

**CLADE 2016**III CONGRESO DE LAS AMERICAS
DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA3 al 5 de Octubre de 2016
Sheraton Hotel, Ciudad de Córdoba
República Argentina

Organiza



Auspicia

**IITREE FI-UNLP⁽¹⁾ – INGREDION⁽²⁾****ARGENTINA**

Clasificación según temario: B

PROYECTO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA PARA MITIGACIÓN DE HUECOS DE TENSIÓN EN PLANTA INDUSTRIAL

Autor	MG. ING. GUSTAVO ARIEL BARBERA
Empresa o entidad	IITREE FI-UNLP ⁽¹⁾
Cargo	PROFESOR / INVESTIGADOR
Autor	MG. ING. FERNANDO ISSOURIBEHERE
Empresa o entidad	IITREE FI-UNLP ⁽¹⁾
Cargo	PROFESOR / INVESTIGADOR
Autor	ING. MARCELO ALY
Empresa o entidad	INGREDION S.A. ⁽²⁾
Cargo	GERENTE DE INGENIERÍA DE PROYECTOS

DATOS DE LAS EMPRESAS

Dirección	48 y 116
Localidad	La Plata
País	Argentina
Código Postal	B1900 AMF
Teléfono	+54-221-4236695/97
Fax	
E-Mail	gbarbera@iitree-unlp.org.ar
Dirección	Gorriti N° 686
Localidad	Baradero
País	Argentina
Código Postal	B2942DDN
Teléfono	+54-3329-488021
Fax	
E-Mail	marcelo.aly@ingredion.com

1. INTRODUCCIÓN

Los huecos de tensión son una perturbación de los sistemas eléctricos que, en términos generales, no se encuentra regulada en los contratos de concesión. Particularmente, en Argentina son contempladas aquellas interrupciones cuya duración sea de al menos 3 minutos.

Sin embargo, para el sector industrial, los huecos de tensión resultan ser la perturbación más nociva [1], puesto que éstos afectan de manera directa a equipamiento sensible presente en las plantas, llegando en ciertos casos a detener el proceso de producción. Esto último, claro está, representa pérdidas económicas significativas para las plantas afectadas.

En la localidad de Baradero, provincia de Buenos Aires, Argentina, se encuentra emplazada una de las plantas de Ingredion S.A., dedicada a la fabricación de productos derivados del maíz.

Dicha industria, la cual es del tipo 24 x 7 x 365, es abastecida en 33 kV y presenta una demanda superior a los 10 MW.

La presencia de huecos provenientes de la red externa afectaba el correcto funcionamiento de calderas y compresores, y su salida de servicio hacía que se detenga completamente una línea de producción. En promedio, el tiempo requerido para restablecer el servicio era del orden de 8 horas, con lo que las pérdidas económicas ocasionadas eran de consideración.

Tal situación motivó a que, si bien se trata de una perturbación no regulada en la Argentina, este Gran Usuario efectúe el correspondiente reclamo a la empresa prestataria del servicio eléctrico. En respuesta, entre 2009 y 2011 la Distribuidora actuó sobre su red instalando un nuevo transformador, exclusivo para la planta, y mejoró el mantenimiento de la línea con la que la alimenta.

El resultado de ello fue una reducción, a la mitad, en el número de eventos que se sucedieron. De cualquier modo, luego de las obras realizadas, en el año 2012 se registraron 176 eventos, y 16 de ellos afectaron la producción. Como consecuencia, se perdieron 41 horas de molienda, provocando pérdidas económicas de consideración.

Este nuevo escenario resultó aún insuficiente para suplir los requerimientos de calidad exigidos por la industria. Por lo tanto, el próximo paso fue intervenir sobre la red interna de la planta, a fin de reducir su vulnerabilidad a esta perturbación.

2. SOLUCIÓN PROPUESTA

A los efectos de conocer con exactitud el estado de situación de la planta, en materia de presencia

de huecos, se registró la tensión y sus correspondientes eventos en el punto de acoplamiento de la misma con la red, durante tres años en forma ininterrumpida. Los datos recolectados fueron exhaustivamente analizados.

