

# MELHORIA DA PRODUTIVIDADE ATRAVÉS DO USO DE NOVAS TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

**Joaquim B. Delgado <sup>\*</sup>, Aníbal Traça de Almeida <sup>\*\*</sup> e Pedro A. Saraiva <sup>\*\*\*</sup>**

D.E.E. da E.S.T.V. do Instituto Superior Politécnico de Viseu  
Campus Politécnico - Repeses - 3504-510 Viseu - PORTUGAL  
232 480522 Fax.: 323 424651

## Sumário

A qualidade da energia eléctrica constitui na actualidade um factor crucial para a competitividade de praticamente todas as actividades económicas. Esta comunicação analisa um tema muito específico neste âmbito, que é o da apresentação das principais tecnologias utilizadas para a minimização das consequências dos micro-cortes sobre processos críticos. São analisados os sistemas armazenadores de energia baseados em: 1. Bobinas Supercondutoras (SMES), 2. Baterias Electromecânicas (Flywheels) e 3. Super Condensadores, bem como o seu papel na implementação de equipamentos dotados de maior grau de imunidade aos fenómenos adversos relacionados com as perturbações na qualidade da energia. Esta característica também designada por "*Ride Through Capability*", consiste em dotar as instalações e a aparelhagem com capacidades para resistir a perturbações na alimentação de energia, que outras sem essas capacidades não suportariam. São ainda caracterizados os impactos e as vantagens comparativas de cada uma das tecnologias acima referidas, bem como realçado o seu contributo para a melhoria da produtividade em todos os sectores.

## Palavras Chave

*Qualidade da energia eléctrica, micro-cortes, "Ride Through Capability", armazenamento de energia, bobinas supercondutoras, baterias electromecânicas, super condensadores e produtividade industrial.*

## Nota Prévia

Quando falamos, ao longo desta comunicação, em qualidade do produto energia eléctrica, estamos a referir-nos as duas das suas dimensões:

- *a qualidade na onda*, caracterizada pela existência de um produto energia onde todos os parâmetros característicos estejam muito próximos dos valores nominais que o definem (frequência, - sistema de tensões polifásico equilibrado e simétrico e - formas de onda sinusoidais) e

- *a qualidade no fornecimento* (ou fiabilidade) relacionada com a ausência de interrupções no fornecimento, que podem ser de dois tipos: - longas e geralmente designadas por cortes ou, - de muito curta duração e designadas por micro-cortes (com duração de apenas uma fracção de segundo).

## 1. INTRODUÇÃO

O sector da energia eléctrica encontra-se, sobretudo nas duas últimas décadas, a atravessar um período de profundas mudanças devido a um número considerável de factores: 1. a alteração da natureza das cargas consumidoras e da forma como a energia eléctrica é hoje utilizada; 2. a liberalização em curso a nível mundial, 3. a proliferação de auto-produtores, 4. o aparecimento de novas tecnologias de geração e 5. o peso crescente das questões ambientais associadas às tecnologias de geração; têm provocado grandes alterações no modo de funcionamento do sector.

(\*) - Equip. Professor Adjunto no D.E.E. da E.S.T.V..  
E-mail: Jdelgado@elect.estv.ipv.pt

(\*\*) - Professor Catedrático no D.E.E.C. da F.C.T.U.C..  
E-mail: adealmeida@isr.uc.pt

(\*\*\*) - Professor Auxiliar do D.E.Q. da F.C.T.U.C..  
E-mail: eq1pas@eq.uc.pt

## 2. ALTERAÇÃO DA NATUREZA DAS CARGAS

Grande parte das cargas actuais (e em particular os sistemas de controlo e as tecnologias de processamento de informação) são baseados em dispositivos electrónicos sensíveis: diodos, transístores, I.C., microprocessadores, triacs, IGBT, etc. Todos estes elementos vieram permitir o uso da electricidade de uma forma muito mais eficiente e o controlo mais preciso sobre os processos, mas simultaneamente trouxeram também perturbações muito significativas à qualidade da energia. Devido à sua não linearidade, os novos dispositivos são simultaneamente dos principais factores causadores de muitos dos problemas na qualidade da energia na actualidade e as maiores vítimas dessa falta de qualidade, pois são altamente sensíveis às variações dos parâmetros característicos (e da qualidade!) da energia que recebem. Perturbações mesmo muito pequenas, da ordem de alguns milisegundos, podem provocar a falha global dos sistemas onde tais dispositivos se encontram inseridos. Este cenário de proliferação tem vindo a agravar-se continuamente, pois cada vez mais energia é consumida por cargas não lineares, segundo estimativas recentemente divulgadas [1], em 2003 cerca de 60 % de toda a energia eléctrica produzida será consumida por cargas não lineares. Em alguns sectores, como o dos serviços, este valor é já muito próximo dos 100 %.

