comience a escuchar el término calidad haciendo referencia al servicio, a las ondas o al producto, todos ellos ligados a la red eléctrica.

Definimos la calidad del servicio como el conjunto de características, técnicas y comerciales, exigible al suministro eléctrico por parte de consumidores y por los órganos competentes de la Administración [1].

En función del tipo de perturbaciones, la calidad de servicio de una instalación será mejor o peor. En el presente proyecto se tratará con especial hincapié una de los principales perturbaciones que más problemas causa en el sistema eléctrico: los huecos de tensión. Esto se debe a que provocan una caída de tensión en un breve espacio de tiempo, lo que provoca picos de intensidad que afectan de forma negativa, no solo a la propia instalación, sino a los procesos industriales y a todos los sistemas conectados a la red, en especial a aquellos con gran tecnología electrónica.

El origen de estas caídas de tensión radica en la mayoría de ocasiones en cortocircuitos producidos por factores ambientales o por la propia fauna, por lo cual son difíciles de controlar y poder actuar sobre ellos. Pero no todas las causas son naturales. Existen otras como la conexión incorrecta de aparatos por parte de las empresas instaladoras o la conexión de elementos que en un momento puntual demanden una gran cantidad de potencia, tales como motores, por parte de los clientes.

El principal factor a la hora de erradicar este tipo de perturbaciones es precisamente la dificultad de prever o evitar su aparición. Por este motivo cada vez se está investigando más sobre herramientas capaces de mitigar dichos efectos, y que tengan los menos efectos adversos posibles, buscando reducir el número de huecos de tensión.



## **2. CALIDAD DE LA ENERGÍA**





## 2. Calidad de la energía

### 2.1. Introducción

Desde el momento en el que se comenzó a transportar la energía desde los puntos de generación hasta el lugar de consumo, se prestó especial importancia a la continuidad ininterrumpida del suministro. Durante las últimas décadas se han incorporado nuevas restricciones entre las que cabe destacar por su trascendencia en el presente proyecto la calidad de onda de tensión que llega al consumidor, garantizando por ley que la onda se encuentre dentro de unos determinados márgenes permitidos. Para lograr este objetivo deben eliminarse, siempre que sea posible o por lo menos mitigar, las perturbaciones existentes en las redes de distribución y transporte.

Por continuidad del suministro eléctrico hacemos referencia a la cantidad y duración de dichas perturbaciones que provocan una interrupción, siempre que no superen un determinado margen de tolerancia.

Para que la calidad de la onda sea la correcta según la legislación vigente debe cumplir unas características fundamentales entre las que destacan que debe ser sinusoidal además de tener una determinada amplitud y frecuencia. Ante cualquier modificación de amplitud, frecuencia o ambas dos, la onda no será perfecta [Ilustración 2.1], por lo cual tendremos una onda deformada que no provocará la interrupción en el suministro, aunque puede llegar a afectar en función de la sensibilidad de las cargas a ese tipo de defecto. Este tipo de hechos es lo que pretendemos erradicar, buscando minimizar la aparición de efectos que provoquen variaciones en la onda.

En la presente sección, trataremos de introducir conceptos claves para facilitar la comprensión del trabajo, así como de justificar la importancia que ha cobrado la calidad de energía en la actualidad.

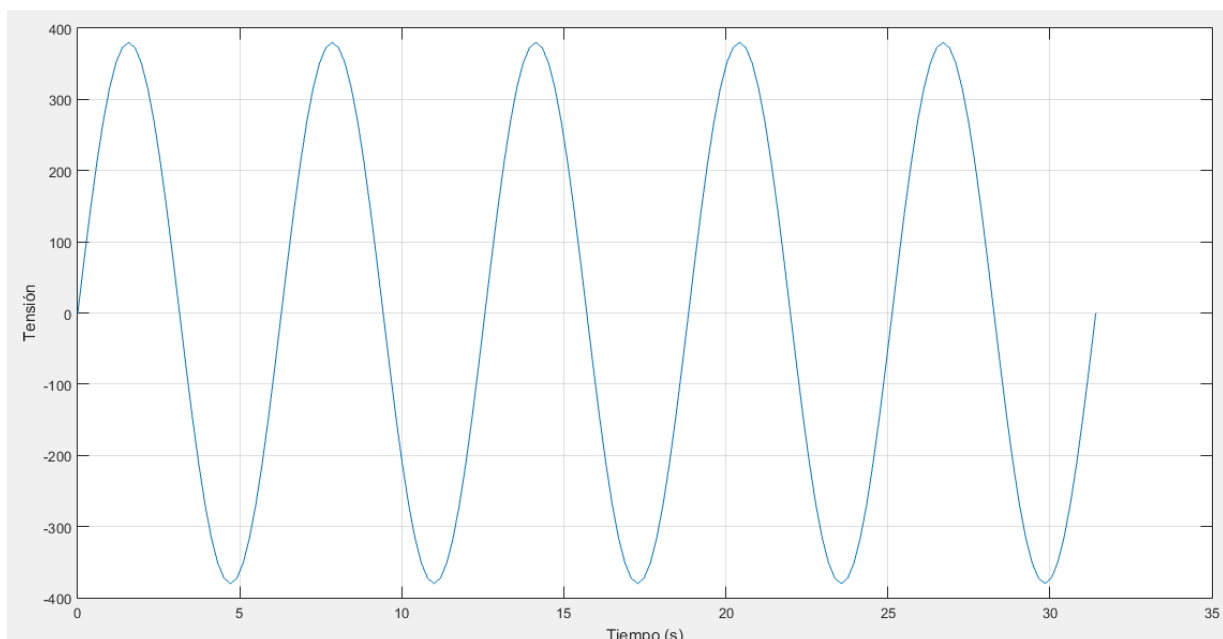


Ilustración 2.1.- Onda sin defectos. Fuente: Propia

## 2.2. Antecedentes

El punto de inflexión cuando nos referimos a la calidad de la energía hay que situarlo en el momento en el cual se produce la liberación del sector eléctrico y la posterior evolución de los sistemas de producción, cobrando mayor importancia con el paso de los años el concepto de calidad del servicio. Así, el Real Decreto 1995/2000 del 1 de diciembre de 2000 hace referencia a las condiciones mínimas de calidad del servicio en tres ámbitos: continuidad del suministro, calidad del producto y calidad en la atención y relación con el cliente. En la actualidad existe una regulación por ley respecto a las interrupciones y las características que éstas pueden presentar en un determinado periodo de tiempo.

La calidad de onda también hace referencia al nivel de degradación de los parámetros más característicos de la onda en el punto de medida. Esto se debe a que, situando este punto en el consumidor final, se pueden producir efectos tales como la pérdida de sincronismos al variar la frecuencia fundamental y el reinicio de equipos electrónicos al producirse variaciones de la tensión de alimentación de forma brusca durante un breve periodo de tiempo.

Este es uno de los motivos por los cuales en los últimos años se está incrementando la preocupación por la calidad de la energía eléctrica, sobre todo en los países más desarrollados en los cuales la industria tiene una mayor presencia e importancia. Esto se debe básicamente a:

1. Los procesos industriales necesitan de una mayor calidad energética, principalmente por los continuos avances de la tecnología, por lo cual los dispositivos son más sensibles a pequeñas alteraciones que pueda haber en la red de forma inesperada.
2. Las redes eléctricas cada vez se encuentran más contaminadas, entendiéndose por contaminación el aumento de receptores que generan perturbaciones, afectando de forma indirecta al resto de elementos receptores conectados, difundiéndose así la problemática.

Así se ha convertido en un problema que afecta no solo a los receptores, sino también a las propias empresas eléctricas, cuyo objetivo es mejorar la calidad de la energía que distribuyen, buscando reducir el impacto de estas perturbaciones en sus clientes. Para ello se centran en trabajar directamente con los fabricantes de dispositivos receptores para lograr que éstos disminuyan la generación de perturbaciones, logrando así una reducción en la incompatibilidad electromagnética entre los equipos conectados y la propia red.

Por último, en este ámbito han tenido una especial importancia las administraciones públicas cuando han ido realizando las distintas legislaciones, reglamentaciones y establecen el marco legal en el cual se recoge todo lo que afecte a la calidad de la señal.

## 2.3. Importancia actual

En la actualidad, el estudio de la calidad de la energía ha cobrado una especial importancia, sobre todo en el ámbito industrial donde la búsqueda de aumento tanto de productividad como de competitividad ha hecho que las inversiones sean cada vez mayor en este sector. [6] A su vez, podemos asegurar que hay una relación muy estrecha entre la calidad de la energía, la eficiencia y la productividad. Es por ello que las empresas buscan con ímpetu aumentar sus beneficios, lo cual logran optimizando sus procesos. Para ello, requieren principalmente a:

- Utilización de equipos de alta eficiencia.
- Automatización de procesos.
- Reducción de pérdidas de energía.
- Eliminar el envejecimiento prematuro de sus equipos.

El uso de equipos con una mayor eficiencia y automatización provoca problemas de fiabilidad en el proceso. Como veremos más adelante, en la gran mayoría de casos las perturbaciones que provocan problemas de calidad están originadas por equipos electrónicos, los cuales producen distorsiones en las ondas tanto de tensión como de corriente.

Por otro lado, no solo los equipos provocan estas perturbaciones, sino que también pueden sufrirlas, como analizaremos en próximos capítulos. Especialmente sensibles son los equipos de automatización, provocando en numerosas ocasiones paradas en la industria, generando perjuicios y consecuencias nefastas. Gracias a ello, es como el concepto de calidad de la energía ha evolucionado a un ritmo tan vertiginoso. Así, la importancia va mucho más lejos de la continuidad o fiabilidad del servicio, buscando ya interferencias e incompatibilidades con la electromagnética entre otros muchos campos.

Sin embargo, no es el único sector en el cual las necesidades de encontrar una calidad de energía óptima se han vuelto fundamentales, como por ejemplo es el caso del sector de la sanidad. Cada vez son más los hospitales y centros sanitarios que cuentan con medidas para aumentar la calidad de la energía eléctrica con la que trabajan sus equipos. No cabe duda, que en estas instalaciones se encuentran dispositivos cuyo funcionamiento se vuelve indispensable para las personas.

El hecho de que un equipo tenga una anomalía en un hospital es mucho más grave que en cualquier otro lugar, ya que aquí no se trabaja con grandes robots o equipos de alto coste, sino que en la mayoría de ocasiones estamos hablando de la vida de una persona. De aquí radica la gran importancia que tiene que las alteraciones que sufran las instalaciones hospitalarias sean mínimas, si no nulas.

Así, convivir con problemas de calidad de energía es algo cotidiano, pero no por ello debemos conformarnos y dejar que aparezcan en nuestros procesos. Por todo ello, el estudio de los fenómenos que los originan y la búsqueda de posibles soluciones son algo fundamental.

#### 2.4. Normativa aplicable

Existen diferentes marcos de actuación según el entorno que nos fijemos, por lo cual y para simplificar el acercamiento de las diferentes normativas vigentes vamos a centrarnos en las que nos afectan a nivel estatal [2], siendo las más importantes las que se muestran a continuación:

- Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre (BOE 27/12/2000). Por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica. En particular, los artículos 99 a 110 abarcan las características, técnicas y comerciales, inherentes al suministro eléctrico exigibles por los sujetos, consumidores y por los órganos competentes a la Administración.

- Orden ECO/797/2002, de 22 de marzo (BOE 13/04/2002). Se aprueba el procedimiento de medida y control de la continuidad del suministro eléctrico.
- Real Decreto 222/2008, de 15 de febrero (BOE 19/03/2008), por el que se establece el régimen retributivo de la actividad de distribución de energía eléctrica. Incluye la metodología a través de la cual se realizan los cálculos para la retribución, incluyendo un incentivo en función de la calidad de servicio.
- Norma UNE-EN 50160, “Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución”, define las características principales que debe tener la tensión suministrada por una red general de distribución en baja y media tensión, en condiciones normales de explotación, en el punto de entrega al cliente.
- Ley 24/2013, de 26 de diciembre del Sector Eléctrico (BOE 27/12/2013). En el presente documento se regula la calidad del suministro eléctrico. En él se establece que será la Administración General del Estado la encargada de determinar los índices objetivos además de los valores entre los cuales que acotarán dichos índices entre los cuales se admitirá una oscilación, lo cual se deberá cumplir tanto a nivel de usuario individual como para una determinada zona geográfica. Por último aparece la obligación de entregar a la Administración toda la información que se considera básica para determinar de forma objetiva si la calidad suministrada es la exigida y está dentro de los límites que se han establecido. Todos estos datos deben de proceder de una auditoría.
- Disposición adicional duodécima del Real Decreto 738/2015 (BOE 01/08/2015). Por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica así como el procedimiento de distribución de aquellos sistemas electrónicos que no se encuentren dentro del territorio peninsular. Además, establece que el envío de la información relativa a la calidad de servicio que deba ser remitida por las empresas distribuidoras de energía eléctrica, deberá realizarse por vía electrónica.

## 2.5. Concepto de calidad de energía

La definición de calidad de la energía no es única, ya que varía en función de quién y en qué ámbito la utilice. Por lo cual, aquí utilizaremos aquella que nos parece más apropiada para el presente trabajo. Así, la norma IEC (61000-2-2/4) y la norma CENELEC (50160) definen la Calidad de la Energía Eléctrica como: “Una característica física del suministro de electricidad, la cual debe llegar al cliente en condiciones normales, sin producir perturbaciones ni interrupciones en los procesos del mismo” [7]

Son varios los autores que consideran que este concepto se aplica únicamente a la señal de tensión y no es así, ya que el sistema eléctrico no es lineal ya que un generador no alimenta solamente a una carga mediante una fuente de tensión. Dicha carga, puede aumentar o disminuir, teniendo diferentes impactos sobre la red.

La calidad de energía eléctrica puede dividirse en dos grandes temas:

- La Calidad del Servicio de Energía Eléctrica, el cual tiene que ver directamente con el tiempo, es decir, la Continuidad del Servicio.
- La Calidad de la Potencia Eléctrica, que se refiere a las variaciones en la forma de onda, frecuencia y amplitud de las señales de corriente y tensión.

La calidad del servicio debe entenderse en este contexto como la continuidad de la señal de tensión y no, como otros lo consideran, atención al cliente, donde involucran todo lo referente a la administración, desde la preparación y entrega de las facturas de consumo de energía eléctrica, hasta la respuesta a las demandas telefónicas de los usuarios por desconexión del circuito.

Es importante aclarar aquí que, si bien la definición que se ha propuesto está acorde con la argumentación presentada, la aplicación del concepto de Calidad de la Energía Eléctrica (CEL) es relativa, pues depende de las necesidades del usuario. Por ejemplo, para un usuario residencial urbano o rural la CEL está referida más a la continuidad que a la calidad de la señal, mientras que para un usuario industrial con equipos de control basados en microelectrónica la exigencia no solo es de calidad en la continuidad del servicio sino en las señales de tensión y corriente.

Nos encontramos ante un problema de calidad siempre que estemos ante una desviación, tanto en tensión, corriente o frecuencia que provoque un mal funcionamiento de los equipos a los que se está alimentando, y por lo tanto un trastorno al usuario final, viéndose afectado su bienestar. No solo puede tener un impacto en el propio equipo sino también en la instalación y unos costes asociados bien sean por reparaciones de los equipos o por dichos picos de corriente.

Entre los principales efectos ligados a los problemas de energía se encuentran:

- Incremento de las pérdidas de energía.
- Daños a la producción, tanto en términos económicos sufriendo incrementos del coste en la fabricación de los productos como de competitividad respecto a otras empresas.
- Pérdida de fiabilidad y confianza de los usuarios en el uso de las instalaciones y equipos.

## 2.6. Continuidad del suministro

Como venimos mencionando, existen numerosas formas de medir la calidad de la energía eléctrica. La continuidad del suministro es una de ellas. Así, tendremos en consideración aquellas faltas que superen una duración de 3 minutos. Con ello únicamente estudiaremos los defectos permanentes, permitiéndonos suprimir los defectos transitorios con la posterior actuación de los mecanismos de protección o de una rápida reparación en la mayoría de casos por el propio usuario.

La calidad del servicio se clasifica en calidad individual (cada uno de los consumidores) y calidad zonal (referente a un área geográfica). Para determinar la calidad zonal se distinguen cuatro niveles diferentes según las características de la zona.

- Zona urbana: todas las capitales de provincia y los municipios con más de 20.000 suministros.
- Zona semiurbana: aquellos municipios con un número de suministros comprendido entre 2.000 y 20.000.
- Zona rural concentrada: aquellos municipios con un número de suministros entre 200 y 2.000.

- Zona rural dispersa: Conjunto de municipios de una provincia con menos de 200 suministros así como los suministros ubicados fuera de los núcleos de población que no sean polígonos industriales o residenciales.

Con el fin de establecer la calidad individual se controlan tanto el número de interrupciones largas como su duración. La legislación establece un límite de número de interrupciones y de duración total de las interrupciones sufridas por cada consumidor en el transcurso de un año natural dependiendo de la zona en la que esté ubicado y el nivel de tensión al que esté conectado. La tabla siguiente resume los límites reglamentarios establecidos en el último Real Decreto 1634/2006.

Tabla 2-1.-Límites de calidad individual. Número y duración máxima de interrupciones. Fuente: Propia

	Baja tensión		Media tensión	
	Número de interrupciones	Duración de la interrupción del servicio	Número de interrupciones	Duración de la interrupción del servicio
<b>Urbana</b>	10	5	7	3,5
<b>Semiurbana</b>	12	9	11	7
<b>Rural concentrada</b>	16	14	14	11
<b>Rural dispersa</b>	22	19	19	15

En lo que respecta a la continuidad del suministro, utilizaremos fundamentalmente dos índices (TIEPI y NIEPI) según la Orden ECO/797/2002, de 22 de marzo, por la que se aprueba el procedimiento de medida y control de la continuidad del suministro eléctrico.

#### 2.6.1. Índices TIEPI y NIEPI

A nivel nacional la continuidad del suministro se encuentra fijada por el número y el tiempo de las interrupciones, estableciendo el límite para considerarlo como tal una interrupción en la cual no se logre un mínimo de un 10% de la tensión nominal de la red.

Por lo tanto, a nivel estatal se toma estos dos parámetros como punto de partida para obtener los dos índices, TIEPI y NIEPI, que se utilizan para determinar la calidad de la energía según la legislación vigente (RD 1955/2000 y Orden ECO/797/2002).

TIEPI: Tiempo de interrupción equivalente de la potencia instalada en media tensión (1 kV < V ≤ 36 kV). Se obtiene mediante el tiempo de interrupción total, sumando los tiempos de cada una de las interrupciones que hayan tenido lugar en un determinado periodo de tiempo. Este índice se define mediante la siguiente expresión:

$$TIEPI = \frac{\sum_{i=1}^k (PI_i \cdot H_i)}{\sum PI} \quad \text{Ecuación (2.1)}$$

Dónde:

- $\Sigma PI$  = Suma de la potencia instalada de los centros de transformación MT/BT del distribuidor más la potencia contratada en MT (en kVA).
- $PI_i$  = Potencia instalada de los centros de transformación MT/BT del distribuidor más la potencia contratada en MT, afectada por la interrupción «i» de duración  $H_i$  (en kVA).
- $H_i$ : Tiempo de interrupción del suministro que se ve afectada directamente la potencia  $PI_i$  (en horas).
- $K$  = Número total de interrupciones durante el período considerado.

Las interrupciones que se considerarán en el cálculo del TIEPI serán aquellas consideradas como de larga duración, o lo que es lo mismo, con una duración superior a tres minutos. Es indistinto que la interrupción fuera provocada o programada, o bien que se diese de forma imprevista.

NIEPI: Es el número de interrupciones equivalente de la potencia instalada en media tensión ( $1 \text{ kV} < V \leq 36 \text{ kV}$ ). Para el cálculo del indicador, se utilizará el número total de interrupciones que tienen lugar durante un periodo de tiempo establecido. Este índice se define mediante la siguiente expresión:

$$NIEPI = \frac{\sum_{i=1}^k PI_i}{\sum PI} \quad \text{Ecuación (2.2)}$$

Dónde:

- $\Sigma PI$  = Suma de la potencia instalada de los centros de transformación MT/BT del distribuidor más la potencia contratada en MT (en kVA).
- $PI_i$  = Potencia instalada de los centros de transformación MT/BT del distribuidor más la potencia contratada en MT, afectada por la interrupción «i» (en kVA).
- $K$  = Número total de interrupciones durante el período considerado.

Al igual que para el cálculo del TIEPI, se tendrán en cuenta únicamente aquellas interrupciones consideradas de larga duración e indistintamente aquellas que se den de forma imprevista o programada. Se considerará una interrupción por cada incidencia que ocurra.

Según la legislación vigente, es obligación de las empresas encargadas de realizar el suministro eléctrico el disponer de un registro en el que consten las incidencias (descritas en el periodo de tiempo que han tenido lugar, el número de interrupciones, los clientes que se han visto afectados así como la ubicación en la que ha ocurrido entre otras muchas) con el objetivo de recopilar todos aquellos datos para poder realizar un control continuo de la calidad de servicio disponible en el territorio nacional.

Recurriendo a estos índices, determinaremos el nivel de cumplimiento a nivel individual y para una ubicación concreta.

Tabla 2-2.- Límites de calidad zonales. Fuente: Propia

	TIEPI (horas)	NIEPI (horas)
<b>Urbana</b>	10	5
<b>Semiurbana</b>	12	9
<b>Rural concentrada</b>	16	14
<b>Rural dispersa</b>	22	19

Para mejorar la comprensión de estos dos índices debemos hacer referencia a la definición de Punto de Conexión de Red (PCR) y Relación cliente-red.

Punto de Conexión en Red (PCR): es el punto físico en el que se sitúa la frontera de responsabilidad del distribuidor: la entrada de la caja general de protecciones para clientes de BT y el dispositivo de maniobra frontera para clientes de AT y MT.

Relación cliente-red: Es el vínculo que se puede establecer entre el cliente y las instalaciones desde las que se suministra. Consta de dos partes, la relación cliente-PCR, soportada y mantenida por la organización comercial y la relación entre el PCR y las instalaciones de red soportada y mantenida por la parte técnica. Según el grado de información de la red en los sistemas, la relación cliente-red podrá establecerse a nivel de distintos elementos de red (centro de transformación, de transformador, de cuadro de BT o de acometida). [1]

#### 2.6.2. Calidad de suministro individual

Los diferentes distribuidores están obligados a cumplir los requisitos mínimos de calidad individual para dar un correcto servicio a cada uno de los clientes, estableciendo así unos límites basándonos en el tiempo y el número de interrupciones que ocurren de manera imprevista cuya duración es superior a los tres minutos en cada año natural.

#### 2.7. Calidad de la energía en hospitales

No cabe duda que uno de los puntos más interesantes en el estudio de la calidad de energía es en los hospitales y centros médicos. Los equipos con los que cuentan este tipo de instalaciones tienen una gran sensibilidad a variaciones de tensión y cualquier fallo provoca consecuencias mucho más graves que en cualquier otro ámbito que podamos imaginarnos.

Además de esta razón principal existen otras muchas por las cuales la seguridad eléctrica y la confiabilidad tienen carácter fundamental para su estudio en instalaciones médicas. Entre estas se incluyen:

- **Compatibilidad electromagnética:** La alta densidad de equipos eléctricos y electrónicos en instalaciones médicas conlleva un riesgo de perturbaciones electromagnéticas entre el suministro de electricidad y los dispositivos médicos.
- **Criticidad de la continuidad:** Muchos tratamientos médicos no pueden ser interrumpidos, ni siquiera por un momento, sin implicar riesgo para el paciente, y en ocasiones, riesgo para la vida.
- **Integridad de los datos:** Los datos médicos precisos son esenciales y se recogen a menudo a través de un examen de pacientes a largo plazo o invasivo.



- Corrientes de fuga: Las corrientes de fuga de los dispositivos pueden ser individualmente seguras pero combinadas con otras pueden sumarse rápidamente y superar el nivel seguro.
- Pacientes débiles o sensibles: Algunos pacientes tienen reflejos debilitados o no existentes en caso de contacto directo con partes eléctricas vivas. Otros pacientes pueden tener una resistencia a la piel reducida debido a estrés, sudoración, electrodos introducidos sobre o en el interior del cuerpo ...

Todas las instalaciones eléctricas de baja tensión deben cumplir con la norma IEC 60364. Es una norma de instalación/aplicación, no una norma de producto. Al ser una norma IEC es aceptada y aplicada casi a nivel mundial, así cada país puede tener su propia norma que es una traducción al idioma local y puede implementar algunas desviaciones de “menor atención”. Algunas veces también puede haber guías técnicas que son herramientas de soporte, pero no son leyes, solo son sugerencias.

En particular, en la sección 7-710 de esta norma está dedicada a lugares médicos y prescribe ciertos requisitos adicionales para tales lugares. La mayoría de las regulaciones nacionales sobre seguridad eléctrica en instalaciones médicas derivan de esta norma. Su aplicación no afecta en exclusividad a grandes hospitales, sino que también regula las instalaciones dedicadas a salas de fisioterapia, centros de belleza, centros especializados en el cuidado de ancianos como pueden ser las residencias... Es principalmente un estándar de seguridad, además de proporcionar algunas reglas básicas.

Dicha norma, agrupa y clasifica todas las salas médicas en tres grupos (numeradas el 0 al 2) basados principalmente en el uso de los instrumentos y equipos que dispone que puedan entrar en contacto con el paciente (equipo eléctrico médico con parte aplicada) o no (equipo médico sin parte aplicada). Cada conjunto cuenta con un conjunto específico de medidas de protección.

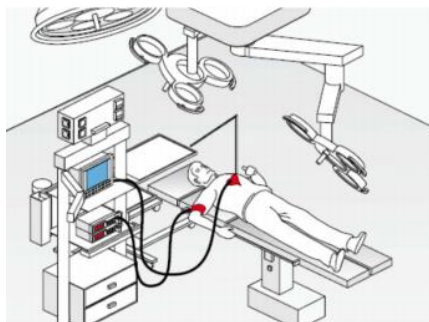


Ilustración 2-2.- Equipo médico con parte aplicada. Fuente: [9]

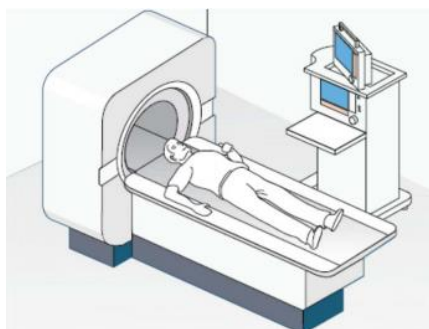


Ilustración 2-3.- Equipo médico sin parte aplicada. Fuente: [9]

El Grupo 0 incluye todas las localizaciones médicas donde no se usan partes aplicadas, tales como cuartos de pacientes ambulatorios, salas de masaje sin dispositivos médicos, oficinas, trasteros, comedores, vestuarios, pasillos, instalaciones de higiene del personal, salas de espera, etc. No se deben tomar medidas adicionales para el Grupo 0, salvo las prescripciones generales de seguridad eléctrica en edificios (Norma IEC 60364). Sin embargo, se debe mantener un alto nivel de fiabilidad y seguridad eléctrica. Esto significa que deben evitarse las perturbaciones de la calidad de la energía (por ejemplo, distorsión armónica, corrientes extraviadas, etcétera), fallos eléctricos y daños en el equipo (por ejemplo, interrupción del conductor neutro, degradación del aislamiento, etcétera). Si se está utilizando un sistema de puesta a tierra TN o TT, es aconsejable monitorear continuamente la calidad del aislamiento. Esto permite tomar medidas predictivas y evitar fallos inesperados. Dicha monitorización puede ser también un primer paso para mejorar la eficiencia energética del sistema.

El Grupo 1 está formado por las localizaciones donde se utilizan partes aplicadas, de forma externa o invasiva. Ejemplos son las habitaciones que sirven para la fisioterapia y la cirugía dental. Las medidas para el Grupo 1 incluyen:

- Protección contra el contacto directo mediante aislamiento adecuado.
- En caso de una interrupción de la alimentación, los servicios de apoyo cruciales, tales como la iluminación, deben cambiar a una fuente de alimentación alternativa.

El grupo 2 incluye todos los lugares médicos que no pertenecen al Grupo 1, es decir, todas las habitaciones donde la pérdida de suministro de energía puede poner en peligro la vida del paciente. También incluye todos los lugares médicos en los que las partes aplicadas se utilizan para procedimientos intracardiacos. Finalmente, incluye todas las salas relacionadas con operaciones de anestesia general: salas de preoperación, quirófanos y salas de recuperación postoperatoria. Las medidas para el Grupo 2 incluyen:

- Protección contra el contacto directo mediante aislamiento adecuado.
- No se permite la interrupción de la alimentación (para equipos médicos ni para servicios de apoyo como iluminación).
- Un sistema de puesta a tierra IT para proteger contra fallos a tierra (evitar interrupciones de alimentación).

