Apoio
20 ANOS CLAMPER
Blutrafos GRUPO FURLANI
MEGABARRE BRASIL

Capítulo XIII

Uso dos conceitos de smart grid no processo de restabelecimento automático de energia

*Por Daniel Pinheiro Bernardon, Vinícius Jacques Garcia, Mauricio Sperandio, Jumar Luís Russi, Eric Fernando Boeck Daza, Lorenzo Comassetto**

As concessionárias de energia elétrica têm continuamente empregado esforços no sentido de melhorar a garantia da energia elétrica fornecida aos seus consumidores, não só pela pressão regulatória como também pelo aumento de arrecadação com a diminuição da energia não distribuída e maior satisfação dos clientes. No entanto, as interrupções no fornecimento de energia elétrica são inevitáveis para a execução de obras de expansão do sistema, para manutenções preventivas e/ou corretivas em componentes da rede ou, ainda, pela atuação de dispositivos de proteção em decorrência de defeitos.

Nos casos de contingência, deseja-se que a solução seja identificada rapidamente, restringindo ao mínimo a área desenergizada. De uma maneira geral, quando ocorrer um defeito em um ponto qualquer da rede, as seguintes ações devem ser tomadas: identificar o local em que o defeito ocorreu; isolar a menor parte possível do sistema pela abertura de chaves; manobrar as chaves para restabelecer o suprimento para os consumidores à jusante do bloco isolado; corrigir o problema; e realizar novas manobras de chaves para retornar ao estado normal das redes.

Atualmente, tem se dado foco a respeito de como os sistemas de distribuição de energia elétrica devem ser no futuro. Nesse sentido, foi cunhado o termo “Smart Grid” para definir como essa nova rede deve se comportar, ou seja, de maneira “esperta” ou “inteligente”. Entre as características de uma smart grid estão a capacidade de realizar manobras de maneira automatizada (auto-regeneração) e a alta confiabilidade, tudo isso com um baixo custo de operação e manutenção.

Uma solução cada vez mais empregada pelas concessionárias de energia para obter tempos de restabelecimento de energia elétrica adequados é o uso de sistemas de automação nas redes de distribuição, por exemplo, chaves ou religadores telecomandados. Tais equipamentos têm se mostrado economicamente viáveis devido ao surgimento de um grande número de fornecedores de equipamentos para automação e de novas tecnologias de comunicação.

O emprego de uma metodologia eficiente para operação destes equipamentos é de suma importância para as concessionárias, com intuito de garantir a viabilidade técnica das manobras, reduzindo o tempo de restauração da energia. Assim, o objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia para restabelecimento de energia elétrica a partir da operação automática de equipamentos telecomandados, considerando a validação da viabilidade técnica das transferências de cargas em tempo real por meio de simulações computacionais, aplicando os conceitos de redes inteligentes (Smart Grid). A melhor opção para as transferências de cargas usando os equipamentos telecomandados, após contingências, será definida a partir de métodos de tomada de decisão multicriterial. Para isso, este

trabalho utiliza o método de Bellman-Zadeh (ver referências), que usa algoritmo fuzzy, se mostrando eficiente para a solução de questões envolvendo múltiplos critérios. Outra vantagem deste método é que a solução encontrada sempre pertence à área de comprometimento de Pareto (ver referências).

Como resultado, as transferências de cargas são realizadas de forma automática sendo precedidas de simulações computacionais que indicam as chaves a serem manobradas e asseguram a viabilidade técnica das transferências, tendo como características agilidade e segurança no restabelecimento da energia. Para análise da metodologia, a ferramenta é aplicada em uma região piloto da AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia SA. A redução de deslocamento de equipes e a melhoria nos indicadores de índices de continuidade caracterizam os maiores benefícios para a empresa, ocasionando um diferencial de mercado e, consequentemente, ganhos econômicos e de produtividade.