## 3. MAIOR EXIGÊNCIA DE QUALIDADE NOS PROCESSOS ACTUAIS

Hoje, mais do que nunca, devido à grande concorrência a nível mundial, à maior sensibilidade dos equipamentos e às margens de lucro marginais associadas à laboração de muitos sectores, a existência de *energia eléctrica com qualidade constitui um factor crucial para a competitividade* e sobrevivência dos mesmos. Os sectores mais críticos a este respeito são os das indústrias de processo contínuo e, as Tecnologias de Informação (Correctoras, Bolsa, Web-sites, Centros de Dados, Hospitais, Aeroportos, Instalações Militares, etc). Devido à sua natureza, estes são concebidos para laborar sem interrupções. Quando estas ocorrem é impossível atingir os níveis de produtividade esperados e projectados, podendo inviabilizar economicamente todo um projecto [2].

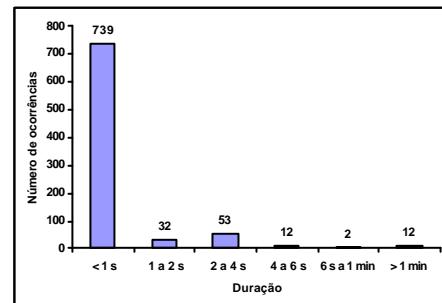
De entre as muitas medidas implementadas pelas empresas operadoras para fornecer maior qualidade, a interligação das redes e o uso de dispositivos de abertura e rearme automático desempenham hoje um papel muito importante, ao evitar os cortes de longa duração. Mas os tempos de comutação destes dispositivos e o elevado número de fenómenos imprevisíveis a que estão sujeitas as linhas de transporte e distribuição, não permitem evitar facilmente os designados cortes de muito curta duração (*ou micro-cortes*).

Segundo dados recentemente divulgados, cerca de 91% dos cortes de energia eléctrica que ocorrem nos USA têm uma duração inferior a 2 segundos, e 86 % duração inferior a 200 milisegundos [3]. A maioria destes cortes são quase imperceptíveis para certos tipos de receptores e inofensivos para muitos clientes, mas são suficientes (e os responsáveis!) para causar a paragem de Variadores Electrónicos de Velocidade [4], de Controladores Lógicos Programáveis (PLC), de redes de comunicação e de controladores de processos: em suma, para causar a paragem total de sistemas e processos fabris. Sendo este tipo de ocorrências responsável diariamente por prejuízos muito avultados devido a: 1. perdas em tempo de produção e de materiais em vias de fabrico, 2. Perdas de informação, 3. custos de reparação de equipamentos, re-arranque e sintonia de processos, 4. perigos acrescidos para a segurança humana e 5. acrescidos impactos negativos sobre o meio ambiente.

A título de exemplo, referimos que um só corte de energia de 5 segundos pode custar 2,4 milhões de dólares a uma empresa fabricante de semicondutores, valor este equivalente à sua factura energética anual[5].

Um levantamento efectuado recentemente em Portugal junto dos sectores industrial e dos serviços [6] permitiu, entre outros aspectos, evidenciar que o problema dos micro-cortes no nosso país é idêntico ao diagnosticado e divulgado pelo EPRI nos USA. A Figura 1 transmite uma ideia do tipo de interrupções actualmente evidenciadas também nas nossas redes de A.T..

Segundo dados disponibilizados por uma empresa Cimenteira (de processo contínuo), situada na Região Centro, alimentada a 60 kV e que efectua a monitorização e registo da qualidade da energia que recebe, no ano de 1998 evidenciou 9 cortes de energia longos e cerca de 113 micro-cortes (duração < 1 Seg.).



**Figura 1** - Distribuição do tipo de interrupções observadas nas redes actuais durante 6 anos (92-97).

Fonte: EPRI-ASC [3].