## 2.8. Eficiencia energética en hospitales

Una vez que se garantiza la seguridad, fiabilidad y calidad del sistema eléctrico, la atención puede ir a la eficiencia energética. El consumo reducido de energía puede ser un elemento crucial para mitigar el aumento continuo de los costos de hospitalización.

Cuando se emplea como parte de un programa de gestión de energía en toda la instalación, una estrategia de eficiencia energética puede ayudar a los hospitales a gestionar proactivamente el uso de energía. La información generada a través del programa puede ayudar a los hospitales a redirigir los ahorros de energía en el cuidado del paciente. Esta información también proporciona indicadores de mantenimiento predictivo, ayudando al hospital a reducir el tiempo de inactividad del equipo.

La mayor parte de las ganancias de eficiencia energética en instalaciones eléctricas se basan en un solo principio físico: las pérdidas de energía en un conductor son inversamente proporcionales a su sección transversal. Esta regla cuenta tanto para cables como para bobinados de motores eléctricos y transformadores.

Las secciones transversales mínimas de los cables eléctricos están prescritas por la norma de seguridad internacional IEC 60364. Sin embargo, esas normas sólo tienen en cuenta los aspectos de seguridad y no la eficiencia energética. Los ahorros de energía resultantes también influirán positivamente en la huella ecológica de la instalación.

Los transformadores son otra parte del sistema eléctrico donde se pueden lograr ahorros significativos. Los transformadores parecen tener una eficiencia energética relativamente alta en comparación con otros equipos eléctricos (típicamente entre el 98% y más del 99%), pero funcionan de forma continua y tienen una larga vida útil (normalmente de 20 a 30 años). Como resultado, un pequeño aumento de la eficiencia puede sumar ahorros significativos durante la vida útil de un transformador. En la gran mayoría de los casos, los transformadores de alta eficiencia tienen un coste de ciclo de vida atractivo.

Otro de los puntos a tener en cuenta al hablar de eficiencia energética se encuentra en que las demandas de iluminación de los hospitales son complejas debido a su naturaleza ininterrumpida y los efectos de la iluminación en los pacientes y el personal. La iluminación representa en promedio entre el 10-15% del consumo total de energía y el 40-50% del consumo de electricidad de los hospitales y ofrece abundantes oportunidades de ahorro de energía.

Las tecnologías de iluminación de bajo costo disponibles en el mercado ofrecen las mejores oportunidades para lograr ahorros altos de energía y reducir los costos de operación y mantenimiento del hospital. Los hospitales pueden beneficiarse, por ejemplo, de:

- Eliminación de lámparas incandescentes e instalación de lámparas fluorescentes o LED de alto rendimiento.
- Adopción de controles de iluminación.

Tanto las soluciones de baja tecnología como las de alta tecnología para controlar la iluminación son eficaces. Muchos hospitales han adoptado una campaña de concienciación de la iluminación para capacitar al personal para apagar las luces cuando las habitaciones no están en uso. Más allá de eso, los sistemas de iluminación de alto rendimiento reducen significativamente el consumo de energía garantizando que la iluminación eléctrica se utilice sólo cuando sea necesario, en la cantidad necesaria. Las siguientes opciones pueden ahorrar energía sin afectar la atención del paciente o la funcionalidad de la instalación:

- Incorporación de controles de luz diurna en habitaciones de pacientes y espacios públicos con grandes áreas de ventana.
- Integración de controles que permiten una regulación continua (100 a 5% de la potencia de la lámpara).
- Instalación de sensores de ocupación en espacios que están frecuentemente desocupados, como baños, escaleras, áreas de servicio y plantas mecánicas.
- Uso de sensores que incluyen opciones de atenuación y escalonamiento para espacios que utilizan luz diurna.

- Incorporación de sensores de movimiento exteriores que ahorran energía y pueden mejorar la seguridad.

Otras tecnologías relacionadas con la iluminación que mejoran el rendimiento energético de los hospitales nuevos y rehabilitados son:

- Adopción de múltiples niveles de luz, tanto en ambiente general como en iluminación de tareas, en salas de pacientes y de exámenes. En las habitaciones de los pacientes, las luces brillantes pueden encenderse durante los exámenes pero permanecen apagadas el resto del tiempo. La iluminación de tiempo de inactividad permite a los pacientes descansar mientras reduce el consumo de energía.
- Consolidar inventarios de lámparas mediante la eliminación de tipos de bombillas innecesarios (diferentes bombillas con el mismo propósito).
- Maximizar las superficies mate o difusa de color claro para fomentar una luz natural sin reflejos.
- Adoptar una estrategia de iluminación para una instalación, que se aplicará en todos los futuros diseños. Dicha estrategia debería normalizar las tecnologías, utilizar medidas de control de manera consistente (por ejemplo, atenuación, sensores de ocupación, luz del día) y garantizar una apariencia y una sensación consistentes en todo el hospital.

# **3. TIPOS DE PERTURBACIONES**



### 3. Tipos de perturbaciones

#### 3.1. Introducción

Cuando hablamos de perturbaciones hacemos referencia a defectos originados en la red. En la mayoría de los casos, la aparición es inevitable ya que la red tiene que dar cobertura a numerosos clientes, por lo cual hay que introducir medidas correctoras, intentando mitigar los defectos generados.

Tabla 3-1.- Definición de perturbaciones. Fuente: Propia

Definición de perturbaciones según norma UNE 50160		
Parámetro	Nombre	Definición
Amplitud	Fluctuación de tensión	$\Delta U < 10\%U_{ref}$
	Hueco de tensión	$90\%U_{ref} > U > 1\%U_{ref}$ $10\ ms < \Delta t \leq 1\ min$
	Interrupción de alimentación - Corte breve - Corte largo	$U < 1\%U_{ref}, \Delta t \leq 3\ min$ $U < 1\%U_{ref}, \Delta t > 3\ min$
	Sobretensión temporal	Sobretensión relativamente larga
	Variación de tensión	Aumento o disminución de tensión
Forma de onda	Sobretensión transitoria	$\Delta t = de\ ns\ a\ ms$
	Tensión armónica	$f_{armónicos} = n \cdot f_{fund}$ $n = entero$
	Tensión interarmónica	$f_{interarmónicos} = n \cdot f_{fund}$ $m = no\ entero$
	Señales de información transmitidas por la red	$110\ Hz \leq f \leq 148,5\ kHz$ impulsos de corta duración
Frecuencia	Variaciones e frecuencia	$f \neq 50\ ó\ 60\ Hz$
Simetría	Desequilibrios de tensión	$ U_R  \neq  U_S  \neq  U_T $ $y/o$ $\varphi_{R,S} \neq \varphi_{S,T} \neq \varphi_{T,R} \neq 120^\circ$

Las perturbaciones típicas son los cortes de tensión, los huecos de tensión, las variaciones de tensión, las sobretensiones y las tensiones armónicas. A modo de resumen se incluye la tabla 3.1 en la cual se definen las perturbaciones según la norma UNE 50160.

A continuación se resume en la tabla 3.1 el nivel de gravedad y la percepción de los usuarios de manera cualitativa según la norma UNE EN 50160.

Tabla 3-2.- Clasificación de las perturbaciones eléctricas según su gravedad y frecuencia en la industria. Fuente: Propia

UNE EN 50160		EFECTOS SOBRE USUARIOS (MT)	
		PROBABILIDAD	GRAVEDAD
Frecuencia		MEDIA	MUY BAJA
Variaciones de tensión		MEDIA	MEDIA
Variaciones rápidas	Amplitud	BAJA	BAJA
	Parpadeo	MUY BAJA	BAJA
Huecos de tensión		MEDIA	MUY ALTA
Interrupciones breves		ALTA	ALTA
Interrupciones largas		MUY ALTA	MEDIA
Sobretensiones temporales entre fases y tierra		ALTA	MUY BAJA
Desequilibrio de la tensión		BAJA	MUY BAJA
Tensiones armónicas		MEDIA	MEDIA
Tensiones interarmónicas		MEDIA	MUY BAJA
Transmisión de señales de información por red		BAJA	MUY BAJA

A continuación explicaremos más detalladamente las características de cada una de las perturbaciones más importantes que tienen en lugar con mayor frecuencia en las instalaciones.

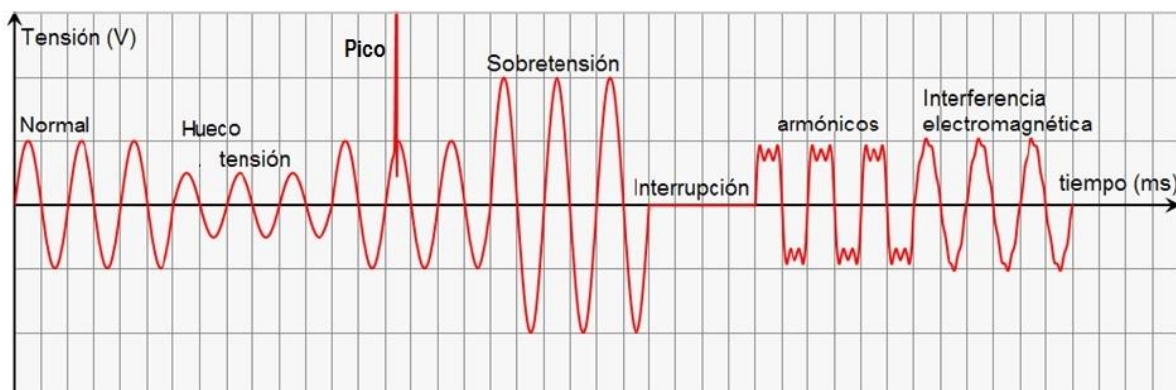


Ilustración 3-1.- Definición gráfica de los distintos tipos de perturbaciones. Fuente: [11]



### 3.2. Cortes de tensión

Hablamos de un corte de tensión de la alimentación, según la UNE 50160, cuando la tensión en los puntos de suministro sea inferior al 1% de la tensión declarada. A su vez, cuando uno de los elementos de protección realiza el corte del suministro de un usuario, se considera que estamos ante este tipo de fallo.

A continuación se muestra un pequeño esquema en el cual el usuario está conectado a una línea de media tensión (Ilustración 3.2). La apertura del seccionador, de cualquiera de los interruptores o la fusión del fusible da lugar al corte del suministro y por lo tanto un corte de tensión.

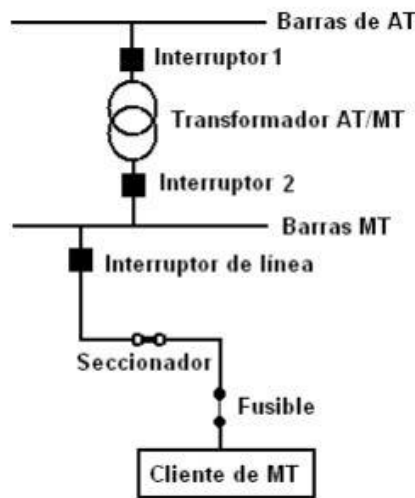


Ilustración 3-2.- Usuario conectado a MT. Fuente: [4]

En cualquiera de los casos mencionados anteriormente el usuario carecerá de tensión hasta que se repare la avería, bien rearmando o sustituyendo el elemento de corte afectado. La gráfica de tensión característica de este defecto es la que se muestra a continuación. (Ilustración 3.3)

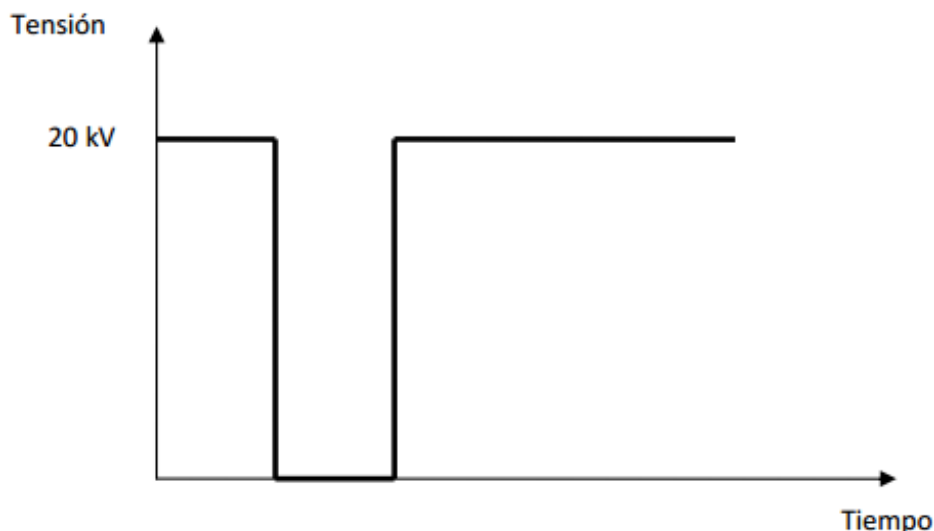


Ilustración 3-3.- Corte de tensión hasta su posterior reparación. Fuente [4]

Existen dos tipos de clasificación de las interrupciones de alimentación en función de si es prevista, en la cual los clientes conocen que se va a producir por un motivo específico tal como reparaciones, o bien si es accidental bien sea provocada por averías o por interferencias. Estas últimas tienen a su vez una clasificación en función del periodo de tiempo. Si éste es superior a los 3 minutos se considera largo y sino breve.

En la mayoría de los casos las interrupciones accidentales son provocadas por cortocircuitos, actuando los sistemas de protección tal y como hemos mencionado anteriormente. Así logramos evitar daños permanentes en la instalación que suelen ocasionar un elevado coste económico. Entre las principales consecuencias que provoca este tipo de defectos hay que destacar dos:

1. Aislamiento de las líneas: Aquí cobra importancia el lugar geográfico en el que se produzca. Las líneas alejadas de las zonas urbanas son mayoritariamente aéreas, con el riesgo que conlleva tanto para la fauna como para la flora. Por otro lado las líneas urbanas son casi siempre subterráneas, salvo algunas excepciones, lo que conlleva reducir la probabilidad de faltas aunque por el contrario, estas faltas casi siempre son permanentes.
2. Sobretensiones en el aislamiento de la red: En este caso las faltas son provocadas generalmente por fenómenos ambientales, siendo la más típica la de los rayos, elevando la tensión a valores fuera de tolerancia.

Como característica principal todas las redes eléctricas buscan devolver el suministro eléctrico en el menor intervalo de tiempo posible, sea cual sea el motivo que lo haya provocado. Para el cortocircuito este tiempo depende básicamente de si los daños provocados han sido permanentes o no. En el primer caso el tiempo de reposición será mucho más elevado ya que a pesar del intento de los automatismos por rearmar las protecciones, éstas no lo conseguirán en el número de intentos que tengan fijados ya que continuamente se encontrarán con el cortocircuito. Si por el contrario el fallo no es permanente, las protecciones se rearmarán en un tiempo de seguridad preestablecido dando de nuevo suministro a los usuarios.

### 3.3. Variaciones de tensión

Las variaciones de tensión consisten en un aumento o disminución en el valor eficaz de la tensión, provocada generalmente por variaciones de las cargas.

Idealizando un sistema eléctrico en el cual no estuviesen conectadas cargas, las tensiones en cada tramo de la red serán función de las relaciones de transformación. Sin embargo, en la realidad esto no es así, y a la red están conectadas un gran número de cargas produciendo la circulación de corriente, motivo por el cual se producen estas variaciones de tensión. A esto hay que sumar que las cargas conectadas a la red no son constantes, lo que provoca variaciones en la caída de tensión.

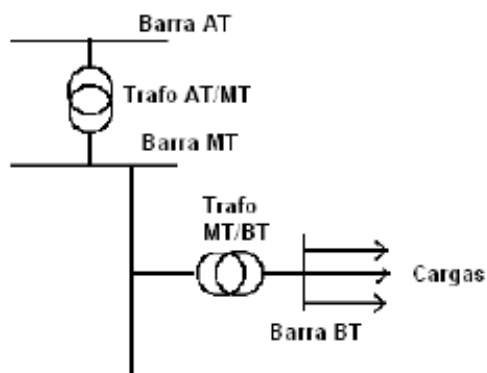


Ilustración 3-4.- Esquema unifilar de un usuario conectado a MT. Fuente: [4]

Las cargas conectadas a la red en viviendas varían su consumo en función del periodo del año en el que nos encontremos, así como si es un día laboral o festivo y el momento del día en el cual se produzca. Si nos vamos al sector industrial, estas variaciones se encuentran mucho más acentuadas, sobre todo por la conexión de motores, los cuales demandan una gran potencia durante su arranque respecto a su funcionamiento normal.

La problemática cobra mayor importancia cuando queremos hacerle frente, debido a que estos defectos son provocados por un conjunto de cargas, ya que no suele darse el caso en el que una carga individual tenga una potencia reseñable respecto a la del sistema a la cual se encuentra conectada. Las grandes variaciones tienen lugar en los usuarios finales, ya que las líneas tienen menor nivel de tensión y sección en los últimos puntos de distribución respecto a las líneas que se utilizan cerca de los centros de generación.

Por este motivo, son las propias compañías eléctricas la que se encargan independientemente de regular cada nivel de tensión en función de las variaciones de carga que generan dichas variaciones de tensión. Cuando es necesario bajar la tensión en sistemas de muy alta tensión se recurre a reactancias. Los transformadores cuentan con su propia regulación de cargas, permitiéndoles subir o bajar una toma del transformador en función del valor de la tensión que detecten, logrando así corregir los valores de una forma sencilla en poco tiempo.

### 3.4. Armónicos

Estaremos ante distorsión armónica cuando la onda sinusoidal, prácticamente pura, que generan las centrales eléctricas sufre deformaciones en las redes de alimentación a los usuarios [2].

De una forma más sencilla, hablar de armónicos es hacerlo de distorsiones en la forma de la onda. El gran inconveniente se encuentra al realizar cálculos con estas señales distorsionadas, recurriendo a las series de Fourier para descomponer la señal en una onda sinusoidal y un conjunto de ondas de frecuencia múltiplo de la fundamental, para conseguir con ello simplificar este procedimiento y conocer el grado de deformación.

### Componentes sinusoidales (armónicos)

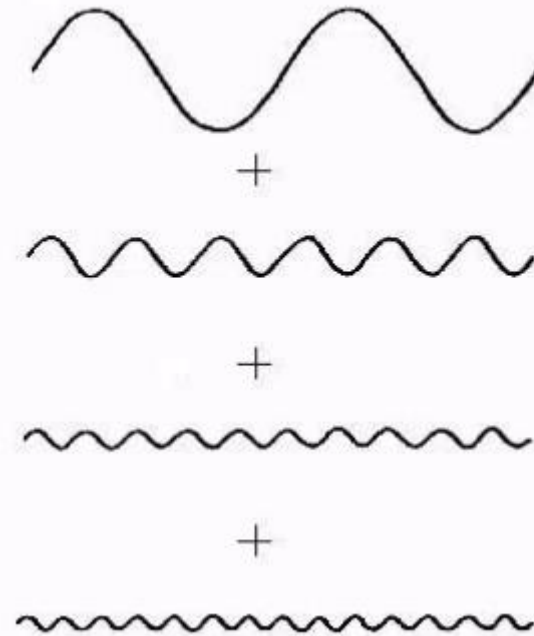


Ilustración 3-5.- Descomposición de Fourier. Fuente: [17]

En Europa la frecuencia de la tensión es de 50 Hz, siendo ésta la componente fundamental de la onda. Las componentes de frecuencias armónicas son múltiplos de ésta y reciben el nombre de armónicos de tensión o de intensidad. No obstante, existen pequeños inconvenientes como la aparición de otras componentes que se denominan interarmónicos, cuya frecuencia no es múltiplo de las fundamentales.

El orden de los armónicos se define según la relación entre su propia frecuencia y la de la componente fundamental.

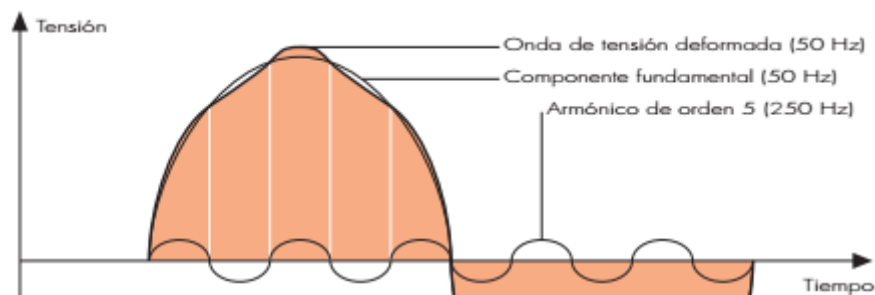


Figura 7.1

Onda de tensión deformada y sus componentes

Ilustración 3-6.- Onda de tensión fundamental, deformada y quinto armónico. Fuente: [2]

Partiendo del fundamento de que cualquier señal tendrá contenido de armónicos, lo que se busca es minimizar el nivel de éstos con el objetivo de reducir los problemas que puedan causar en la instalación. A partir de este principio, existen equipos que son capaces de atenuar e incluso eliminar dichos armónicos, pero por el contrario existen otros que son fuertemente generadores. Como todos estos equipos se encuentran interconectados mediante la red, el buen funcionamiento de nuestra instalación se basará en la capacidad de equilibrio entre estos dos tipos de equipos.

Atendiendo al tipo de funcionamiento de las cargas, tenemos la siguiente clasificación:

- Cargas lineales: La mayoría de equipos que forman el sistema de distribución son lineales. No generan armónicos, se pueden considerar casi puras. Existen ciertos tipos de cargas que además son capaces de mitigarlos. Entre los principales se encuentran las resistencias.
- Cargas no lineales: La intensidad demandada no es sinusoidal, sino que es una deformada, por lo que generan armónicos. En este grupo se encuentran los rectificadores monofásicos y trifásicos.

Haciendo una clasificación específica de las fuentes de intensidad armónicas tendríamos los siguientes elementos.

- Receptores de uso industrial.
  - Rectificadores: Equipos a través de los cuales realizamos la transformación de corriente alterna en continua. El orden de estos armónicos obedece a la siguiente expresión:
$$n = p \cdot m \pm 1$$

Dónde:

    - n: orden armónico
    - p: número de pulsos del rectificador
    - m: número entero
  - Hornos: Bien sean de inducción o de arco.
- Receptores de uso doméstico. De forma individual no poseen una potencia elevada, pero cuando los analizamos de forma conjunta es cuando los armónicos que generan comienzan a cobrar especial importancia. Entre ellos se encuentran:
  - Receptores de televisión y electrodomésticos.
  - Lámparas: Tanto fluorescentes como de descarga.
- Equipos en instalaciones eléctricas. En este grupo podemos citar:
  - Dispositivos electrónicos de control y mando por su capacidad de interrumpir la corriente en momentos determinados.
  - Dispositivos con núcleos magnéticos. Este efecto se produce principalmente cuando trabajan en condiciones de saturación. Estos armónicos generados en mayor porcentaje se corresponden con orden impar.

Cuando evaluamos las consecuencias originadas por este efecto, tiene una gran importancia el grado de deformación de la onda y la sensibilidad que presenten los equipos que lo soporten. Así, cuanto mayor sea la potencia de cortocircuito mejor será la respuesta que presente nuestra instalación. Entre los dispositivos en los cuales las consecuencias son más graves destacan los condensadores, los fusibles y relés de protección y los balastos inductivos.

En resumen, el origen de los armónicos se encuentra en las cargas, al tener un consumo de corriente distorsionado. Esto provoca que los armónicos de menor orden normalmente se dirijan hacia las fuentes generadoras, ya que en valores de frecuencia pequeños ofrecen una impedancia más pequeña mientras que los armónicos de orden más elevado se dirigen con mayor probabilidad hacia los condensadores.

En la actualidad, ha aumentado la legislación referente a los armónicos generadores en las redes de eléctricas, buscando mejorar la calidad de la energía. Así, se han establecido límites para los armónicos que se pueden llegar a generar al utilizar equipos y dispositivos que puedan provocar la aparición de perturbaciones. Toda esta normativa sobre las distorsiones armónicas involucra de forma directa al diseño y producción de equipos de uso cotidiano, viéndose afectados principalmente los electrodomésticos. El objetivo es establecer límites a los dispositivos de forma individual.

De aquí radica la importancia que ha cobrado este tema para las empresas encargadas de la distribución de energía a nivel español. Los criterios que siguen a la hora de calcular y determinar este tipo de perturbaciones se basan en:

- En función de la potencia demandada y disponible establecen una determinada cuota para el nivel de perturbación que se genere por parte de ese equipo.
- En la determinación de los armónicos, tienen en cuenta la simultaneidad que pueda darse, aplicando así un determinado coeficiente.
- Prestan especial atención al efecto generado por la anulación de determinados armónicos desfasados entre sí.

### 3.5. Sobretensiones temporales

La norma UNE-EN-50160 se refiere a una sobretensión temporal como un aumento de la tensión de alimentación de duración relativamente larga. Respecto a la duración de la sobretensión, la define como el tiempo comprendido entre el instante en que el valor eficaz de la tensión en un punto particular de una red de alimentación eléctrica excede el umbral inicial y el instante en el que cae por debajo del umbral final.

Este defecto aparece en el sistema de distribución, normalmente asociado a faltas a tierra o con la conexión y desconexión de cargas de gran potencia a la red. Lo que se produce es un aumento puntual de la tensión superior, que en ocasiones llega a duplicar su valor en especial en aquellas instalaciones en las cuales el neutro está aislado. Para instalaciones en las cuales el neutro está conectado a tierra se llega a alcanzar valores de 1,5 veces la tensión.

Para simplificar un poco la comprensión de este tipo de fallo, podemos considerarlo como aquel aumento de tensión que supera la tensión de referencia y cuya duración fuera similar a la de los huecos de tensión.

Su importancia radica en el hecho de que en función de ellas se definen las características de la protección por pararrayos y en algunos casos, cuando se producen con repeticiones sucesivas de polaridad opuesta resultan determinantes así no alcancen valores excesivos, para el dimensionamiento del aislamiento interno y también para los aislamientos externos cuando éstos están contaminados; pueden ser originados principalmente por:

- Fallas Fase-Tierra, dos Fases-Tierra
- Desconexión de cargas importantes
- Fenómenos de ferresonancia y resonancia en circuitos no lineales

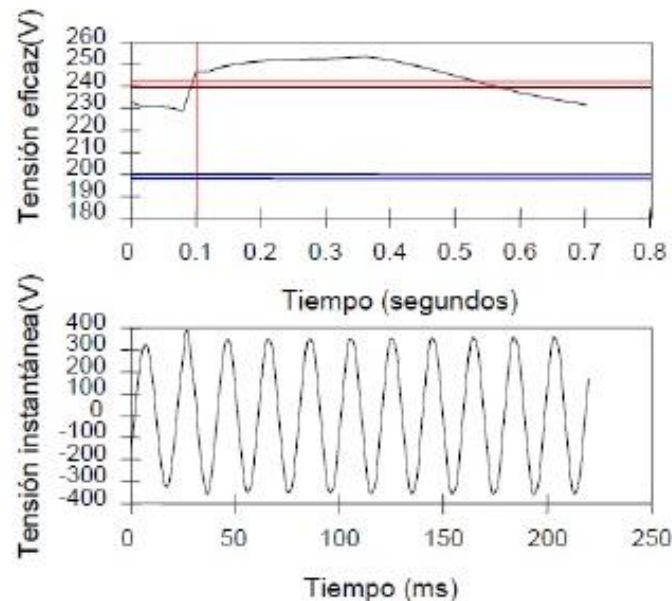


Ilustración 3-7.- Representación gráfica de una sobretensión temporal. Fuente: [17]

### 3.6. Sobretensiones transitorias

En la norma UNE-EN 50160 se define como “sobretensión oscilatoria o no, de corta duración, generalmente fuertemente amortiguada y cuya duración no excede de algunos milisegundos”.

La particularidad de las sobretensiones transitorias se encuentra en que no se puede estudiar mediante valores promediados ya que por su amplitud y duración su estudio tiene que realizarse a partir de valores instantáneos de la amplitud de la onda de tensión. Este tipo de perturbación aparece en cualquier punto de la red y nivel de tensión. Una vez se ha generado, se desplaza a través de la misma con idéntica velocidad de propagación que una onda en un medio conductor. Esto hace que, por norma general, en la práctica se considere que se generan en toda la red en el mismo instante de tiempo en que tienen lugar, aunque los parámetros no sean los mismos ya que si no, no se ajustaría a la realidad. Entre todas las variables, se presta especial atención al valor de pico, ya que es la que más afecta al valor de la energía asociada, la cual se reduce a medida que se aleja la onda del punto en el cual se ha generado.