Metodologia para cálculo de fluxo de potência em redes de distribuição

Implementou-se para o cálculo do fluxo de potência em redes de distribuição radiais o algoritmo de somatório de correntes. Como as cargas elétricas são definidas com um comportamento constante em função da tensão aplicada, isso resulta em uma solução não trivial para o cálculo do fluxo de potência, uma vez que a corrente absorvida pelas cargas depende da tensão e esse valor não é conhecido. Dessa maneira, a solução é encontrada somente de forma interativa, utilizando o seguinte procedimento:

1) Inicialmente, considera-se que a tensão em todos os pontos do alimentador é igual à tensão nominal na barra da subestação, isto é, neste primeiro momento, as quedas de tensão nos condutores primários são desprezadas;
2) Calculam-se as componentes, ativa e reativa, das correntes primárias absorvidas e/ou injetadas no sistema pelos elementos elétricos (transformadores de distribuição, consumidores primários, bancos de capacitores);
3) O procedimento para se obter as correntes em todos os ramos da rede consiste em duas etapas. Na primeira, acrescentam-se os valores de corrente dos equipamentos nos respectivos ramos. Na segunda, acumulam-se as correntes desde os trechos finais até a subestação;
4) A seguir, determinam-se as respectivas quedas de tensão nos condutores primários;
5) Parte-se da barra da subestação e se obtém as quedas de tensão acumuladas em todos os trechos da rede primária e, consequentemente, os valores de tensão em qualquer ponto;
6) Verifica-se a diferença entre o novo valor de tensão para todos os nós da rede primária e o valor anteriormente utilizado. Se essa diferença for suficientemente pequena, a solução do cálculo do fluxo de potência foi encontrada e o sistema é dito convergente.

Apoio
20 ANOS CLAMPER
Blutrafos GRUPO FURLANI
MEGABARRE BRASIL

Caso contrário, repetem-se os passos anteriores a partir do item dois, utilizando as tensões calculadas para a obtenção dos valores de corrente. Realizam-se as iterações até que a diferença encontrada seja menor que o valor permissível, o qual foi estipulado em 1%. Esse valor resulta em valores precisos para as variáveis de estado, sem perder a rapidez de processamento do programa.

No término desse processo, definem-se as potências ativa e reativa em todos os ramos dos alimentadores e, consequentemente, as perdas técnicas nos condutores primários.

Este método de fluxo de potência foi implementado na metodologia proposta para o processo de operação automática dos equipamentos telecomandados restabelecimento de energia elétrica, sendo usado para verificar a viabilidade técnica das transferências de cargas. Os estudos são realizados considerando as cargas pré-falta e uma estimativa para as próximas três horas consecutivas, de modo a assegurar a viabilidade técnica das transferências para este período.

Metodologia proposta para operação automática de equipamentos telecomandados para restabelecimento de energia elétrica

A seguir é apresentada a metodologia proposta para operação automática dos equipamentos telecomandados para restabelecimento de energia. Para tanto, será apresentada a lógica de restabelecimento considerando o exemplo hipotético da rede de distribuição ilustrado na Figura 1.

Considerando que a chave NF-1 (normalmente fechada) e as chaves NA (normalmente aberta) da Figura 1 são telecomandadas, o processo de restabelecimento de energia elétrica se dá da seguinte maneira, considerando o desarme do alimentador AL-1:

• Defeito à jusante da chave telecomandada NF-1: na ocorrência de defeito, serão sinalizados, em tempo real no sistema SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), os valores de corrente de curto-circuito medidos na chave NF-1. Neste caso, assume-se que a falha ocorreu após a chave e o sistema enviará automaticamente os comandos de abrir a chave telecomanda NF-1 e de religar o alimentador AL-1, restabelecendo a energia para os consumidores à montante da chave. Como o tempo para abrir a chave, a partir do conhecimento do defeito, é inferior a três minutos, considera-se que os consumidores à montante não são impactos pela falha, para fins de apuração de indicadores técnicos. Já para os consumidores à jusante, será computado o tempo de reparo do defeito e restabelecimento da energia.

• Defeito à montante da chave telecomandada NF-1: na ocorrência de defeito, não serão sinalizados, no sistema SCADA, os valores de corrente de curto-circuito na chave NF-1. Assim, assume-se que a falha ocorreu antes da chave NF-1 e o sistema enviará automaticamente os comandos de abrir a chave telecomandada NF-1 e de fechar a chave telecomandada NA-1 ou NA-2, no sentido de transferir os consumidores à jusante da chave NF-1 para outro alimentador. A verificação da viabilidade técnica das transferências de carga e a definição de qual alimentador receberão os consumidores são realizadas em tempo real por meio de simulações computacionais.

