

## Capítulo IV

# Qualidade da energia elétrica no contexto de smart grid

*Por Emerson Grzeidak, Jorge Cormane, Anésio de Leles Ferreira Filho e Francisco Assis\**

Desde algumas décadas os avanços tecnológicos nas áreas das telecomunicações e os sistemas de informação têm sido um tema explorado pelas empresas do setor energético no sentido de melhorar a eficiência, a confiabilidade, a segurança e a qualidade da energia elétrica (QEE). No entanto, a indústria energética atual enfrenta grandes desafios operativos, tecnológicos, econômicos e ambientais.

Esses desafios acarretam um aumento na complexidade do gerenciamento da energia elétrica.

O sistema de energia elétrica (SEE) do futuro é um sistema desregulamentado com uma elevada penetração da geração distribuída (GD) que só será capaz de fornecer um alto grau de confiabilidade na medida em que fossem aproveitadas as novas tecnologias para o seu fortalecimento.

No novo sistema, as decisões vão ser tomadas sobre a direção do desenvolvimento da rede para que possa atender às necessidades da sociedade do século XXI, integrando novas tecnologias em uma infraestrutura moderna e inteligente.

O conceito “Smart Grid (SG)” nasce como resposta a essa tendência, mas ainda não está claramente definido, não é único, nem possui uma única tecnologia associada. Pelo contrário, é uma mistura de vários temas e tecnologias que pode ter abordagens diferentes em contextos diferentes.

O SEE atual é mais do que uma rede que inclui geração e a demanda. Para o SG o sistema é uma integração entre a geração e o usuário final. A geração centralizada continuará sendo uma peça importante, mas as inserções de novos elementos vão mudar substancialmente a configuração do sistema.

A GD, a resposta da demanda, os sistemas de armazenamento e as redes de interligação são alguns exemplos. Até agora, as redes de transmissão são gerenciadas pelo operador do sistema, enquanto as redes de distribuição são centralizadas no usuário. Esta diferença vai desaparecendo gradualmente devido à criação de pequenas redes com despachos de energia de baixo nível. Do lado do cliente, muita coisa tende a mudar. O cliente terá cada vez mais participação no mercado. Um mercado com preços em tempo real, em que a relação entre o usuário e a rede elétrica irá operar em duas direções, assim como as redes de comunicação. A essência do SG é implementada em sete princípios básicos:

- Auto-reparo em eventos de perturbação de energia;
- Operar com resiliência contra ataques físicos e cibernéticos;
- Possibilitar uma participação ativa dos consumidores;
- Gerar novos produtos, serviços e mercados;

- Possibilitar a incorporação de todas as opções de geração e armazenamento de energia;
- Otimizar os recursos e operar eficientemente;
- Fornecer uma QEE segundo os padrões atuais.

A base da visão do SG é a sua capacidade sinérgica em coordenar recursos múltiplos para efetuar tarefas específicas.

Um sumário que sintetiza as capacidades do SG é mostrado na Figura 1, que agrupa cinco categorias funcionais do SG que tem como base um conjunto de áreas fundamentais de interesse.

Auto Otimização da Rede	Confiabilidade diferenciada e alta	Eficiência automatizada	Automação Abrangente e ponta a ponta	Otimização dos Recursos Limpos
Resposta a Demanda	Locais Públicos e Energia	Eficiência e Gerenciamento Online da Energia	Distribuição Automatizada	Gerenciamento de Veículos Elétricos
Corte de Carga	Energia para Emergência	Programas EE	Medição Avançada	Energia Renovável Distribuída
Capacidade	Qualidade da Energia e Confiabilidade	Eficiência da Energia (EE)	Eficiência Operacional	Tecnologias Limpas
Base/Infraestrutura				
<small>Fonte: E. M. Lightner and S. E. Widergren, in "An Orderly Transition to a Transformed Electricity System," IEEE Transaction on Smart Grid - vol. 1, no. 1, Junho 2000.</small>				

**Figura 1 – Aplicações de recursos em categorias funcionais.**

Pesquisas na área da energia elétrica têm feito progresso considerável em formular e promover a visão futura sobre o SG. Dentre elas, a QEE é uma consideração importante na confiabilidade e segurança de SG. A importância deve-se ao fato de o SG estar inserido no contexto do surgimento de uma nova estrutura do sistema elétrico. Novos modelos de sistemas elétricos acarretam novos paradigmas, mudança nas normas e nas tecnologias relacionadas à QEE. Desse ponto de vista, a QEE é uma consequência da dinâmica da operação e da inserção de novas tecnologias do sistema elétrico de potência.

