

Integração de Tecnologias para Viabilização da Smart Grid

Djalma M. Falcão, *Fellow, IEEE*

Resumo—A expressão Smart Grid deve ser entendida mais como um conceito do que uma tecnologia ou equipamento específico. Baseia-se na utilização intensiva de tecnologia de automação, computação e comunicações na rede elétrica, as quais permitirão a implantação de estratégias de controle e otimização da rede de forma muito mais eficiente que as atualmente em uso. Neste artigo são descritas algumas das tecnologias que viabilizarão a implantação do conceito de Smart Grid no sistema elétrico assim como essas tecnologias poderão ser integradas. O artigo aborda, também, os requisitos de pesquisa, desenvolvimento e formação de pessoal necessários para a implantação da Smart Grid.

Palavras Chave—Redes elétricas inteligentes, automação, controle e proteção.

I. INTRODUÇÃO

Os Sistemas de Energia Elétrica (SEE) estão prestes a sofrer uma transformação de grandes proporções. Esta transformação consiste na modernização das tecnologias de geração, transmissão, distribuição e uso final da energia elétrica, visando abordar questões que vão desde as preocupações com mudanças climáticas e o envelhecimento das instalações atuais até a possibilidade de proporcionar ao usuário final maior participação no planejamento e operação do sistema. Essa nova concepção de SEE atende pelo nome genérico de Smart Grid [1], [2], [3] (Redes Inteligentes, como vem sendo traduzido para o Português).

Neste artigo são descritas algumas das tecnologias que viabilizarão a implantação do conceito de Smart Grid no sistema elétrico assim como essas tecnologias poderão ser integradas. O artigo aborda, também, os requisitos de pesquisa, desenvolvimento e formação de pessoal necessários para a implantação da Smart Grid.

II. O CONCEITO DE SMART GRID

A expressão Smart Grid deve ser entendida mais como um conceito do que uma tecnologia ou equipamento específico. Baseia-se na utilização intensiva de tecnologia de automação, computação e comunicações para monitoração e controle da rede elétrica, as quais permitirão a implantação de estratégias de controle e otimização da rede de forma muito mais

eficiente que as atualmente em uso.

A introdução do conceito de Smart Grid produzirá uma convergência acentuada entre a infra-estrutura de geração, transmissão e distribuição de energia e a infra-estrutura de comunicações digitais e processamento de dados. Esta última funcionará como uma *Internet de Equipamentos*, interligando os chamados IEDs (*Intelligent Electronic Devices*) e trocando informações e ações de controle entre os diversos segmentos da rede elétrica. Essa convergência de tecnologias exigirá o desenvolvimento de novos métodos de controle, automação e otimização da operação do sistema elétrico, com forte tendência para utilização de técnicas de resolução distribuída de problemas baseadas na utilização de multi-agentes.

Algumas das características geralmente atribuídas à Smart Grid são:

- Auto-recuperação: capacidade de automaticamente detectar, analisar, responder e restaurar falhas na rede;
- Empoderamento dos Consumidores: habilidade de incluir os equipamentos e comportamento dos consumidores nos processos de planejamento e operação da rede;
- Tolerância a Ataques Externos: capacidade de mitigar e resistir a ataques físicos e cyber-ataques;
- Qualidade de Energia: prover energia com a qualidade exigida pela sociedade digital;
- Acomodar uma grande variedade de fontes e demandas: capacidade de integrar de forma transparente (*plug and play*) uma variedade de fontes de energia de várias dimensões e tecnologia;
- Reduzir o impacto ambiental do sistema produtor de eletricidade, reduzindo perdas e utilizando fontes de baixo impacto ambiental;
- Resposta da demanda mediante a atuação remota em dispositivos dos consumidores;
- Viabilizar e beneficiar-se de mercados competitivos de energia, favorecendo o mercado varejista e a micro-geração.

A transformação da rede de energia elétrica atual para a Smart Grid deverá acontecer de forma incremental: novas tecnologias de automação, computação e comunicações serão introduzidos em partes da rede, formando bolsões de sub-redes com as características da Smart Grid, as quais conviverão de forma harmoniosa com rede legada. Na medida em que esses bolsões aumentem em número e capacidade, a rede elétrica como um todo tenderá para uma rede dentro da nova visão.

D. M. Falcão é Professor Titular do Programa de Engenharia Elétrica da COPPE/UFRJ, C. P. 68504, Rio de Janeiro RJ, CEP: 21941-972 (e-mail: falcão@nacad.ufrj.br).

Parte do trabalho de pesquisa relatado neste artigo foi financiado pelas agências CNPq, CAPES e Faperj.