Como o tempo para transferência automática, a partir do conhecimento do defeito, é inferior a três minutos, considera-se que os consumidores transferidos, à jusante da chave, não são impactos pela falha, para fins de apuração de indicadores técnicos. Já para os consumidores a montante, será computado o tempo de reparo do defeito e restabelecimento da energia.

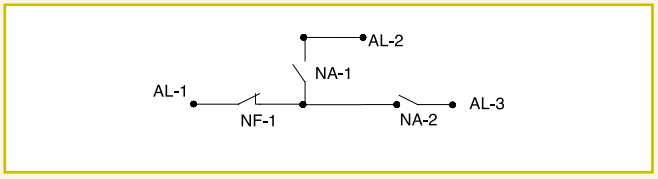

Figura 1 – Exemplo de rede de distribuição.

Metodologia proposta para escolha das chaves telecomandadas a serem manobradas a partir de análise multicriterial

Nesta seção é apresentado o algoritmo de tomada de decisão multicriterial. O desafio é definir qual é a melhor opção para as transferências de cargas usando equipamentos telecomandados, após contingência, em função das funções objetivo e restrições definidas.

As escolhas das funções objetivo e restrições são de extrema importância para o processo de tomada de decisão multicriterial. Podem ser considerados vários tipos de funções objetivo. O mais usual é a quantidade de consumidores restabelecidos. Outro fator importante é o tempo necessário para restabelecer o fornecimento de energia para esses consumidores. Como este item é difícil de ser calculado diretamente, geralmente, ele é medido pelo número de chaves escolhidas para realizar as manobras de transferências de cargas. Também é importante assegurar a confiabilidade dos sistemas de distribuição, que está fortemente relacionada aos indicadores de continuidade, DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora).

Como restrições, os principais fatores são operar as redes sem sobrecarga nos elementos elétricos, sem violar os ajustes de proteção e a queda de tensão admissível nas redes primárias. Normalmente, as restrições de não permitir violação dos ajustes de proteção e da queda de tensão admissível nos alimentadores são definidas como rígidas. No entanto, a sobrecarga nos elementos pertencentes às redes elétricas é flexibilizada por se tratar de uma situação provisória, ou seja, até que o defeito seja sanado, para retornar a configuração de operação em regime normal. Assim, se aceita um percentual de sobrecarga nos elementos elétricos.

De acordo com essas considerações, definiram-se as

Apoio
20 ANOS CLAMPER
Blutrafos GRUPO FURLANI
MEGABARRE BRASIL

seguintes funções-objetivo e restrições a serem utilizadas nas análises das transferências de cargas em situações de contingências:

Funções-objetivo:

- restabelecer a energia para o número máximo de consumidores;
- realizar o número mínimo necessário de operações de comutação para as transferências de carga;
- minimizar o número de consumidores interrompidos por ano.

$$Min\ f_R = \sum_j \left(\lambda_{0n} \cdot \ell_{Pr\,otjn} \cdot C_{Pr\,otjn} \right) \quad (1)$$

Restrições:

- manter a radialidade dos sistemas;
- não permitir sobrecarga nos elementos pertencentes às redes elétricas (trechos de rede, chaves, reguladores de tensão, entre outros) superior ao percentual permitido.

$$I_i \leq I_{i\,max} \cdot F_{sobrec\,arg\,a} \quad (2)$$

- não permitir violação dos ajustes de proteção.

$$I_i \leq I_{Pr\,otj} \quad (3)$$

- não permitir violação da faixa de tensão admissível nas redes primárias.

$$V_{j\,min} \leq V_j \leq V_{j\,max} \quad (4)$$

Em que:
fR - função de confiabilidade;
Fsobrecarga - fator de sobrecarga permitido, por exemplo, se permitir 30% de sobrecarga, usar 1,3;
Ii - corrente no ramo i;
I Pr otj - corrente de atuação do dispositivo de proteção j;
Iimax - corrente máxima admissível no ramo i;
V j - módulo da tensão no nó j;
V j min - módulo da tensão mínima aceitável no nó j;
V j max - módulo da tensão máxima aceitável no nó j.
λ0n - taxa de falhas do alimentador n, média de interrupções ano por km;
lPr otjn - comprimento dos ramos de rede protegidos pelo dispositivo de proteção j do alimentador n;
CPr otjn - número de consumidores a jusante do dispositivo de proteção j do alimentador n.