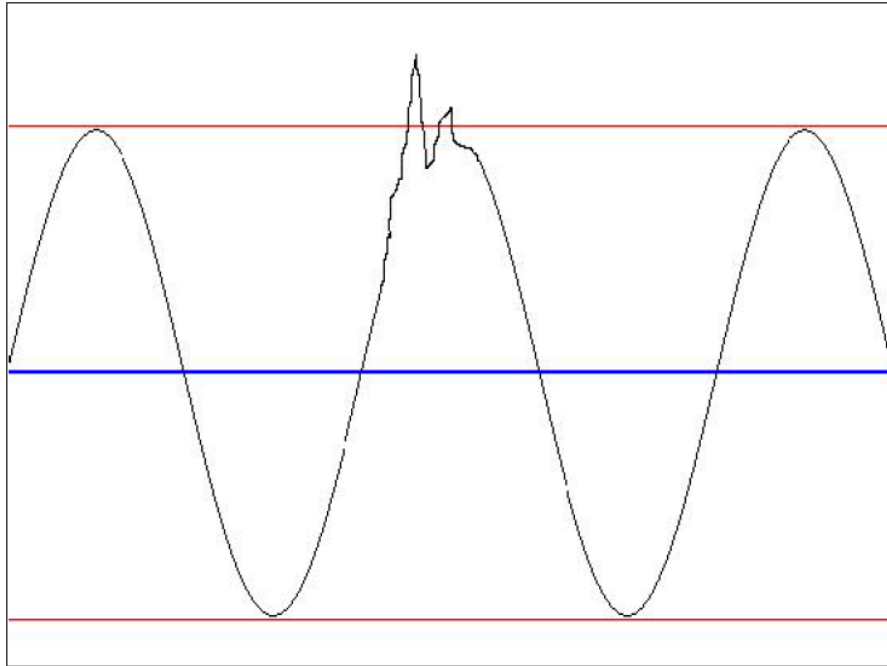


Ilustración 3-8.- Sobretensión transitoria. Fuente: [17]

Las sobretensiones transitorias, generalmente, se clasifican en dos grupos según la forma que presenten:

1. Simples: También conocidas como impulsos. Se caracterizan por una fuerte subida del valor pico y una posterior bajada por debajo del valor medio. Posteriormente, no presentan oscilaciones y el valor nominal de la tensión recuperará su valor.
2. Oscilatorios: Al igual que los impulsos presentan una fuerte subida, pero la diferencia se encuentra en que hasta que recupera el valor nominal de la tensión, se producen oscilaciones durante un periodo de tiempo.

Como hemos mencionado anteriormente, existen diferentes variables que caracterizan este tipo de perturbación. Una gran parte de ellos se utilizan principalmente para buscar el posible efecto que puede provocar en la instalación así como la manera de mitigar, antes que para realizar una descripción más precisa y detallada del propio fenómeno. Entre los más comunes y que mayor información nos aportan se encuentran:

- Valor de pico: Es el valor máximo o mínimo alcanzado, o lo que es lo mismo, el máximo valor de la onda en valor absoluto. Para impulsos oscilatorios algunas veces se tienen en cuenta ambos, tanto el pico positivo como el negativo.
- Duración: Es la diferencia entre el inicio y final de la perturbación. Para determinados impulsos, este valor cambia ya que su definición es la diferencia entre el inicio y el momento en el cual su valor se encuentra por debajo del 50% del máximo.
- Frecuencia: Es un valor que define el número de pulsos para un periodo de tiempo determinado. Con esto, podemos realizar un análisis para comprobar la oscilación de la onda el instante en el que tiene lugar el fenómeno.
- Energía: Es el valor asociado a un impulso de tensión en una carga.



Otra posible clasificación, según su origen en función de la fuente que genere ese pico de tensión, es:

- Origen atmosférico: Ocasionadas por fenómenos atmosféricos, generalmente por rayos que tienen lugar durante las tormentas. Para establecer una semejanza, diremos que un rayo equivale a un impulso de corriente en un breve periodo de tiempo con unos valores de máximos por encima de los 10 kA, que en ocasiones puede llegar hasta los 250 kA. Esto supone que la forma que presenta la onda es muy variable ya que el rango es muy amplio, aunque siempre presente un ascenso muy brusco, en un periodo de tiempo que nunca es superior a unos pocos microsegundos. Las descargas que se producen en la propia red pueden ser directas o indirectas.

El estudio del comportamiento de las líneas de distribución frente al rayo ha sido de gran atención durante los últimos años y existe una abundante literatura centrada exclusivamente en este campo. Sin embargo, todavía existen muchos puntos sobre los que no hay un conocimiento suficientemente preciso. Probablemente, los más importantes sean la propia naturaleza del rayo y los principales parámetros que describen su comportamiento.

- Origen interno: Son ocasionadas por una modificación brusca del régimen normal de corriente establecido en un circuito eléctrico durante su funcionamiento, ya sea por conexión o desconexión de cargas o bien por un fallo del mismo. Cuando este tipo de perturbaciones se presenta en redes de alta o media tensión suele afectar, en la mayoría de los casos, también a las de baja tensión ya que se encuentran conectadas directamente y en función de las distintas reacciones que originen finalmente sobre los propios equipos que se encuentren conectados a ella.

Existen casos en los cuales estas sobretensiones son generadas directamente por el propio usuario. Son fenómenos que pueden ser peligrosos para los propios equipos a pesar de que la energía con la que cuentan es mínima.



# **4. HUECOS DE TENSIÓN**



## 4. Huecos de tensión

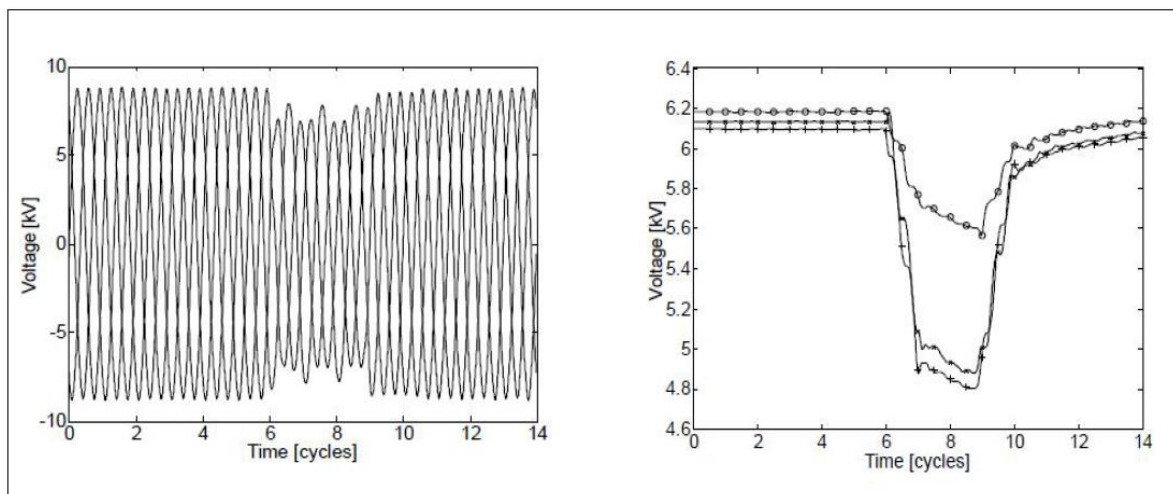
### 4.1. Introducción

El objetivo de este capítulo se basa en dar un mayor conocimiento sobre los eventos que se conocen como huecos de tensión. Buscaremos definir el concepto para lograr entender aquellos factores que influyen de forma directa o indirecta así como los distintos parámetros que afectan a las caídas de tensión.

Los huecos de tensión no son todos iguales, ya que en función de cómo se produzca el fallo y el tiempo que esté presente se denominará de forma distinta, realizando una clasificación y posterior análisis.

La descripción de un hueco de tensión radica en dos parámetros básicos que son la profundidad (valor de la caída de tensión que se produce) y por la duración, bastando para realizar un primer análisis y establecer las consecuencias que pueden generar en nuestro sistema.

En la Ilustración 4.1 se muestra el ejemplo que contempla la normativa vigente para definir los huecos de tensión sobre una línea trifásica que se produce de forma simultánea en las tres fases. En el primer gráfico se observa la forma de la onda y cómo se produce un hueco de tensión que se transmite durante un breve periodo de tiempo y que luego recupera la normalidad, mientras que en el segundo se representa la variación de la tensión eficaz de dicha onda.



### 4.2. Caracterización de un hueco de tensión

Entre las perturbaciones que afectan a la calidad de la onda de tensión, los huecos de tensión tienen una importante repercusión desde el punto de vista industrial.

Según la norma UNE-EN-50160 el hueco de tensión se define como: “disminución brusca de la tensión de alimentación a un valor situado entre el 90% y el 1% de la tensión declarada, seguida del restablecimiento de la tensión después de un corto lapso de tiempo. Por convenio, un hueco de tensión dura de 10 ms a 1 min. La profundidad de un hueco de tensión es definida como la diferencia entre la tensión eficaz mínima durante el hueco de tensión y la tensión declarada. Las variaciones de tensión que no reducen la tensión de

alimentación a un valor inferior al 90% de la tensión declarada no son consideradas como huecos de tensión”.

Existen dos parámetros mediante los cuales clasificaremos los huecos de tensión. Esto nos servirá a la hora de determinar los posibles defectos que puede generar en nuestra instalación, así como realizar las medidas de prevención y mitigación correspondientes, estos son:

- Profundidad: Distancia entre el punto al cual cae la tensión y nuestro valor de referencia. Casi todos los medios de detección utilizan el valor medio de la tensión eficaz para realizar el cálculo de esta magnitud. Sin embargo, no es el único método ya que en ocasiones también se recurre al valor de la componente fundamental de la tensión mediante Fourier o por la tensión de pico. Según sea este valor, podemos hacer a su vez una subclasificación en tres grupos:
  - 1% - 30%.
  - 30% - 80%.
  - Superior al 80%.
- Duración: Valor del periodo de tiempo que dure dicha caída de tensión, es decir, hasta que se alcance de nuevo el valor de referencia fijado. Este parámetro cobra una gran importancia a la hora de que las medidas de protección de una instalación actúen, ya que éstas van a tratar de actuar con el objetivo de aislar el cortocircuito. Caben dos posibles unidades de medida, bien el número de ciclos que se han visto afectados, o en escala de tiempo, admitiendo una división en dos grupos en función de si es superior o inferior a 1 segundo.

Para simplificar la comprensión de estos dos parámetros, se muestran ambos en la ilustración 4.2.

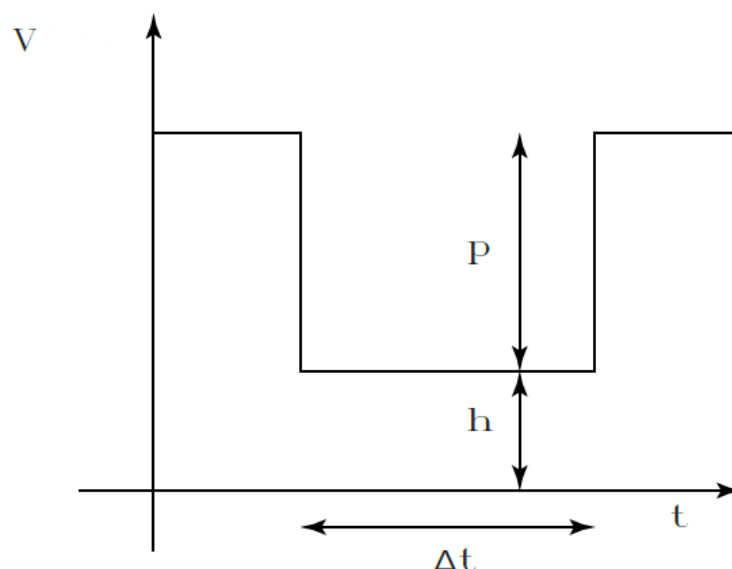


Ilustración 4-2.- Profundidad y duración de un hueco de tensión. Fuente [5]

Uno de los puntos que genera mayor polémica al abordar este defecto, es el límite máximo de tiempo para poder caracterizarlo como hueco de tensión.

- Si el efecto que lo produce tiene que ver con la aparición y eliminación de faltas deberíamos fijar un periodo de unos segundos

- Cuando el efecto es provocado, por ejemplo, por arranques directos de motores en las cuales estas faltas permanecen en nuestra instalación durante un intervalo de tiempo superior, también hablaremos de hueco de tensión.

Los huecos de tensión son la perturbación más frecuente de las redes de transporte y distribución de energía eléctrica.

A la hora de hablar de los huecos de tensión existe confusión debido a que al decir, por ejemplo, un hueco del 20% no es seguro si se refiere a una caída de 0.2 pu o 0.8 pu. Por lo tanto en este proyecto nos referiremos en todo momento a la tensión residual del hueco (h en la ilustración 4.2), de modo que un hueco de tensión del 20% se referirá que la tensión ha disminuido 0.8 pu, es decir,  $p = 0,8$  pu y  $h = 0,2$  pu, donde p es la profundidad del hueco y se puede ver claramente que  $1 - p = h$ . Asimismo, se utilizará  $\Delta t$  para definir la duración del hueco.

Tabla 4-1.- Rangos de tiempo y valores de interrupciones, hueco de tensión y sobretensiones. Fuente: Propia

<b>Instantáneo</b>		
<b>Interrupción</b>	0,5 – 30 ciclos	<0,1 pu
<b>Hueco de tensión</b>	0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 pu
<b>Sobretensión</b>	0,5 – 30 ciclos	1,1 – 1,8 pu
<b>Momentáneo</b>		
<b>Interrupción</b>	30 ciclos – 3 segundos	<0,1 pu
<b>Hueco de tensión</b>	30 ciclos – 3 segundos	0,1 – 0,9 pu
<b>Sobretensión</b>	30 ciclos – 3 segundos	1,1 – 1,4 pu
<b>Temporal</b>		
<b>Interrupción</b>	3 segundos – 1 minuto	<0,1 pu
<b>Hueco de tensión</b>	3 segundos – 1 minuto	0,1 – 0,9 pu
<b>Sobretensión</b>	3 segundos – 1 minuto	1,1 – 1,2 pu

En muchos casos tiende a confundirse el hueco de tensión con un corte breve de tensión, ya que poseen muchas características comunes, a lo que hay que añadir que cuando buscamos técnicas para mitigar o bien eliminar sus efectos nos encontramos con situaciones que, si bien no son idénticas, son muy similares.

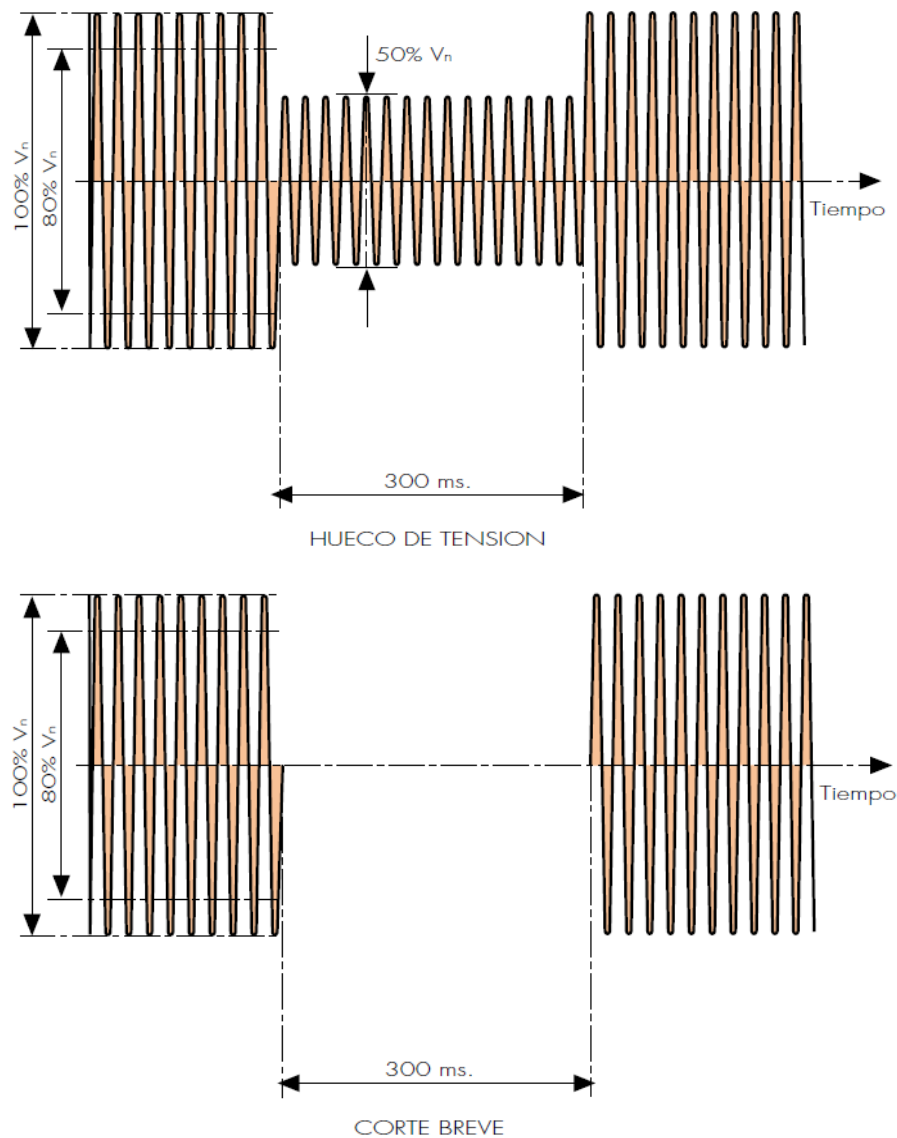


Ilustración 4.3.- Diferencia entre un hueco de tensión y un corte breve de tensión. Fuente: [2]

### 4.3. Causas que originan huecos de tensión

En los sistemas de distribución se producen aumentos de la corriente que generalmente no suelen repercutir en el valor de la tensión, que no suele alejarse del valor nominal. Esto se debe a que la impedancia que poseen es nula, por lo que una variación en la corriente, provocará una reacción inversa en la tensión. No obstante, en el momento en el que el aumento de corriente es importante o bien el valor de la impedancia deja de ser nulo, se genera una caída de tensión que ya se debe tener en cuenta por las posibles consecuencias que pueda ocasionar.

Así, de forma teórica se podrían resumir las causas que originan los huecos de tensión en dos:

- Grandes incrementos de corriente.
- Aumento del valor de la impedancia de los sistemas de distribución.

En la realidad, la mayoría de los huecos de tensión son originados por los grandes incrementos de corriente, siendo en ocasiones aisladas cuando se producen por el aumento del valor de la impedancia.



#### 4.4. Clasificación de huecos según el evento

Para simplificar la comprensión el concepto de hueco de tensión lo hemos referenciado todo a sistemas monofásicos.

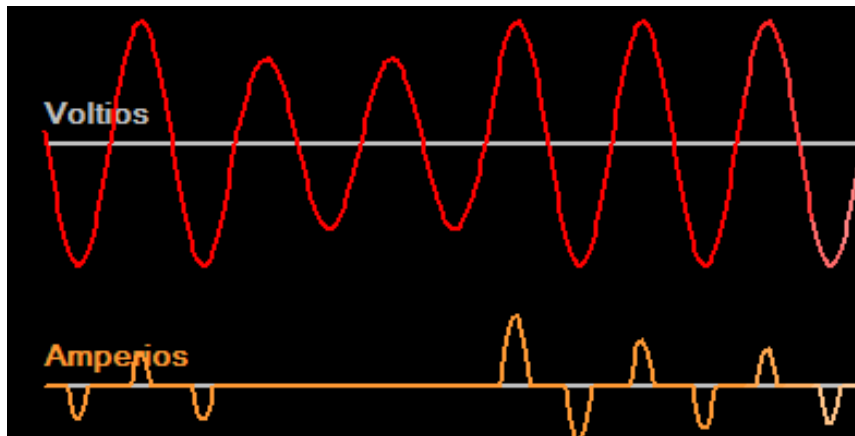


Ilustración 4-4.- Onda monofásica con un hueco de tensión del 70%. Fuente: Propia

Sin embargo, en el momento de realizar el transporte y posterior distribución, siempre se realizan en trifásica. Aquí es donde de verdad se genera una cierta complicación, ya que es donde realmente se generan este tipo de faltas.

Como hemos venido mencionando, los huecos de tensión son generados en su mayoría por cortocircuitos en la red, que producen una rápida caída de tensión durante un breve periodo de tiempo, recuperándose rápidamente una vez la falta ha desaparecido. Sin embargo, existen otras faltas provocadas por arranques de motores o energización de transformadores que aunque son menos habituales, también provocan este tipo de defectos. Aunque la caída de tensión se produzca igualmente de forma brusca, la diferencia respecto al cortocircuito se encuentra en la capacidad de recuperación del valor nominal de tensión, el cual es mucho más lento, siendo mucho más suave la vuelta.

En trifásica existen tres tipos de cortocircuitos en función de las fases afectadas: monofásico, bifásico y trifásico

##### 4.4.1. Monofásico

Nos encontramos ante la falta más sencilla, en la cual se produce el contacto entre una fase y la tierra [Ilustración 4.5]

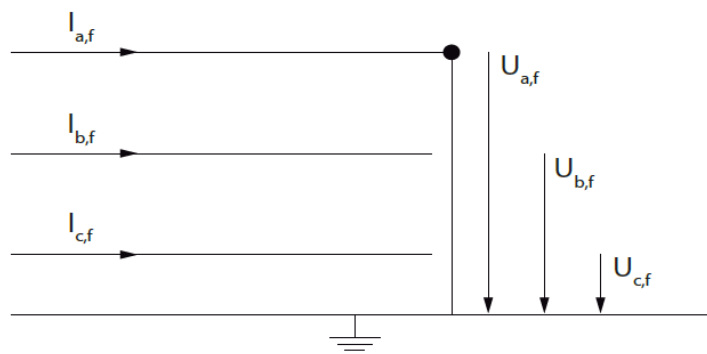


Ilustración 4-5.- Esquema de falta entre una fase y tierra. Fuente: [14]

En la ilustración 4.6 se muestra una simulación de un sistema en el cual se ha producido un hueco de tensión en una de las fases con una profundidad del (70%) y con una duración de (2 ciclos - 40ms). Como podemos observar, las otras dos fases continúan en funcionamiento, lo que permite que el valor de la tensión no sufra modificación alguna, al igual que la potencia suministrada a la carga.

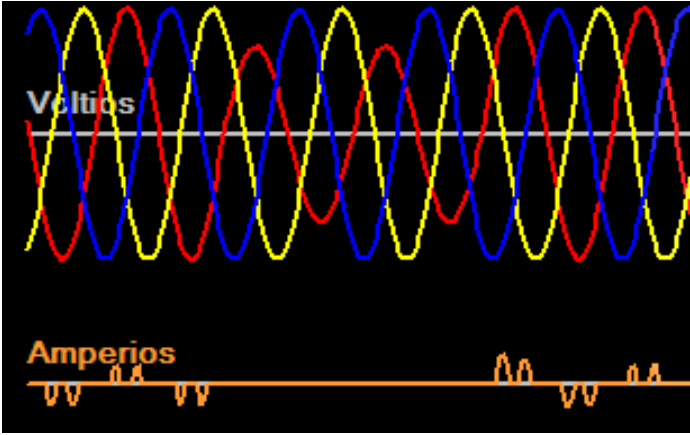


Ilustración 4-6.- Hueco de tensión monofásico en red trifásica. Fuente: Propia

4.4.2. Bifásico

Al hablar de cortocircuito bifásico nos referimos a aquél que provoca un desequilibrio entre las fases. Se puede producir al entrar en contacto dos fases [Figura 4.7.] o bien las dos fases con la tierra [Ilustración 4.8]. Esto provoca un aumento en la intensidad que circula por cada una de las fases en las que se da el fallo.

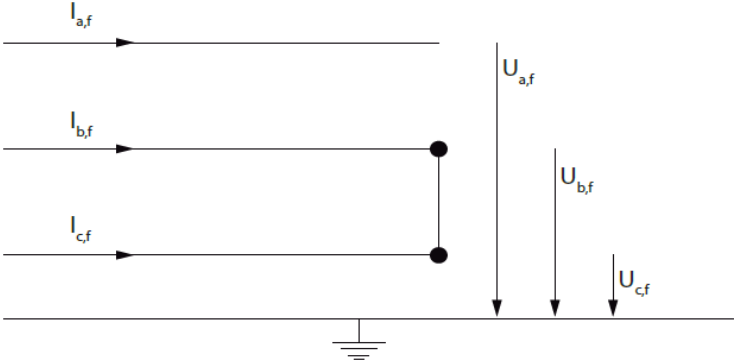


Ilustración 4-7.- Esquema de falta entre dos fases. Fuente: [14]

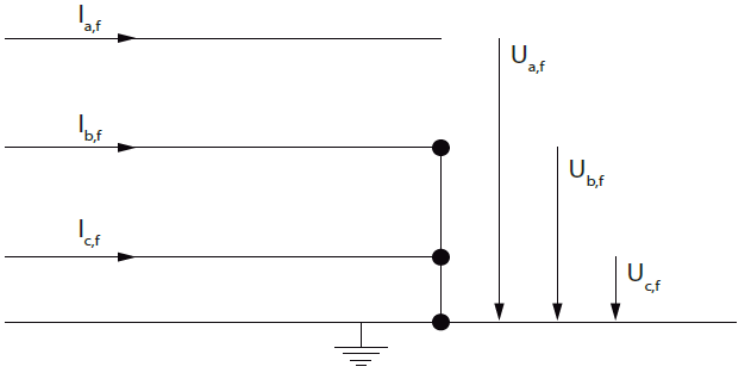


Ilustración 4-8.- Falta entre dos fases y tierra. Fuente: [14]

En la ilustración 4.9 se ejemplifica este defecto, en el mismo caso que para el monofásico, con una profundidad del (70%) y con una duración de (2 ciclos - 40ms) para cada una de las dos fases en las que tiene lugar.

Es a partir de este tipo de eventos cuando se empezarían a notar los efectos provocados por los huecos de tensión, pudiendo verse afectados equipos bien sea de forma directa por el impacto del hueco de tensión o bien de forma indirecta dando lugar a posibles paradas de equipos.

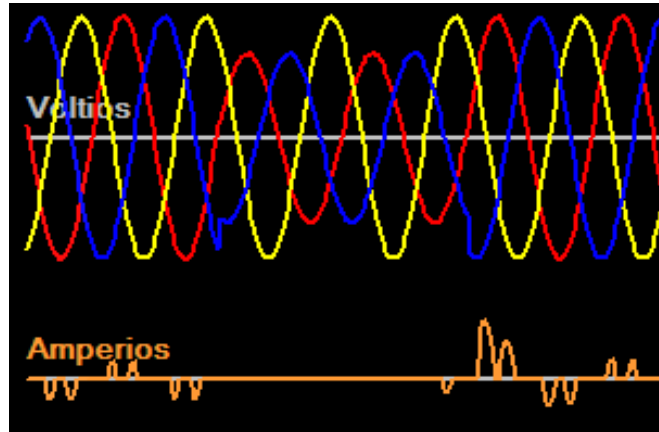


Ilustración 4-9.- Hueco de tensión bifásico en una red trifásica. Fuente: Propia

#### 4.4.3. Trifásico

Estamos ante uno de los defectos menos frecuentes, pero que mayores consecuencias presenta en los equipos cuando sucede. Para que ocurra, tiene que existir contacto entre las tres fases o bien mediante una impedancia con un valor casi nulo. En este caso las corrientes de cortocircuito que circulan por las 3 fases son las mismas.