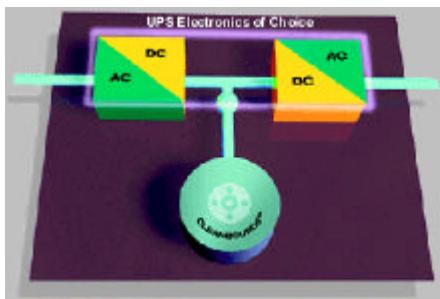
## 4. TECNOLOGIAS REPARADORAS

Para minorar as consequências dos problemas anteriormente referidos, têm vindo a ser tomadas medidas que se situam basicamente nos seguintes domínios:

- Desenvolvimento de normas que regulamentem o nível mínimo de qualidade do serviço que as redes devem oferecer (R.Q.S.),
- Desenvolvimento de normas que regulamentem os níveis máximos de perturbação admissível para as cargas (ex. IEEE 519) e,
- Desenvolvimento de normas que regulamentem o grau de imunidade mínima que os dispositivos que utilizam a energia devem possuir para poderem operar em ambientes mais "agressivos" sem comprometerem a sua funcionalidade.

Se por exemplo, for possível dotar os equipamentos e/ou instalações sensíveis (no sector industrial e dos serviços) de dispositivos armazenadores de energia eléctrica para suprir energia durante a ocorrência de micro-cortes, estarem a endereçar a resolução de cerca de 90 % das origens de potenciais problemas.

As tecnologias reparadoras a seguir descritas abordam este tipo de situações e caracterizam-se essencialmente pela sua capacidade para armazenar grandes quantidades de energia eléctrica em pouco volume e, por serem capazes de disponibilizar ou injectar essa energia de uma forma muito rápida nas redes.



**Figura 2** - Filosofia de injeção de energia.

A protecção facultada por estas tecnologias pode ainda ser efectuada ao nível de uma instalação completa ou grande número de clientes, ao nível de uma máquina específica ou apenas ao nível de um dado componente crítico.

#### 4.1 BOBINAS SUPERCONDUTORAS (SMES)

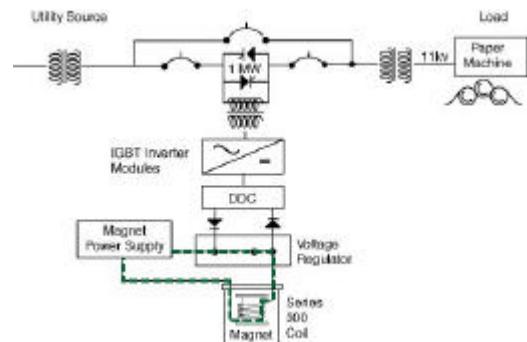
Nas bobinas supercondutoras (SMES-Superconducting Magnetic Energy Storage), a energia eléctrica é armazenada no campo magnético de uma indutância cujas espiras são constituídas por material supercondutor. Devido à sua baixíssima resistência eléctrica, a corrente pode fluir na bobina em circuito fechado durante muito tempo, permitindo manter energia armazenada, que pode ser utilizada a qualquer instante para suprir deficiências de curta duração em cargas expostas a fenómenos perturbadores.

A primeira empresa a disponibilizar esta tecnologia para aplicações práticas na área da reparação da

qualidade da energia foi a *American Superconductor* em 1988 [7]. Os diagramas com o princípio do funcionamento de uma SMES aplicada a uma instalação crítica são apresentados nas Figuras 3 e 4. Este decorre genericamente do seguinte modo:

##### • Situação normal de operação

Na ausência de micro-cortes, a energia flui directamente da empresa fornecedora para a instalação. A bobina do acumulador magnético supercondutor, é percorrida por uma corrente d.c. através do interruptor *Voltage Regulator*, que se encontra fechado. O Módulo *Magnet Power Supply* garante que a bobina se encontre sempre com a carga máxima, aumentando o valor da corrente d.c. nas espiras sempre que esta diminui devido a pequenas perdas.

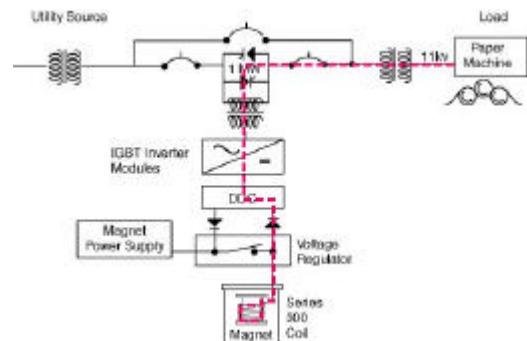


**Figura 3** - Situação normal de operação.

Fonte: AmSuper [7].