### *Novo paradigma do setor energético*

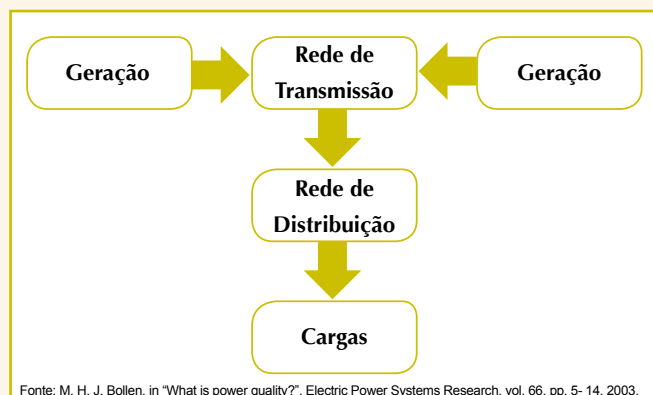
Os desafios impostos pelo atual mercado e a crescente demanda por energia levaram a uma nova interpretação da rede elétrica, a qual se encontra concentrada principalmente nos seguintes três tópicos:

- A desregulamentação do setor energético, que tornou um sistema único em um aglomerado de companhias independentes com clientes.
- As fontes de energia renováveis e eletricidade que está migrando de grandes estações elétricas conectadas ao sistema de transmissão para pequenas unidades conectadas em níveis mais baixos de tensão.
- Consumidores mais cientes dos seus direitos e que exigem uma eletricidade de baixo custo com alta confiabilidade e qualidade. As prioridades diferentes para cada tipo diferente de consumidor.

A desregulamentação no setor elétrico aumenta a gama de

escolhas do consumidor. Nesta nova configuração, o cliente pode escolher seu fornecedor de energia e montar suas preferências. Essa tendência mundial também é observada no Brasil. O setor elétrico brasileiro vem sendo modificado, em sua forma institucional, por leis federais, decretos e resoluções, migrando do controle estatal para o privado.

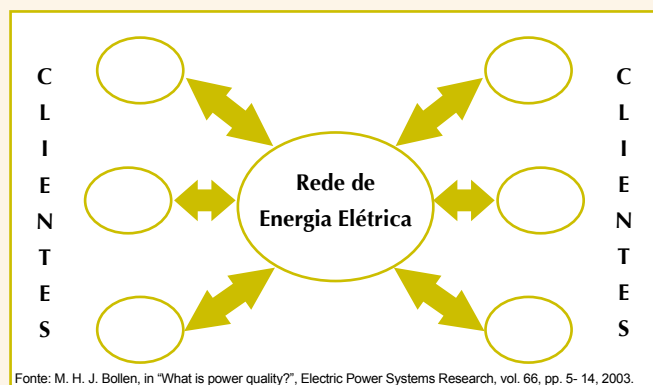
O sistema elétrico de potência tradicional é mostrado na Figura 2, em que se podem visualizar os consumidores como cargas e o fluxo de informações de forma unidirecional.



Fonte: M. H. J. Bollen, in "What is power quality?", Electric Power Systems Research, vol. 66, pp. 5- 14, 2003.

Figura 2 – Modelo tradicional.

No entanto, percebe-se que a rede elétrica está migrando para um modelo conforme mostra a Figura 3. Neste novo modelo, o SG será interativo tanto para as fontes de geração de energia como para as cargas. Os clientes gerarão e comercializarão sua própria energia de acordo com a demanda e a regulamentação. As redes serão suportadas por uma infraestrutura de comunicação bidirecional, de alta velocidade com tecnologias de medição avançada e controle. A estrutura da transmissão e distribuição será interconectada, de modo que consumidores e geradores de todos os tamanhos estejam interligados entre si e com os novos componentes da rede de natureza intermitente, tais como unidades de armazenamento de energia e fontes renováveis. O modelo central e vertical será substituído por um modelo distribuído e desagregado em que diferentes clientes enfatizam diferentes aspectos da nova rede elétrica de acordo com a sua perspectiva.



