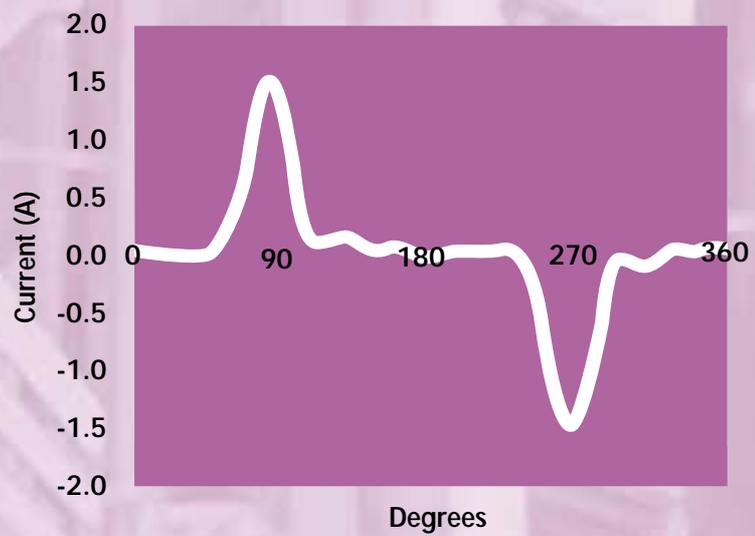
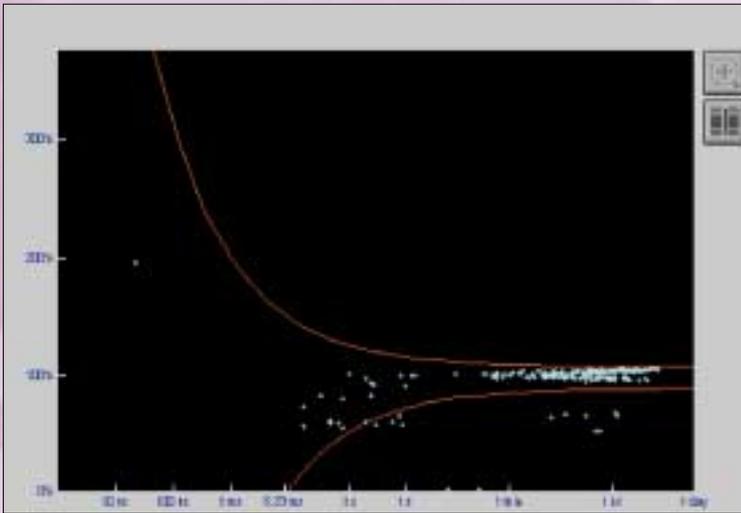


Guía de Calidad de la Energía Eléctrica



Introducción

1.1



Introducción

Introducción a la Calidad de la Energía Eléctrica

David Chapman
Copper Development Association UK
Marzo 2001

(Versión 0b Noviembre 2001)

European Copper Institute (ECI)

El European Copper Institute (ECI) es una joint venture formada por ICA (International Copper Association) y los miembros del IWCC (International Wrought Copper Council). Por medio de sus socios, ECI actúa en nombre de los principales productores mundiales de cobre y fabricantes europeos promoviendo la utilización del cobre en Europa. Fundado en Enero de 1996, ECI está respaldado por una red de diez Centros de Promoción del Cobre en Alemania, Benelux, Escandinavia, España, Francia, Grecia, Hungría, Italia, Polonia y Reino Unido. ECI continúa los esfuerzos inicialmente emprendidos por la Copper Products Development Association, fundada en 1959, e INCRA (International Copper Research Association) fundada en 1961.

Centro Español de Información del Cobre (CEDIC)

CEDIC es una asociación privada sin fines de lucro que integra la práctica totalidad de las empresas fundidoras-refinadoras y semitransformadoras de cobre y de sus aleaciones en España. Su objetivo es promover el uso correcto y eficaz del cobre y sus aleaciones en los distintos subsectores de aplicación, mediante la compilación, producción y difusión de información.

Reconocimientos

Este proyecto ha sido llevado a cabo con el apoyo de la Comunidad Europea y la International Copper Association, Ltd

Responsabilidad

El contenido de este proyecto no refleja necesariamente la posición de la Comunidad Europea, y no supone ninguna responsabilidad por parte de la Comunidad Europea.