Una vez que tales eventos fueron adecuadamente caracterizados, particularmente contemplando la profundidad y la duración de los huecos, se vislumbró que una posible solución sería la instalación de **UPSs** (“*Uninterruptible Power Systems*”) de potencia para alimentar a la totalidad de las cargas sensibles, esto es 4 calderas y 6 compresores. Vale destacar que todas ellas se encuentran vinculadas a una misma barra de baja tensión (380 V), aguas debajo de un transformador MT/BT de 2,5 MVA.

Un dato de relevancia que surgió del análisis de los registros es que la mayoría de los eventos tuvo una duración inferior a los 3 minutos.

Los resultados de los registros fueron analizados en detalle junto a distintos proveedores de UPSs y todos ellos coincidieron en que, por medio de la instalación de las mismas, sería posible mitigar el inconveniente.

3. MEDICIONES PRELIMINARES

3.1. Mediciones de cargas

A fin de caracterizar las cargas a ser alimentadas por las UPSs se relevaron perfiles de consumos, tanto de calderas como de compresores, todos ellos trifásicos. El conocimiento de tales perfiles, claro está, resulta de vital importancia para establecer el porte de las UPSs a instalar.

En ese sentido, se midieron los valores medios y máximos de Potencia Aparente en cada compresor durante un día, empleando un período de integración de 5 minutos. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla I.

Tabla I. Resultados de mediciones de perfiles de carga en compresores.

Compresor	S _T med [kVA]	S _T máx [kVA]
Compresor N° 1	84	87
Compresor N° 2	84	87
Compresor N° 3	85	90
Compresor N° 4	47	49
Compresor N° 5	40	45
Compresor N° 6	69	74
Total	409	432

Como puede observarse en la Tabla I, en todos los casos los valores máximos de potencia registrados fueron cercanos a los respectivos

valores medios. Esto es un claro indicador que los compresores representan una carga particularmente estable para el sistema, lo cual facilita el dimensionamiento de las UPSs, y permite que se obtenga un mejor provecho de su potencia. A manera de ejemplo, en la Fig. 1 se muestra el perfil de carga – Potencia Aparente – de uno de los compresores.

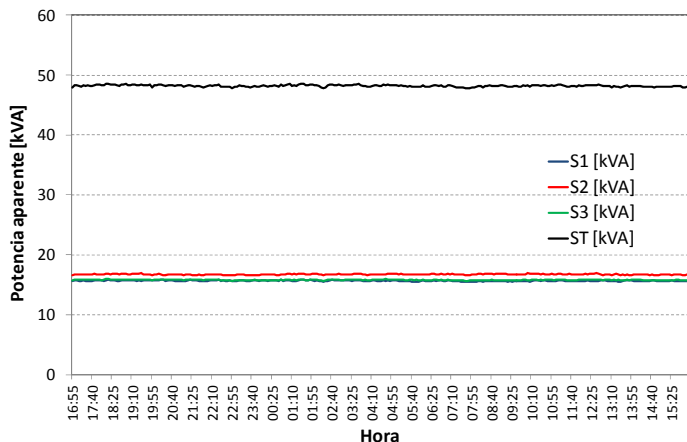


Fig. 1. Perfil de carga registrado en uno de los compresores.

Asimismo, se midieron también los perfiles de carga en las calderas. En la Tabla II y la Fig. 2 se muestran resumen y perfil, respectivamente, de lo obtenido en una de ellas a lo largo de una semana de registro.

Tabla II. Resultado de mediciones de perfil de carga en una de las calderas.

Caldera	S_T med [kVA]	S_T máx [kVA]
Caldera N° 4	87	113

El perfil de carga de las calderas no fue tan “plano” como en el caso de los compresores. De todos modos, la diferencia entre valores medios y máximos no fue crítica.

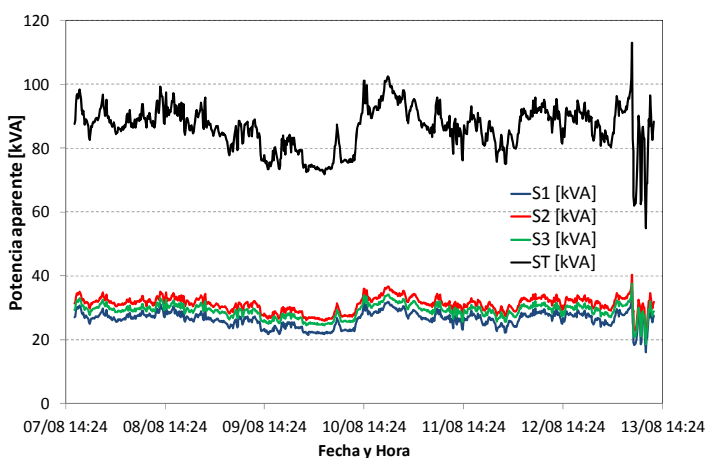


Fig. 2. Perfil de carga registrado en una de las calderas.