##### • Situação de reparação

Quando ocorre uma perturbação, subtenso ou micro-corte na alimentação em qualquer das fases que chega à instalação, a electrónica deste dispositivo abre instantaneamente o interruptor *Voltage Regulator* e o módulo Inversor (com IGBT) injecta energia na(s) fase(s) do sistema trifásico da rede para reparar o defeito surgido. A instalação fica assim a ser alimentada a partir da bobina durante o tempo de duração da perturbação. Uma vez superada a situação, a bobina volta a carregar-se e fica imediatamente disponível para uma nova actuação.



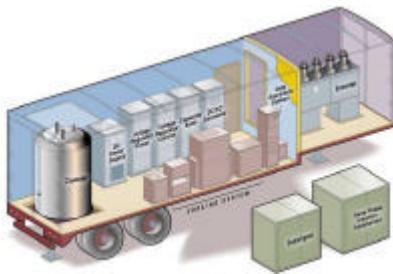
**Figura 4** - Situação de reparação.

Fonte: AmSuper [7].

##### Dados do sistema:

- Capacidade do acumulador : 2.7 MJoule,
- Tempo de resposta < 2 milisegundos.

Esta tecnologia permite efectuar a protecção integral de instalações fabris ou de grande número de clientes quando colocada apôs os P.T.s. Permitindo assim ultrapassar grande parte dos fenómenos perturbadores para as cargas críticas dos sectores mais sensíveis, tornando-os deste modo mais competitivos. Existem já bastantes unidades deste sistema a operar na Europa e USA para a protecção de unidades industriais de processo contínuo críticas e na estabilização de redes de T&D.



**Figura 5** - Forma como pode ser disponibilizada uma SMES. Fonte : AmSuper [7].

#### 4.2 BATERIAS ELECTROMECÂNICAS OU “FLYWHEELS”

As baterias electromecânicas são dispositivos que armazem energia sob a forma cinética, numa massa inercial (volante de inércia ou “Flywheel”) que roda a grande velocidade (Figura 6).



**Figura 6** - Aspecto interior de uma Bateria Electromecânica.

Fonte: PSW'99 Exhibition (Chicago).

A quantidade de energia cinética armazenada nessa massa é dada pela seguinte expressão :

$$E_C = \frac{1}{2} I w^2,$$

onde  $I$  é o momento de inércia do volante e  $w$  a sua velocidade de rotação ( $I = K M R^2$ , sendo  $K$  a constante de inércia do volante, que depende da sua geometria,  $M$  a sua massa e  $R$  o raio).

Para maximizar o armazenamento de energia, o volante necessita de rodar à máxima velocidade possível, pois a  $E_C$  do volante depende do quadrado da sua velocidade

de rotação. Este facto origina grandes esforços centrífugos, que podem levar à sua desintegração. Assim, a densidade e a resistência mecânica do material do volante são factores determinantes para a maximização da função de armazenamento para uma dada geometria.

Por forma a que estas baterias apresentem um rendimento elevado, o atrito do volante é minimizado através de dois sub-sistemas:

1. O volante é colocado a rodar sob o efeito de um conjunto de chumaceiras magnéticas, que pela acção de campos magnéticos repulsivos o fazem levitar, girando na ausência de contacto físico com qualquer elemento,

2. O volante é inserido num invólucro fechado, onde se faz vácuo.

Intrinsecamente integrado no volante (rotor) encontra-se um conjunto de pares de pólos magnéticos que interacutam com um conjunto de bobinas estatóricas acopladas ao invólucro. Este conjunto (situado no estator e no rotor) implementa uma máquina eléctrica de imanes permanentes, sistema motor/generator, que permite o fluxo de energia do exterior para a bateria (traduzindo-se num aumento da velocidade de rotação) ou em sentido contrário (provocando uma redução dessa velocidade).

Os rotores utilizados por alguns fabricantes são constituídos por aço de alta resistência, que permite alcançar velocidades de rotação de algumas dezenas de milhar de r.p.m. [8], mas encontram-se também já disponíveis sistemas que utilizam rotores de materiais compósitos que podem atingir velocidades de rotação da ordem das centenas de milhar de r.p.m. com densidades de energia muito superiores [9].