Fonte: M. H. J. Bollen, in "What is power quality?", Electric Power Systems Research, vol. 66, pp. 5- 14, 2003.

Figura 3 – Novo modelo.

O sistema de transmissão e distribuição encontra-se entrelaçados nesse novo modelo: o cliente recebe a energia por um sistema de distribuição, mas também pode utilizá-lo para transportar o excesso

de energia gerada e enviá-la de volta para a rede. Desse modo, o sistema de distribuição comporta-se como um sistema de transmissão em pequena escala. Tal processo é decorrente da mudança de grandes estações geradoras de energia para pequenas unidades conectadas a níveis mais baixos de tensão, como as estações de armazenamento e as fontes renováveis eólicas e solares. Sob esta ótica, os veículos elétricos podem também ser visualizados como dispositivos de armazenamento de energia, em que o usuário poderá emprestar a energia da bateria em momentos de ociosidade do veículo.

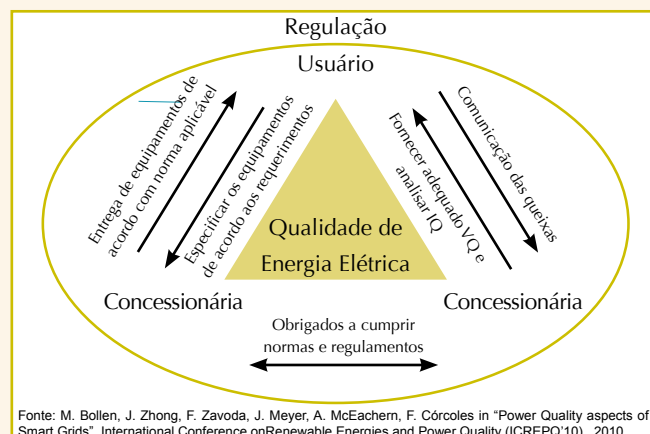
Neste novo modelo desagregado, os clientes do sistema possuem comportamentos de oferta e demanda diferentes em magnitude da tensão, frequência, forma de onda, etc. Estes fluxos de energia bidirecional precisam de monitoramento e avaliação dinâmica dos diferentes parâmetros de QEE vinculados ao fornecimento e consumo de energia. Tais tendências, comportamentos e características demandam pesquisas na área de QEE para que o impacto negativo sobre o sistema elétrico seja minimizado e o ganho para todos seja maximizado.

### Qualidade da energia elétrica

A QEE resulta da interação entre a rede e os equipamentos conectados. Uma adequada QEE no fornecimento da tensão atrelada a dispositivos de comunicação de última geração garante um nível de compatibilidade necessário para o funcionamento de todos os equipamentos conectados à rede e a possibilidade estabelecer novas formas de gestão da QEE.

A QEE, em geral, abrange dois tipos de perturbações: as variações que são continuamente medidas e avaliadas e os eventos que ocorrem de forma imprevisível exigindo uma ação de detecção, identificação e mudança de condições no aparelho para poder realizar a medição de forma adequada.

Na Figura 4, apresentam-se as três áreas que compõem a QEE nos sistemas de energia elétrica e as responsabilidades vinculadas a cada uma delas. Destaca-se na figura que qualquer mudança na rede elétrica impacta diretamente alguma das áreas, portanto, estas áreas são alvo dos constantes desenvolvimentos e avanços tecnológicos.



Fonte: M. Bollen, J. Zhong, F. Zavoda, J. Meyer, A. McEachern, F. Córcoles in "Power Quality aspects of Smart Grids", International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10), 2010.

Figura 4 – Responsabilidades das áreas vinculadas à QEE no sistema elétrico.

A operação e gestão do SEE moderno são baseadas principalmente nas informações dos fluxos de potência coletadas pelo sistema de monitoramento em tempo real, permitindo a mudança das condições

da rede e a reconfiguração automática da topologia para melhorar a entrega da potência e reduzir a duração das interrupções.

Entre os requerimentos para o SEE do futuro, devem-se incluir, principalmente, um sistema de monitoramento para melhorar a confiabilidade, equipamentos de monitoramento para melhorar a manutenção e o monitoramento do produto para melhorar a QEE.