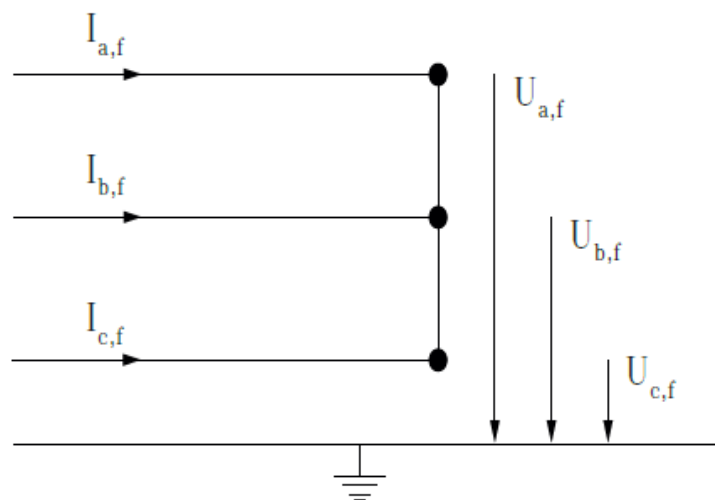


Ilustración 4-10.- Defecto entre tres fases. Fuente [14]

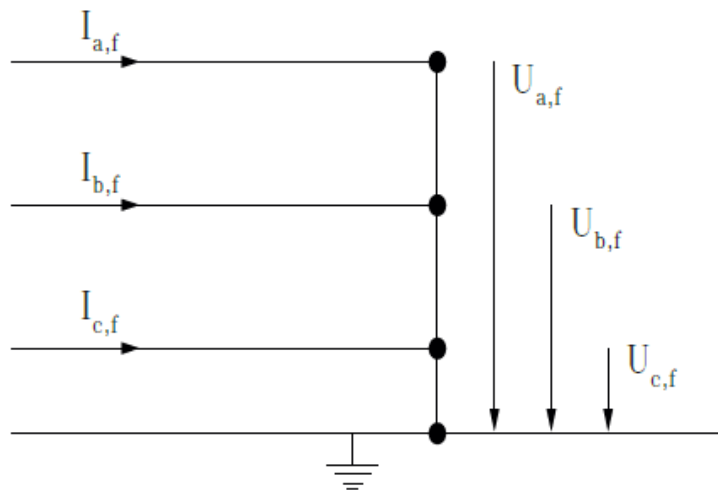


Ilustración 4-11.- Falta entre tres fases y tierra. Fuente [14]

De la misma forma que para los dos casos anteriores, estudiaremos el defecto para un hueco de tensión en cada una de las tres fases con una profundidad del (70%) y con una duración de (2 ciclos – 40 ms).

Suele dar lugar ya no solo a funcionamientos extraños y defectuosos, sino que además tienen lugar paradas de equipos a pesar de su equipamiento para mitigar huecos de tensión ante la gran pérdida de potencia que pueden llegar a sufrir.

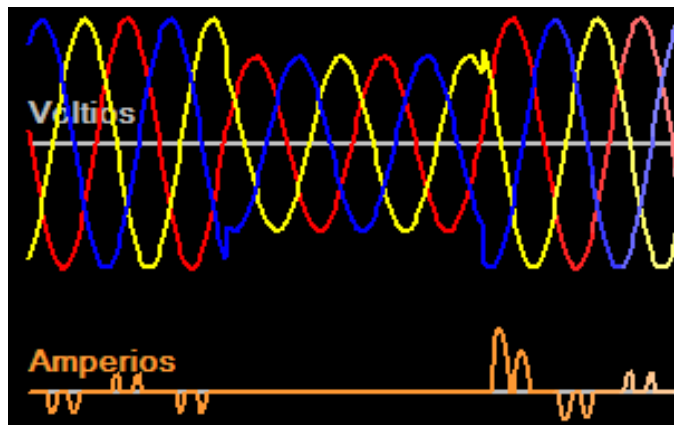


Ilustración 4-12.- Hueco de tensión trifásico en una red trifásica. Fuente: Propia

#### 4.5. Huecos de tensión en serie

Del análisis de los huecos de tensión se deduce que son aleatorios, ya que no es posible predecir su aparición, lo que no impide que su distribución a lo largo del año sea mayor en determinadas épocas del año, como por ejemplo, durante periodos de clima adverso.

Durante una tormenta podrán producirse dos o más huecos de tensión en un corto periodo de tiempo. En la ilustración 4.13 se muestra dos huecos de tensión que tienen lugar de forma consecutiva [14]. Como podemos observar, los huecos son diferentes ya que en el primero el hueco tiene una mayor duración, aunque la profundidad del primero sea menor que la del segundo.

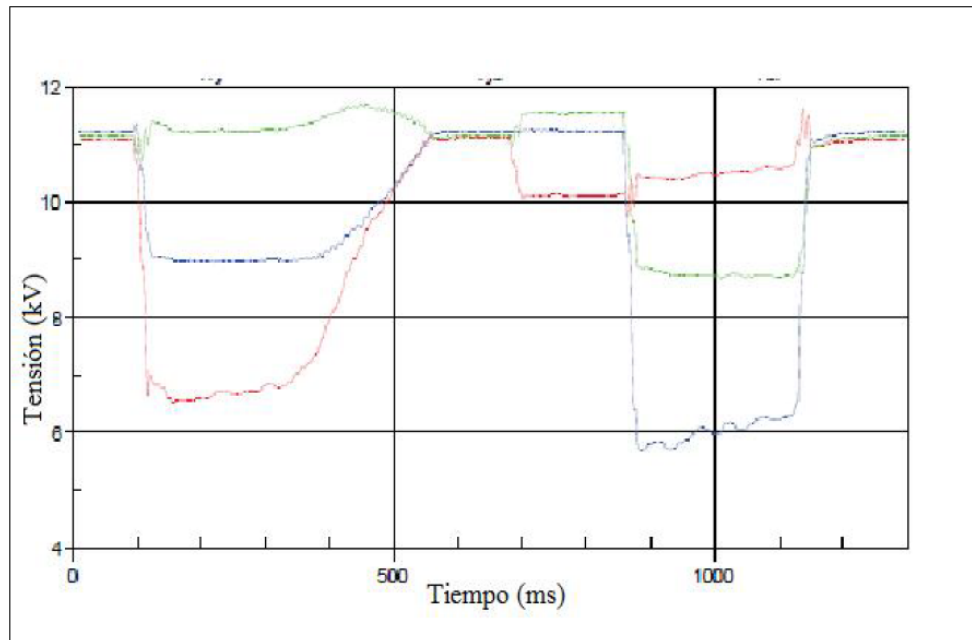


Ilustración 4-13.- Tensión eficaz en huecos de tensión en serie. Fuente: [14]

Normalmente el impacto que tiene un hueco en serie es mucho más grave que la de efectos que ocurren por separado. En ocasiones, un equipo puede soportar un determinado número de tensiones en diferentes momentos de funcionamiento y fallar cuando tiene lugar un segundo hueco de tensión de la misma profundidad y duración que el primero en un breve periodo de tiempo.

Sin embargo, también puede darse el caso de que un hueco de tensión tenga la suficiente profundidad o duración para afectar al equipo y que el siguiente no cause ninguna avería ya que las protecciones han actuado.

Existen diferentes modos de atacar el problema de los huecos de tensión en serie, pero como norma general se opta por aplicar un sistema como precaución ante la perturbación más grave.

#### 4.6. Prevención y mitigación

El objetivo al hacer frente a cualquier tipo de perturbación, siempre es buscar el método de eliminarlo y que no afecte a nuestra instalación. Sin embargo, en la realidad no siempre se logra esto, por lo que tenemos que recurrir a técnicas para reducir los posibles problemas que nos pueda ocasionar.

Debido a que estamos ante un fenómeno que en un gran número de ocasiones se presenta de forma fortuita, trataremos de mitigarlo empleando una serie de pautas:

- Llevar a cabo los mantenimientos que requieren los dispositivos conectados a la red, en especial aquellos cuya finalidad es proteger, en tiempo y forma adecuados, de tal forma que nos aseguremos que ante esta situación están en condiciones de actuar ante un defecto, y que podrán soportarlo.
- Realizar análisis para predecir la aparición de este tipo de fallos, y así poder actuar previamente. A partir de este tipo de estudio también se puede llegar a la conclusión del origen, y así poder atacarlo (por ejemplo, cuando el origen es de tipo climático se puede optar por cambiar el tipo de línea, utilizando líneas subterráneas, todo ello previo estudio económico).

Según el tipo de instalación que vayamos a estudiar, las medidas que tomaremos serán diferentes. Si la instalación se va a conectar por primera vez a la red habrá que realizar un estudio previo para, en la medida de lo posible, evitar que existan perturbaciones en un futuro. El caso más complicado es cuando la instalación ya se encuentra en funcionamiento. En primer lugar hay que recopilar toda la información posible sobre lo que ha ocurrido, en especial el instante en el que ha ocurrido así como la repetitividad (en caso de que haya ocurrido en alguna ocasión anterior) y las consecuencias que ha generado. A partir de ahí, se llevarán a cabo las medidas que se estimen oportunas para evitar que vuelva a darse la perturbación.

En función de quién sea el responsable de actuar, bien si es la empresa encargada de suministrar el servicio o el propio usuario, las medidas a adoptar son distintas y poseen una incidencia diferente sobre el defecto.

La empresa suministradora suele optar por elevar la potencia de cortocircuito en el sitio en el cual ha ocurrido la falta, buscando con ello reducir el número de ciclos a los cuales afecta y su profundidad. En otras ocasiones también se recurre a transformadores independientes con el objetivo de separar el punto de conexión de la instalación del usuario de aquellas zonas en las cuales las perturbaciones ocurren de forma regular.

En lo que respecta a las medidas que puede adoptar el cliente, varían en función de la instalación que se trate, ya que cada una tiene sus particularidades. Normalmente, una de las primeras soluciones pasa por conmutar a un suministro alternativo, encontrándonos con la ventaja de encarar los cortes breves de larga duración.

# **5. SISTEMAS DE CORRECCIÓN DE PERTURBACIONES**





## 5. Sistemas de corrección de perturbaciones

Durante los últimos capítulos hemos analizado las distintas alteraciones que puede sufrir la onda de tensión prestando especial atención a los fenómenos que los provocan así como las medidas de prevención y corrección que se aplican en la actualidad.

Dado la importancia que cobran los dispositivos utilizados con esta finalidad, tanto en el momento del diseño de la instalación como una vez en funcionamiento, analizaremos en particular dichos elementos y como pueden corregir, incluso de forma simultánea, los distintos tipos de perturbaciones.

Cuando nos referimos a corrección de perturbaciones entendemos cualquier tipo de medida que tomemos, bien en la propia instalación como en los receptores conectados a ella, para corregir un incorrecto funcionamiento y lograr así una satisfacción por parte del usuario.

Esta corrección se realiza principalmente atacando la emisión de perturbaciones o bien inmunizándose frente a éstas. En el primer caso lo que se busca es que los equipos emitan el menor número de perturbaciones posibles, siempre dentro de un umbral por debajo del cual no produzcan ningún efecto sobre el propio equipo. Por otro lado, para lograr una correcta inmunización lo que se busca es que, independientemente del tipo y duración de la alteración, el equipo sea capaz de hacerle frente logrando que el funcionamiento del equipo siga siendo normal.

A diferencia de otros elementos de protección de instalaciones como interruptores magnetotérmicos o diferenciales, que se colocan en serie, los limitadores de sobretensiones deben colocarse en paralelo para un funcionamiento correcto del sistema de protección. El comportamiento de un limitador de sobretensiones sigue un funcionamiento simple: su resistencia depende de la tensión en sus bornes.

Como veremos más adelante, para simplificar su clasificación, dividiremos en dos grupos los dispositivos:

- Específicos.
- Universales.

### 5.1. Dispositivos de corrección específicos

Realizaremos el estudio en función del tipo de perturbación al que corrijan para facilitar la comprensión de cada uno.

#### 5.1.1. Variaciones de tensión lentas

Tal y como hemos mencionado en capítulos anteriores, el principal parámetro que se ve influenciado por este tipo de defectos es la amplitud de la onda. Es por ello que las empresas encargadas de la distribución cuentan con sistemas de regulación de tensión. Así los equipos que se instalan podrán trabajar en condiciones normales con pequeñas variaciones siempre que se encuentren dentro de los márgenes de tolerancia fijados previamente por el distribuidor.

Sin embargo, hay ocasiones en las cuales no logramos que los equipos trabajen en el rango deseado, por lo cual tenemos que situar antes de la entrada de alimentación elementos que sean capaces de corregir las desviaciones que se puedan originar. Es lo que conocemos como correctores inmunizadores. Existen varios, pero vamos a centrarnos en dos:

- Reguladores de tensión: Lo que perseguimos con este tipo de dispositivos es mantener un nivel estable de tensión, y si no se lograra completamente, al menos reducir la variación que se pueda generar en el valor eficaz de la tensión del receptor.

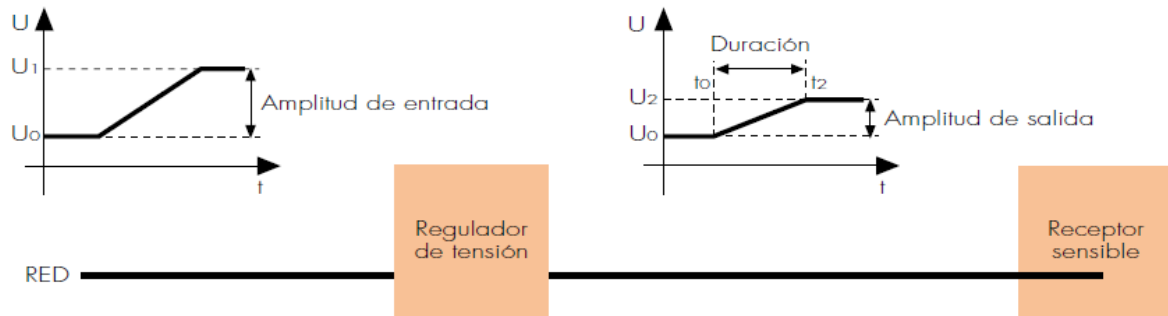


Ilustración 5-1.- Esquema regulador de tensión. Fuente: [3]

Como podemos observar en la ilustración, lo que hace el regulador es reducir la variación hasta conseguir que no afecte negativamente al equipo. Para ello se tiene que dar la siguiente condición:

$$U_2 - U_0 < U_1 - U_0 \quad \text{Ecuación 5.1}$$

En la actualidad, la gran mayoría de las instalaciones, tanto de corriente continua como alterna, cuentan con un regulador de tensión a la entrada de alimentación. Estos se colocarán en función de los parámetros que se utilizan para definirlos: la potencia máxima que puede consumir el equipo al cual se conecte el regulador y la precisión que se pretende alcanzar con él. El margen que logra este tipo de equipos oscila entre el 3% y el 7%, consiguiendo así un funcionamiento óptimo de los equipos.

Los reguladores cuentan con distintas tecnologías que van desde reguladores electrónicos, mecánicos o incluso electromecánicos en función del uso que se le pretenda dar, lo cual modifica la duración mínima de la variación. Entre los más utilizados destacan los tiristores y diodos, en especial, por su sencillez y su facilidad de uso, el regulador Zener que cuenta únicamente con una resistencia en paralelo y un diodo Zener.

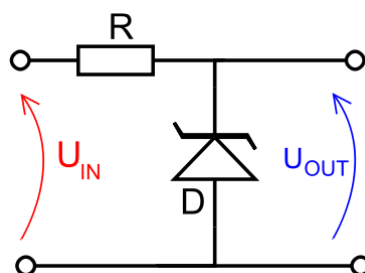
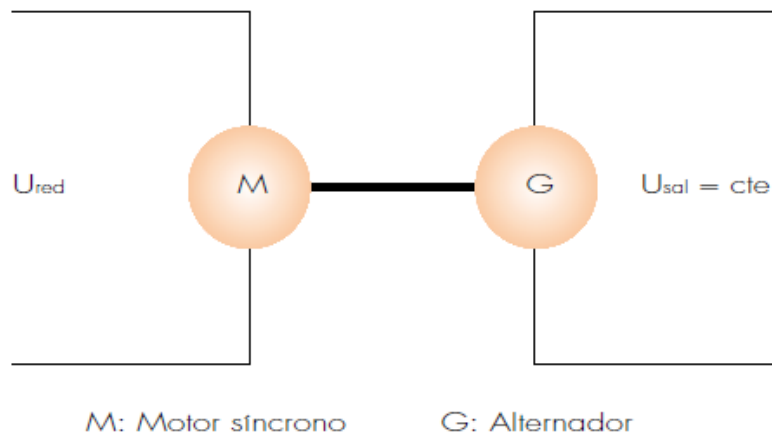


Ilustración 5-2.- Esquema regulador Zener. Fuente: [13]

- Conjunto motor-generador: La finalidad de este dispositivo es idéntica a la del regulador de tensión, ya que también actúa sobre el valor eficaz de tensión, pero en esta ocasión se utilizará un generador que mantendrá constante su tensión, lo cual nos permite en cierta forma aislar nuestra instalación, evitando así las variaciones que pueda sufrir la red.

La conexión del motor asíncrono, cuyo par y velocidad de giro permanecen constantes en función de la corriente absorbida, con el generador nos permite regular de una forma eficaz la tensión de salida.



*Ilustración 5-3.- Esquema de un motor-generador. Fuente [3]*

### 5.1.2. Fluctuaciones de tensión

Como venimos mencionando durante los capítulos previos, las fluctuaciones de tensión afectan principalmente al parámetro de la amplitud de la onda en un sistema trifásico y son producidos por los equipos finales. Para garantizar la CEM (compatibilidad electromagnética) la conexión de los dispositivos la realizaremos en el punto más adecuado de la red de distribución.

Para conseguir reducir este tipo de perturbación los equipos cuentan con elementos encargados de ello. La principal problemática que nos encontramos es que suelen ser específicos para cada equipo, lo que provoca que sea difícil extender y estandarizar la mayoría de avances. Los más comunes y que tienen mayor utilidad por su polivalencia son los compensadores estáticos, entre los cuales destacan:

- Reactancias controladas: Se utilizan para reducir las variaciones de potencia demandada asociada a variaciones de su componente reactiva ( $\Delta Q$ ). La forma más común en la que nos las encontramos es en hornos de arco. Su conexión se realiza en serie con reactancias inductivas en paralelo para poder controlar la potencia reactiva absorbida y así lograr, desde el punto de vista de la red, variaciones de que podemos considerar como nulas (ecuación 5.2), lo que permite mayor uniformidad en la potencia demandada, reduciendo directamente las fluctuaciones de tensión.

$$\Delta Q + \Delta Q' \approx 0$$

Ecuación 5.2

- Estabilizadores magnéticos: La compensación de los incrementos de potencia reactiva se realiza mediante la conexión de un transformador de elevada reactancia en paralelo con la carga. El secundario de transformador es cortocircuitado en determinados instantes de tiempo.

### 5.1.3. Impulsos de tensión

Estamos ante otra de las perturbaciones que afectan a la calidad de una onda, más concretamente a la amplitud de la onda como hemos visto previamente. Generalmente, ocurre entre los conductores de la alimentación y la tierra.

El elemento más común para corregirlo es el supresor. Se conecta en paralelo con el dispositivo receptor en la entrada de alimentación de este último. En lo que respecta a los tipos de supresores realizaremos un breve análisis de los más comunes en la actualidad.

- Varistor: Los varistores son resistencias no lineales cuyo valor desciende con la tensión en sus extremos. Está formado por semiconductores cuya principal característica es que la relación tensión-corriente no es lineal. Consta de tres parámetros de control que son el tiempo de respuesta ( $\eta_s$ ), la tensión nominal (V) y los picos de corriente admisibles (kA).
- Descargador de gas: constan de un tubo de cerámica o cristal lleno de gas noble (argón, neón...) a una presión determinada. Generalmente se destinan a proteger equipos de alta frecuencia. Su modo de actuar frente al impulso es derivarlo a tierra.
- Diodo Zener: Otro uso del diodo Zener, aparte de regular variaciones de tensión lentas se encuentra también en controlar los impulsos de tensión, aunque no sea su mejor modo de funcionamiento ya que su respuesta es de peor calidad que la de los dos dispositivos anteriores. Es un dispositivo semiconductor polarizado con tensión inversa. Su uso exclusivo para corriente continua.

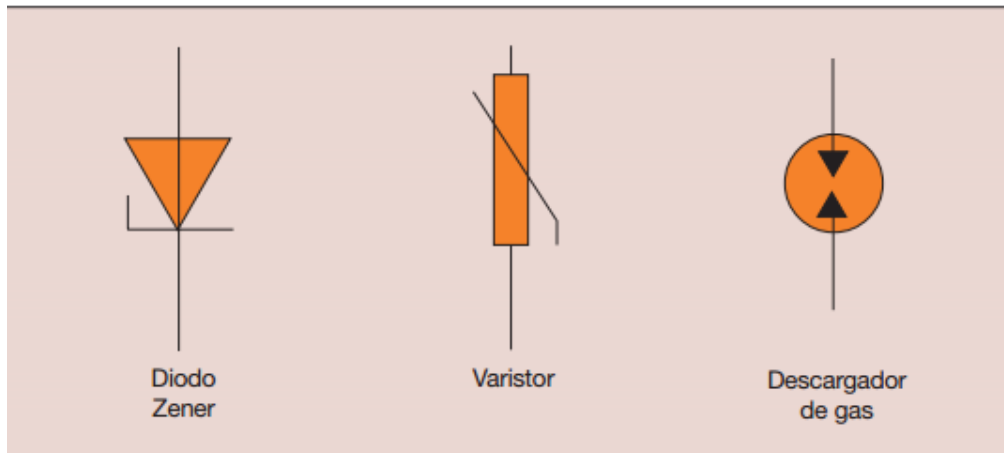


Ilustración 5-4.- Representación gráfica de un diodo Zener, varistor y descargador de gas. Fuente: [16]

#### 5.1.4. Distorsión armónica

Al referirnos a distorsión armónica lo hacemos a aquella perturbación que afecta a la forma de la onda de un sistema trifásico. Los principales causantes de este fenómeno son los receptores en los cuales la relación entre la intensidad y la tensión no es lineal. Para evitar correr estos riesgos, las propias compañías eléctricas se encargan de hacer la conexión con el usuario en el punto más adecuado buscando reducir así la posibilidad de aparición. Aun así, los propios equipos cuentan con dispositivos encargados de corregir y reducir los efectos de la distorsión armónica, entre los que destacan:

- Filtros pasivos: Se trata de convertir en lineal la característica no lineal del receptor. Para ello, se le considera, desde la red de alimentación, como un conjunto formado por el receptor y el filtro pasivo, conectados en paralelo.

Según su respuesta en frecuencia, los filtros se pueden clasificar básicamente en cuatro categorías diferentes:

- a) Filtro pasa bajos: Son aquellos que introducen muy poca atenuación a las frecuencias que son menores que la frecuencia de corte. Las frecuencias que son mayores que la de corte son atenuadas fuertemente.
- b) Filtro pasa altos: Este tipo de filtro atenúa levemente las frecuencias que son mayores que la frecuencia de corte e introducen mucha atenuación a las que son menores que dicha frecuencia.
- c) Filtro pasa banda: En este filtro existen dos frecuencias de corte, una inferior y otra superior. Este filtro sólo atenúa grandemente las señales cuya frecuencia sea menor que la frecuencia de corte inferior o aquellas de frecuencia superior a la frecuencia de corte superior. Por tanto, sólo permiten el paso de un rango o banda de frecuencias sin atenuar.
- d) Filtro elimina banda: Este filtro elimina en su salida todas las señales que tengan una frecuencia comprendida entre una frecuencia de corte inferior y otra de corte superior. Por tanto, estos filtros eliminan una banda completa de frecuencias de las introducidas en su entrada.

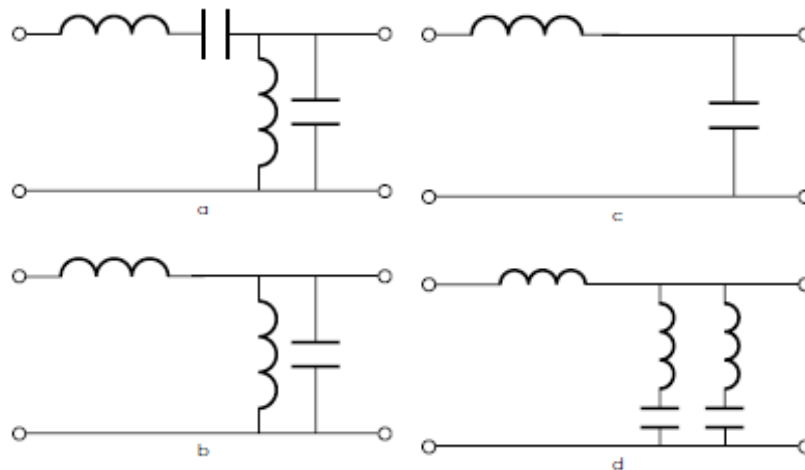


Ilustración 5-5.- Combinaciones de filtros pasivos. Fuente [16]

## 5.2. Sistemas de corrección universales

Nos referimos de esta forma a aquellos correctores de red que utilizan componentes electrónicos de potencia y son capaces de reducir un número importante de todas las perturbaciones de las que venimos hablando en capítulos anteriores. Los que tienen un uso más común son los sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI).

### 5.2.1. Sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI)

Es un dispositivo que gracias a sus baterías u otros elementos almacenadores de energía, puede proporcionar energía eléctrica por un tiempo limitado y durante un apagón eléctrico a todos los dispositivos que tenga conectados. Otras de las funciones que se pueden adicionar a estos equipos es la de mejorar la calidad de la energía eléctrica que llega a las cargas, filtrando subidas y bajadas de tensión y eliminando armónicos de la red en el caso de usar corriente alterna.

Los SAI dan energía eléctrica a equipos llamados cargas críticas, como pueden ser aparatos médicos, industriales o informáticos que, como se ha mencionado anteriormente, requieren tener siempre alimentación y que ésta sea de calidad, debido a la necesidad de estar en todo momento operativos y sin fallos en un tiempo que abarca desde los diez minutos hasta incluso varias horas.

Generalmente se dividen en dos tipos:

- SAI en línea: En él, la carga es alimentada por la línea rectificador-inversor y la carga de la batería se mantiene por la acción del primero. Cuenta con un conmutador que, en caso de fallo del inversor, conecta la carga a dicha red.
- SAI fuera de línea o en espera: La red alimenta normalmente la carga, y cuando en ésta se produce cualquier tipo de fallo, pasa a ser alimentada por el inversor. La diferencia con la anterior es que durante el funcionamiento normal de la red, la carga se encuentra alimentada por ésta, lo que hace que la calidad que reciba sea la que posee la red y no la del SAI.