Como principais vantagens deste tipo de sistemas, há a salientar os seguintes aspectos:

- Capacidade para debitarem elevadas potências instantâneas (as correntes máximas estão limitadas apenas pela secção dos enrolamentos estatóricos, existindo já protótipos onde estes são constituídos por materiais supercondutores a altas temperaturas).
  - Extremamente robustos às cargas e descargas.
  - Muito compactos (pesam 1/10 da alternativa com base em baterias electroquímicas e ocupam apenas 1/3 do espaço).
  - Podem operar sob condições de grandes variações térmicas.
  - Tempos de carga muito rápidos.
  - Tempos de vida útil muito longos, sem elevada necessidade de manutenção.
  - Sistemas silenciosos e não poluentes.
  - Após o tempo de vida útil, são 100 % recicláveis.
- A penetração destes dispositivos no mercado tem-se efectuado de uma forma lenta, mas segundo alguns especialistas dentro de poucos anos todas as U.P.S. terão no seu exterior uma etiqueta a dizer algo como “*Flywheel Inside*”... [10].

### 4.3 SUPER CONDENSADORES

A utilização de condensadores como acumuladores de energia esteve sempre bastante condicionada pelo facto de com as tecnologias até à pouco disponíveis se conseguirem capacidades e densidades de energia relativamente baixas, para além de apresentarem significativas correntes de fuga, o que conduzia à sua auto-descarga relativamente rápida. Os métodos de construção destes dispositivos têm vindo no entanto a ser aperfeiçoados, recorrendo a novos princípios, materiais e geometrias que têm permitido desenvolver condensadores com capacidades, *densidades de energia e de potência*, até há pouco tempo impensáveis. Estes dispositivos designam-se hoje por *super condensadores* ou *ultra condensadores*, e desempenham um papel importante como alternativas para o armazenamento de energia eléctrica e na construção de aparelhagem mais robusta e com capacidade de auto-sobrevivência a ambientes hostis ("Ride Through Capability") [11].

Os avanços mais recentes neste domínio permitem já obter super condensadores com capacidades de milhares de Farad em volumes extremamente reduzidos (Figuras 7 e 8), conferindo-lhes um enorme potencial para o armazenamento de energia eléctrica e para suprir energia nas mais diversas situações, com grandes vantagens sobre outras tecnologias, atingindo-se densidades de potência da ordem dos 3000 W/litro e de energia na casa dos 50 Wh/Kg [12].



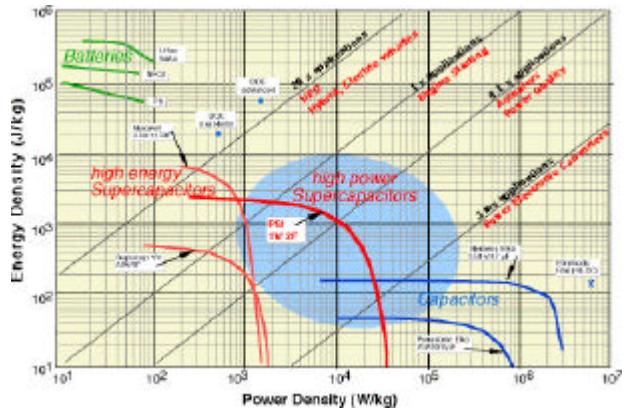
**Figura 7** - Super condensador com 2500 F (7200 J) (dim. : 160x60x60 mm, peso : 720 g)

A empresa ESMA, da Rússia, em colaboração com a EPRI PEAC (dos USA) desenvolveram já um Super Condensador (Ref<sup>a</sup>. ESMA EC 303) com 45.000 F, uma capacidade de armazenamento de energia de 23.600 Joules e com um peso de 2,6 Kg (Figura 8).



**Figura 8** - Linha de Super Condensadores da ESMA.  
Fonte: ESMA CAPS [13].

As diferenças mais significativas entre os *super condensadores* e os *condensadores*, prendem-se com o facto de em termos de *densidades de energia e de potência*, os super condensadores se situarem entre os grandes condensadores tradicionais (com densidades de energia baixas e densidades de potência muito altas) e as baterias electroquímicas (com densidades de energia muito elevadas e velocidades de escoamento bastante baixas) [14].



**Figura 9** - Localização dos Super Condensadores entre alguns dos diferentes armazenadores de energia.  
Fonte: CSIRO [14].

Entre as *principais vantagens* dos super condensadores há a salientar:

- Podem carregar-se e descarregar-se um número muito elevado de vezes, tendo portanto um tempo de vida útil muito longo.
- Disponibilizam correntes de descarga muito elevadas.
- Não requerem praticamente manutenção.
- Os tempos de carga e de descarga são idênticos e muito curtos.
- São fabricados com materiais não tóxicos e relativamente baratos.
- Podem operar em situações ambientais adversas.