Uma das inovações tecnológicas mais promissoras propostas para implementação da Smart Grid são as Microrredes Inteligentes (*Smart Microgrids*) [4], ou simplesmente Microrredes, as quais são uma forma eficiente de se conectar fontes de energia de diferentes tipos e capacidades, dispositivos armazenadores de energia e cargas especiais. Constituem um mini-SEE que pode operar de forma semi-autônoma, conectado ao sistema da concessionária ou isolado. Utilizam dispositivos conversores, baseados em eletrônica de potência, para conectar e controlar as diversas fontes de geração e armazenamento de energia, assim como cargas especiais. Utilizam, também, tecnologia avançada de medição eletrônica, sensores distribuídos, comunicações digitais e computação, para a supervisão, controle da qualidade e confiabilidade do fornecimento de energia e otimização de custos e emissões.

A evolução do processo de implantação da Smart Grid deverá seguir os seguintes passos:

- Instalação da infra-estrutura de dispositivos inteligentes;
- Instalação da infra-estrutura de comunicações;
- Integração e interoperabilidade;
- Disponibilização de ferramentas analíticas;
- Otimização operativa.

III. TECNOLOGIAS VIABILIZADORAS

Esta seção descreve algumas das tecnologias já disponíveis que viabilizam a implantação do conceito de Smart Grid.

A. Geração Distribuída e Micro-geração

A tendência de incorporação de fontes de energia dispersas, particularmente as renováveis (fotovoltaica, eólica, etc.), conectadas aos sistemas de distribuição de energia elétrica, vem crescendo nos últimos anos, por razões de ordem ambiental, políticas governamentais e avanços tecnológico.

B. Infra-Estrutura Automática de Medição (AMI)

Sistema de coleta automática de dados de medidores de energia e transferência para um sistema centralizado de processamento de dados. Permite analisar a demanda e influir na resposta da demanda através da disponibilização de sinais de preços e atuação em dispositivos nas instalações dos consumidores. Utiliza os chamados *Smart Meters* os quais são medidores eletrônicos com funcionalidade ampliada e capacidade de comunicação bi-direcional.

C. Precificação Dinâmica

A disponibilidade de comunicação bi-direcional entre as concessionárias e os consumidores permite a introdução de um sistema de precificação dinâmica. Nesse tipo de sistema, o preço da energia elétrica varia ao longo do dia como forma de incentivar políticas de melhoria do perfil da demanda e, conseqüentemente, redução do custo total de expansão e operação do sistema elétrico.

D. Equipamentos Prediais e Eletrodomésticos Inteligentes

Equipamentos elétricos para uso em residências e estabelecimentos comerciais estão sendo equipados com

recursos de controle capazes de alterar sua demanda em função de sinais de preço ou relacionados com a confiabilidade do sistema elétrico.

E. IEDs

A utilização de tecnologia digital proporciona a convergência de tecnologias de proteção, controle e supervisão em equipamentos padronizados os quais recebem a denominação genérica de IEDs. Esses dispositivos são os elementos de interfaceamento da infra-estrutura de comunicações e processamento de informação com o sistema de energia elétrica.

F. PMUs

Os dispositivos para Medição Fasorial Sincronizada (PMU na sigla inglesa) representam um avanço considerável na disponibilização de informações para a determinação do estado operativo do sistema elétrico em grandes áreas ge-elétricas.

IV. INTEGRAÇÃO DE TECNOLOGIAS

O SEE é um sistema físico e organizacional de grande porte, envolvendo milhões de componentes e milhares de organizações públicas e privadas. Do ponto de vista físico, um aspecto muito importante no funcionamento desse sistema é o seu comportamento dinâmico, o qual implica na propagação mais ou menos rápida dos fenômenos, podendo levar a falhas em cascata normalmente evoluindo para blecautes totais ou parciais. Do ponto de vista das organizações envolvidas, ações coordenadas, baseadas em regras claras e estáveis, são aspectos fundamentais para alcançar uma operação segura e eficiente.

O SEE é naturalmente decomposto em três segmentos físicos: geração, transmissão e distribuição; e um segmento virtual, mas de grande relevância econômica, a comercialização da energia. Embora a interdependência desses segmentos seja total, a organização atual da indústria de energia elétrica [5] contempla a existência de empresas (ou agentes) dedicadas exclusivamente a um ou mais desses segmentos. Para garantir o bom funcionamento do sistema, organizações responsáveis pela integração dos vários segmentos são necessárias. No caso do Brasil, essas organizações de caráter sistêmico são o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) e Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

As tecnologias que compõem a Smart Grid permeiam todos os segmentos do setor elétrico acima referidos, embora esteja evoluindo com diferentes velocidades em cada um deles. No restante desta seção, são apresentados resumos das aplicações associadas ao conceito de Smart Grid e a interdependência entre as mesmas são destacadas, em particular, as interdependência resultantes da aplicação dos novos conceitos.