# **6. ESTUDIO DE HUECOS DE TENSIÓN**



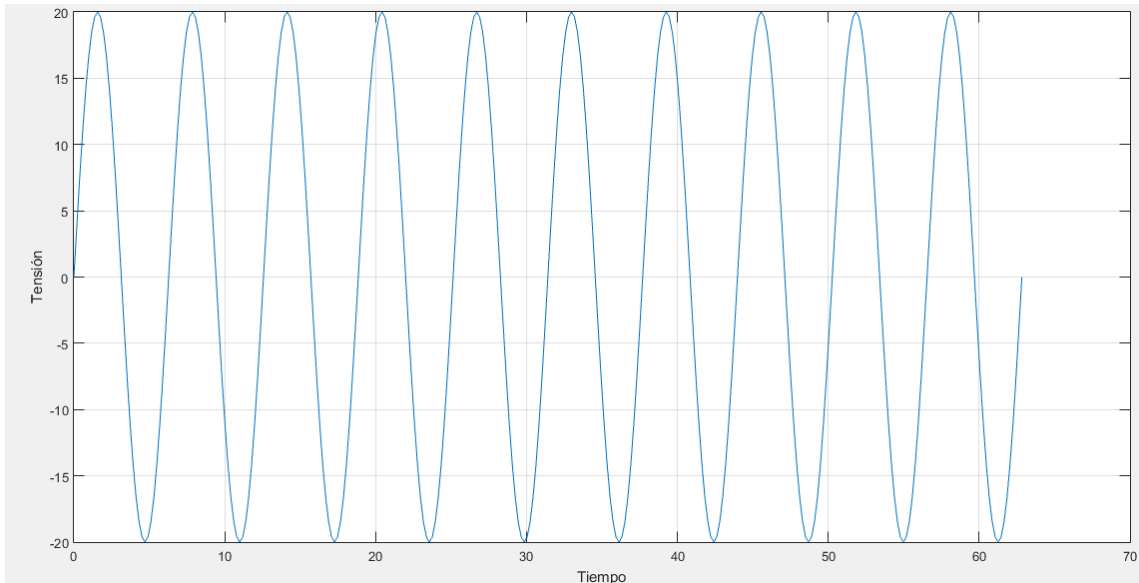


## 6. Estudio de huecos de tensión

### 6.1. Creación de ondas

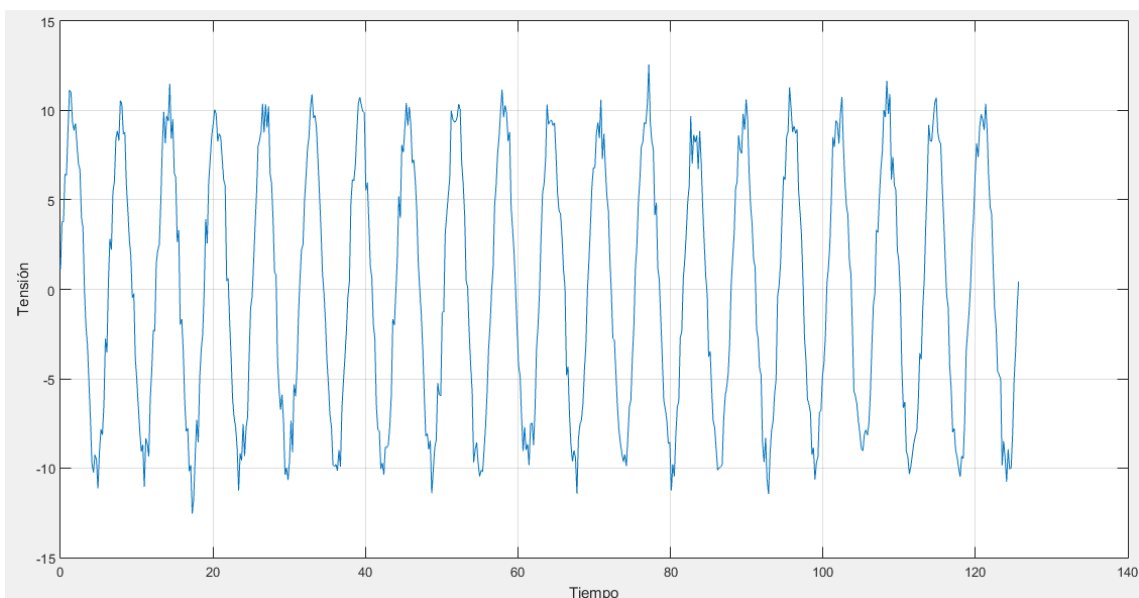
Para llevar a cabo el posterior estudio de los huecos de tensión, hemos realizado con Matlab el proceso completo, desde la creación de la onda hasta la posterior búsqueda de perturbaciones introducidas de forma aleatoria.

En primer lugar creamos una onda sencilla como primer paso, simulando con ello el comportamiento de una onda monofásica.



*Ilustración 6-1.- Onda monofásica. Fuente: Propia*

Posteriormente, introducimos en la onda ruido, para asemejarla con la realidad.



*Ilustración 6-2.- Onda monofásica con ruido. Fuente: Propia*

Una vez tenemos la onda similar a la realidad, comenzamos a introducir los huecos de forma aleatoria.

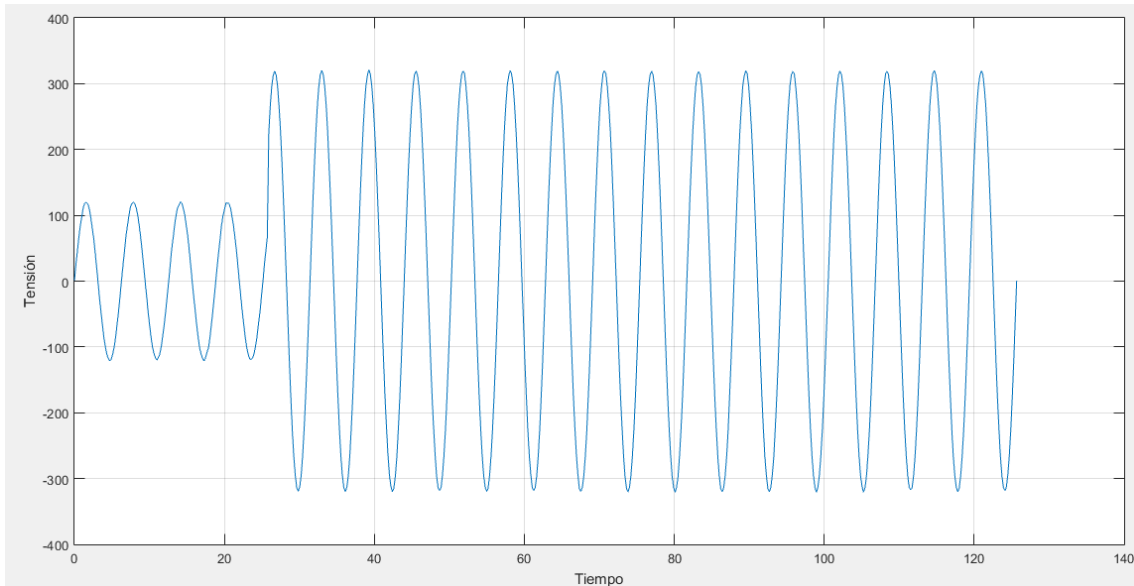


Ilustración 6-3.- Onda monofásica con huecos de tensión. Fuente: Propia

En el siguiente ejemplo simulamos una onda monofásica de 20 ciclos, en la cual se introduce un hueco de tensión que dura 4 ciclos de forma aleatoria en una de las fases, con una tolerancia de detección del 90%.

Así, nos detecta que el defecto se encuentra en los ciclos que van del 3 al 7 tal y como se muestra en la ilustración 6-4.

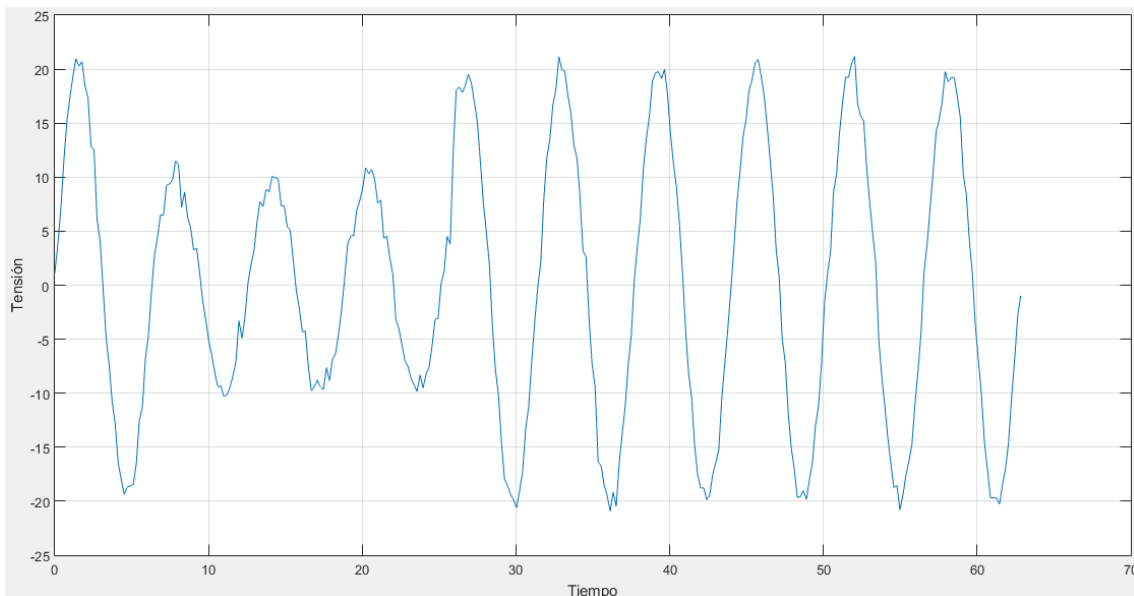


Ilustración 6-4.-Onda monofásica con hueco de tensión aleatorio. Fuente: Propia

En el siguiente ejemplo simulamos una onda trifásica de 20 ciclos, en la cual se introduce un hueco de tensión que dura 5 ciclos de forma aleatoria en una de las fases, con una tolerancia de detección del 90%.

DETECCIÓN DE HUECOS DE TENSIÓN EN UNA INSTALACIÓN HOSPITALARIA  
EN MATLAB.

Autor: Adrián Reyes Cristín.  
Junio 2017

INTRODUCCIÓN DE LOS VALORES NECESARIOS PARA LA EJECUCIÓN DEL PROGRAMA.

Inserte el número de ciclos de la onda: 20

Inserte la amplitud : 320

Inserte la fase (en grados): 0

Inserte el número de ciclos de la onda ruido: 5

Inserte la amplitud: 100

Inserte la fase (en grados): 0

Inserte la tolerancia que quiere admitir en la búsqueda de perturbaciones 90

Así, nos detecta que el defecto se encuentra en los ciclos que van del 3 al 7.

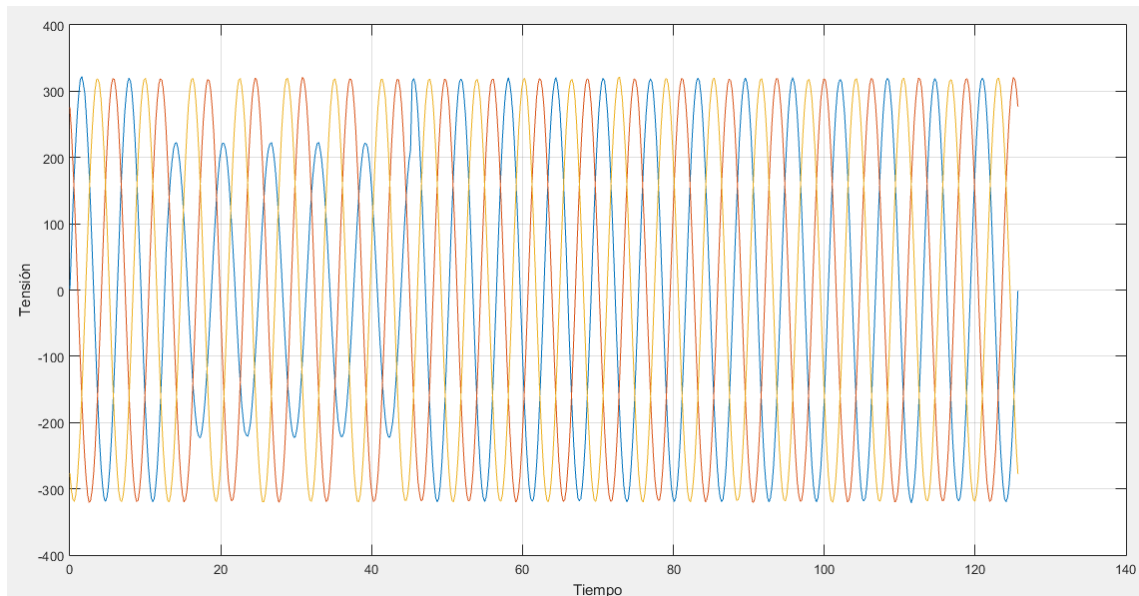


Ilustración 6-5.- Señal trifásica con huecos de tensión. Fuente: Propia

Una vez hemos creado las ondas de forma intencionada para conocer el funcionamiento de los huecos de tensión y cómo provocarlos, pasamos a trabajar con los datos reales.

Para realizar una búsqueda correcta de los diferentes eventos de tensión que pueda tener la señal real, hemos llevado a cabo el mismo método de detección que el descrito previamente.

Así, hemos almacenado la señal en intervalos de diez minutos, los cuales hemos ido analizando de la siguiente forma:

- En primer lugar, guardamos los máximos y los mínimos de cada ciclo.
- A continuación, comparamos los valores almacenados con un valor de referencia, al cual otorgamos un cierto margen de tolerancia. ( $\pm 10\%$ ). De esta forma entenderemos como normal todos aquellos valores que se encuentren próximos al valor de referencia.

- Posteriormente, obtenemos los valores que se encuentran fuera de rango, y por lo tanto suponen un tipo de evento de tensión que debemos tener en cuenta. Para su representación gráfica se ha decidido realizar el defecto junto con los cinco ciclos anteriores y posteriores, para una mejor visualización.
- Por último, tenemos que establecer el momento en cual ha sucedido, para lo cual analizamos el vector en el que hemos almacenado ese valor máximo para posteriormente hacer una conversión a la escala de tiempos.

De esta forma, hemos llevado a cabo el análisis de las señales reales recogidas en las diferentes salas de una instalación hospitalaria.

## 6.2. Resultados

Una vez hemos desarrollado el programa para la detección de huecos de tensión y hemos comprendido su comportamiento, así como la forma de detectarlos procedemos a analizar ondas reales. Para ello hemos recogido la señal eléctrica del hospital de Ávila durante 2 semanas en distintas estancias:

Tabla 6-1.- Ubicación de las tarjetas instaladas. Fuente: Propia

Ubicación	Circuito sobre el que se ha instalado
Resonancia magnética	Fuerza
Quirófanos (2º planta)	Instalación aislamiento IT
Sala de rayos X.	Fuerza
UCI	Instalación aislamiento IT
Ordenadores de administración	Fuerza

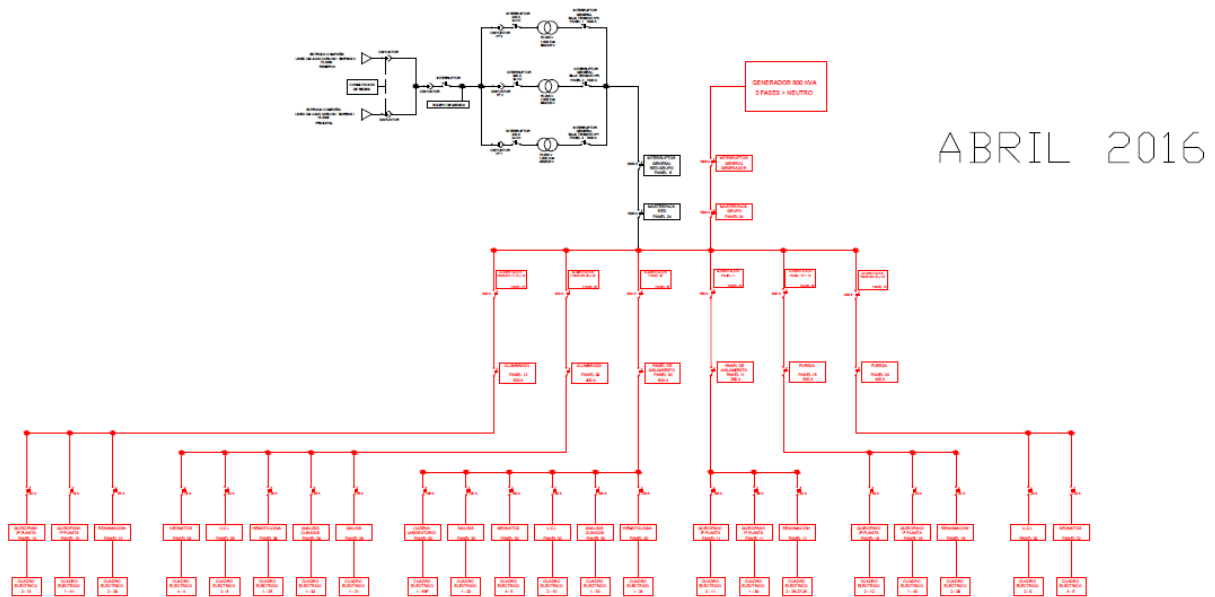


Ilustración 6-6.- Esquema eléctrico de las estancias en las que se han colocado las tarjetas. Fuente: Hospital de Ávila

Durante el análisis realizado, pudimos comprobar que el día 1 no hubo ningún evento relacionado con huecos de tensión o sobretensiones en ninguna de las salas, mientras que el día 2 sí encontramos una perturbación en la UCI. En este caso se trata de una caída de tensión con una duración de dos periodos tal y como se observa en la ilustración 6.2. Se dio en la fase 3, concretamente en la hora 6, minuto 5.

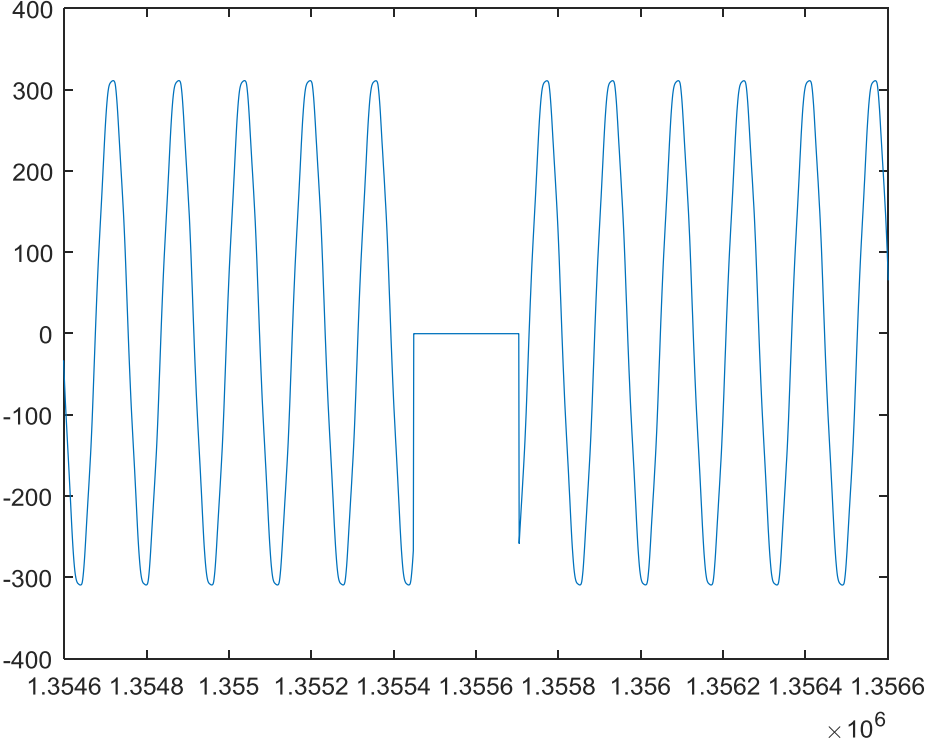


Ilustración 6-7.- Caída de tensión en la T4. Fuente: Propia

**Análisis semana 1**

Durante la semana 1 de abril, los equipos se instalaron en los siguientes puntos:

Tabla 6-2.- Ubicación de las tarjetas durante la semana 1. Fuente: Propia

Tarjeta	Cuadro	Circuito
T1	General, panel 32	Fuerza [PQUAQ_02-3000i]
T2	Secundario, panel 32	Planta 1 [PQUAQ_03-PSFLEX-S]
T3	Secundario, panel 35	Urgencias [PQUAQ_04-PSFLEX-B]
T4	Secundario panel 32	Oncología [PQUAQ_05-PSFLEX-B]

En los días 2, 3 y 4 no se presentan ninguna incidencia. Sin embargo, el día 1 se observan 2 eventos, uno relacionado con huecos de tensión que afecta a todas las tarjetas instaladas y otro con sobretensiones en la T1. El día 5 se observa una sobretensión en la todas las tarjetas. El día 6 se observa una sobretensión en la T1.

## Día 1

Existe un pequeño hueco de tensión en las cuatro tarjetas instaladas, concretamente en la hora 18 (19 para T2). Del posterior análisis comprobamos que no coinciden exactamente en la línea de tiempo, lo cual entendemos que se debe a que no se comenzó a medir de forma simultánea. Dicho fenómeno se observó en T1 y T4 en la fase 1 y para T2 y T3 en la fase 2.

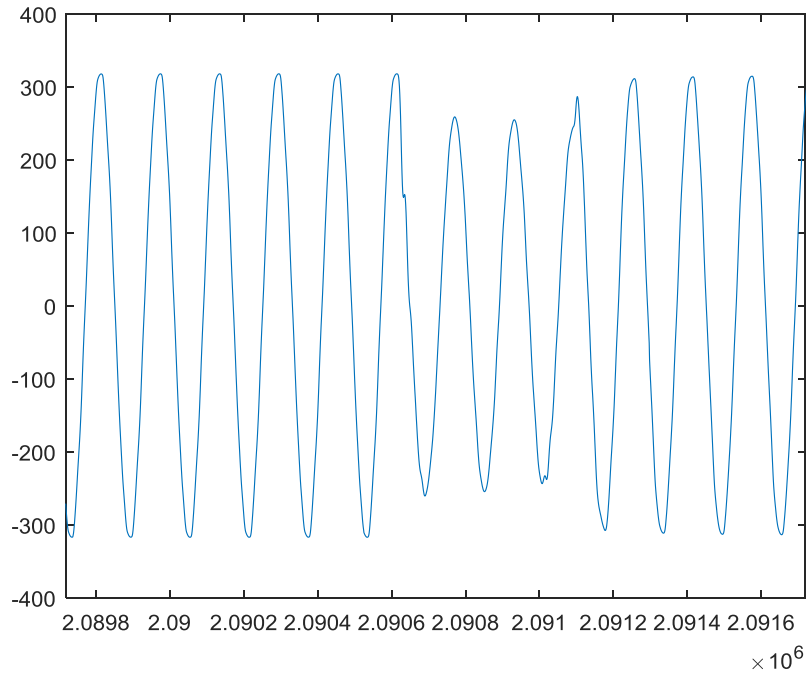


Ilustración 6-8.- Hueco de tensión en una fase en T1. Fuente: Propia

En la hora 12, minuto 2, tiene lugar en la T1 podemos observar una cero de tensión, ya que la tensión cae hasta un valor  $V_{max} = 0,24$  V durante 3 periodos. Este hecho tiene lugar en la fase 2.

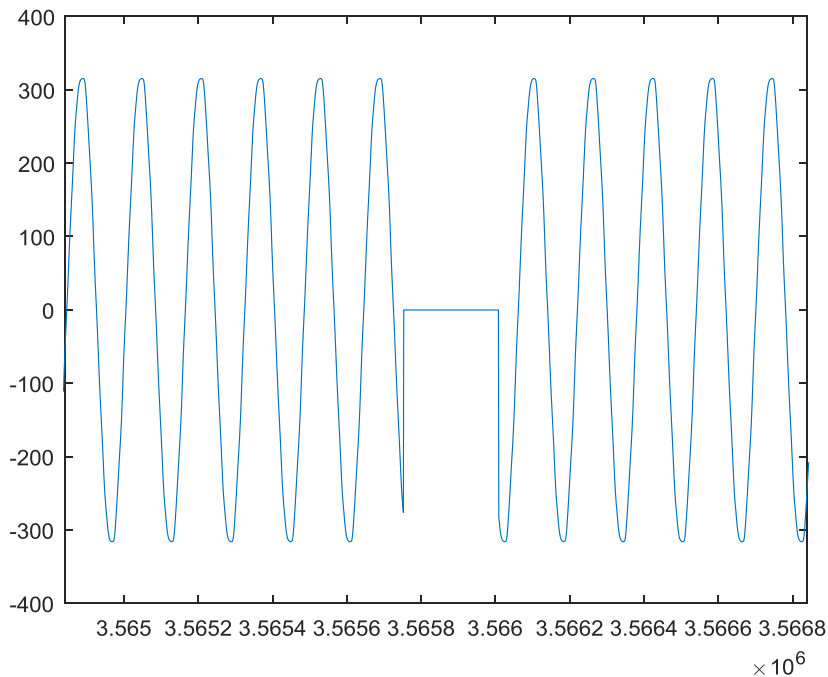


Ilustración 6-9.- Caída de tensión en T1. Fuente: Propia

Este mismo día en la hora 18, minuto 2, tiene lugar un hueco de tensión con una duración de 6 periodos en la fase 1 con los valores de tensión que se muestran en la tabla XX.

Tabla 6-3.- Valores de tensión registrados en T1. Fuente: Propia

Periodo	1	2	3	4	5	6
$V_{m\acute{a}x}$	260,607	258,881	254,568	254,869	243,681	286,569

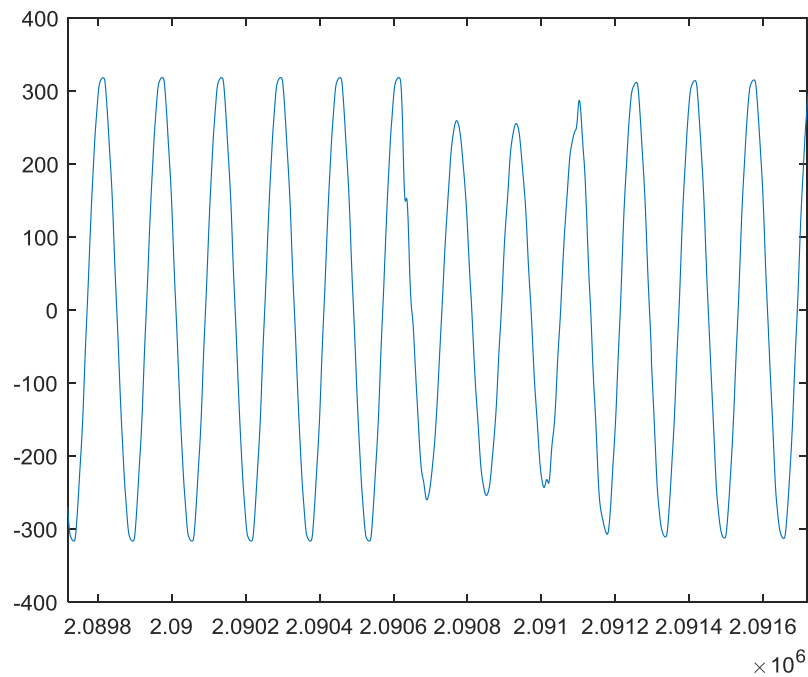


Ilustración 6-10.- Hueco de tensión en fase 1 registrada en T1. Fuente: Propia

Del análisis de la tarjeta 2 (T2), encontramos un pequeño hueco de tensión. Lo registramos en la hora 19, minuto 0. Tiene lugar en la fase 2 con una duración de 6 periodos.

Tabla 6-4.- Valores de tensión registrados en T2. Fuente: Propia

Periodo	1	2	3	4	5	6
$V_{m\acute{a}x}$	248,662	246,671	243,028	242,231	232,457	271,993

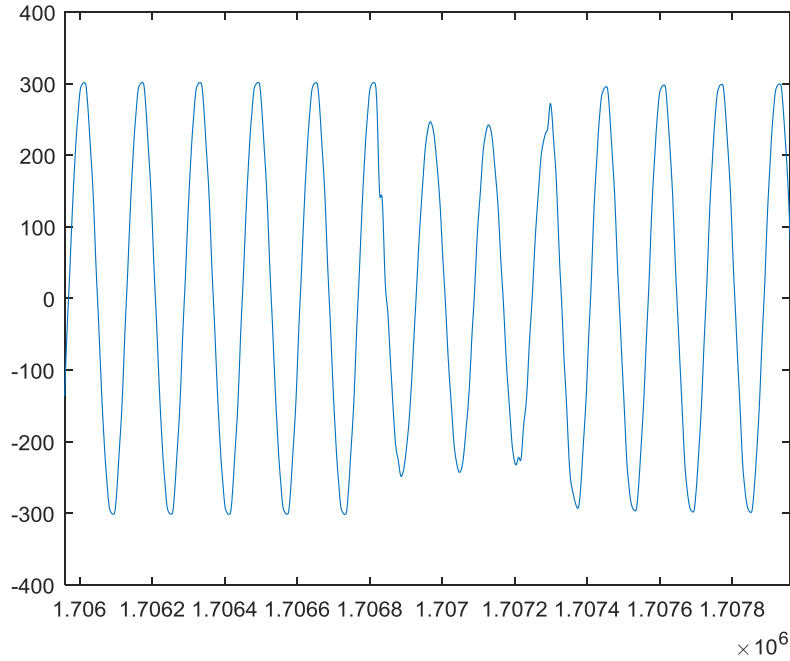


Ilustración 6-11.- Hueco de tensión en la fase 2 registrada en T2. Fuente: Propia

En la tarjeta 3 (T3), encontramos de nuevo un hueco de tensión. Éste tiene lugar en la hora 18, minuto 1. Ocurre en la fase 2 con una duración de 5 periodos. Los valores de tensión son los que se muestran en la tabla XX.