Os super condensadores são já utilizados como "buffers" de energia eléctrica para os mais diversos dispositivos electrónicos sensíveis, permitindo a sua correcta operação quando a qualidade da energia apresenta perturbações.

• Enquanto que as SMES e as "Flywheels" são sistemas mais vocacionados para a protecção de grandes cargas, os super condensadores estão especialmente dotados para a protecção individual de dispositivos. Pois, esta tecnologia permite facilmente construir pequenos sistemas adequados à dimensão das cargas a proteger (individualmente) a um custo muito competitivo.

## 5. CONCLUSÕES

Com a presente comunicação pretendeu-se efectuar uma descrição muito sucinta em torno de três tecnologias de armazenamento de energia (*SMES, Flywheels e Super Condensadores*) com grande potencial para a melhoria dos níveis de desempenho dos equipamentos eléctricos em ambientes com elevado grau de perturbação na qualidade da energia eléctrica. Esta análise decorrente de uma auscultação e levantamento prévio de necessidades no sector eléctrico nacional, permitiu constatar que a exploração destas tecnologias é ainda muito recente e a sua aplicação prática diminuta; contudo se estas forem devidamente consideradas e se houver a acção conjugada de:

- por um lado haver uma *intervenção preventiva tentando minimizar os impactos negativos dos equipamentos sobre a qualidade da energia eléctrica* (o que está a ser efectuado através de um projecto mais cuidado dos equipamentos, do uso de uma nova geração de dispositivos electrónicos de estado sólido e de uma escolha mais criteriosa de equipamentos no mercado) e,
- por outro contribuir para que os *equipamentos sejam mais robustos e imunes aos fenómenos perturbadores*, apresentam grandes vantagens para o aumento da produtividade em todos os sectores.

Outra importante vantagem associada ao uso deste tipo de dispositivos deve-se ao seu reduzido impacto ambiental, que hoje constitui também um argumento favorável à sua penetração. Além de permitirem armazenar *grandes quantidades de energia* e de possuírem *capacidade para a disponibilizar de forma muito rápida*, não produzem qualquer tipo de resíduos e apresentam perdas muito reduzidas.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] "The Future of Power Delivery in the 21st Century", EPRI's Power Delivery Groop, ([www.ePRI.com/pdg/events](http://www.ePRI.com/pdg/events)), 1999.
- [2] "Technology Thrives Paper Market is Hot", Sheble N., Revista INTECH da ISA, May/99.
- [3] "The Two Seconds Problem", ASC and EPRI Research, ([www.amsuper.com/application/power/2secprob.html](http://www.amsuper.com/application/power/2secprob.html)), March/98.
- [4] "What Causes ASDs to Trip During Voltage Sags", Langley R. and Mansoor A., EPRI PEAC Corporation, Knoxville, Tennessee, Revista Power Quality Assurance, October/99.
- [5] "Storage Technologies for Ride-Through Capability", Krepdin I. and Howe B., ([www.esource.com/publicdomain/Abstract/PQ03.html](http://www.esource.com/publicdomain/Abstract/PQ03.html)), May/99.
- [6] "Estudo sobre o Panorama da Qualidade da Energia Eléctrica em Portugal", Joaquim Delgado, DEE/ESTV do ISPV, 2º Sem. 1999.
- [7] "Superconductivity is Capturing the Imagination of the World", June/99, ([www.amsuper.com](http://www.amsuper.com)).
- [8] "Advances in Flywheel Energy Storage Systems", Austin, Texas, March/98 ([www.activepower.com](http://www.activepower.com)).
- [9] "Acumentrics Introduce Composite Flywheel Based 250 KVA Full On-line UPS - No batteries required", Brian Stahl and Gary A. Moor, November/99 ([www.acumentrics.com](http://www.acumentrics.com)).
- [10] "Active Power Adds Liebert a Worldwide Reseller", ([powerquality.aip.com/daily/news.html](http://powerquality.aip.com/daily/news.html)), 1999.
- [11] "High Energy Density with Ultracapacitors - Bursting with Power", Siemens Matsushita Components, February/99.
- [12] "The Leader in High-Power Energy Storage", Maxwell Power Cache Ultracapacitors", ([www.powercache.com/products/cap2500.htm](http://www.powercache.com/products/cap2500.htm)).
- [13] "ESMA Super Caps Technology", 2001, ([www.esma-cap.com](http://www.esma-cap.com)).
- [14] "Carbon Supercapacitors", CSIRO, Energy Technology, ([www.syd.dctcsiro.au](http://www.syd.dctcsiro.au)), February/97