A. Geração Centralizada

Geração Centralizada (GC) é a forma convencional de geração de energia elétrica. Consiste em centrais geradoras de médio e grande porte localizadas em pontos mais ou menos distantes dos centros de consumo. A principal questão na área de Smart Grid advém da introdução de fontes de energia com

características de despacho diferentes das convencionais. Entre essas, no caso do Brasil, destaca-se a geração utilizando biomassa (principalmente o bagaço de cana) e a energia eólica. Essas novas fontes vão exigir o desenvolvimento de técnicas inteligentes de despacho, de forma a acomodar suas características sazonais e intermitentes, na cadeia de otimização energética do sistema. Em complemento à GC, observa-se um crescimento constante da chamada Geração Distribuída (GD), constituída por pequenas unidades localizadas próximas à carga.

B. Transmissão

O sistema de transmissão é o aglutinador do SEE. É através da transmissão que as principais fontes de energia são conectadas aos usuários finais, passando pelo sistema de distribuição. Falhas no sistema de transmissão podem desencadear perturbações sistêmicas que, em alguns casos resultam em desligamentos de parte ou de todo o sistema elétrico.

Os sistemas de transmissão são, atualmente, supervisionados e controlados através do sistema SCADA, os quais processam varreduras de medidas de grandezas analógicas (tensão, fluxo de potência, etc.) e estados de chaves e disjuntores (aberto/fechado), com taxas de amostragem da ordem de 2-10 segundos.

Avanços tecnológicos nas áreas de sensores, dispositivos de medição e comunicações digitais, estão produzindo uma modificação significativa neste cenário. O processo de integração e automação de subestações [6], o qual implica em substituição de equipamentos dedicados de proteção, controle e aquisição de dados, por redes locais interligando os IEDs, através do uso de protocolos padrão de comunicações (IEC 61850), e a introdução de PMUs [7], os quais permitem a aquisição de informações de fasores de tensão e corrente, com taxas de até sessenta fasores por segundo, com estampa de tempo obtidas através do sistema GPS, proporcionam um volume de informações de alta qualidade sobre a evolução do ponto de operação do sistema elétrico no tempo.

A disponibilidade de informação abundante e de excelente qualidade abre possibilidades da introdução do conceito de Smart Grid no sistema de transmissão. Algumas áreas em desenvolvimento são [9]:

- *Monitoração On-line de Ativos*: a utilização de técnicas avançadas de monitoração em tempo-real do carregamento e condições de funcionamento de linhas de transmissão, transformadores, etc., permitirá uma utilização mais eficientes desses ativos e evitarão falhas capazes de comprometer a integridade dos sistema de transmissão;
- *Controles Eletrônicos Inteligentes*: utilização integrada de dispositivos de controle eletrônicos tais como HVDC, FACTS, SVC, etc.;
- *Proteção*: sistemas auto-adaptativos de proteção que permitam a reconfiguração e ajustes on-line de acordo com as condições de operação do sistema;
- *Automação de Subestações*: integração de sistemas de monitoração, controle e proteção de subestações utilizando protocolos padrões de comunicações e

transferência de dados (61850, CIM, XML, etc.), utilizando redes de fibras óticas e sistemas wireless;

C. Sistema de Distribuição

Os sistemas de distribuição são aqueles que estão sendo mais beneficiados pela tecnologia Smart Grid. A principal área de aplicação é a utilização de medição eletrônica. Os medidores eletrônicos acrescentam uma série de novas funcionalidades ao antigo medidor eletromecânico de kWh, constituindo-se em um *Smart Meter*, o qual abre a possibilidade de inovações importantes, tais como:

- *AMI (Advanced Metering Infrastructure)*: permitirão a leitura automática da demanda de consumidores individuais, conexão e desconexão de consumidores, disponibilização de informações do preço da energia, etc;
- Detecção e isolamento automático de faltas, reconfiguração e restauração de serviço;
- Controle coordenado de tensão e fluxo de reativos.

D. Uso Final da Energia Elétrica

Nos sistema elétricos atuais, a parte do sistema situado além do medidor de energia, exceto no caso de grandes consumidores, tem papel passivo na operação do sistema. Com a introdução do conceito de Smart Grid, particularmente devido à introdução dos Smart Meters e da Microgeração (geração de pequeno porte instalada em residências e pequenos edifícios), esta situação tende a se transformar.