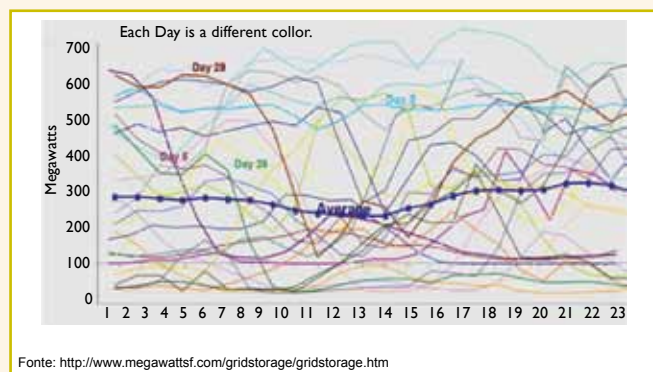
Desde a visão do usuário final da rede, os aparelhos de monitoramento devem controlar e gerenciar o fluxo de eletricidade entre a concessionária e o cliente por meio de redes de comunicação nos dois sentidos, além de fornecer informações sobre os padrões de comportamento de consumo de energia. Desde a visão da concessionária, a rede de distribuição interliga os medidores e todos os dispositivos de campo, gerenciando e controlando-os através de uma rede de comunicações sem fio ou uma rede fixa. Pode também ligar-se às instalações de armazenamento de energia e às fontes de energia distribuídas no sistema.

Inicialmente, sistemas de GD eram utilizados para atenuar picos de energia e providenciar eletricidade em que os alcances das redes de transmissão não podiam. Atualmente, sistemas GD são aplicados para atenuação de cargas em linhas de transmissão e para oferecer suporte aos clientes durante falhas e suporte de tensão. Entretanto, sistemas GD tendem a ter desvantagens em relação à QEE, especialmente quando se usam fontes de energia renováveis. Os tipos de GD discutidos serão as fontes alternativas baseadas em energia solar e energia eólica; os demais tipos de fontes de geração, como geradores a diesel e pequenas centrais hidroelétricas, podem ser encontrados na literatura referenciada.

### Sistemas de energia eólica

O impacto do aumento da geração da energia eólica distribuída poderia reduzir o número de afundamentos de tensão, o que depende fortemente da localização do gerador, das condições de carga e da causa do afundamento. Não obstante, turbinas eólicas podem também ser a causa de afundamentos junto com a rede. O procedimento de partida de uma turbina eólica gera uma alta corrente de entrada que pode durar de 0,2 s a 3 s dependendo do tipo de partida.

A imprevisibilidade dos recursos de energia eólica é indicada pelo seu baixo fator de capacidade (tipicamente 20% a 40%) que é mais baixo que os geradores convencionais. A natureza intermitente do gerador eólico é mostrada na Figura 5.



**Figura 5 – Variação da saída de um gerador eólico**

Observa-se que a energia fornecida por uma fonte eólica pode flutuar bruscamente por efeito dos ventos em momentos de alta demanda ocasionando oscilações da tensão. Por esse motivo, considera-se que existem problemas no controle e na confiabilidade da rede elétrica alimentada por energia eólica.

Outro problema relacionado é o fato de os sistemas de energia eólica poderem contribuir para a distorção de tensão nas redes de distribuição. Tal fato deve-se às características rotativas da máquina e do projeto da interface da eletrônica de potência empregada.

Se a máquina está sujeita a uma distribuição não senoidal do estator e dos enrolamentos do rotor, isso pode gerar harmônicos no entreferro e como resultado o estator e o rotor contribuirão com harmônicos na corrente. Essas características são inerentes da máquina, conseqüentemente, harmônicos são inevitáveis. Estudos recentes em sistemas de energia eólica mostram que conversores de frequência podem de fato causar harmônicos na corrente de linha, acarretando harmônicos na rede.

### Sistemas fotovoltaicos

Em redes em que grandes quantidades de sistemas fotovoltaicos são conectadas esparsamente e em alguns casos de operações de ilhamento, flutuações na tensão já foram reportadas como problemáticas. Os fatores que caracterizam a flutuação da tensão baseados em dados medidos em são:

- Magnitude da tensão;
- Duração da transição entre o céu nublado e o céu sem nuvens;
- Velocidade da transição.

No momento presente, técnicas de mitigação podem suportar flutuações de magnitude de 6.4% a 9.9% da tensão nominal, porém com um custo considerável. As flutuações de tensão dependem da densidade do sistema fotovoltaico e das suas características.

