

Capítulo V

Integração da geração eólica nas redes de transmissão e distribuição

*Por Milthon S. Silva, Harald Schwarz e Klaus Pfeiffer**

Em geral, os países com alto custo de produção de energia elétrica como Alemanha têm procurado de forma agressiva a desregulamentação do setor elétrico. No entanto, o rápido crescimento da geração de energias renováveis, especialmente a eólica, vem causando problemas de carregamento no sistema elétrico.

No estudo, são apresentados os resultados da experiência na integração da geração eólica em Brandemburgo, estado federal alemão, que circunda a cidade de Berlim e que possui 28% da energia eólica gerada na Alemanha.

Este estado apresenta uma maior expansão da geração eólica devido às suas características geográficas e a integração dessa geração no sistema elétrico existente vem criando muitos desafios para as concessionárias de distribuição e transmissão de energia.

Em todas as partes do mundo, fatores como a redução dos índices de poluição por meio da diminuição do uso de combustíveis fósseis, expansão da oferta de energia elétrica e o melhor aproveitamento dos recursos naturais renováveis estão favorecendo a implementação de tecnologias como a geração de energia elétrica, pelo uso de energias renováveis e a disseminação da geração distribuída.

A ligação da geração distribuída (conjunto

de fontes dispersas de médio e pequeno portes ligadas à rede elétrica), que envolve unidades eólicas, fotovoltaicas, a gás natural, entre outras, provoca problemas nos sistemas elétricos de potência das redes de distribuição para a operação das concessionárias. Esses problemas não estão contemplados dentro do atual sistema energético brasileiro, o qual se encontra desregulamentado.

As empresas concessionárias das redes de distribuição necessitam se equipar de ferramentas de análise para avaliação do impacto destas fontes conectadas à rede, sob o ponto de vista da confiabilidade do atendimento, qualidade da tensão e estabilidade da operação, considerando que muitas destas fontes não são despacháveis e estão sujeitas a operação variável em virtude da flutuação do suprimento de energia primária, a exemplo do vento (energia eólica) e da radiação solar (energia fotovoltaica).

Devido aos problemas de contaminação pelo uso de fontes de energia baseadas na queima de combustíveis fósseis ou pela explosão de átomos, muitos governos na Europa estão destinando maiores quantidades de recursos para a implementação de sistemas baseados no uso de energias renováveis, especialmente na Alemanha, onde durante a última década a quantidade

de geração distribuída instalada duplicou, particularmente a energia eólica (DEWI, 2010).

No Brasil, a atual conjuntura relativa ao abastecimento de energia elétrica, associada às incertezas sobre a afluência dos reservatórios, competição entre os agentes, preocupações ambientais, entre outros, evidencia a importância da adoção de estratégias criativas para aliviar condições críticas do suprimento de energia elétrica (site Eletrobras, Proinfa 2010). Para cumprir esse objetivo, a Eletrobras apoia o desenvolvimento de projetos para a diversificação da matriz energética brasileira. Para isso foi criado o programa brasileiro de incentivo às fontes alternativas de energia elétrica, o Proinfa, instituído pela Lei n. 10.438, de abril de 2002, e revisado pela Lei n. 10.762, de novembro de 2003.

Até dezembro de 2010, o Brasil possuía no total 48 projetos eólicos com 871.482 MW de potência instalada, estando em construção atualmente 19 projetos com 551,8 MW. A maioria desses projetos faz parte dos empreendimentos outorgados entre 1998 e 2010 pelo Proinfa e dos leilões de energia (fontes alternativas e reserva) que totalizam 84 projetos com 2.841,33 MW que, quando concluídos, representarão 2,5% da matriz energética nacional.