As principais modificações virão de:

- *Equipamentos Prediais e Eletrodomésticos Inteligentes*: permitirão o controle da demanda dos consumidores mediante o envio de sinais através do sistema de comunicações bi-direcionais;
- *Micro-geração*: disponibilização de geração de pequeno porte, através do uso de painéis fotovoltaicos, micro-geradores eólicos, células a combustível etc., capazes de produzir energia par consumo próprio e venda para a concessionária;
- *Sistemas Prediais de Gerenciamento de Energia*: sistemas para monitoração e otimização da demanda de residências e edifícios de forma isolada ou através da Internet.

E. Planejamento e Operação

O planejamento e a operação dos SEEs vêm sendo realizado de forma segmentada: a geração centralizada e a transmissão, em geral, recebem um tratamento integrado enquanto os diversos subsistemas de distribuição são estudados de forma independente. Esta abordagem deverá sofrer uma alteração conceitual nos próximos anos devido à introdução do conceito de Smart Grid. A comunicação bidirecional de informações e do fluxo de energia, entre o sistema e os consumidores, cria a necessidade de uma abordagem integrada de todos os segmentos do sistema elétrico, pelo caráter cada vez mais ativo do sistema de distribuição e usuários finais. Esta mudança de paradigma afetará substancialmente as metodologias de planejamento da expansão, planejamento da operação e monitoração e controle em tempo-real.

Estendo-se desde os PMUs instalados no sistema de transmissão até os eletrodomésticos inteligentes nas residências, os novos recursos de monitoração e controle deverão ser utilizados de forma conjunta e otimizada para garantir um melhor desempenho do sistema do ponto de vista da confiabilidade e qualidade do suprimento. A integração das diversas tecnologias descritas na seção anterior desse artigo, aparentemente restritas aos respectivos segmentos do setor elétrico no qual são instaladas, deverá ser executado em um nível hierárquico superior, no qual ferramentas avançadas de visualização, simulação e controle permitirão estabelecer uma acurada Consciência da Situação (*Situation Awareness*) relativa ao ponto de operação dos sistema, permitindo prevenir e corrigir possíveis ameaças à integridade do sistema.

Alguns tópicos específicos de pesquisa que ajudarão essa função são;

- *Esquemas especiais de proteção e ilhamento*
- *Controle de frequência e estabilidade transitória*
- *Controle coordenado de tensão e estabilidade de tensão*
- *Controle de oscilações*
- *Esquemas otimizados de recomposição do sistema*
- *Modificação on-line de esquemas especiais de proteção*

V. PESQUISA, DESENVOLVIMENTO E FORMAÇÃO

A. Tópicos de Pesquisa

A implantação do conceito de Smart Grid vem exigindo um grande esforço de pesquisa e desenvolvimento em todo o mundo, principalmente nos países desenvolvidos (EUA, Japão, Europa, etc.). Em particular, o governo americano incluiu em suas prioridades a modernização do sistema elétrico dos EUA baseado no conceito de Smart Grid. Em 2009 foram concedidos auxílios para investimentos nessa linha no valor de US\$ 3,4 bilhões pelo governo com uma contrapartida da iniciativa privada de US\$ 5,7 bilhões. Os principais tópicos de pesquisa e desenvolvimento são:

- *Geração*: integração de fontes alternativas de energia de pequeno porte e elementos armazenadores na rede elétrica através do conceito de microrredes, usinas virtuais, etc.
- *Transmissão*: sistemas integrados de monitoração, controle e proteção (wide area monitoring, protection and control WAMPAC), PMUs, estimação de estado distribuída, etc.
- *Distribuição*: sistemas automáticos de medição, medidores eletrônicos, automação da distribuição;
- *Uso Final*: sistemas de gerenciamento de energia prediais e residenciais; efeito da aplicação de técnicas de resposta da demanda;
- *Padronização e Interoperabilidade*: padronização de redes de sensores e de comunicações de dados visando a troca de informações e interoperabilidade;
- *Regulação*: estabelecimento de legislação adequada à comercialização no varejo de energia elétrica para permitir o uso adequado de precificação dinâmica e da energia da micro-geração.