### Sistemas de armazenamento de energia

Com o aumento da incorporação das fontes renováveis de energia, torna-se mais necessária a integração com sistemas de armazenamento de energia para aumentar a confiabilidade do sistema, que pode armazenar energia quando há vento soprando e usá-la de volta para a rede quando o vento parar. Desse modo, aumenta-se a independência da rede elétrica dos fatores climáticos.

No entanto, há vários empecilhos na implementação de um sistema de armazenamento. Isso se deve ao fato de que a adição de um novo dispositivo de armazenamento requer vários estudos e materiais de alto custo. Cada sistema é projetado para uma configuração específica da rede elétrica, tornando-o inflexível caso a rede seja reconfigurada. Com as tendências do smart grid, torna-se essencial a procura por novas alternativas

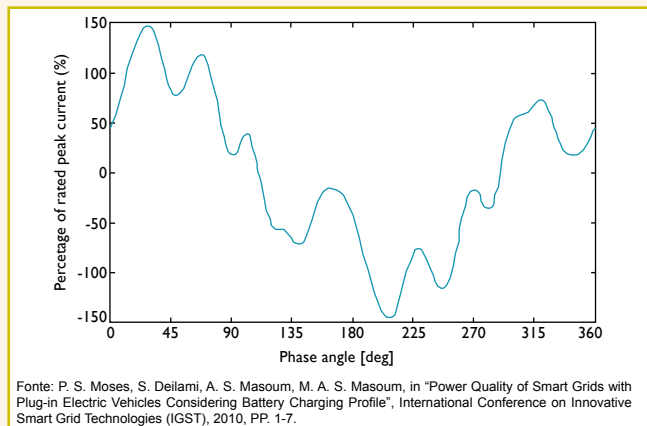
que tornem essas tecnologias mais flexíveis e adaptativas a vários sistemas.

### Veículos elétricos

Veículos elétricos continuam a ser cada vez mais populares na medida em que conceitos ambientais ganham força. Entretanto, alguns entraves que impedem uma expansão em massa de veículos elétricos devem ser superados. A questão do tempo de recarga da bateria deve ser resolvida, visto que tempos longos de recarga leva a níveis inaceitáveis da indisponibilidade do veículo para o condutor e tempos curtos de recargas têm o potencial de causar sobrecarga na rede.

A adoção em grande escala de veículos elétricos no SG necessita de pesquisas. Entre elas, estudos sobre o impacto da recarga simultânea de veículos elétricos Plug-in (PEVs) na rede em larga escala, bem como as configurações de recarga, duração e a proporção do desempenho na QEE no SG. A recarga de bateria dos veículos emprega dispositivos de comutação não linear que podem resultar em uma injeção de harmônicos significativos na corrente no sistema de distribuição, como mostrado na Figura 6.

Outros artigos estudaram distorções harmônicas geradas por conversores CA-CC individuais em circuitos com baterias em recarga, porém, há pesquisas limitadas quanto à análise do impacto de diferentes padrões de recarga de múltiplos usuários PEVs no sistema elétrico, em que os níveis de harmônicos podem subir a



**Figura 6 – Distorção na forma de onda da corrente em uma recarga do PEV**

níveis drásticos que causam estresse em SGs. Em adição à distorção harmônica, recargas de PEV podem causar flutuações na tensão e perdas de potência devido aos harmônicos. As recargas de PEVs podem ocorrer em locais públicos, estações de recarga privadas pagas ou em residências.

### Compatibilidade eletromagnética

A característica física das tecnologias do SG com o aumento da incorporação de equipamentos eletrônicos potencialmente sensíveis tem implicações naturais com respeito à compatibilidade eletromagnética (EMC). A função satisfatória dos equipamentos elétricos e eletrônicos com os distúrbios eletromagnéticos constitui o alvo do EMC.

A Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC) define EMC como “a habilidade de um equipamento ou sistema funcionar satisfatoriamente em um ambiente eletromagnético sem introduzir distúrbios eletromagnéticos intoleráveis a qualquer coisa no ambiente”. Distúrbios eletromagnéticos são definidos como fenômenos eletromagnéticos que podem degradar o desempenho do equipamento.