El European Copper Institute, la Copper Development Association UK y el Centro Español de Información del Cobre (CEDIC) rechazan toda responsabilidad por cualquier daño directo, indirecto, consecuente o incidental que pueda resultar del uso de la información, de la incapacidad para el uso de la información o de los datos contenidos en esta publicación.

Copyright© European Copper Institute y Copper Development Association UK.

Se autoriza la reproducción siempre y cuando ésta sea íntegra y se mencione la fuente.



Princesa, 79
28008 Madrid
Tel.: 91 544 84 51
Fax: 91 544 88 84



European Copper Institute
168 Avenue de Tervueren
B-1150 Brussels
Belgium

Tel: 00 32 2 777 70 70
Fax: 00 32 2 777 70 79
Email: eci@eurocopper.org
Website: www.eurocopper.org

Introducción

La Calidad de la Energía

Probablemente, en la actualidad, la materia prima básica más utilizada en las actividades industriales y comerciales del mundo desarrollado es la energía eléctrica. Se trata de un producto muy peculiar, pues debe estar a disposición de los usuarios de una manera permanente y, sin embargo, no es posible su almacenamiento previo en cantidades importantes, por lo que debe fabricarse según se va necesitando. Por otro lado, no puede controlarse su calidad antes de estar en disposición de ser utilizado. De hecho, constituye un ejemplo representativo de la filosofía "Just in Time" (Justo a Tiempo) según la cual los materiales requeridos en una cadena de producción deben ser entregados por un proveedor de garantizada idoneidad justo en el momento preciso en que deban integrarse en el proceso de producción, sin que sea posible efectuar ensayos de recepción previos a su incorporación al producto. Para que este procedimiento tenga éxito, es necesaria una definición muy precisa de las características que han de presentar estos componentes, una confianza absoluta de que el proveedor está en situación de producir y suministrar el material de acuerdo con las especificaciones requeridas en el momento preciso y la seguridad de que el producto está dentro de los límites de tolerancia exigidos.

En el caso de la energía eléctrica, la situación es similar: debe garantizarse la continuidad del suministro y deben controlarse las tolerancias o límites de variación de sus características de tal manera que no creen problemas al usuario. Por otro lado se trata de un producto que presenta peculiaridades muy especiales: la electricidad se genera lejos de los lugares de consumo; se mezcla en la red de transporte y distribución con más energía procedente de otros centros de generación y llega a los puntos de consumo después de pasar a través de varios transformadores y recorrer muchos kilómetros de líneas aéreas y, posiblemente, algunos kilómetros más de redes subterráneas. Donde esta industria es de propiedad privada, la responsabilidad de la gestión y mantenimiento de las redes de transporte y distribución puede depender de diferentes empresas y organismos. Controlar la calidad de la energía entregada a los usuarios no es una tarea fácil y no existe un procedimiento que permita retirar del sistema la energía que no cumpla las especificaciones exigidas o que ésta pueda ser devuelta por el usuario al proveedor.

Desde el punto de vista de los usuarios, el problema es todavía más difícil. Existen estadísticas sobre la calidad de la energía suministrada, pero el nivel de calidad considerado aceptable por una empresa suministradora (o por el organismo regulador de esta actividad) puede ser diferente del requerido y, posiblemente, del deseado por el usuario. Las deficiencias más evidentes en el suministro de energía eléctrica son su corte o interrupción (cuya duración puede estar comprendida desde pocos segundos a varias horas) y las oscilaciones o bajadas de tensión, también denominados huecos de tensión, en las que ésta desciende, en algunos momentos, a valores inferiores a los considerados normales. Evidentemente, las interrupciones de suministro durante largos periodos de tiempo son un problema para todos los usuarios afectados, pero otras muchas aplicaciones son muy sensibles incluso a interrupciones muy breves.

Algunos ejemplos de estas aplicaciones son:

- ◆ Actividades que se desarrollan mediante procesos continuos, en las que breves interrupciones pueden alterar los ritmos de las cadenas de producción, acumulando grandes cantidades de productos semielaborados desechables. Un ejemplo podría ser la industria del papel en la que las operaciones de limpieza de las máquinas son largas y costosas.
- ◆ Los procesos de producción por etapas, en las que un corte o interrupción de los mismos puede inutilizar el resultado de las operaciones anteriores. Un ejemplo de este tipo es la fabricación de semiconductores, en la que la producción de una oblea requiere docenas de etapas que duran varios días y en las que una interrupción en una fase intermedia resulta catastrófica.
- ◆ El proceso de datos, donde el valor de la transacción a efectuar es alto, pero su coste es reducido, como es el caso de las operaciones en los mercados de valores o en el cambio de divisas. La interrupción de la posibilidad de operar en un momento determinado puede provocar pérdidas cuyo valor puede exceder muchas veces el coste del proceso. En un caso reciente se exigió una compensación de quince millones de euros por una interrupción de veinte minutos en el suministro de energía eléctrica.