No caso do Brasil, várias iniciativas por parte de empresas, centros de pesquisas e universidades encontram-se em andamento. Exemplos desses projetos são:

- *Microrredes*: implantação de uma microrrede experimental, constituída por várias fontes alternativas de pequenos porte, visando estudo de esquemas de controle, proteção e medição automatizada (COPPE/UFRJ);
- *Projeto MEDFASEE*: sistema de medição fasorial sincronizada, constituído por unidades localizadas em vários campi universitários brasileiros e conectados à rede de baixa tensão, capaz de monitorar o funcionamento do sistema elétrico brasileiro (UFSC).
- *Medição Automática*: desenvolvimento de sistema de medição centralizada e sistema não-invasivo de monitoração de eletrodomésticos (CEPEL);
- *Implantação de PMUs*: estudos visando a instalação de unidades de PMUs em pontos estratégicos do sistema interligado nacional com o objetivo, entre outros, de melhorar a capacidade de oscilografia e estimação de estado (ONS);
- *Aplicações de PMU na Segurança do Sistema*: detecção on-line da proximidade de colapso de tensão (COPPE/UFRJ); monitoração do nível de estresse do sistema elétrico, assistente para conexão de ilhas elétricas e fechamento de loops, monitoração de oscilações (ONS e CEPEL);
- *Implantação de Sistemas de Medição Automatizada*: várias empresa de distribuição de energia elétrica do país vem realizando a implantação de sistemas centralizados de medição eletrônica (Ampla, Light, Eletropaulo, Cemig, etc.)

B. Formação para Smart Grid

A implantação da tecnologia Smart Grid exige a combinação de várias disciplinas, algumas das quais não são regularmente cobertas pelos currículos dos cursos de graduação em engenharia de sistemas de energia elétrica. Algumas dessas disciplinas são:

- Automação industrial e controle digital;
- Eletrônica de potência;
- Fontes alternativas de energia;
- Processamento de sinais;
- Sistemas de comunicações digitais;
- Regulação e tarifação do sistema elétrico.

A introdução dos temas acima no currículo de graduação pode ser realizada mas, necessariamente, terá um caráter superficial para evitar a perda do foco na formação do estudante. Uma abordagem mais eficiente e adequada, para aqueles interessados em uma visão integrada dos sistemas de energia elétrica do futuro, parece ser a formação em nível de pós-graduação, tanto no *stricto sensu* (Mestrado) ou *lato sensu* (Especialização) [8].

Além das disciplinas básicas acima, a formação do engenheiro para atuar no cenário de Smart Grid exigirá um esforço na integração das citadas disciplinas àquelas

tradicionais da formação do engenheiro de SEE. Por exemplo, os seguintes temas devem ser considerados:

- Análise e simulação em regime permanente e dinâmico de sistemas com a presença de fontes alternativas (eólica, solar, biomassa, etc.) e dispositivos conversores;
- Monitoração, controle e proteção utilizando medição fasorial sincronizada;
- Novos conceitos em sistemas de proteção;
- Regulação e tarifação do sistema elétrico em face da utilização de AMI.

VI. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma breve introdução às tecnologias viabilizadores da implantação do conceito de Smart Grid nos sistemas de energia elétrica. A integração dessas tecnologias produzirá um ambiente com grande potencial para a melhoria no desempenho desses sistemas no que diz respeito à confiabilidade e qualidade do suprimento, economia na operação e expansão, redução de emissões e participação ativa de consumidores. O artigo abordou também as questões relacionadas à pesquisa, desenvolvimento e formação de pessoal no tema.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] D.M. Falcão, "Smart Grid e Microrredes: O Futuro já é Presente," *Anais do VIII SIMPASE*, Rio de Janeiro RJ, 9-14 Agosto de 2009.
- [2] U.S. Department of Energy, "Smart Grid System Report", disponível em http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/SGSRMain_090707_lo_wres.pdf, July 2009.
- [3] NIST - U.S. Department of Commerce, "NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 1.0", disponível em <http://nist.gov/smartgrid/>, January 2010.
- [4] S.P.Chowdhury, P.Crossley, and S. Chowdhury, *Microgrids and Active Distribution Networks*, IET, London, 2009.
- [5] D.S. Kirschen and G. Strbac, *Fundamentals of Power System Economics*, John Wiley, 2004.
- [6] P. Myrda and K. Donahoe, "The True Vision of Automation", *IEEE Power & Energy Magazine*, vol. 5, no. 3, pp. 32-44, May/June 2007.
- [7] A.G. Phadke and J.S. Thorp, *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*, Springer, 2008.
- [8] G.T. Heidt et al., "Professional Resources to Implement the Smart Grid," *Proceedings of the 2009 North American Power Symposium (NAPS)*, Starkville, Mississippi, USA, October 4-6, 2009.
- [9] A. Bose, "Smart Transmission Grid Applications and their Supporting Infrastructure", disponível em <http://certs.lbl.gov/pdf/smart-transmission-grid.pdf>.