Tabla 6-5.- Valores de tensión registrados en T3. Fuente: Propia

Periodo	1	2	3	4	5
$V_{m\acute{a}x}$	273,774	270,111	267,343	265,947	256,246

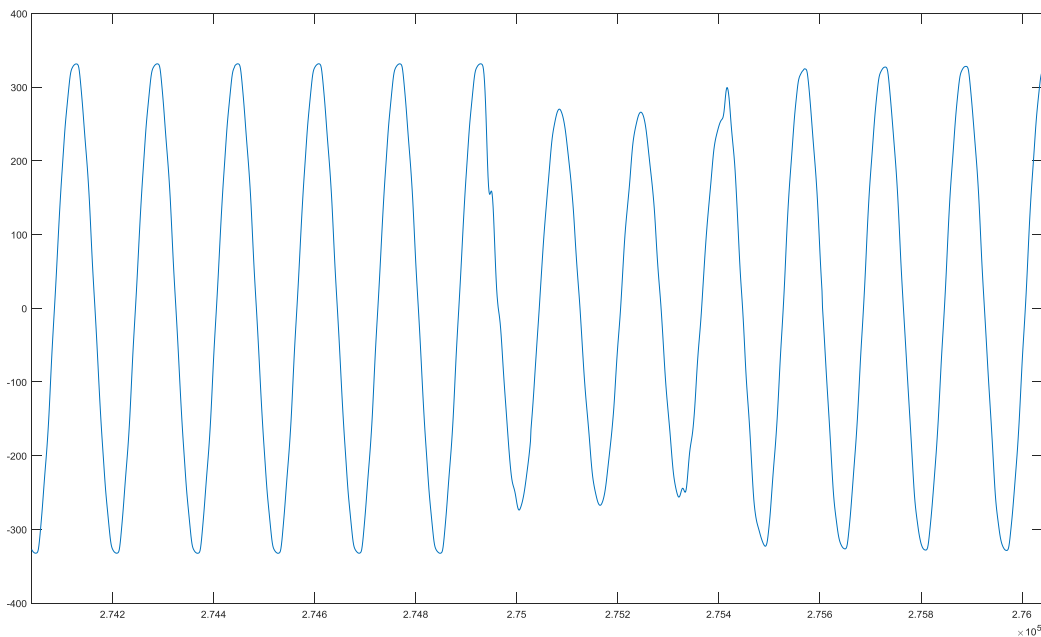


Ilustración 6-12.- Hueco de tensión en fase 2 registrada en T3. Fuente: Propia

En la tarjeta 4 (T4) observamos otro hueco de tensión. En esta ocasión en la hora 18, minuto 2. Afecta a la fase 2 con una duración de 5 periodos.



Tabla 6-6.- Valores de tensión registrados en T4. Fuente: Propia

Periodo	1	2	3	4	5
$V_{m\acute{a}x}$	274,351	271,480	268,237	267,273	256,645

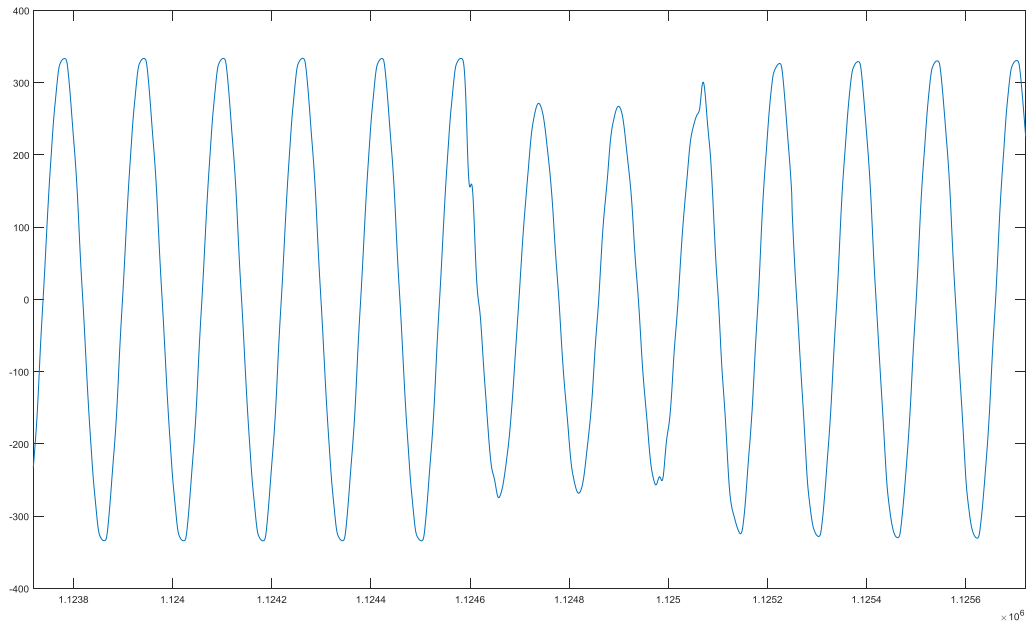


Ilustración 6-13.- Hueco de tensión en fase 2 registradas en T4. Fuente: Propia

Día 5

Un hecho similar pudimos observar al caso del día 1, esta vez en la hora 8 (9 para la T2) en las mismas fases que para el caso mencionado anteriormente. Presenta un valor de tensión máximo  $V_{m\acute{a}x} = 273,96V$ . Tiene lugar únicamente en un periodo, en el minuto 4.

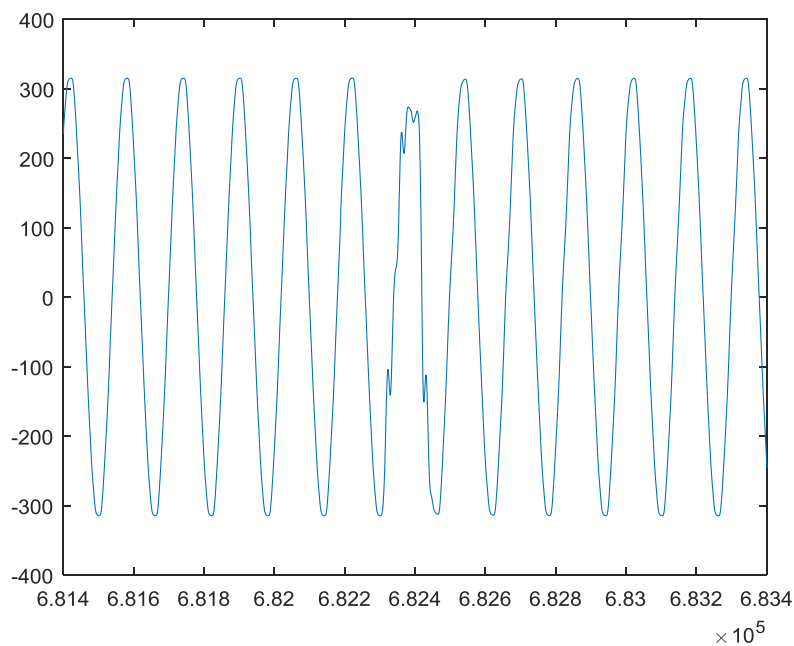


Ilustración 6-14.- Sobretensión en fase 1 registradas en T1. Fuente: Propia

La tarjeta 2 (T2) presenta un valor máximo  $V_{\text{máx}} = 260,825 \text{ V}$ .

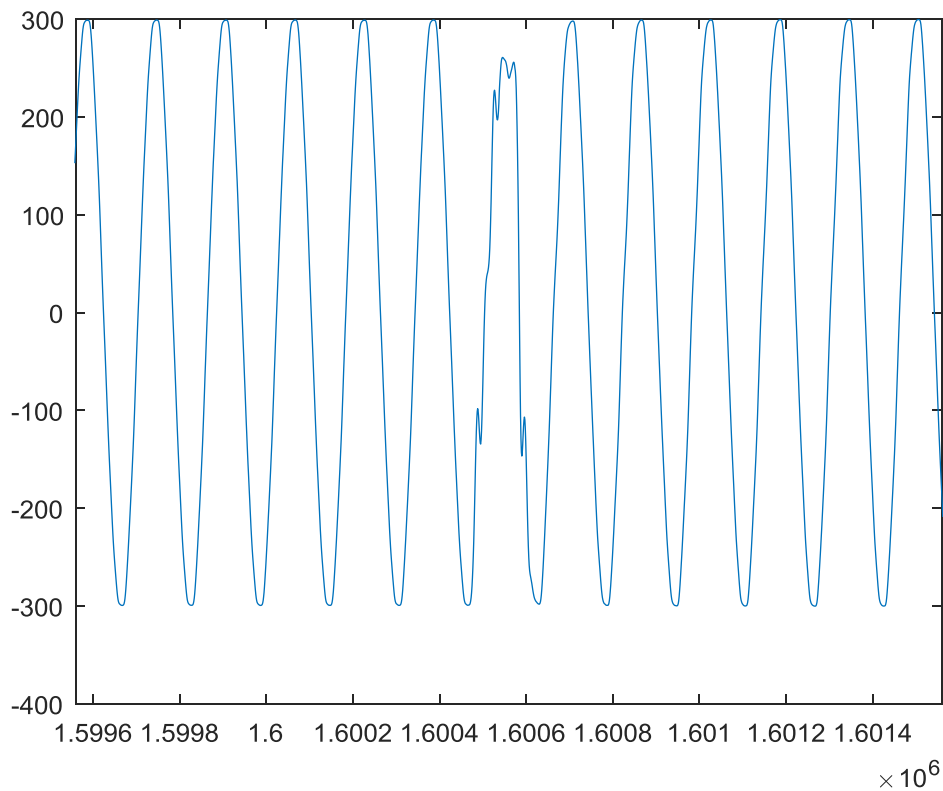


Ilustración 6-15.- Caída de tensión en fase 2 registrada en T2. Fuente: Propia

La tarjeta 3 (T3) presenta un valor máximo de tensión  $V_{\text{máx}} = 286,223 \text{ V}$ .

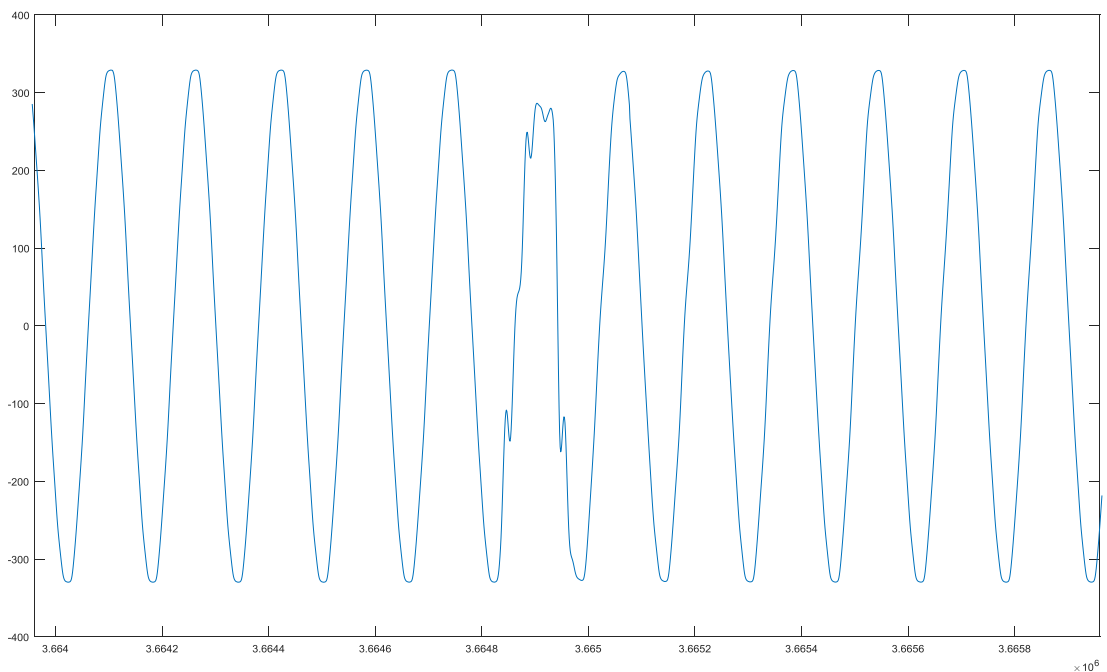


Ilustración 6-16.- Caída de tensión en fase 2 registrada en T3. Fuente: Propia

De análisis de la tarjeta 4 (T4), deducimos que existe una sobretensión en la hora 8, minuto 3. En este caso el valor de la tensión máxima es  $V_{\text{máx}} = 287,346 \text{ V}$ .

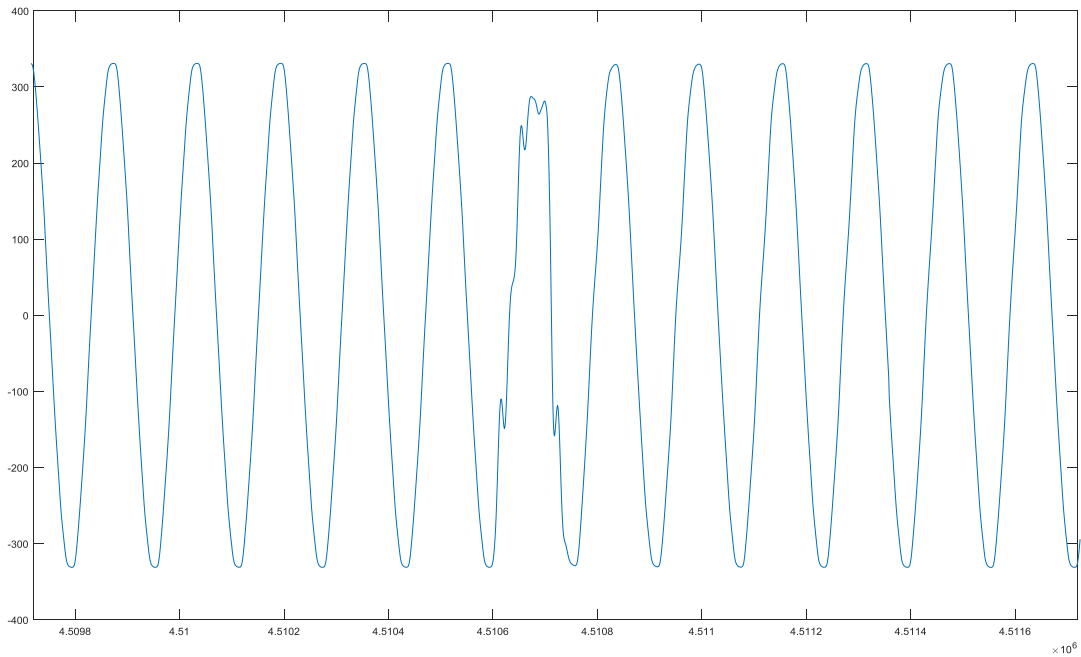


Ilustración 6-17.- Caída de tensión en fase 2 registrada en T4. Fuente: Propia

### Día 6

Analizando el día 6, concretamente la tarjeta 1 (T1), detectamos una importante caída de tensión concretamente en la hora 23, minuto 3. Tiene lugar en la fase 3 con una duración de 3 periodos, siendo notable durante los dos primeros periodos ya que alcanzó valores muy próximos al cero. El valor máximo de tensión durante esos instantes fue los de la tabla 6.7.

Tabla 6-7.- Perturbaciones registradas en T1

Periodo	1	2	3
$V_{m\acute{a}x}$	0,02	0,02	207,181

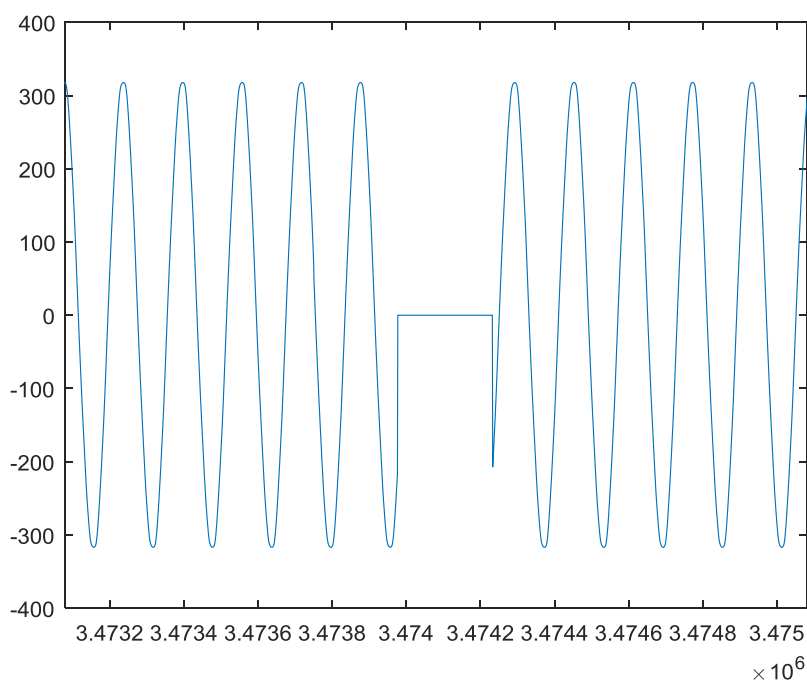


Ilustración 6-18.- Caída de tensión en fase 3 registradas en T1. Fuente: Propia

## Día 7

En el día 7, encontramos un hueco trifásico en las T2, T3 y T4, concretamente en la hora 10 para las T3 y T4, mientras que para la T2 es la hora 11.

Como podemos observar en la imagen XX correspondiente con hueco trifásico en la T2 en la hora 11 y minuto 1, con una profundidad importante en el caso de la tercera fase en el cual el valor de la tensión máxima se reduce por debajo de los 120V, no siendo tan apreciable en el caso de las otras fases con valores alrededor de los 275V, aunque si lo suficiente para considerarlo un hueco de tensión.

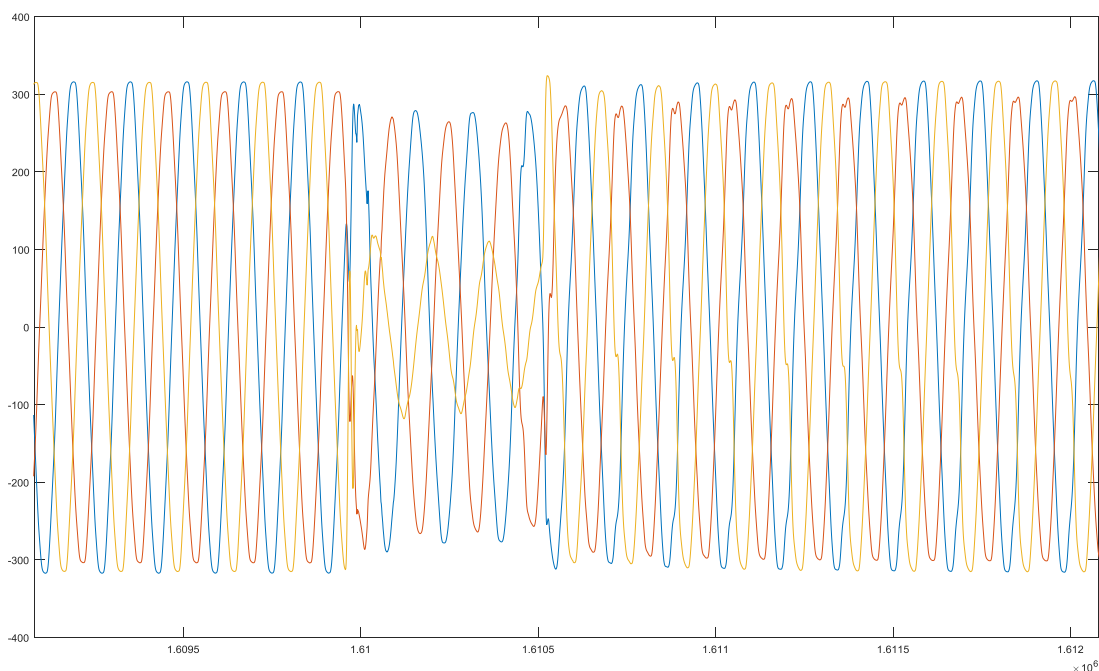


Ilustración 6-19.- Hueco de tensión trifásico registrado en T2. Fuente: Propia

Realizaremos el análisis individual de cada fase para comprender mejor lo que ocurre en cada caso.

En la fase 1, el hueco de tensión tiene una duración de 7 periodos, en los cuales los valores máximos que alcanza son:

Tabla 6-8.- Valores de tensión máxima registrados en T1

Periodo	1	2	3	4	5	6	7
$V_{\text{máx}}$	287,423	289,923	279,603	278,159	276,413	276,840	277,941

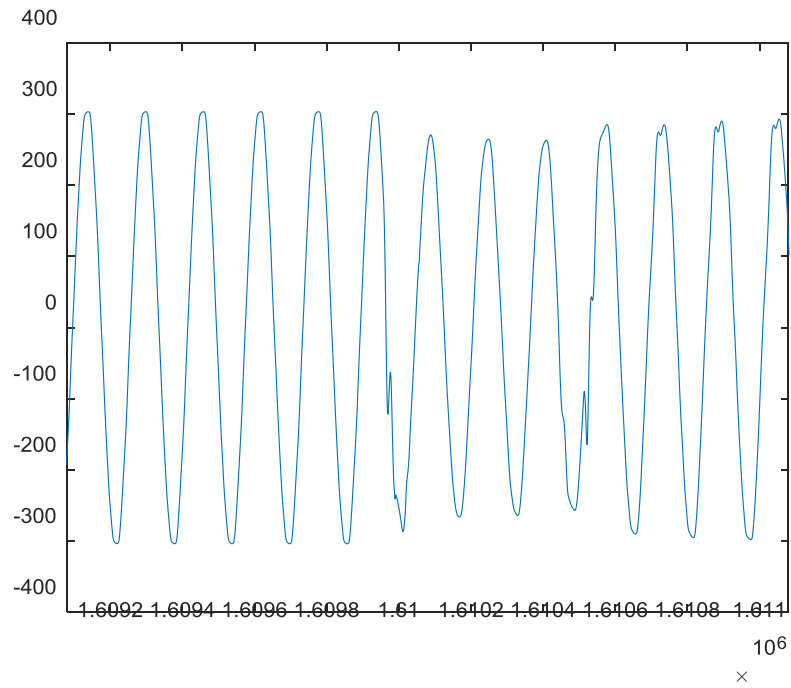


Ilustración 6-20.- Hueco de tensión en la fase 1 registrado en T1. Fuente: Propia

Para la fase 2 ocurre algo similar a la fase 1, pero en este caso varía la duración, la cual es de 11 periodos. Los valores obtenidos son bastantes similares a los de la primera fase.

Tabla 6-9.- Valores registrados en T2 (Fase 2). Fuente: Propia

Periodo	1	2	3	4	5	6
$V_{m\acute{a}x}$	286,525	270,8387	266,101	264,587	264,070	263,154
Periodo	7	8	9	10	11	
$V_{m\acute{a}x}$	267,550	285,132	290,129	284,813	290,049	

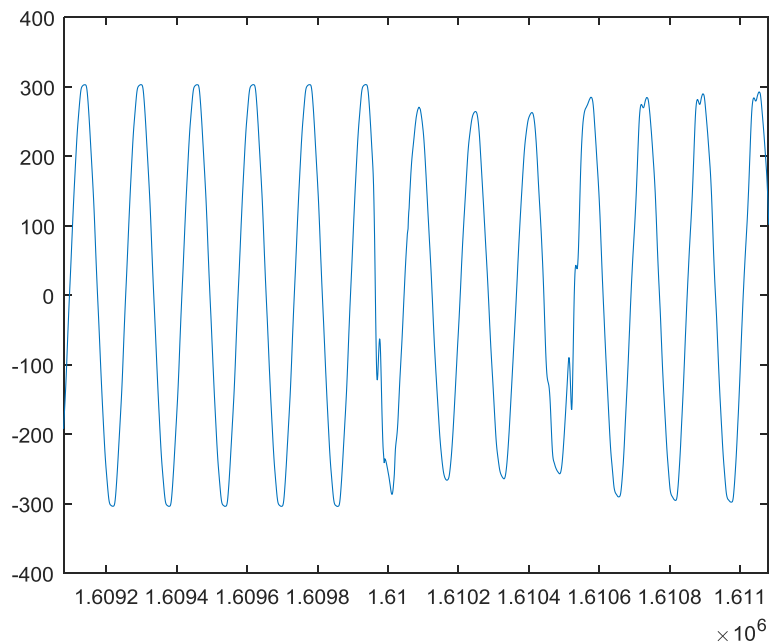


Ilustración 6-21.- Hueco de tensión en fase 2. Fuente: Propia

El caso que presenta unos resultados más visibles es el de la fase 3. En esta ocasión el hueco de tensión posee una profundidad mucho más evidente. A pesar de esto, la duración es menor que en las otras dos fases.

Tabla 6-10.- Valores registrados en la fase 3 de la T2

Periodo	1	2	3	4	5	6
$V_{m\acute{a}x}$	118,645	118,202	117,044	111,672	110,826	103,707

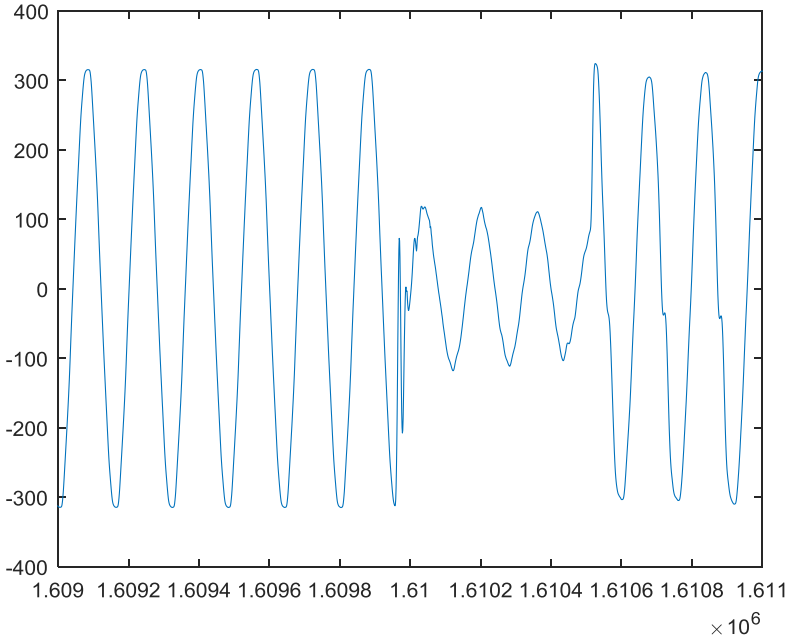


Ilustración 6-22.- Hueco de tensión en la fase 3. Fuente: Propia

En lo que respecta al caso de la T3, es igualmente un hueco trifásico en la hora 10 y minuto 3 pero en este caso mucho más importante para la fase 1, en la alcanza una profundidad que consideramos importante, aproximadamente del 62%.

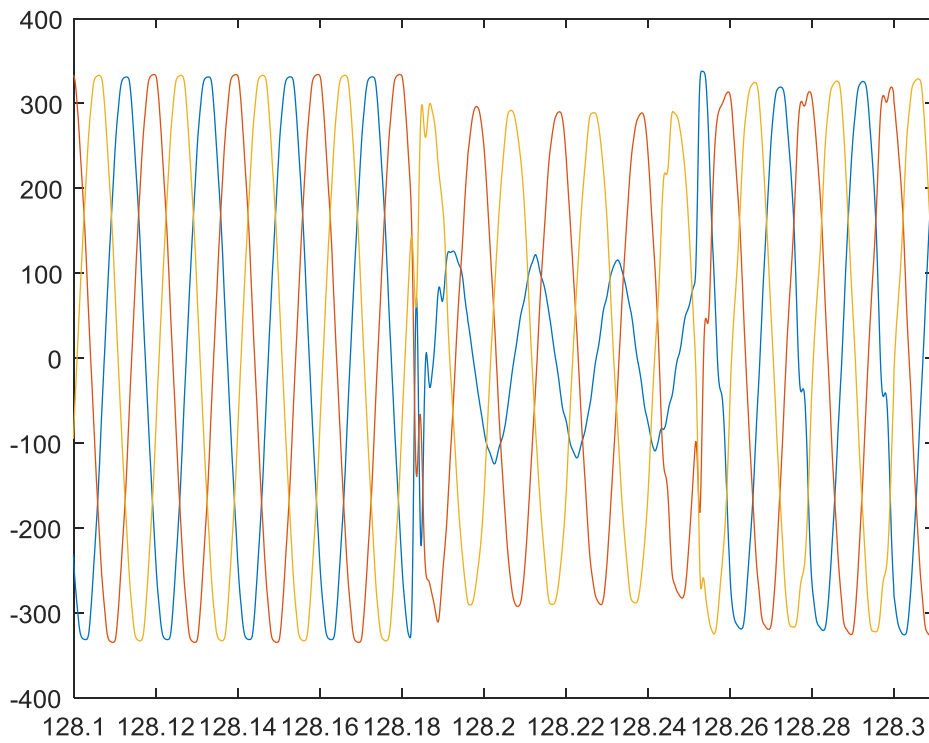


Ilustración 6-23.- Hueco de tensión trifásico registrado en T3. Fuente: Propia

Para la fase 1 encontramos una duración de 6 periodos con los siguientes valores de tensión máxima.