*Hay que
conocer la
fiabilidad del
suministro
y se debe
comprender la
adaptabilidad
del proceso a
las variaciones
del mismo.*

Se trata de ejemplos de industrias muy sensibles, pero es sorprendente comprobar cuantos procesos aparentemente banales presentan unas exigencias en el suministro de energía críticas. Podrían citarse como ejemplo grandes superficies comerciales con puntos de venta y equipos de control de existencias informatizados y plantas de producción con control distribuido.

Entonces, ¿qué se quiere decir cuando se alude a la "Calidad de la Energía"? Una fuente de suministro de energía perfecta sería aquella que estuviese siempre disponible, dentro de las tolerancias de tensión y frecuencia exigibles y presentase un perfil de onda perfectamente senoidal libre de perturbaciones. Cuánta desviación de esta perfección está dispuesto a tolerar el usuario dependerá de las aplicaciones, del tipo de equipos que tenga instalados y de la percepción de sus propias necesidades.

Los defectos de la calidad de la energía - las desviaciones de aquella perfección - puede clasificarse en cinco tipos:

Distorsión armónica	(sección 3)
Cortes en el suministro	(sección 4)
Oscilaciones de la tensión	(sección 5)
Caídas y picos de tensión	(sección 5)
Fenómenos transitorios	(secciones 5 y 6)

Cada uno de estos problemas de calidad de la energía tiene causas diferentes. Unos son el resultado de infraestructuras comunes a varios usuarios. Por ejemplo, un fallo en la red puede ocasionar una caída de tensión que afectará a varios utilizadores y cuanto mayor sea el nivel de la avería mayor será el número de clientes afectados, o un problema en la instalación de un abonado puede provocar un fenómeno transitorio que afecte a otros usuarios del mismo subsistema. Otros problemas, como los armónicos, se generan en la propia instalación del usuario y pueden propagarse, o no, a la red de distribución y afectar a otros clientes. Los problemas de distorsión armónica se pueden resolver mediante una combinación de adecuados procedimientos de diseño y el empleo de equipos de eliminación o reducción de armónicos de eficacia probada.

Las empresas suministradoras de energía eléctrica argumentan que los usuarios con necesidades críticas deberían asumir por si mismos los sobrecostes necesarios para garantizar la calidad del suministro, en lugar de pretender que el suministrador proporcione una elevada calidad en el suministro de energía a todos los abonados en todos los puntos de la red. Este suministro de energía de calidad garantizada exigiría una inversión muy importante en equipos adicionales en la red de distribución para beneficiar a un número relativamente reducido de usuarios (en términos numéricos, no de consumo de potencia), por lo que resultaría antieconómico. También se puede dudar de su factibilidad técnica en el actual marco social y legal en el que cualquier usuario está autorizado a estar conectado a la red y los proveedores de otros servicios públicos tienen derecho a abrir zanjas en las vías públicas con el consiguiente riesgo de dañar los cables de la red de distribución de energía eléctrica. Las condiciones meteorológicas, tales como los vientos fuertes o el granizo, producen con frecuencia daños a las líneas de tendido aéreo, cuya reparación en estas condiciones, resulta difícil y requiere un tiempo. Debería ser, por lo tanto, responsabilidad del usuario adoptar las medidas adecuadas para garantizar que la calidad de la energía suministrada a su proceso de producción es suficientemente buena, con la clara implicación de que este nivel de calidad tendría que ser probablemente superior al de la energía suministrada a la planta por la empresa suministradora.

Existen varias soluciones técnicas para eliminar o reducir los efectos de los problemas de la calidad de la energía suministrada que constituyen un campo de innovación y desarrollo muy activo. Como tales, los usuarios necesitan conocer la gama de soluciones disponibles y sus posibilidades y costes relativos. En otras partes de esta Guía se tratan en detalle diferentes problemas concretos y la gama de soluciones disponibles.