Las restantes calderas presentaron un comportamiento similar.

3.2. Mediciones de armónicas

Otro punto de relevancia a considerar fue el contenido armónico presente en la planta, previo a la instalación de las UPSs.

El motivo de ello es que las UPSs, debido a los convertidores electrónicos incluidos en su topología, emiten armónicas tanto hacia la carga que alimentan (inversor) como hacia la red a la que se encuentran conectadas (rectificador). A fin de predecir el contenido armónico esperado en la industria, a posteriori de la incorporación de las UPSs, es necesario contemplar tanto lo emitido por éstas como así también lo existente previo a su instalación.

En ese marco, se midieron armónicas en tensiones y corrientes, tanto en la entrada de la planta en 33 kV, como en la barra interna de ésta en 380 V en la que se instalarán las UPSs.

En la Fig. 3 se muestra el perfil de THD (“Total Harmonic Distortion”) en la tensión en la entrada de la planta, registrado durante un mes.

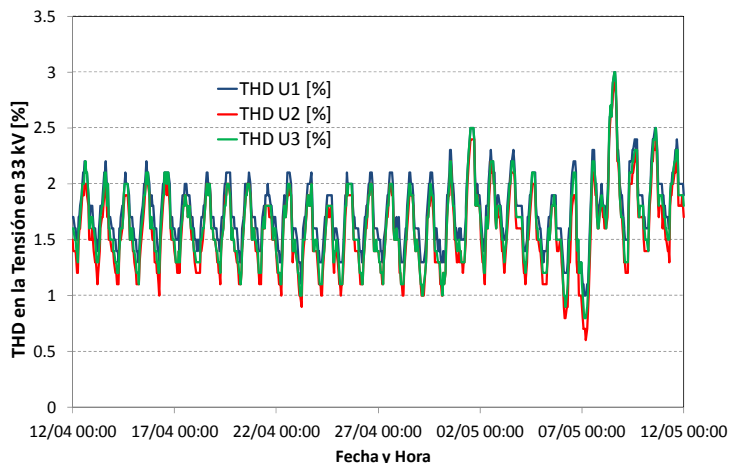


Fig. 3. Perfil de THD U [%] en la entrada de la planta.

El valor máximo permitido para este parámetro conforme a la normativa argentina es 8 % [2]. De acuerdo a lo que se observa en el perfil, este límite se cumple holgadamente. Por lo tanto, la Empresa prestataria del Servicio Eléctrico cumple con creces con los requerimientos existentes en términos de armónicas.

Por otro lado, en la Fig. 4 aparece el perfil de THD en la tensión, medido en 380 V, en la barra en la que se instalarán las UPSs.

A los efectos de ponderar el contenido armónico medido en la barra interna se ha hecho uso de la Norma IEC 61000-2-4 [3], la cual brinda niveles de compatibilidad en plantas industriales para perturbaciones conducidas de baja frecuencia. Esta Norma define tres clases en términos de contenido armónico, llamadas Clase 1 (mayor calidad), Clase 2 y Clase 3, respectivamente.

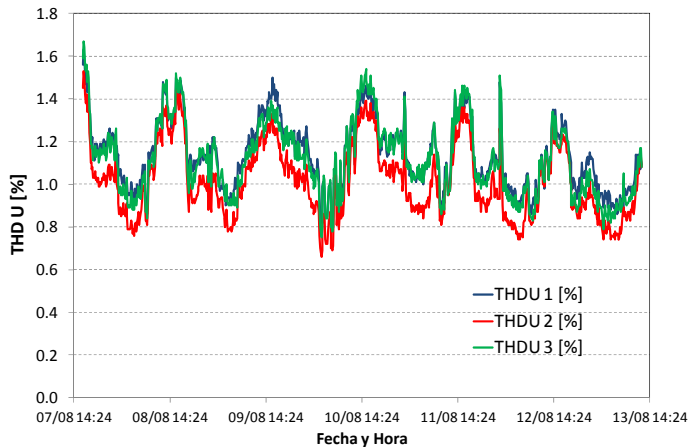


Fig. 4. Perfil de THD U [%] en barra interna de la planta.