Tabla 6-11.- Valores registrados en fase 1. Fuente: Propia

Periodo	1	2	3	4	5	6
$V_{m\acute{a}x}$	126,149561	124,567879	121,985912	117,423933	115,47747	109,271945

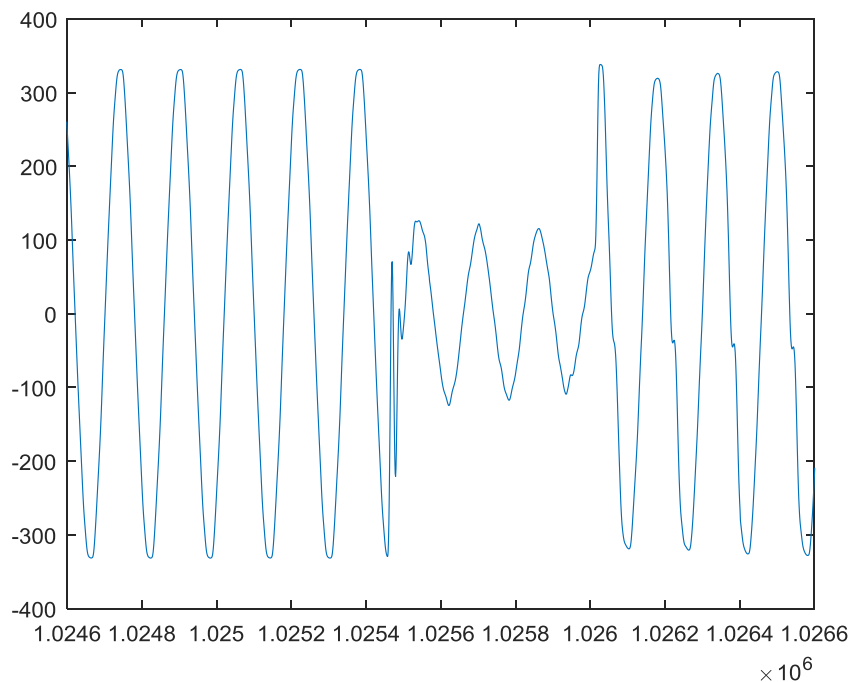


Ilustración 6-24.- Hueco de tensión en fase 1 registrados en T3. Fuente: Propia

En la fase 2 encontramos un hueco de tensión de una duración breve, con una profundidad que no presenta un gran impacto.

Tabla 6-12.- Valores registrados en la fase 2. Fuente: Propia

Periodo	1	2	3	4
$V_{m\acute{a}x}$	292,459	290,212	290,475	288,795

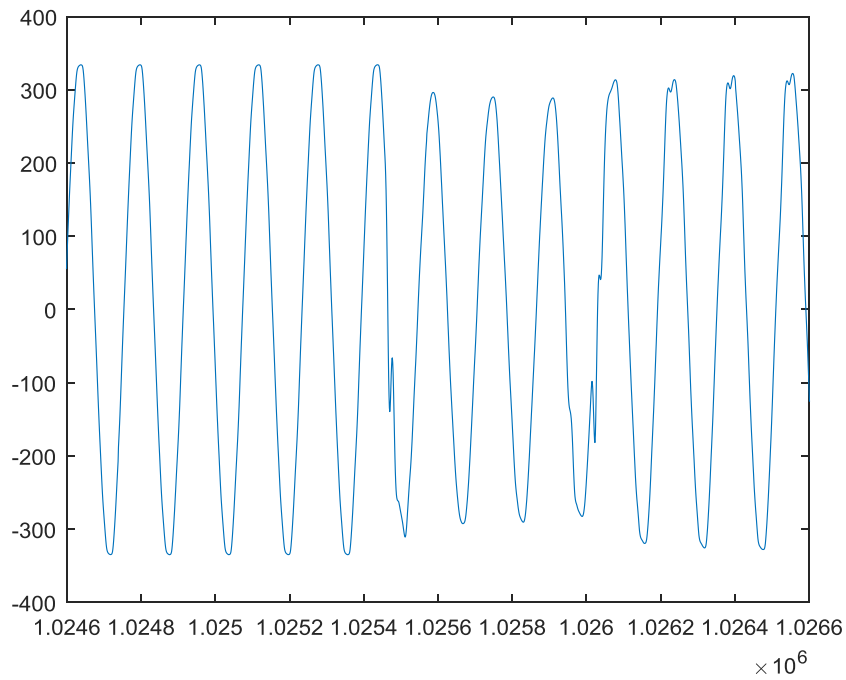


Ilustración 6-25.- Hueco de tensión registrado en la fase 2. Fuente: Propia

La fase 3 presenta un hueco de tensión con una duración de 5 periodos.

Tabla 6-13.- Valores registrados en la fase 3. Fuente: Propia

Periodo	1	2	3	4	5
$V_{m\acute{a}x}$	291,456	291,107	288,573	288,791	290,168



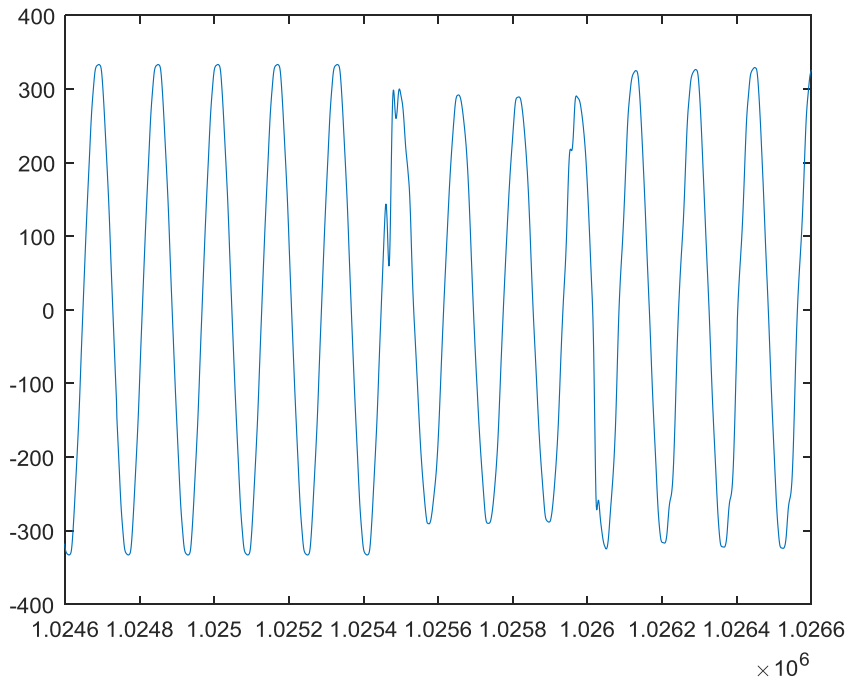


Ilustración 6-26.- Hueco de tensión registrado en la fase 3. Fuente: Propia

En lo que respecta al caso de la T4, es igualmente un hueco trifásico en la hora 10 y minuto 4 pero en este caso mucho más importante para fase 2, en la alcanza una profundidad que consideramos importante, aproximadamente del 60%.

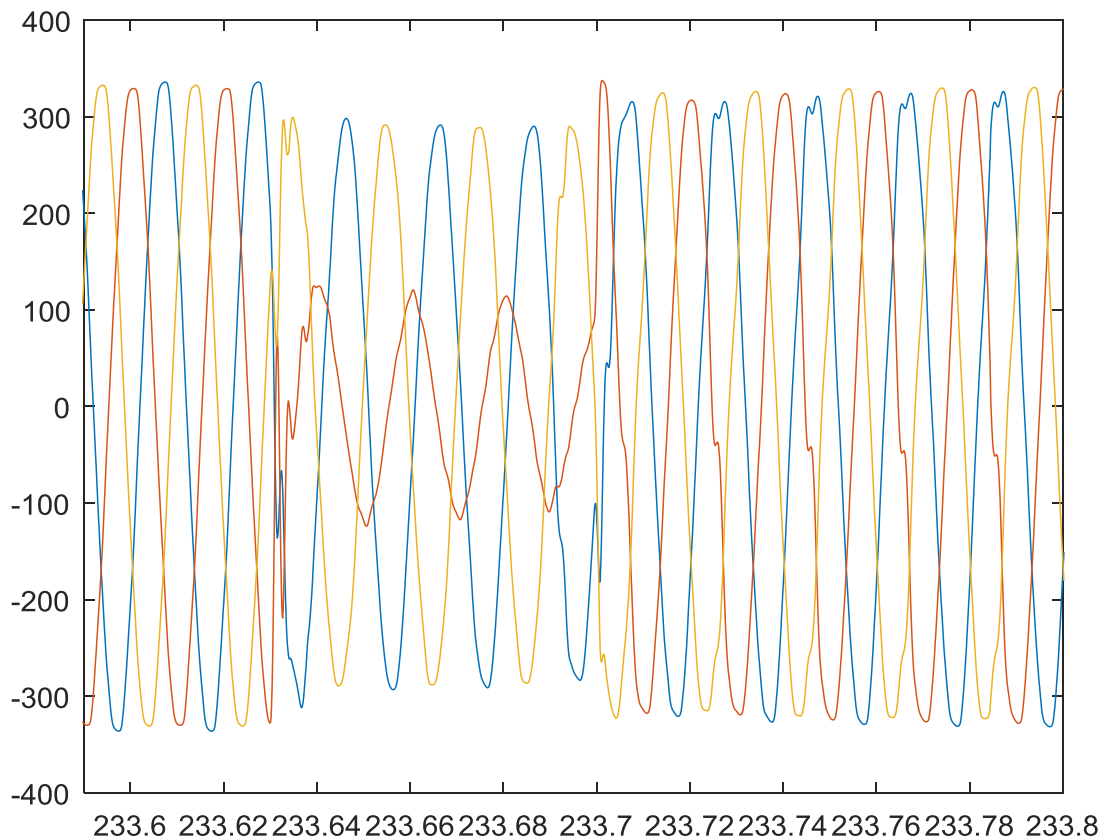


Ilustración 6-27.- Hueco de tensión trifásico registrado en T4. Fuente: Propia

En la fase 1 nos encontramos con un hueco de tensión con una duración de 4 periodos. La profundidad del hueco permanece estable.

Tabla 6-14.- Valores registrados en la fase 1. Fuente: Propia

Periodo	1	2	3	4
$V_{m\acute{a}x}$	291,466	291,225	290,129	283,577

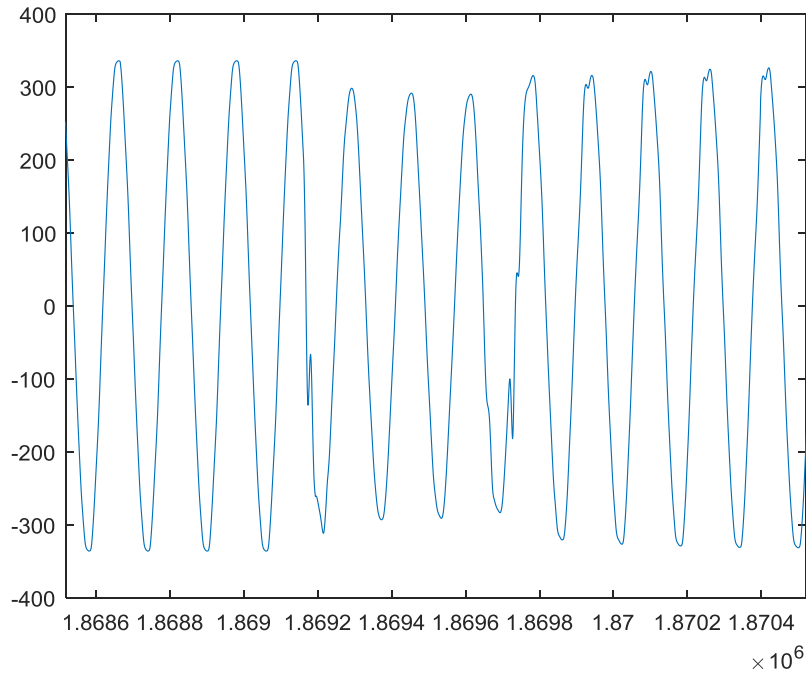


Ilustración 6-28.- Hueco de tensión registrado en la fase 1. Fuente: Propia

En la fase 2 la duración del hueco de tensión es de 6 periodos. La profundidad que presenta es importante, ya que la tensión baja de forma brusca.

Tabla 6-15.- Valores registrados en la fase 2. Fuente: Propia

Periodo	1	2	3	4	5	6
$V_{m\acute{a}x}$	124,852483	123,991988	120,731964	117,320671	114,431276	109,166839

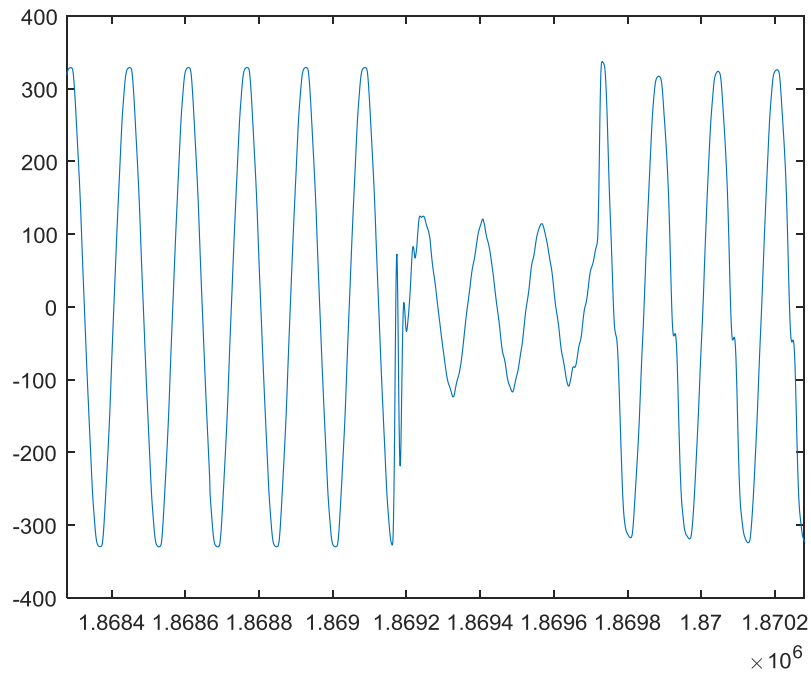


Ilustración 6-29.- Hueco de tensión registrado en fase 2. Fuente: Propia

Por último, se muestra el hueco de tensión que tiene lugar en la tercera fase, el cual tiene una duración de 5 intervalos.

Tabla 6-16.- Valores registrados en la fase 3. Fuente: Propia

Periodo	1	2	3	4	5
Vmax	291,45689	291,107374	288,573382	288,79183	290,168049

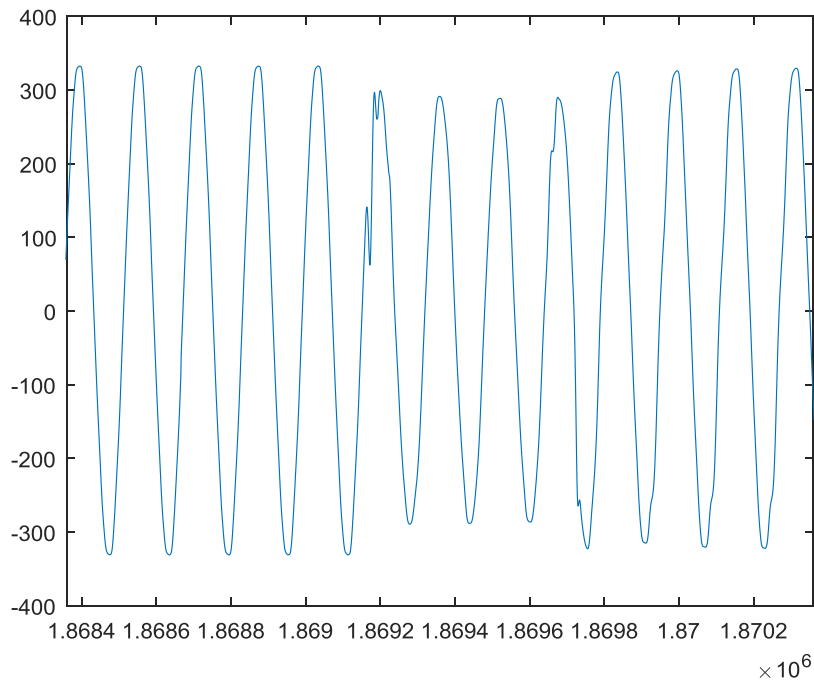


Ilustración 6-30.- Hueco de tensión registrado en la fase 3. Fuente: Propia

## Análisis semana 2

En la semana 2 se cambiaron las ubicaciones de los equipos, pasando a instalarse las tarjetas en los puntos que se muestran en la tabla 6.17.

Tabla 6-17.- Ubicación de las tarjetas en el hospital. Fuente: Propia

Tarjeta	Cuadro	Circuito
T1	General, panel 33	Fuerza [PQUAQ_02-3000i]
T2	Secundario, panel 33	Diálisis [PQUAQ_03-PSFLEX-S]
T3	Secundario, panel 33	Neonatos [PQUAQ_04-PSFLEX-B]
T4	Secundario panel 33	Partos [PQUAQ_05-PSFLEX-B]

Durante esta semana se observa el día 0 en tres de las cuatro tarjetas huecos bifásicos. En la otra ocurrió un fallo en la medida en una de las fases durante toda la semana por lo cual los datos registrados no son fiables y por lo tanto los descartaremos de nuestro estudio. Igualmente se registra un cero de tensión este mismo día en otro instante de tiempo en la tarjeta 4 (T4) y un hueco de tensión sin gran importancia en la tarjeta 2 (T2).

El día 1 se registra en la tarjeta 1 (T1) un pequeño hueco de tensión.

### Día 0

Encontramos un hueco bifásico en las tarjetas T1, T2 y T4, concretamente en la hora 8 minuto 2 para el caso de T1, hora 8 minuto 0 para T2 y en T4 en la hora 8 minuto 1. En todas ellas, tiene lugar en las fases 2 y 3.

Como podemos observar en la ilustración 6.31 correspondiente con hueco bifásico en la T1 la fase 1 mantiene su valor, mientras que las otras dos fases se ven afectadas en el mismo instante de tiempo, y su duración es muy parecida.

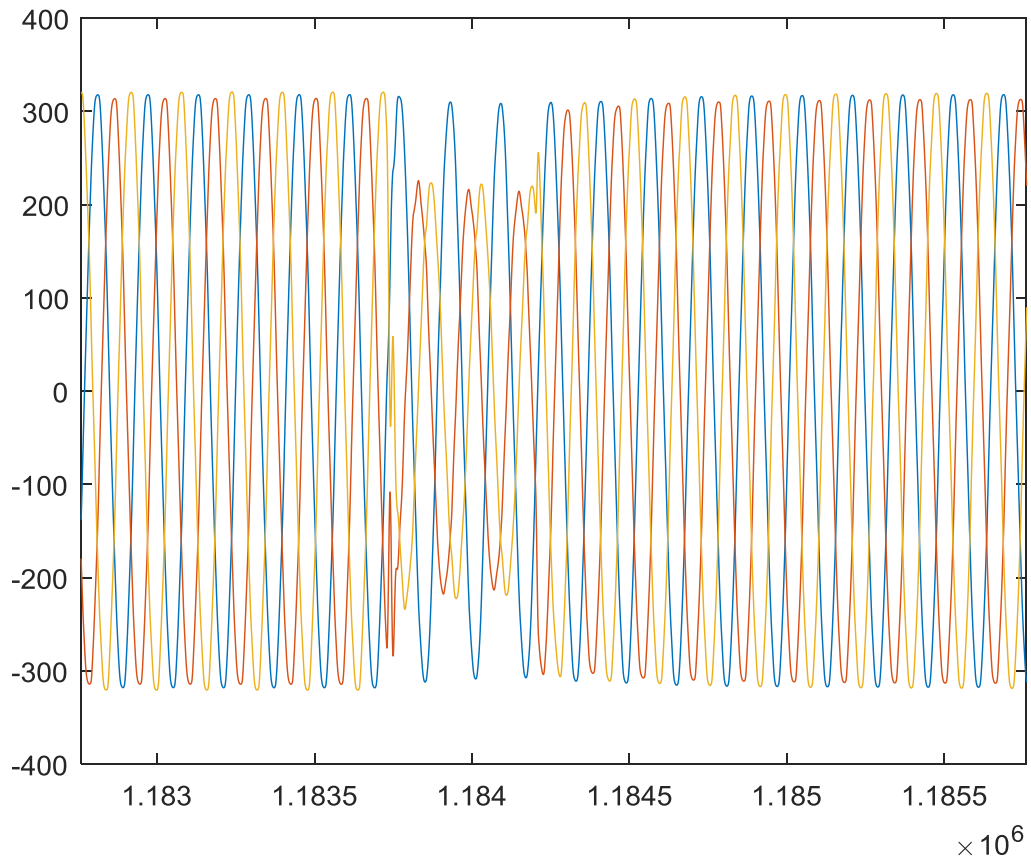


Ilustración 6-31.- Hueco de tensión bifásico en fase 2 y 3. Fuente: Propia

En la tarjeta 1 (T1) en la hora 8, minuto 2 encontramos en la fase 2 un hueco de tensión. Presenta una duración de 6 periodos.

Tabla 6-18.- Valores máximos en la fase 2. Fuente: Propia

Periodo	1	2	3	4	5	6
$V_{\text{máx}}$	287,091	225,774	217,733	216,335	213,337	214,335

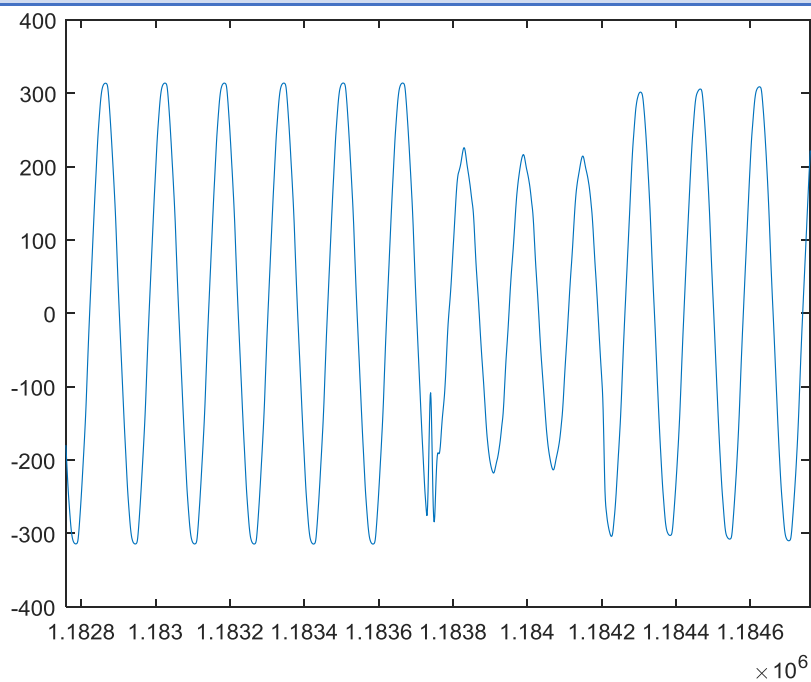


Ilustración 6-32.- Hueco de tensión en la fase 2. Fuente: Propia

Para el caso de la fases 3 ocurre en el mismo instante de tiempo, pero tiene mayor duración en el tiempo, concretamente 11 periodos.

Tabla 6-19.- Valores máximos registrados en la fase 3. Fuente: Propia

Periodo	1	2	3	4	5	6
$V_{\text{máx}}$	253,645	233,684	246,687	236,844	243,628	280,684

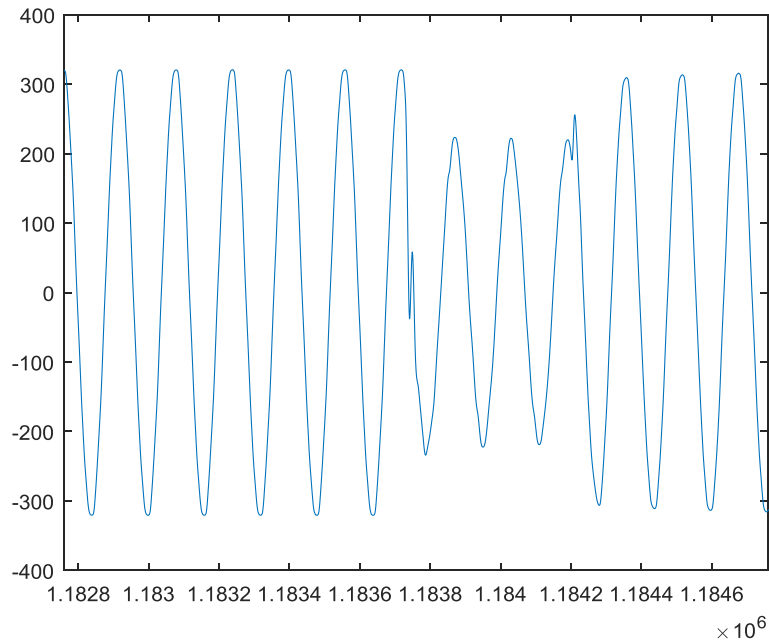


Ilustración 6-33.- Hueco de tensión en la fase 3. Fuente: Propia

En la tarjeta 2 (T2) encontramos dos fenómenos en éste día. Uno de ellos es una caída de tensión y otro un hueco bifásico como hemos mencionado previamente.

En la hora 6, minuto 4 encontramos la caída de tensión con una duración de 18 periodos. La tensión en todos ellos se mantiene prácticamente estable con un valor medio durante todos ellos de 295 V.

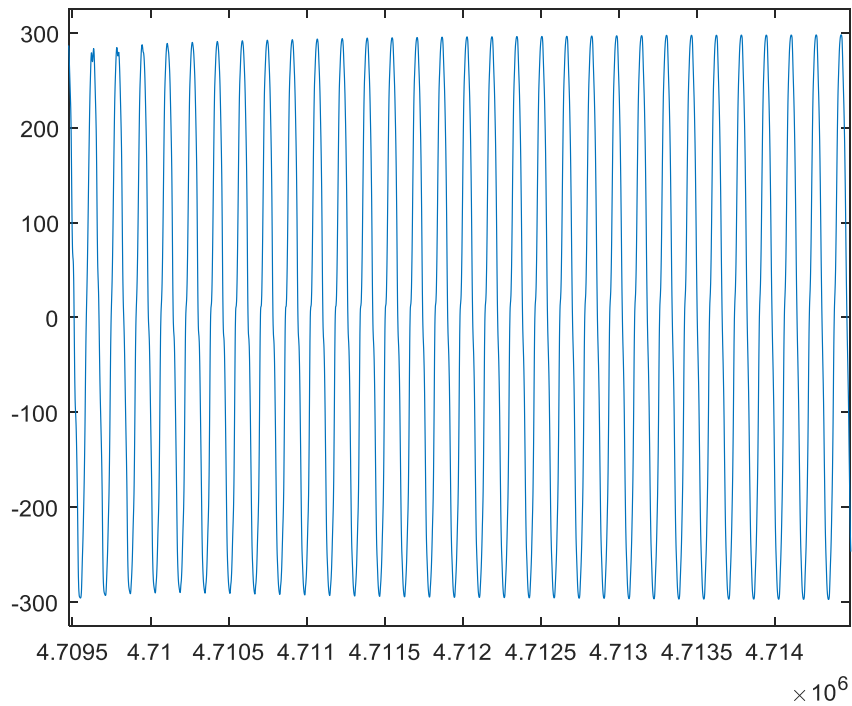


Ilustración 6-34.- Caída de tensión en T2. Fuente: Propia

En la tarjeta 2 (T2) encontramos un hueco bifásico que afecta directamente a las fases 2 y 3. En este caso, los valores que alcanza la tensión durante el hueco de tensión son bastante diferentes de una fase a la otra, aunque la duración si se asemeja.