Energias renováveis na Alemanha

A geração de energias renováveis na Alemanha foi implementada desde meados de 1970. No período compreendido

entre 1975 a 1995 foram instaladas aproximadamente 3 GW, especialmente relacionadas com a geração eólica. Naquele momento, o governo alemão decidiu estabelecer uma lei federal para promover a instalação de energias renováveis (EEG), determinando que, enquanto o valor da geração de energia vinda de centrais térmicas era três centavos de Euro por kWh, a energia eólica seria de nove centavos de Euro por kWh (Gesetz, 2006), garantindo, desta maneira, o investimento por parte de produtores independentes.

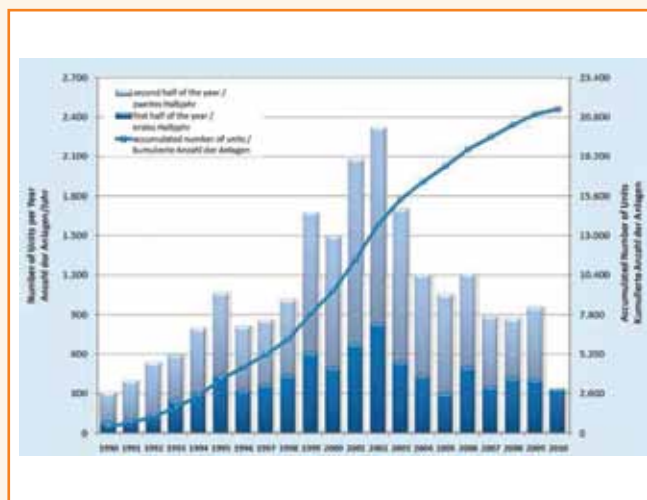


Figura 1 – Evolução do número de aerogeradores instalados na Alemanha até junho de 2010.

TABELA 1 – DISTRIBUIÇÃO DA ENERGIA EÓLICA NA ALEMANHA, DEWI 2010.

	A STATUS ATÉ 30/06/2010	B SOMENTE EM 2010
1. Número de aerogeradores	21.308	332
2. Capacidade instalada (MW)	26.383,66	659,18
Número de aerogeradores (repotenciação) dentro de 1. A e B	350	9
Capacidade pela repotenciação (MW) dentro de 2. A e B	699,99	18,90
Número de aerogeradores (Offshore) dentro de 1. A e B	17	2
Capacidade em offshore (MW) dentro de 2. A e B	82,00	10,00
Potência média instalada (kW/aerogerador)	1.238,20	1.985,48

A Figura 1 ilustra a evolução do número de aerogeradores instalados na Alemanha durante os últimos anos. Isso conduziu a um aumento rápido da geração de energia eólica que cresce a uma taxa de 2,5 GW por ano. Em 2010, a capacidade instalada de energias renováveis chegou a 26,3 GW. Na Tabela 1, é apresentada a distribuição de energia eólica na Alemanha, em que se observa que a potência nominal média dos aerogeradores instalados atualmente está em aproximadamente 2 MW.

Pelo cenário antes indicado, nos últimos anos é cada vez mais frequente a situação de sobrecarga “Overload” das linhas de distribuição, originada pelo aumento da potência das unidades de geração eólica combinado com períodos de baixa carga da rede, levando a um debate nacional sobre a necessidade de trocar as linhas de distribuição de baixa para média tensão ou aumentar o nível de tensão das redes de distribuição.

Sabe-se, no entanto, por experiências passadas, que a construção de uma nova linha ou redimensionamento de uma já existente pode levar cerca de cinco a dez anos por conta dos problemas de permissões na Alemanha. Para resolver

TABELA 2 – TECNOLOGIA E TIPO DE AEROGERADORES INSTALADOS NA ALEMANHA EM 2010, DEWI 2010.

	DIÂMETRO DO ROTOR	25 – 45 M	45,1– 64 M	64,1–80 M	>80 M
	Sem multiplicador	0	40	42	132
	Com multiplicador	0	0	7	111
	Controle Pitch	0	40	49	243
	Controle Stall	0	0	0	0
	Controle Active Stall	0	0	0	0
	Uma velocidade fixa	0	0	0	0
	Duas velocidades fixas	0	0	0	0
	Velocidade variável	0	40	49	243
	Número de aerogeradores	0	40	49	243

este problema, o governo alemão exigiu a implementação de sistemas de segurança na administração da rede nas concessionárias de distribuição, chegando a ser atualmente uma referência a nível mundial.