En la Tabla III se comparan los valores medidos de las principales armónicas individuales y el THD (representados por su Percentil 95, esto es el valor superado por el 5 % de las muestras) con los límites de la Norma IEC para la Clase 1.

Tabla III. Armónicas medidas en el interior de la planta, comparadas con los límites IEC.

	U5	U7	U11	U13	U17	U19	THD
Valor P95	1.27	0.39	0.08	0.17	0.06	0.09	1.4
Límites IEC Clase 1	3	3	3	3	2	1.5	5

De la Tabla III se desprende que en materia de armónicas la planta cumple holgadamente con los estándares de calidad más exigentes establecidos en la Norma IEC para redes industriales.

4. ESTUDIOS DE ARMÓNICAS

Los estudios llevados a cabo tuvieron por objeto predecir el contenido armónico que contendrá la planta, tanto en la barra interna como en el Punto de Acoplamiento, luego de la instalación de las UPSs.

Para ello, se realizaron simulaciones empleando el programa ATP (*Alternative Transient Program*). Los datos para el modelado de la red se obtuvieron a partir de la base de datos de la Guía de Referencia de la Distribuidora y de información suministrada por personal de la industria.

Se realizaron barridos en frecuencia y flujos de armónicas para diferentes escenarios de la red externa, y para distintas configuraciones de las UPSs. Adicionalmente, también se contempló la futura incorporación de un banco de compensación de potencia reactiva de 1,2 Mvar en la barra de 33 kV de la industria. Con la inclusión de este banco se espera un incremento global del contenido armónico de la planta.

Las UPSs fueron modeladas como generadores de corrientes armónicas. Se tomaron como

valores de corriente los niveles de emisión provistos por los propios fabricantes de UPSs. Dado que éstos suelen indicar sólo la distorsión total de corriente (THD I [%]), la amplitud de las armónicas individuales se estableció utilizando las proporciones que utiliza la Norma IEC 61000-3-4 [4], la cual brinda límites de emisión de armónicas para cargas con corrientes nominales mayores a 16 A.

A fin de facilitar la implementación de las simulaciones, se consideró que el contenido armónico de la planta previo a la inclusión de las UPSs era nulo. De este modo, los resultados que dichas simulaciones arrojarán representan una suerte de incremento esperado, con respecto a los niveles oportunamente medidos (ver primera fila de la Tabla III).

Los resultados de las simulaciones en la red interna de la planta se muestran en la Tabla IV. La primera fila corresponde al escenario sin el banco de compensación instalado, mientras que la segunda es con éste incluido.

Tabla IV. Resultados de la simulación en la red interna

Armónica	U5	U7	U11	U13	U17	U19	THD
Sin banco	0.7	0.6	0.4	0.5	0.2	0.3	1.2
Con banco	0.7	0.7	0.5	0.3	0.1	0.2	1.2

En la Tabla V se hace lo propio, pero en la acometida de la planta, esto es en 33 kV.

Tabla V. Resultados de la simulación en la acometida de la planta.

Armónica	U5	U7	U11	U13	U17	U19	THD
Sin banco	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3
Con banco	0.2	0.3	0.4	0.3	0.1	0.1	0.6

Los resultados de las simulaciones realizadas indican que no se presentarán incrementos sustanciales de armónicas una vez que se instalen las UPSs. Asimismo, la presencia del banco de compensación no implicaría una magnificación de las armónicas.

5. REQUERIMIENTOS PARA LAS UPSs

Como próximo paso dentro del marco del proyecto, se realizó un pormenorizado estudio de los sistemas de UPSs desde un punto de vista conceptual.

En ese sentido, tomando como base normativa [5] y bibliografía [6] de referencia se abordaron, entre otros, los siguientes puntos:

- **Tipo de UPSs:** En los sistemas “on-line”, la carga se encuentra permanentemente alimentada por el inversor y no existe tiempo de transferencia alguno.