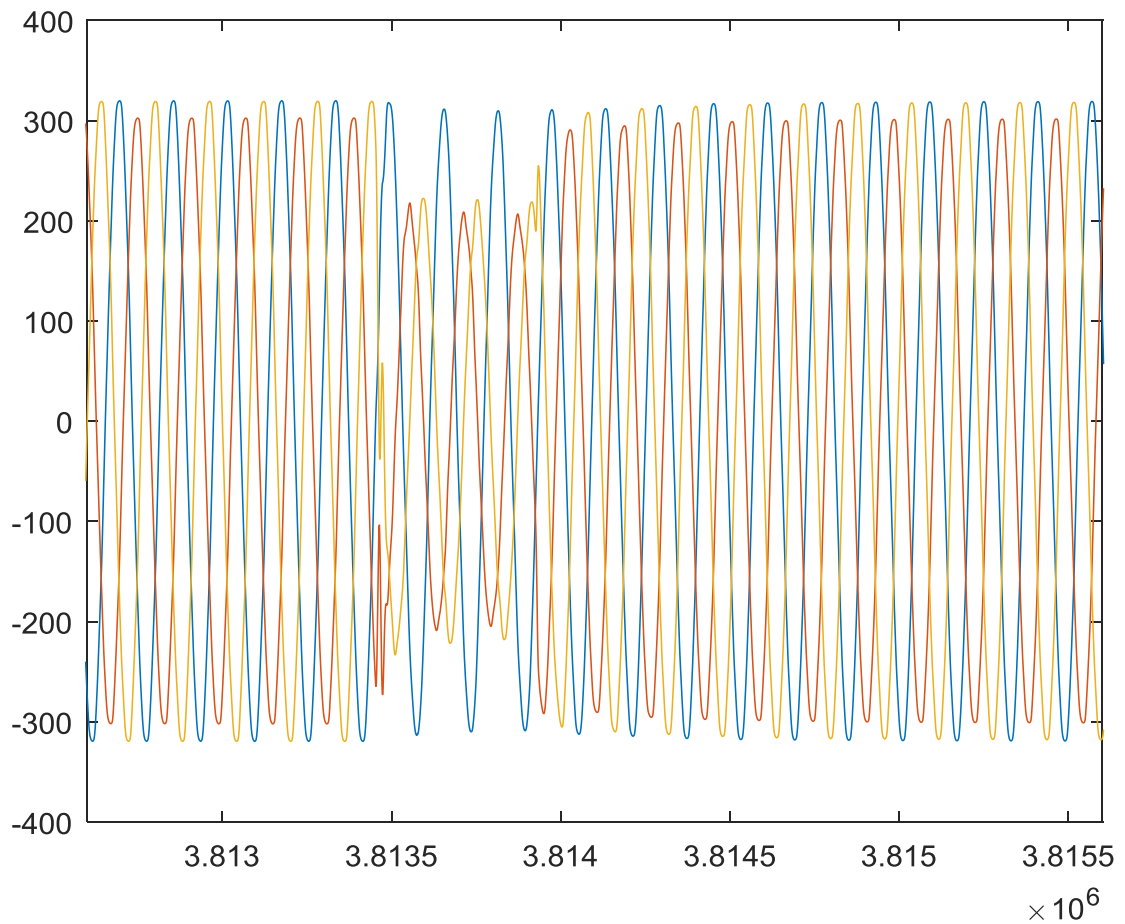


Ilustración 6-35.- Hueco bifásico en fases 2 y 3. Fuente: Propia

Cuando observamos lo que ha ocurrido en la fase 2 en la hora 8, minuto 0, podemos afirmar que el hueco posee una profundidad notable, con una duración de 9 periodos.

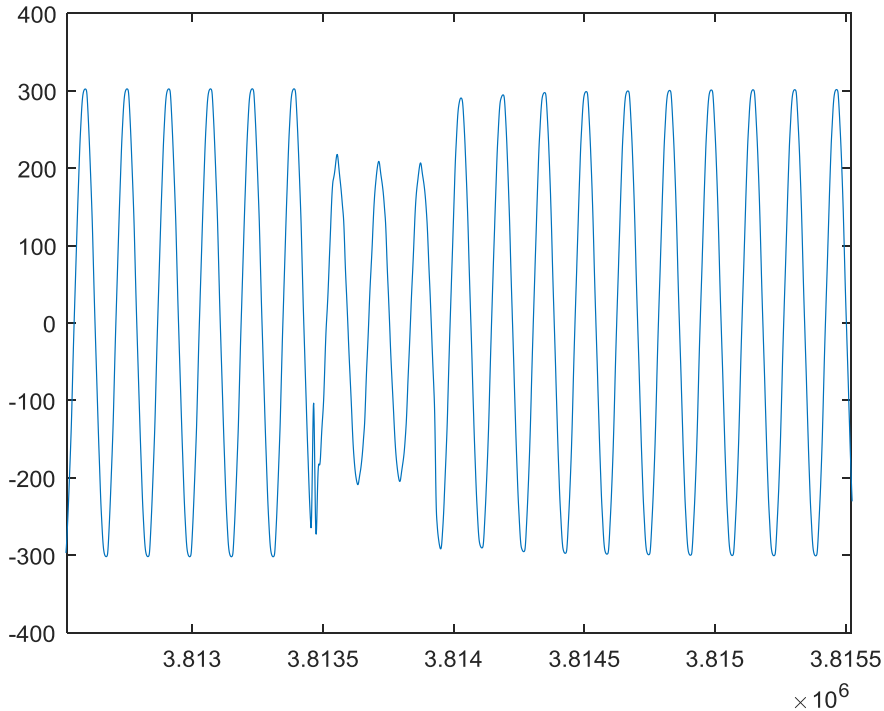


Ilustración 6-36. Hueco de tensión en la fase 2. Fuente: Propia

En el caso la fase 3, la duración es similar, 10 periodos, pero la profundidad del hueco de tensión no es tan brusca como en el caso previo. Tiene lugar en el mismo instante de tiempo.

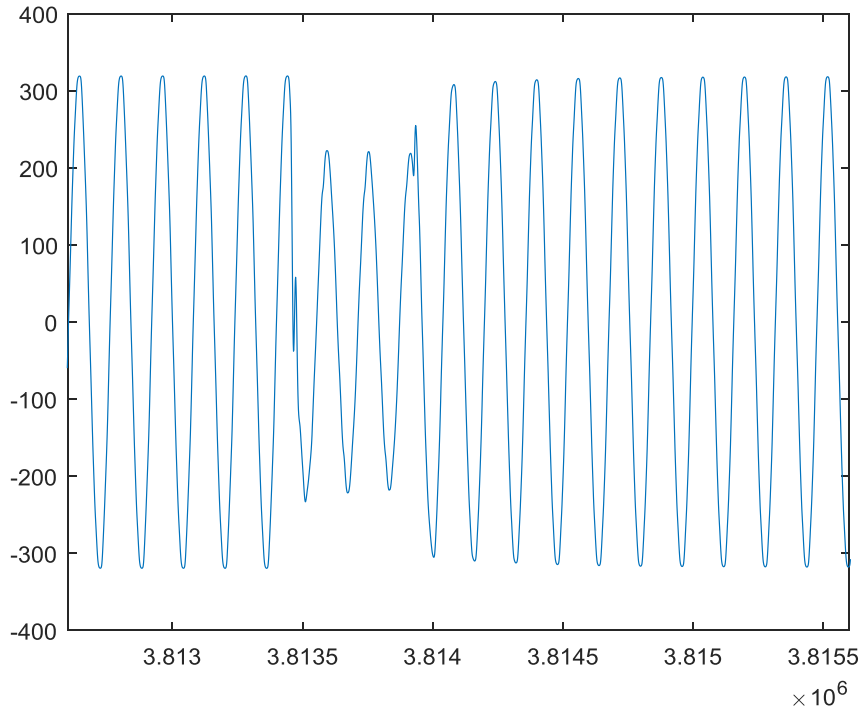


Ilustración 6-37.- Hueco de tensión en la fase 3. Fuente: Propia



En la tarjeta 4 nos encontramos de nuevo ante un hueco bifásico que afecta a las fases 2 y 3, con duraciones y profundidades similares en ambos casos.

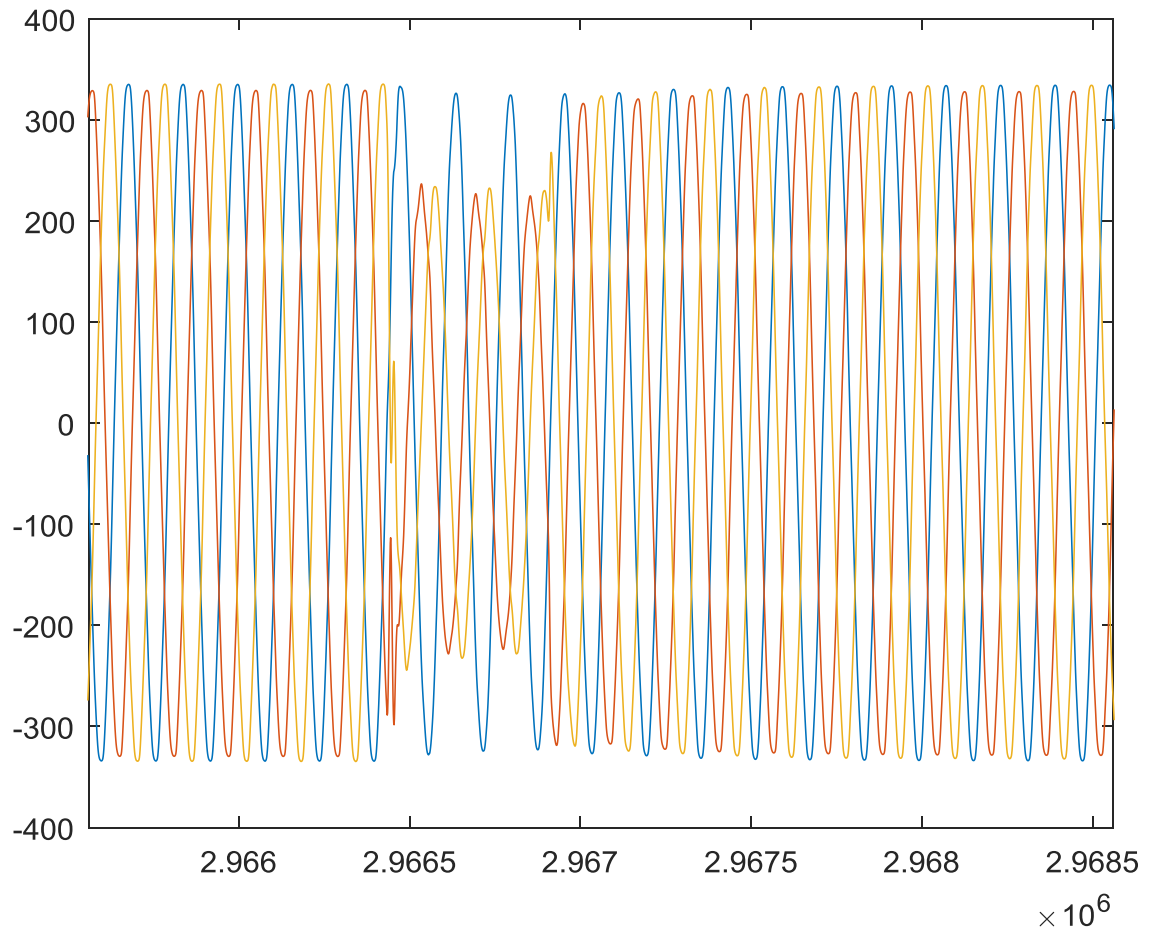


Ilustración 6-38.- Hueco de tensión bifásico en fases 2 y 3. Fuente: Propia

En la fase 2 observamos una duración de 5 periodos en la hora 8, minuto 1.

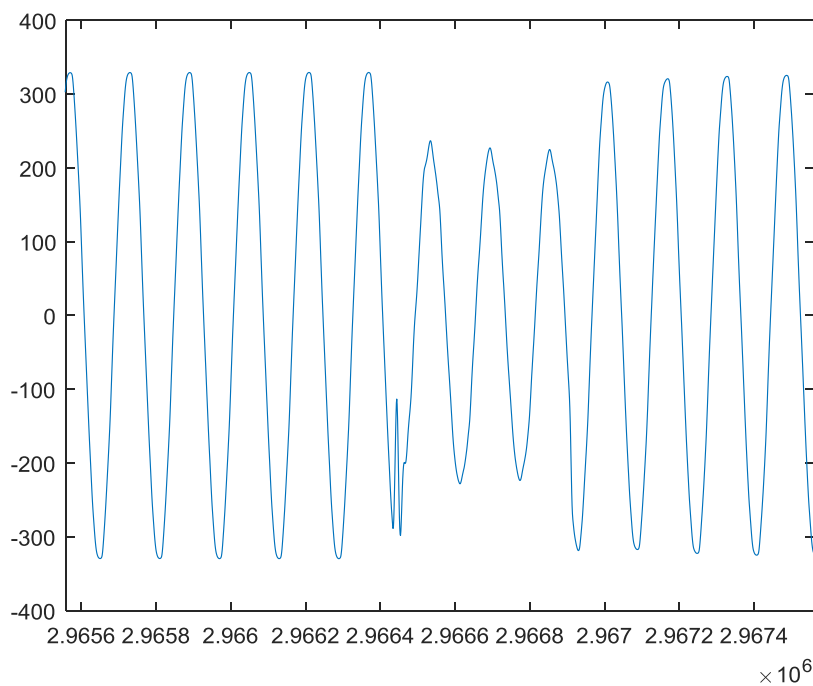


Ilustración 6-39.- Hueco de tensión en la fase 2. Fuente: Propia

Para el caso de la fase 3 es mayor la duración, concretamente de 11 semiperiodos, comenzando el evento en el mismo instante de tiempo que para la fase 2.

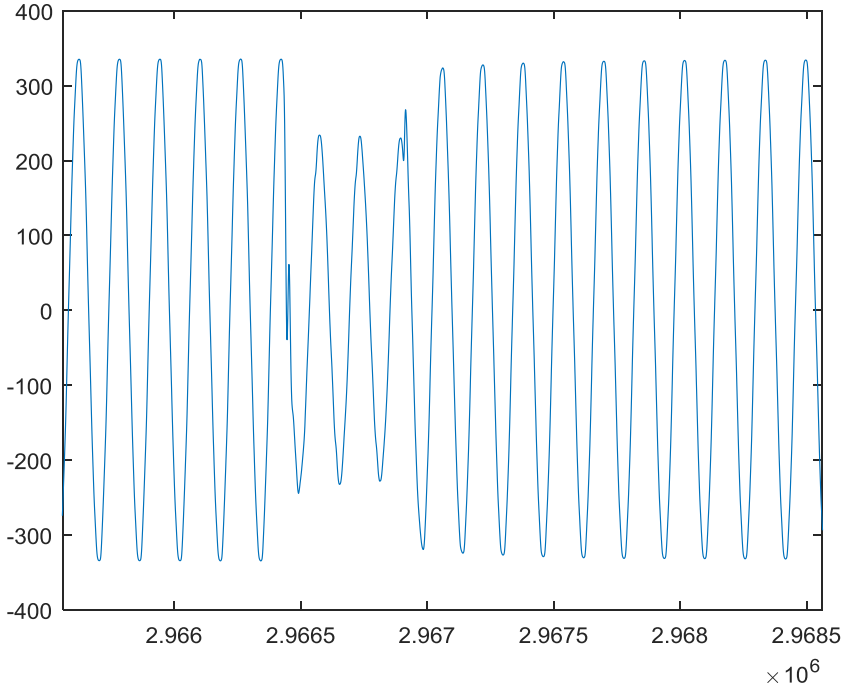


Ilustración 6-40.- Hueco de tensión en la fase 3. Fuente: Propia

# **7. CONCLUSIONES**



## 7. Conclusiones

El desarrollo del presente proyecto surgió con dos objetivos bien diferenciados

1. La caracterización de las distintas perturbaciones, prestando especial atención a los huecos de tensión
2. Detección de huecos de tensión y otras perturbaciones que afectan a la calidad de la energía en el hospital de Ávila

El primer objetivo se ha cumplido de forma total, realizando un análisis bien diferenciado de todas las perturbaciones encontradas en la actualidad que tienen relevancia en el estudio de la calidad de energía. Con ello se ha contrastado toda la información existente y su impacto diario en todos y cada uno de los equipos que forman parte de las instalaciones hospitalarias. Todo ello tiene efectos tanto en el modo de funcionamiento de los equipos, los cuales presentan anomalías normalmente no percibidas por el usuario, pero que en caso de fallo puede tener consecuencias nefastas, ya que estos equipos trabajan para salvar vidas humanas.

En particular, hemos descubierto que la electrónica utilizada por la mayoría de los instrumentos de diagnóstico computarizado, que se encuentra en los laboratorios de I + D, se están volviendo más sensibles incluso a perturbaciones de potencia menores. Esto ha generado ciertos problemas, principalmente en lo que respecta a su alimentación desde las redes de baja tensión, lo cual ha provocado junto con otros factores un aumento en los problemas de calidad de la energía.

Este nivel de fiabilidad debe considerar no sólo las interrupciones del servicio, sino también las condiciones de calidad de energía que pueden causar interrupciones del proceso. Por lo tanto, los hospitales y otros grandes consumidores como puede ser el sector industrial, siempre deben prestar especial atención a las especificaciones técnicas de los equipos con el objetivo de ayudar a prevenir y mitigar dichos efectos.

En general, es muy difícil determinar el costo exacto asociado con el tiempo de inactividad de los distintos sistemas. Los fabricantes suelen mantener registros del sistema muy buenos que se utilizan para determinar qué sistemas requieren un número significativo de piezas de repuesto y tiempo de servicio.

En lo que respecta al segundo objetivo se ha logrado de forma parcial, ya que para lograr un correcto análisis de los resultados obtenidos habría que realizar un estudio mucho más detallados sobre las causas y motivos que han originado dichas perturbaciones, ya que nosotros hemos construido una herramienta capaz de detectar dichos fallos, pero no conocemos más datos para poder un juicio válido sobre el porqué se han originado dichas perturbaciones en esos instantes de tiempo.

Por ello como líneas de trabajo futuras se propone un estudio más detallado que concrete las condiciones de la red en esos instantes en los cuales han tenido lugar las perturbaciones, así como mayor información acerca de estos fenómenos en el sector hospitalario. Estamos ante un tema sobre el cual la información escasea, y es sin duda un punto de estudio muy interesante por todas las posibilidades que proporciona, además de la importancia que cobra ya que del correcto funcionamiento de todos estos equipos depende la vida humana.

Otro punto interesante se encuentra en el estudio económico que este tipo de efectos tiene en otros sectores, principalmente en el industrial. En numerosas ocasiones tienen lugar hechos en las máquinas de los cuales desconocemos su origen, achacándolo a otros hechos como mal funcionamiento o diseño, cuando su origen se encuentra en la calidad de la energía con la cual es alimentada.

# 8. BIBLIOGRAFÍA





## 8. Bibliografía

- [1] *Avance de Red Eléctrica Española*. (2012) Madrid .
- [2] BOE. *ORDEN ECO/797/2002, de 22 de marzo, por la que se aprueba el procedimiento de medida y control de la continuidad del suministro eléctrico*. Obtenido de <https://www.boe.es/boe/dias/2002/04/13/pdfs/A14170-14176.pdf> Fecha de consulta: (27/05/2017).
- [3] Calcina, J. (2015). *Sobretensiones temporales. Técnicas de Alta tensión Ingeniería Eléctrica*.
- [4] Electric, S. *Limitadores de tensión transitorias*. Obtenido de [http://www.schneiderelectric.es/html/limitadoresdesobretensiones/docs/guia\\_proteccion\\_capitulos/capitulo\\_07.pdf](http://www.schneiderelectric.es/html/limitadoresdesobretensiones/docs/guia_proteccion_capitulos/capitulo_07.pdf) Fecha de consulta: (30/05/2017).
- [5] Gobierno de España. Ministerio de Energía, T. y *Energía Eléctrica*. Obtenido de <http://www.minetad.gob.es/energia/electricidad/CalidadServicio/Paginas/IndexCalidad.aspx> Fecha de consulta: (20/05/2017)
- [6] Ingeniare. (2012). Análisis multiresolución del motor trifásico de inducción sometido a huecos de tensión. *Rev. chil. ing. vol.20 no.1 Arica abril*, 66-68. Obtenido de [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-33052012000100007](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052012000100007) Fecha de consulta: (11/05/2017)
- [7] Louzán Pérez, N. y Pérez Donsión, M. (2002) Métodos de corrección de huecos de tensión y cortes breves. Universidad de Vigo. Departamento de Ingeniería Eléctrica.
- [8] McEachern, A. (2000). *Sources of voltage sags. Power Standards Testing Laboratory*.
- [9] Méndez García, J. *Medición de la calidad de la energía*. Obtenido de [http://www3.fi.mdp.edu.ar/electrica/archivos/medicion\\_calidad\\_energia.pdf](http://www3.fi.mdp.edu.ar/electrica/archivos/medicion_calidad_energia.pdf) Fecha de consulta: (15/05/2017)
- [10] MHJ. Bollen, E. S. (2000). "*Characterization of three. phase unbalanced dips*" Power. Engineering Society Summer Meeting.
- [11] Morales, J. I. *EL FENÓMENO FÍSICO-ARMÓNICO*. Obtenido de <http://90disonancias.com/2013/12/375/el-fenomeno-fisico-armonico/> Fecha de consulta: (10/05/2017)
- [12] Pérez Donsión, Calidad de potencia en los sistemas de energía eléctrica: perspectivas futuras. Universidad de Vigo. Departamento de Ingeniería Eléctrica.
- [13] *Real Decreto 1955/2000 por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica. BOE, Diciembre (2000)*
- [14] Roger C. Dugan, M. F. (2012). *Electrical Power Systems Quality*. McGraw–Hill.
- [15] Salgado, J. *Los filtros pasivos*. Obtenido de <http://ele-mariamoliner.dyndns.org/~jsalgado/analogica/6CA-filtros.pdf> Fechas de consulta: (20/05/2017).
- [16] Standard, I. (2002). *IEC (61000-2-2/4) Electromagnetic compatibility (EMC)*.
- [17] Stephen J. Chapman.(1998) *Electric Machinery Fundamentals*. McGraw-Hill.

- [18] Técnico, C. (2016). *Guía sobre la calidad de onda en las señales eléctricas*. Madrid: Gráficas Marcar.
- [19] Unesa. (1995). *“Limitación de armónicos en las redes eléctricas españolas de alta tensión de distribución”*. *Guía Técnica para la conexión a la red*.
- [20] Universidad del Atlántico, Universidad Autónoma del occidente. *Calidad de la energía eléctrica*. Obtenido de <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Gie/Docs/calidad.pdf>  
Fecha de consulta: (12 /05/2017)

# 9. ANEXOS



## 9. Anexos

### 9.1. Código Matlab

```
%Introducción y presentación del programa%

fprintf('=====
==\n');
fprintf('  DETECCIÓN DE HUECOS DE TENSIÓN EN UNA INSTALACIÓN HOSPITALARIA
\n');
fprintf('
          EN MATLAB.
\n\n');
fprintf('
          Autor: Adrián Reyes Cristín.
\n');
fprintf('
          Septiembre 2017
\n');
fprintf('=====
==\n\n\n');

fprintf('INTRODUCCIÓN DE LOS VALORES NECESARIOS PARA LA EJECUCIÓN DEL
PROGRAMA.\n\n');

%Pedimos al usuario que introduzca las variables de onda generada%
Ciclos_1 = input ('\n Inserte el número de ciclos de la onda: ');
Amplitud_1 = input ('\n Inserte la amplitud : ');
%Frecuencia_1 = input ('\n Inserte la frecuencia: ');
Fase_1 = input ('\n Inserte la fase (en grados): ');

%Pedimos al usuario que introduzca las variables de la onda ruido%

Ciclos_2 = input ('\n Inserte el número de ciclos de la onda ruido: ');
Amplitud_2 = input ('\n Inserte la amplitud: ');
%Frecuencia_2 = input ('\n Inserte la frecuencia: ');
Fase_2 = input ('\n Inserte la fase (en grados): ');
Tolerancia = input ('\n Inserte la tolerancia que quiere admitir en la
búsqueda de perturbaciones ');

%Generamos la onda senoidal con armónicos con los parámetros establecidos%
x1=0:pi/16:Ciclos_1*2*pi;
y1=Amplitud_1*sin(x1+(Fase_1*pi/180));

%Generamos la onda senoidal de ruido con armónicos con los parámetros
estblecidos%
x2=0:pi/16:Ciclos_2*2*pi;
y2=Amplitud_2*sin(x1+(Fase_2*pi/180));

%Creamos vectores con la longitud de ambos vectores%
la=length(y1);
lb=length(y2);
%Cogemos la longitud maxima%
Rango=max(la,lb);
%Creamos dos matrices de ceros con la longitud maxima%
a=zeros(1,Rango);
b=zeros(1,Rango);

%Genero un número aleatorio entero entre 0 y el numero maximo de ciclos%
Numero=round(10*rand);

%Si el numero es cero, restaremos a partir del primer ciclo%
if Numero==0
    for i=1:33*Ciclos_2
```

```

        b(1,i)=y2(1,i);
    end
else
Ciclo=floor(length(y1)/(33*Numero));

j=1;
    for i=Ciclo*33:Ciclo*33+33*Ciclos_2
        b(1,i)=y2(1,j);
        j=j+1;
    end
end

j=1;
for j=1:Rango
    Solucion(1,j)=y1(1,j)-b(1,j);
end

signalconruido = Solucion + 0.9 * randn(1, length(Solucion));

%Representamos la onda con ruido
plot(x1,signalconruido);
grid;
xlabel('Tiempo');
ylabel('Tensión');
hold on;

%En el siguiente ciclo hacemos empezar la onda en ciclo positivo

for n=1:33

    if signalconruido(n)<0 && signalconruido(n+1)>0;

        for m=1:Rango-n

            Nueva_Senal(m)=signalconruido(n);
            n=n+1;
        end
        break;
    end
end

%En el siguiente ciclo buscamos el valor máximo de cada ciclo

x=0;
for m=1:Ciclos_1

    Valor_actual=0;
    for j=1+x:32+x

        Valor_actual(1,j)=abs(signalconruido(1,j));

    end
    Valor_Maximo(m)=max(max(Valor_actual));
    x=x+32;
end

Valor_Maximo

Valor_Referencia=Amplitud_1;

```

```
p=1;
Ciclos_Error=0;

%En el siguiente bucle determinamos los ciclos en los cuales existe una
perturbación

for n=1:Ciclos_1

    if (Tolerancia/100)*Valor_Referencia > Valor_Maximo(n)

        Ciclos_Error(p)=n
        p=p+1;

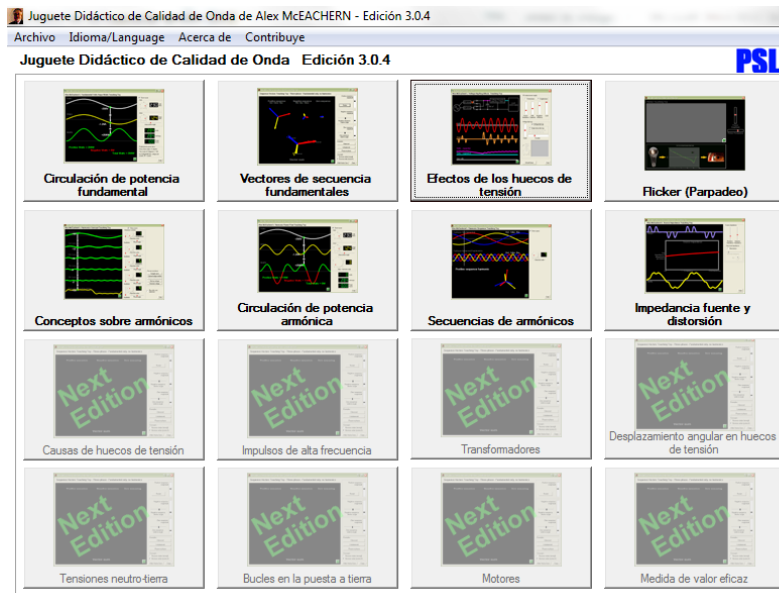
    end

end

Ciclos_Error
```

## 9.2. Software Didáctico de Calidad de Onda de Alex McEACHERN.. Edición 3.0.3

Se añade como anexo el software de libre distribución usado para distintas simulaciones y se explica algunas de sus características.



El software de Alex McEACHERN permite variar datos y parámetros para comprobar de forma interactiva el efecto de distintas perturbaciones sobre una instalación básica. La pantalla de impresión muestra el circuito básico sobre los que se realizan las simulaciones, en este caso monofásico, con un código de colores para identificar la forma de onda en la parte inferior.