Exemplos de problemas de imunidade em relação às tecnologias do SG foram reportados na Suécia. Medidores de energia residenciais que enviavam sinais de dados em linhas de transmissão causaram interferência em lâmpadas com regulamentação de fluxo luminoso e aparelhos elétricos.

Também há casos reportados em que aparatos elétricos em residências interferiram nos medidores de energia eletrônicos com erros adversos no registro da energia consumida. É aconselhável considerar EMC como pré-requisito para sistemas elétricos, sendo um requisito técnico fundamental para qualquer regulamentação de mercado.

### Pesquisas futuras e desenvolvimento

O caminho para o SG irá envolver tentativas e lições que resultarão na descoberta de uma ou mais abordagens bem-sucedidas. Inexperiência com novas tecnologias, como baterias, armazenamento de energia, geração distribuída e veículos elétricos, portam incertezas e riscos em seu comportamento, confiabilidade e manutenção. Devido ao fato de as tecnologias e mecanismos de controle serem novos, a criação de normas e práticas de projeto são agravadas pela falta de experiência com as inovações tecnológicas.

Em várias áreas, tecnologias relacionadas ao SG têm sido implementadas em ritmo acelerado, enquanto outras áreas há carência de pesquisas. A Figura 7 fornecida pelo Smart Grid System Report (ver referências bibliográficas) sumariza o status do desenvolvimento do SG usando pesquisa e investigações reportadas por governos, indústria e instituições de pesquisa nos Estados Unidos.

Conforme se observa, áreas com tendência alta e moderada têm mostrado uma quantidade de pesquisas razoável, enquanto

TENDÊNCIA	ÁREAS
Alta	Geração distribuída, automação da T&D, medidores avançados, capital de risco
Moderada	Preços dinâmicos, compartilhamento de dados em tempo real, sistemas de medição avançada, evolução dos regulamentos e políticas
Baixa	Micro redes, veículos elétricos, avaliação dinâmica das linhas, resposta a demanda, eficiência do T&D
Nascente	Segurança cibernética, normas e arquiteturas abertas
Quase nulo ou levemente em declínio	Fator de Capacidade, Qualidade da Energia, Confiabilidade

Fontes: E. M. Lightner and S. E. Widergren, in “An Orderly Transition to a Transformed Electricity System,” IEEE Transaction On Smart Grid vol. 1, no. 1, June 2000. E Smart Grid System Report, a Report From the U.S. Secretary of Energy to Congress Jul. 2009 [Online]. Available: <http://www.oe.energy.gov/smartgrid.htm>

Figura 7 – Tendências do SG nos Estados Unidos.

áreas como confiabilidade e QEE têm registrado atividades quase nulas. Conforme os desafios expostos neste artigo, vários temas de pesquisas podem ser definidos.

### Conclusão

Smart Grid pode ser visto como uma inovação nos sistemas de energia elétrica que inclui tecnologias da informação e de telecomunicações para possibilitar a integração dos diferentes recursos e satisfazer às demandas da sociedade atual.

Baseando-se em uma revisão crítica do impacto nos recursos de energia abordados neste artigo, conclui-se que os desafios requerem uma abordagem sistemática para desenvolver soluções e análises que possibilitem uma integração coesiva dessas novas tecnologias, assim como a necessidade de reformular e adaptar normas atuais que permitam definir as responsabilidades das diferentes áreas do sistema elétrico.

O alinhamento com normas técnicas deve ser balanceado com a criação de ambientes que encorajam a inovação de modo que o sistema como um todo possa desenvolver-se com níveis altos de confiabilidade e segurança.