En cambio, en aquellas “off-line”, el inversor se encuentra sin operar en el modo de operación

normal y entra en servicio ante la presencia de un evento. En este caso, un aspecto muy importante a considerar es el tiempo de transferencia.

Dado que se procura asegurar el funcionamiento continuo de las cargas, se optó por el tipo “on-line”.

- **Autonomía:** En su conjunto, las UPSs deben ser capaces de alimentar a la totalidad de cargas sensibles durante un tiempo superior a los 3 minutos. Este requerimiento está basado en los registros realizados al comienzo del proyecto, los cuales fueron descritos en el apartado 2.

- **Eficiencia:** Dado que trabajarán de manera “on-line”, la eficiencia de las UPSs debe ser tal que las pérdidas se mantengan acotadas. Sería apropiado que ésta sea superior al 90 %.

- **Factor de potencia a la entrada:** Es altamente deseable que el factor de potencia sea lo más cercano posible a la unidad, a fin de compensar la energía reactiva de las cargas que alimentan. De este modo cumplirían una doble función.

- **Inyección de armónicas hacia la carga y la red:** Por medio de mediciones, se comprobó que la planta no posee inconvenientes en materia de armónicas previo a la instalación de las UPSs. Por lo tanto, éstas deben proveer una tensión de salida con bajo contenido armónico ($THD_{inversor} < 5\%$) y, a su vez, no deben contaminar la red aguas-arriba ($THD_{rectificador} < 5\%$).

- **Arranque de las cargas en modo “by-pass”:** El tipo de carga a alimentar presenta una corriente de arranque varias veces superior a la nominal. Procurando no sobredimensionar la potencia las UPSs, es deseable que éstas permitan efectuar el arranque de las cargas en modo “by-pass”, esto es directamente desde la red.

- **Regulación de tensión:** Las UPSs a instalar deberán ser capaces de regular la tensión de salida un $\pm 15\%$.

- **Sobrecargas transitorias:** Deben permitir, además, sólo durante períodos acotados de tiempo, una potencia superior a la nominal.

- **Confiabilidad:** Habida cuenta que se encontrarán alimentando cargas críticas en el sistema de producción de la industria, las UPSs deberán garantizar un correcto funcionamiento. En general, un circuito más simple implica una mayor confiabilidad, y lo mismo ocurre con los sistemas de control asociados.

A partir de esto, se preparó un documento detallando las especificaciones básicas a cumplir por las UPSs. Tal documento fue distribuido entre los distintos oferentes a fin de que cada uno indique el cumplimiento o no, por parte de sus

productos, de las especificaciones solicitadas y aclarar los puntos que así lo requieran.

Una vez que se contó con las respectivas devoluciones se llevó a cabo una comparación de lo ofrecido por los distintos fabricantes, desde un punto de vista netamente técnico.

Claro está, este análisis técnico se complementó con otras cuestiones tales como precio, servicio de mantenimiento y garantía. Particularmente, con respecto a esta última, se solicitó la garantía del producto ofrecido por un período de 10 años.

Luego de un detallado análisis, la Compañía optó por uno de los oferentes.

6. IMPLEMENTACIÓN DE LA SOLUCIÓN

Una vez seleccionado el oferente, el próximo paso fue la implementación del proyecto.

Teniendo en cuenta los resultados de las mediciones de perfiles de carga de calderas y compresores, descritas en el apartado 3, así como también los módulos de UPSs ofrecidos por el proveedor, se consensuó lo siguiente:

Instalar cuatro módulos de UPSs de 400 kVA cada uno, lo que representa 1,6 MVA en su conjunto, conforme a lo indicado en el esquema unifilar simplificado de la Fig. 5 (se incluye sólo la zona de interés). Es decir, por un lado, con la UPS1 alimentar las calderas 1 y 4, con la UPS2 alimentar las calderas 2 y 3, y con la UPS3 y la UPS4 operando en paralelo alimentar los 6 compresores (más algunas secadoras).

En su totalidad, el sistema cuenta con 352 baterías.