Los usuarios se enfrentan durante el proyecto de la instalación con la necesidad de adoptar decisiones de inversión sobre el tipo y cantidad del equipo adicional necesario para lograr la calidad del suministro requerida. Desgraciadamente, en esta etapa del diseño se carece de algunos datos importantes, por ejemplo, se desconoce la amplitud y severidad de los problemas de calidad de la energía que, probablemente, se presenten en un lugar determinado. Debido a la escasez de la

Un suministro eléctrico perfecto sería aquél que siempre está disponible, con las variaciones de tensión y frecuencia dentro de las tolerancias admisibles, y con una forma de onda sinusoidal libre de perturbaciones.

La Calidad de la Energía. Introducción

información estadística publicada, a los usuarios les resulta difícil cuantificar el coste de los fallos y, por tanto, justificar el coste de la inversión en las medidas preventivas. Este tema se trata más detalladamente en la sección 2. En el Reino Unido, por ejemplo, los únicos datos disponibles proporcionan el número y duración media de las interrupciones de suministro superiores a un minuto, clasificadas por proveedores. Por término medio, en 1998/99, era probable que cada usuario sufriese interrupciones que acumulasen un total de 100 minutos cada quince meses, lo que representa una disponibilidad del 99.98%. Lamentablemente, es ese 0,02% el que origina los problemas. El rendimiento declarado por la mayoría de las empresas suministradoras estaba próximo a su mejor dato histórico, correspondiendo el mejor y peor rendimiento al 50% y al 200% de la media, respectivamente, de modo que, probablemente, la situación actual está cercana al mejor rendimiento que se puede alcanzar desde un punto de vista económico. Debe recordarse que estas cifras se refieren únicamente a interrupciones superiores a un minuto, y que hay un número desconocido, pero considerable, de interrupciones dentro del segundo margen de 0,1 a 5 segundos. Los problemas causados por uno de estos cortes de suministro pueden resultar tan costosos como una interrupción de una hora de duración.

El debate sobre las bajadas o huecos de tensión y las interrupciones del suministro de corta duración pone de manifiesto la diferencia de puntos de vista del suministrador y del usuario. Por definición, se trata de eventos muy breves, cuya existencia es difícil de probar a menos que se encuentre acoplado permanentemente a la red un monitor de control. Todavía es más difícil atribuir un valor económico a las pérdidas provocadas por un suceso determinado. La industria eléctrica tiende a valorar el coste de una interrupción del suministro en función del coste de la electricidad que ha dejado de facturar como consecuencia de dicha interrupción, mientras que el usuario lo valora de acuerdo con las pérdidas que le ha provocado la interrupción de su producción. La energía eléctrica es relativamente barata y las interrupciones del suministro son relativamente breves, mientras que las pérdidas en la producción pueden alcanzar valores muy elevados (como en el caso de la fabricación de semiconductores que se ha citado) o un periodo de prolongado de paralización de la actividad para efectuar la limpieza de la maquinaria previa a la reanudación de la producción (como en el caso de la industria papelera). Por lo tanto, cada una de las dos partes tienen puntos de vista muy diferentes a la hora de evaluar la importancia de las consecuencias de las variaciones de tensión o de los cortes de suministro y la justificación del nivel de inversión necesario en equipos correctores.

Normalmente se piensa que las interrupciones prolongadas - cortes de corriente - proceden de la red de alimentación y, por tanto, son responsabilidad del proveedor, pero también pueden tener su origen en fallos del equipo, conductores y conexiones de la instalación receptora. Un diseño cuidadoso con el empleo de técnicas de alta fiabilidad puede reducir el riesgo de daños consecuencia de aquellas interrupciones. El propósito sería evidenciar los puntos débiles de la instalación y eliminarlos mediante la instalación de equipos redundantes o fuentes de suministro alternativas de manera que el funcionamiento de la instalación pueda continuar a pesar de que se produzca un determinado fallo. Los sistemas así diseñados son más fáciles de mantener y por lo tanto su funcionamiento es mejor. Es importante que los protocolos de mantenimiento se desarrollen en una etapa tan temprana como sea posible teniendo en cuenta el concepto de fiabilidad en el desarrollo del diseño. Son elementos esenciales de un sistema de elevada fiabilidad la presencia de generadores de emergencia y los Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (SAI o UPS) para compensar los cortes de energía cortos o prolongados. En la sección 4 se trata del diseño de equipos de elevada fiabilidad.