### Referências

- *Smart Grid*. Washington, DC, Dec. 2007, 110th Congress of United States, Title XIII. Energy Independence and Security Act of 2007.
- E. M. Lightner and S. E. Widergren, “An orderly transition to a transformed electricity system”. *IEEE Transaction On Smart Grid* v. 1, n. 1, June 2000.
- *A vision for the modern grid*. National Energy Technology Lab, 2007.
- *European smartgrids technology platform*. European Commission, 2006.
- *Towards smart power networks*. European Commission, 2005.
- T. F. Garrity, “Getting smart”. *IEEE Power Energy Magazine* n. 2, p. 38-45, Mar./Apr. 2008.
- S. M. Amin and B. F. Wollenberg. “Toward a smart grid: Power delivery for the 21st century”. *IEEE Power Energy Magazine* n. 5, p. 34-41, Sep./Oct. 2005.
- J. R. Roncero, “Integration is key to smart grid management”. In: *Proceedings IET-CIRED Seminar SmartGrids Distribution*, 2008, p. 1-4.
- L. H. Tsoukalas and R. Gao, “From smart grids to an energy internet: Assumptions, architectures and requirements. *International Conference Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technology*, Apr. 6.
- R. Krebs, B. M. Buchholz, Z. A. Styczynski, K. Rudion, C. Heyde, and Y. Sassnick, “Vison 2020 – security and in the future. German experiences”. In: *Energy and Society General Meeting*, p. 1.
- M. G. Lauby and W. P. Malcom, “North American industry trends supporting intelligent grids”. In: *Proceedings Intelligent System Application to Power Systems* 6.
- M. A. S. Masoum, P. S. Moses, and S. Deilami, “Load management in smart grids considering harmonic distortion and transformer derating,” In: *International Conference on Innovative Smart Grid Technologies (IGST)*, 2010, p. 1-7.
- M. H. J. Bollen, “What is power quality?,” *Research*, v. 66, p. 5-14, 2003.
- C. Hutson, G. K. Venayagamorthy, K. Corzine, “Intelligent scheduli of hybrid and electric vehicle storage capacity in a parking llot for profit maximization in grid power transactions”. *IEEE Energy 2030*, Atlanta, GA, USA, 17-18 Nov. 2008.
- M. Bollen, J. Zhong, F. Zavoda, J. Meyer, A. McEachern, F. Córcoles “Power

quality aspects of smart grids". *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10)*, 2010.

- Available: <<http://smartgrid.ieee.org/>>.
- E. Muljadi and H. E. McKenna, "Power quality issues in a hybrid power system". *IEEE Transactions on Industry Applications* v. 38, n. 3, p. 803-809, May/Jun. 2002.
- Latheef, M. Negnevitsky, K. Muttaqi and S. Perera, "Present understanding of the impact of distributed generation on power quality". *Australasian Universities Power Engineering Conference*, 14-17 dec. 2008, p. 1-6.
- J. Vorsic, A. Orgulan, M. Horvat and D. Koritnik, "Very small hydroelectric plants-their influence on the supply network". *IEEE Transaction on Energy Conversion*, v. 15, n. 3, p. 323-327, sep 2000.
- J. A. Sanchez, N. Moreno, S. Vazquez, J. M. Carrasco, E. Galvan, C. Batista, S. Hurtado and G. Costales, "A 800 kw wind-diesel test bench based on the made AE-52 variable speed wind turbine," vol. 2. *The 29th Annual Conference of the IEEE industrial Electronics Society*,
- IECON, nov 2-6 2003, p. 1.314-1.319.
- J. V. Milanovic, H. Ali, and M. Aung, "Influence of distributed wind generation and load composition on voltage sags". *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 1, p. 13-22, jan. 2007.
- R. M. Gnatv and J. V. Milanovic, "Qualitative and quantitative analysis of voltage sags in networks with significant penetration of embedded generation". *European Transactions on Electrical Power*, v. 15, n. 1, p. 77-93, 2005.
- Woyte, V.V.Thong, R. Belmans, and J. Nijs, "Voltage fluctuations on distribution level introduced by photovoltaic systems". *IEEE Transaction on Energy Conversion*, v. 21, n. 1, p. 202-209, Mar. 2006.
- M. H. J. Bollen, G. Oliguin, and M. Martins, "Voltage dips at the terminals of wind power installations". *Wind Energy*, John Wiley and Sons Ltd, n. 8, p. 307-318, 28 Jul. 2005.
- Available: <<http://www.megawatts.com/gridstorage/gridstorage.htm>>.
- Larsson, "Flicker emission of wind turbines during continuous operation". *IEEE Transaction on energy Conversion*, v. 17, n. 1, p. 114-118, Mar. 2002.
- M. Lindholm and T. Rasmussen, "Harmonic analysis of doubly fed induction generators," v. 2. *The 5th Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS*, nov. 17-20 2003, p. 837-841.
- S. A. Papathanassiou and M. P. Papadopoulos, "Harmonic analysis in a power system with wind generation". *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 21, n. 4, p. 2006-2016, Oct. 2006.
- J. H. R. Enslin, W. T. J. Hulshorst, A. M. S. Atmadji, P. J. M. Heskes, A. Kotsopoulos, J. F. C. Cobben, and P. Van der Sluijs, "Harmonic interaction between large numbers of photovoltaic inverters and the distribution network." *Bologna, Italy: Power Tech Conference Proceedings, IEEE Bologna*, 23-26 Jun. 2003, p. 1-6.
- A. Latheef, Thesis title: harmonic impact of photovoltaic inverter systems on low and medium voltage distribution systems. *University of Wollongong, Wollongong, NSW, Australia*, 2006.
- Modh, E. Ortjohann, a. Schmelter, N. Hamsic, D. Morton, "Challenges in integrating distributed energy storage systems into future smart grid". In: *Proc. Of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, June/July 2008.
- P. T. Staats, W. M. Grady, A. Arapostathis and R. S. Thallam, "A statistical method for predicting the net harmonic currents generated by a concentration of electric vehicles battery chargers". *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 12, p. 1.258-1.266, 1997.
- R. Bass, R. Harley, F. Lambert, V. Rajasekaran, and J. Pierce, "Residential