As verificações de atendimento das funções objetivo e restrições são realizadas durante o processo de cálculo de fluxo de potência para as diferentes alternativas analisadas. Já o número de consumidores interrompidos ano é obtido com a aplicação das equações clássicas de confiabilidade durante o processo de cálculo de fluxo de potência. Ressalta-se que essa função-objetivo está fortemente relacionada com o indicador de continuidade FEC.

Algoritmo de tomada de decisão multicriterial

A identificação da melhor opção para as transferências de cargas não é simples, visto que há três funções-objetivo. Por exemplo, uma determinada opção pode possuir o maior número de consumidores a ser transferido; outra, o menor número de chaves a ser operada; e a outra, o menor número de consumidores interrompido ano.

Nesse caso, o método escolhido foi o algoritmo de Bellman-Zadeh, que se mostrou eficiente para a solução desses problemas, além de permitir não apenas a análise de critérios quantitativos, mas também qualitativos. Com o uso dessa abordagem, inicialmente alteram-se todas as funções-objetivo pelas funções objetivo fuzzy, apresentadas na forma de conjuntos fuzzy. As funções de pertinência podem ser construídas a partir das Equações 5 e 6:

Para funções objetivo que devem ser maximizadas:

$$\mu_{A_j}(x) = \frac{F_j(x)}{\underset{x \in D_x}{máx}\ F_j(x)} \quad (5)$$

Para funções objetivo que devem ser minimizadas:

$$\mu_{A_j}(x) = \frac{\underset{x \in D_x}{mín}\ F_j(x)}{F_j(x)} \quad (6)$$

De acordo com o método de Bellman-Zadeh, considera-se como solução ótima a que apresenta o valor máximo da intersecção das funções de pertinência (Equação 7).

$$\underset{x \in D_x}{máx}\ \mu_D(x) = \underset{x \in D_x}{máx}\ \underset{j=1,..n}{mín}\ \mu_{A_j}(x) \quad (7)$$

Essa abordagem pode ser ilustrada pelo exemplo apresentado na Figura 2.

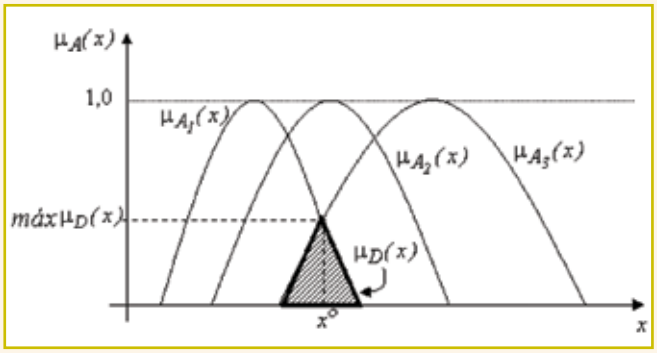

Figura 2 – Interseção das funções de pertinência e definição da área de soluções.

Figura 3 – Rede de distribuição.

A Figura 3 ilustra a aplicação do algoritmo de Bellman-Zadeh para seleção da melhor opção de transferência de carga da rede de distribuição considerada.

Este sistema contempla duas subestações, em que o alimentador da subestação 2 (SE-2), que possui as chaves telecomandadas NF-1 e NF-2, tem interligação com outros dois alimentadores da subestação 1 (SE-1) por meio de chaves telecomandadas NA-1 e NA-2.

Assim, para casos de defeitos à montante da chave NF-1, são analisadas as possibilidades de transferência de carga para o alimentador 2 (AL-2) ou para o alimentador 3 (AL-3), sem violação das restrições. As Tabelas 1 e 2 ilustram os resultados obtidos:

Tabela 1 – Resultados da análise de cada transferência.

Opções	Consumidores transferidos	Número de chaves operadas	Número de consumidores interrompidos por ano
Opção 1 (NF-1 e NA-1) Manobra viável: abrir NF-1 e fechar NA-1	14.000	2	1.800
Opção 2 (NF-1 e NA-2) Manobra viável: abrir NF-2 e fechar a NA-1	9.000	2	2.300
Base escolhida	14.000	2	1.800

Os valores relativos às funções de pertinência das soluções fuzzy, para cada opção, são obtidos com a aplicação da Equação 5 para maximizar o número de consumidores a serem transferidos, e da Equação 6 para minimizar o número de chaves a ser operado e minimizar o número de consumidores interrompidos ano, conforme a Tabela 2:

Tabela 2 – Funções de pertinência das soluções fuzzy.