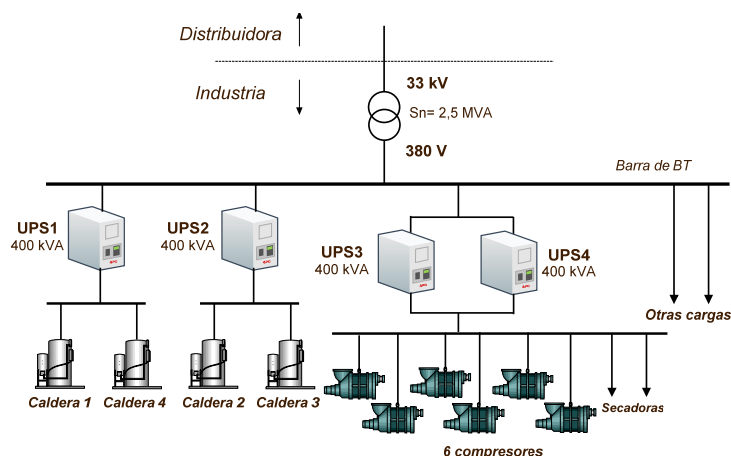


Fig. 5. Topología de la solución implementada.

Como puede observarse, el porte de las 4 UPSs es tal que en la actualidad se encuentran sobredimensionadas. En efecto, la UPS1 cuenta con un **FU** (Factor de **U**talización) de 41 %, la UPS2 con un **FU** de 53 %, y las UPS3 y UPS4 con un **FU** de 48 %.

A plena carga, la autonomía de todas ellas garantizada por el fabricante es de 5 minutos, con lo que se supera lo solicitado oportunamente.

El proyecto incluyó también la inclusión de dos grandes equipos de aire acondicionado con el objeto de refrigerar no sólo a las UPSs, sino también a las baterías.

También se reemplazaron antiguos tableros vinculados a las calderas y los compresores.

La duración del proyecto fue de aproximadamente 1 año. En cuanto a la inversión total, ésta fue US\$ 750.000; mientras que los ahorros esperados son del orden de US\$ 500.000 por año. Por lo tanto el período de amortización es de esperar que sea acotado.

En la Fig. 6 se muestran unas fotografías del sistema implementado operando, el cual se puso en servicio en julio de 2015.



Fig. 6. Fotografías del sistema implementado.

El proyecto ha resultado de gran innovación a nivel mundial, por la potencia instalada de UPSs, aplicada a grandes calderas y compresores.

7. RESULTADOS OBTENIDOS

En los primeros 300 días desde su puesta en marcha, los ahorros estimados recuperaron 42 % de la inversión realizada.

Adicionalmente, el factor de potencia de la planta aumentó de 0,92 a 0,98, lo cual redujo considerablemente las penalidades por inyección de energía reactiva hacia la red de suministro.

Durante distintos incidentes ocurridos, la autonomía general del sistema fue de 10 minutos a plena carga.

8. CONCLUSIONES / RECOMENDACIONES

- Los huecos representan una perturbación particularmente nociva para el sector industrial, dado que afectan los procesos de producción ocasionando así importantes pérdidas económicas.
- Los esfuerzos realizados por las empresas prestatarias del servicio eléctrico procurando mitigar la presencia de huecos pueden no ser suficientes para satisfacer los requerimientos de ciertos tipos de industrias.
- El hecho de que las cargas sensibles a huecos sean de vital importancia en el proceso de producción de determinada industria, puede ser un disparador para que los propios Grandes Usuarios actúen sobre sus redes internas a fin de disminuir su vulnerabilidad a esta perturbación.
- En casos en los que la presencia de huecos genera grandes pérdidas económicas, la inversión requerida para afrontar un proyecto de esta naturaleza puede recuperarse en el corto/mediano plazo.

9. REFERENCIAS

- [1]. <http://blog.schneider-electric.com/power-management-metering-monitoring-power-quality/2015/06/11/power-quality-measuring-to-manage/>.
- [2]. Ente Nacional Regulador de la Electricidad (ENRE). Anexo a la Resolución ENRE 184/00. Base Metodológica para el Control de la Calidad del Producto Técnico. Etapa 2. 2000.
- [3]. IEC 61000-2-4. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-4: Environment - Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances.
- [4]. IEC 61000-3-4. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-4: Limits - Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A.
- [5]. IEC 62040-3: Uninterruptible power systems (UPS) - Part 3: Method of specifying the performance and test requirements.
- [6]. Ali Emadi, Abdolhosein Nasiri and Stoyan B. Bekiarov. "Uninterruptible Power Supplies and Active Filters". CRC PRESS. 2005.