Nas redes elétricas de distribuição da Alemanha, normalmente, situações críticas podem acontecer quando a rede está sobrecarregada devido à alta demanda de energia ou a falhas transitórias geradas por tempestades com fortes ventos, que alteram a potência dos geradores das unidades eólicas, cujo principal problema é a instabilidade da tensão e a frequência da rede.

A situação mais crítica na rede de distribuição ocorre quando acontecem fortes ventos combinados com um período de baixa demanda de carga na rede. As linhas de distribuição têm que transportar uma energia não necessária ao transformador que está interconectado à rede de transmissão, afetando sua capacidade térmica e ocasionando possíveis danos aos equipamentos ligados.

Outra característica atualmente interessante na geração eólica da Alemanha é a utilização principalmente de aerogeradores com controle Pitch de velocidade variável e diâmetro de rotor maior que 80 m, conforme Tabela 2.

Problemas causados pela geração eólica na Alemanha

Atualmente, um total de 175 GW de energia eólica está instalado ao redor do mundo, dessa, aproximadamente 27 GW (final 2010) estão conectadas nas redes elétricas alemãs que representam aproximadamente 16% do total, conforme ilustrado na Figura 2. (WWEA Dez-2010).

Além disso, uma quantidade de 10 GW a ser instalada em parques eólicos “On-shore” (na costa) é esperada dentro dos próximos cinco anos. Assim como o incremento na construção de plataformas “Off-shore” (no mar), podem acrescentar outros 20 GW de energia eólica na rede elétrica alemã.

Este incremento traz benefícios por ser a energia eólica


Figura 2 – Energia eólica instalada na Alemanha, Ender, 2010.

uma energia limpa, renovável e não contaminante ao meio ambiente. Em contrapartida, este rápido crescimento está originando graves problemas na operação da rede, como os exemplos descritos a seguir.

Operação instável do sistema

O sistema elétrico europeu está projetado como um sistema integral que usa como tensão padrão 400 kV, que é operado por vários "Transmission System Operator" (TSOs). Estes têm a responsabilidade de manter a operação do sistema em uma região segura e confiável tanto em frequência como em tensão.

A geração eólica tem como característica principal a sua flutuação que depende das condições do vento e que precisa ser compensada para proporcionar uma alimentação estável ao sistema. Esta energia de compensação é comprada ou vendida dentro de um "spot market" (mercado livre,) que normalmente possui um patamar de preço muito elevado, fazendo esta geração de energia ser não competitiva em relação às outras fontes convencionais.

A Figura 3 ilustra uma comparação entre a geração eólica prevista e real de um gerador durante um período de 24 horas.

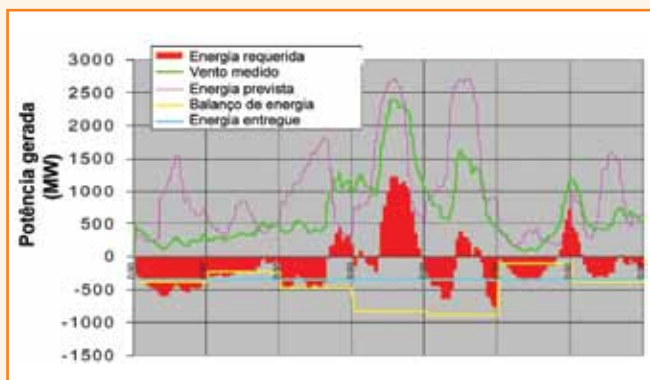


Figura 3 – Um dia normal de geração eólica, Schwarz, 2006.