Opções	Consumidores transferidos	Número de chaves operadas	Número de consumidores interrompidos/ano	Intersecção das funções – pertinência
1	$\mu C1(x) = 1{,}00$	$\mu S1(x) = 1{,}00$	$\mu\delta 1(x) = 1{,}00$	$\min \mu C1 , \mu S1 , \mu\delta 1 = 1{,}00$
2	$\mu C2(x) = 0{,}64$	$\mu S2(x) = 1{,}00$	$\mu\delta 2(x) = 0{,}78$	$\min \mu C2 , \mu S2 , \mu\delta 1 = 0{,}64$

Apoio
20 ANOS CLAMPER
Blutrafos GRUPO FURLANI
MEGABARRE BRASIL

De acordo com o método proposto, considera-se como melhor solução a opção que apresentar o valor máximo da intersecção das funções de pertinência, conforme a Equação 7. Neste caso, a melhor opção é a "1". Assim, o sistema realiza as simulações computacionais indicando qual é a melhor opção para as transferências de cargas, de acordo com as funções objetivo definidas, sem violar as restrições estabelecidas.

Resultados positivos

A ferramenta computacional desenvolvida foi aplicada na região metropolitana da AES Sul, distribuidora gaúcha de energia, a fim de avaliar o desempenho das metodologias propostas em uma região piloto. Esta rede é composta por 20 subestações de distribuição, 125 alimentadores, 62 equipamentos telecomandados e atende a 532.619 consumidores. A Figura 4 ilustra a rede, que abrange 163 km2.

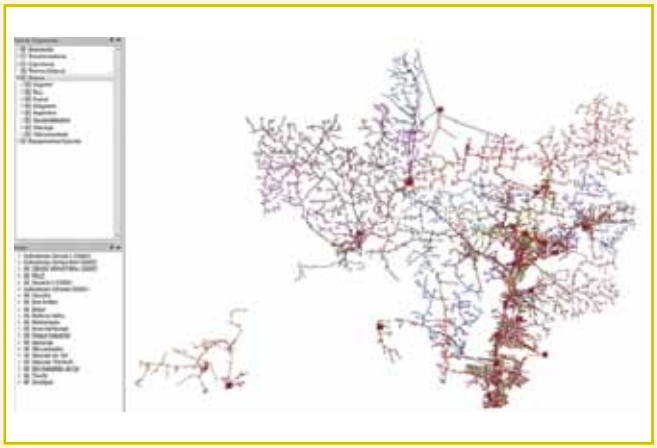

Figura 4 – Rede de distribuição da região metropolitana da AES Sul.

De acordo com a ocorrência e localização dos defeitos, o sistema informará a sequência de manobras a ser executada automaticamente pelo sistema SCADA, atendendo às funções-objetivo sem violar as restrições definidas. A Figura 5 ilustra uma tela de análise do programa após defeito.

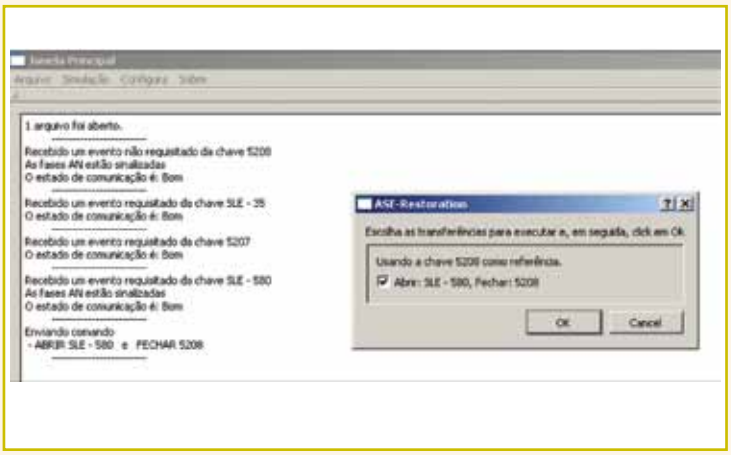

Figura 5 – Definição de manobras após defeito.

A Tabela 3 apresenta a redução esperada nos indicadores da região metropolitana a partir do restabelecimento automático de energia:

Tabela 3 – Redução esperada nos indicadores de continuidade.