harmonic loads and PEV charging". *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 2001, p. 803-808, v. 2.

- S. H. Berisha, G. G. Karady, R. Ahmad, R. Hobbs and D. Karner, "Current harmonics generated by electric vehicle battery charges". In: *Proceedings of the 1996 International Conference on Power Electronics, Drives and Energy System for Industrial Growth*, 1996, p. 584-589, v. 1.
- Y. Lu and J. Jiang, "Harmonic-study of electric vehicle chargers". In: *Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2005, p. 2.404-2.407, v. 3.
- J. A. Orr, A. E. Emanuel and K. W. Oberg, "Current harmonics generated by a cluster of electric vehicle battery chargers". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-101, p. 691-700, 1982.
- P. S. Moses, S. Deilami, A. S. Masoum, M. A. S. Masoum, "Power quality of smart grids with plug-in electric vehicles considering battery charging profile." In: *International Conference on Innovative Smart Grid Technologies (IGST)*, 2010, p. 1-7.
- M. Olofsson, "Power Quality and EMC in Smart Grid," *10th International Conference Electrical Power Quality and Utilisation*, 15-17 Sep. 2009, Lodz, Poland, p. 1-6.
- *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 161: Electromagnetic compatibility, IEC 600 50-161 Std.*, Available: <http://www.electropedia.org>.
- M. Olofsson, U. Grape, "Framework for Electromagnetic Compatibility in Electric Power Systems". *VIII International Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology*, St. Petersburg, Russia, 16-19 June 2009, Available:
- <http://www.elsakerhetsverket.se/PageFiles/450/Framework%20for%20Electromagnetic%20Compatibility%20in%20Electric%20Power%20Systems.pdf>.
- *Smart Grid System Report*, a Report From the U.S. Secretary of Energy to Congress Jul. 2009 [Online]. Available: <<http://www.oe.energy.gov/smartgrid.htm>>.
- P. Zhang, F. Li and N. Bhatt, "Next-generation monitoring, analysis and control for the future smart control center". *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 1, n. 2, Sep. 2010.

---

**Este trabalho foi originalmente apresentado durante a IX Conferência Brasileira de Qualidade da Energia Elétrica (CBQEE), realizada em Cuiabá (MT), entre os dias 31 de julho e 3 de agosto de 2011.**

---

**\*EMERSON GRZEIDAK é estudante de graduação do curso de engenharia mecânica da Universidade de Brasília.**

**JORGE CORMANE é mestre e doutorando em engenharia elétrica da Universidade de Brasília (UnB).**

**ANÉSIO DE LELES FERREIRA FILHO é mestre e doutor em engenharia elétrica. Atualmente, é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília (UnB) e coordenador do Grupo de Pesquisa em Qualidade da energia Elétrica.**

**FRANCISCO ASSIS é mestre e doutor em ciências. Atualmente, é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília (UnB) e coordenador do Grupo de Pesquisa em Processamento Digital de Sinais (GPDS).**

#### CONTINUA NA PRÓXIMA EDIÇÃO

Confira todos os artigos deste fascículo em [www.oseletrico.com.br](http://www.oseletrico.com.br)  
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail [redacao@atitudeditorial.com.br](mailto:redacao@atitudeditorial.com.br)