Mientras que la mayoría de los cortes de suministro o de las bajadas de tensión se originan en el sistema de transmisión y distribución y son responsabilidad de la empresa suministradora, los problemas provocados por los armónicos son casi siempre procedentes de la instalación receptora y son responsabilidad del usuario. Son las corrientes armónicas las que provocan problemas en las instalaciones, pues cuando estas corrientes pasan a través de la impedancia de alimentación en el punto de acoplamiento común, se genera una tensión armónica. Esta tensión distorsionada, o al menos alguno de sus componentes, penetra en el sistema y se combina con el fondo de distorsión armónica presente en cualquier sistema de transmisión (debida, por ejemplo, a la no linealidad de los transformadores). Mediante la limitación de las corrientes armónicas, los usuarios pueden lograr que la distorsión armónica de tensión en la fuente de alimentación se mantenga dentro de unos límites aceptables. La mayoría de los límites nacionales se han fijado a partir de la norma

*Es
responsabilidad
del consumidor
tomar las
medidas
oportunas para
asegurarse de
que la calidad
de la energía
suministrada a
su proceso es
suficientemente
buena.*

para la industria eléctrica del Reino Unido (actualmente G5/4) que se publicó por primera vez como G/1. Esta norma de diseño estableció en su momento unos límites arbitrarios de distorsión de la tensión, que han demostrado, a lo largo de los últimos 40 años, ser en gran parte correctos. Determinar la fuente de distorsión armónica puede resultar difícil y esto, a menudo, provoca que el usuario atribuya al suministrador la causa del problema. En realidad, es poco frecuente que los problemas de armónicos tengan su origen en causas externas a la instalación receptora. El origen, casi siempre, está en el equipo instalado y en un diseño de la instalación inadecuado. La sección 3 trata en detalle las causas de los problemas provocados por los armónicos y sus soluciones.

Las perturbaciones transitorias son fenómenos de alta frecuencia, de duración inferior a un ciclo de la frecuencia de alimentación (0,02 s). Entre sus causas más frecuentes están las maniobras de conmutación, los impactos de los rayos en la red aérea y la conexión de grandes cargas reactivas en la instalación del usuario o en instalaciones ubicadas en el mismo circuito. Los fenómenos transitorios pueden alcanzar valores de miles de voltios y por ello producir daños graves a la instalación y a los equipos conectados a ella. Las compañías eléctricas y las empresas de telecomunicación se esfuerzan en procurar que sus canalizaciones no introduzcan transitorios perjudiciales en las instalaciones de los usuarios. No obstante, algunos transitorios menores, y por tanto no perjudiciales para la integridad de los equipos, pueden ocasionar problemas graves en los equipos informáticos al generar datos falsos. La generación y los efectos de los transitorios se reducen en gran parte y se mejora la eficacia de las técnicas de supresión instalando un buen sistema integrado de tomas de tierra. Dicho sistema de puesta a tierra deberá tener múltiples conexiones a tierra y múltiples derivaciones a masa desde cualquier punto de la instalación, para asegurar una elevada integración y una reducida impedancia para una amplia gama de frecuencias. Los sistemas de puesta a tierra se tratan en la sección 6.

Los problemas de calidad de la energía hacen que los proyectistas de las instalaciones deban plantearse muchas preguntas, de las cuales quizá la más importante sea ¿cuándo lo bueno es bastante bueno?. Esta pregunta es imposible de contestar. Mientras que es relativamente sencillo cuantificar el comportamiento de una determinada pieza de un equipo ante una bajada de tensión, determinar la probable incidencia de dicha baja de tensión en un punto determinado del sistema de alimentación es bastante más difícil, ya que cambiará con el tiempo cuando se añadan nuevos consumidores o se sustituyan elementos conectados a la red. Es muy difícil reunir datos significativos sobre la sensibilidad de los equipos a los efectos de las distorsiones armónicas de tensión e incluso sobre la propia corriente de distorsión armónica ocasionada por el equipo. La auténtica cuestión que se plantea es la de la compatibilidad entre el equipo y la red de suministro.

Existen ciertas normas internacionales que establecen los límites de variación de tensión y la tasa de distorsión armónica, por debajo de los cuales los equipos deberían trabajar sin problemas. Análogamente, también hay normas que fijan los límites de distorsión armónica de tensión de la red de suministro. Idealmente, debería existir una franja de salvaguardia - margen de seguridad - entre los dos límites, pero debido a que es difícil controlar de forma continua la calidad de la energía recibida del proveedor, los límites del suministro se establecen en términos estadísticos y no como límites estrictos.

Garantizar una buena Calidad de la Energía requiere un buen diseño previo, disponer de unos equipos de corrección adecuados, una estrecha cooperación con la empresa suministradora, un frecuente control de la instalación y un buen mantenimiento. En otras palabras, requiere un enfoque global y un buen conocimiento de los principios y procedimientos para la mejora de la calidad de la energía. El propósito de esta Guía es proporcionar este conocimiento.