Redução dos indicadores			
Indicador	DEC (h/ano)	FEC (f/ano)	END (kWh/ano)
Valor	2,11	0,97	1111,45
Percentual	18,25%	21,31%	19,22%

Já a Figura 6 mostra o detalhe de uma chave telecomandada instalada na rede da AES Sul e a tela do sistema SCADA usado para monitoramento e seu controle:

Figura 6 – (a) Chave telecomandada (b) Tela do sistema SCADA para operação das chaves telecomandadas.

Conclusão

A principal contribuição deste trabalho é a metodologia proposta para a operação automática dos equipamentos telecomandados no processo de restabelecimento de energia elétrica, aplicando os conceitos de redes inteligentes (Smart Grid). A validação da viabilidade técnica das transferências de cargas é realizada em tempo real por meio de simulações computacionais, incluindo a definição da melhor opção para as transferências usando os equipamentos telecomandados, após contingência, a partir de métodos de tomada de decisão multicriterial.

Assim, o sistema indicará qual é a melhor opção para as transferências de acordo com as funções-objetivo definidas, sem violar as restrições estabelecidas. Para uma avaliação real do desempenho do software, foram realizados estudos de casos com dados reais das concessionárias, os quais se apresentaram satisfatórios.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio técnico e financeiro da concessionária de energia elétrica AES SUL Distribuidora Gaúcha de Energia SA, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Referências

• *KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica através de ferramenta para solução de problemas de decisão com múltiplos objetivos e incertezas. CBA – Congresso Brasileiro de Automática. São Paulo, 1996.*

• *BROWN, R. E. Impact of Smart Grid on distribution system design. IEEE Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, p.1-4, 2008.*

• *SPERANDIO, M.; COELHO, J. et al. A Influência do Cálculo de Taxas de Falha na Alocação de Chaves Automáticas. XII ERIAC – Décimo Segundo Encontro Regional Ibero-americano do Cigré. Foz do Iguaçu-PR, 2007.*

• *BELLMAN, R.; ZADEH, L. A. Decision making in a fuzzy environment. Management Science 17(4), p. 141-164, 1970.*

• *EKEL, P.Y.; TERRA, L. D. B.; JUNGES, M. F. D. Methods of Multicriteria Decision Making in Fuzzy Environment and Their Applications to Power System Problems. Proceedings of the 13th Power Systems Computation Conference, v. 2, p. 755-761, 1999.*

• *KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. et al. Desenvolvimento de Ferramenta Automatizada para Estimação da Qualidade de Fornecimento das Redes de Distribuição. V SBQEE – Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica. Aracajú, 2003.*

• *Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. PRODIST – Procedimentos de Distribuição – Módulo 8. ANEEL, 15 dez. 2009.*

• *TSAI, L. Network reconfiguration to enhance reliability of electrical distribution systems. Electric Power System Research. Elsevier, n. 27, p. 135-140, 1993.*

• *BERNARDON, D. P.; COMASSETTO, L.; CANHA, L. N.; ABAIDE, A. R. New Methods for Distribution Network Reconfiguration from Multicriteria Decision-Making. IEEE International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, p. 225-230, abr. 2007.*

**** DANIEL PINHEIRO BERNARDON é doutor, mestre e graduado em Engenharia Elétrica pela UFSM. É professor adjunto 2 da Universidade Federal do Pampa (Unipampa) desde 2008. Atua na área de modelagem e otimização de sistemas de potência.***

VINICIUS JACQUES GARCIA é engenheiro eletricista, pró-reitor de pós-graduação da Unipampa e pesquisador da UFSM e da Unesp.

MAURICIO SPERANDIO é engenheiro eletricista, com mestrado e doutorado em Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina. Atualmente é professor adjunto da Universidade Federal do Pampa.

JUMAR LUÍS RUSSIPOSSUI é engenheiro eletricista, com mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria. Atualmente é Professor Adjunto da Universidade Federal do Pampa.

ERIC FERNANDO BOECK DAZA é engenheiro da AES Sul.

LORENZO COMASSETO é engenheiro da AES Sul.

FIM

Veja este e todos os artigos da série "Smart grids – redes inteligentes" no site www.osetoreletrico.com.br. Em caso de dúvidas, críticas e comentários, escreva para redacao@atitudeeditorial.com.br