Un diseño cuidadoso de la instalación con el empleo de técnicas de elevada adaptabilidad, puede minimizar los efectos de fallos sobre el equipo, los conductores y los componentes instalados.

Red de Colaboradores

Copper Benelux

168 Avenue de Tervueren
B-1150 Brussels
Belgium

Tel: 00 32 2 777 7090
Fax: 00 32 2 777 7099
Email: mail@copperbenelux.org
Web: www.copperbenelux.org

Contact: Mr B Dôme

Copper Development Association

Verulam Industrial Estate
224 London Road
St Albans AL1 1AQ
United Kingdom

Tel: 00 44 1727 731205
Fax: 00 44 1727 731216
Email: copperdev@compuserve.com
Webs: www.cda.org.uk & www.brass.org

Contact: Mrs A Vessey

Deutsches Kupferinstitut e.V

Am Bonnheshof 5
D-40474 Duesseldorf
Germany

Tel: 00 49 211 4796 323
Fax: 00 49 211 4796 310
Email: sfassbinder@kupferinstitut.de
Web: www.kupferinstitut.de

Contact: Mr S Fassbinder

ECD Services

Via Cardinal Maffi 21
I-27100 Pavia
Italy

Tel: 00 39 0382 538934
Fax: 00 39 0382 308028
Email: info@ecd.it
Web: www.ecd.it

Contact: Dr A Baggini

European Copper Institute

168 Avenue de Tervueren
B-1150 Brussels
Belgium

Tel: 00 32 2 777 70 70
Fax: 00 32 2 777 70 79
Email: eci@eurocopper.org
Web: www.eurocopper.org

Contact: Mr H De Keulenaer

Hevrox

Schoebroekstraat 62
B-3583 Beringen
Belgium

Tel: 00 32 11 454 420
Fax: 00 32 11 454 423
Email: info@hevrox.be

Contact: Mr I Hendrikx

HTW

Goebenstrasse 40
D-66117 Saarbruecken
Germany

Tel: 00 49 681 5867 279
Fax: 00 49 681 5867 302
Email: wlang@htw-saarland.de

Contact: Prof Dr W Langguth

Istituto Italiano del Rame

Via Corradino d'Ascanio 4
I-20142 Milano
Italy

Tel: 00 39 02 89301330
Fax: 00 39 02 89301513
Email: ist-rame@wirednet.it
Web: www.iir.it

Contact: Mr V Loconsolo

KU Leuven

Kasteelpark Arenberg 10
B-3001 Leuven-Heverlee
Belgium

Tel: 00 32 16 32 10 20
Fax: 00 32 16 32 19 85
Email: ronnie.belmans@esat.kuleuven.ac.be

Contact: Prof Dr R Belmans

Polish Copper Promotion Centre SA

Pl.1 Maja 1-2
PL-50-136 Wroclaw
Poland

Tel: 00 48 71 78 12 502
Fax: 00 48 71 78 12 504
Email: copperpl@wroclaw.top.pl

Contact: Mr P Jurasz

TU Bergamo

Viale G Marconi 5
I-24044 Dalmine (BG)
Italy

Tel: 00 39 035 27 73 07
Fax: 00 39 035 56 27 79
Email: graziana@unibg.it

Contact: Prof R Colombi

TU Wroclaw

Wybrzeze Wyspianskiego 27
PL-50-370 Wroclaw
Poland

Tel: 00 48 71 32 80 192
Fax: 00 48 71 32 03 596
Email: i8@elektryk.ie.pwr.wroc.pl

Contact: Prof Dr H Markiewicz



David Chapman

 Copper Development Association

Copper Development Association
Verulam Industrial Estate
224 London Road
St Albans AL1 1AQ
United Kingdom

Tel: 00 44 1727 731200
Fax: 00 44 1727 731216
Email: copperdev@compuserve.com
Websites: www.cda.org.uk
www.brass.org

 **CEDIC**
CENTRO ESPAÑOL DE
INFORMACIÓN DEL COBRE

Princesa, 79
28008 Madrid
Tel.: 91 544 84 51
Fax: 91 544 88 84

 **COPPER**
[EUROPE]

European Copper Institute
168 Avenue de Tervueren
B-1150 Brussels
Belgium

Tel: 00 32 2 777 70 70
Fax: 00 32 2 777 70 79
Email: eci@eurocopper.org
Website: www.eurocopper.org