Pelas considerações anteriores, para o uso intensivo da geração eólica seria necessário fazer alterações na regulamentação do sistema elétrico, mas esse procedimento é muito demorado. Por isso, na Alemanha, na última revisão da "German Law on Energy Economics" – EnWG (2005), o Governo Federal outorgou às concessionárias de energia o poder para que ajustem todas as suas unidades geradoras relevantes, assim como a possibilidade de transferir suas cargas em caso de risco de instabilidade no sistema (BUNR, 2005). Para isso ser organizado de uma maneira mais técnica, todas as novas unidades geradoras (renováveis e não renováveis) que desejam ser conectadas ao sistema no futuro estão agora forçadas por lei a instalar unidades de controle remoto que estarão diretamente ligadas ao TSO de sua região (Gesetz, 2004).

Sobrecarga térmica de linhas e equipamentos

Embora a estabilidade do sistema possa ser garantida e mantida dentro da rede, seus componentes, como linhas

de transmissão, transformadores, entre outros, podem ser sobrecarregados especialmente durante uma situação de tempestade com vento forte e baixa demanda de energia em uma área específica.

Para evitar o desligamento e a saída de operação de uma linha devido à sobrecarga térmica, a geração distribuída nessa área deve ser desconectada dentro de períodos de tempo específicos. Para realizar esse trabalho são utilizados os sistemas de segurança na administração da rede "Network Safety Management Systems" (NSMs), que foram comissionados e postos em serviço na Alemanha e que já entraram em operação várias vezes.

Atividades contínuas por parte das concessionárias para reestruturar a capacidade de suas redes, bem como a construção de novas linhas poderiam resolver o problema da restrição da capacidade de transporte da rede. Mas, devido ao tempo de construção de uma nova linha de transmissão, que na Alemanha é de até dez anos, o uso de sistemas NSM garante a correta operação da rede. A Figura 4 ilustra a relação entre o incremento da geração de energia eólica até 2011 (linha verde) e a capacidade de transporte das redes elétricas de 110 kV (áreas amarelas), em que se pode observar que, para um maior incremento da geração eólica, será necessária a construção de novas linhas de transmissão.

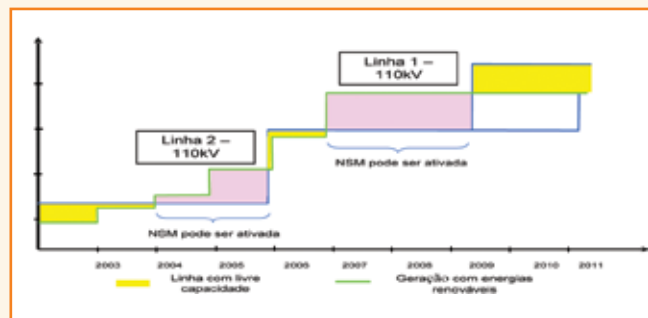


Figura 4 – Geração de energia eólica e incremento da capacidade de transporte, Pfeiffer, 2008.

Queda de tensão depois de um curto-circuito

No sistema elétrico, normalmente ocorrem graves quedas de tensão depois de curtos-circuitos. No caso de uma queda de tensão de aproximadamente 85% do valor nominal da tensão, os modelos anteriores de geradores eólicos geralmente saíam de operação prejudicando a estabilidade do sistema.

Uma pesquisa das redes de transmissão alemãs de 380 kV mostrou que, em situações de curtos-circuitos trifásicos, um número relevante de barras da rede dentro de uma grande área tinha uma queda de tensão que estava diretamente relacionada com uma perda de até 4 GW na geração de energia eólica.

A Figura 5 ilustra um exemplo disso no leste alemão, em que aproximadamente 2,7 GW da geração eólica foram desconectados, depois de acontecer um curto-circuito trifásico (área vermelha). Este desequilíbrio causa rapidamente um grande problema de estabilidade no sistema de transmissão.



Figura 5 – Área de influência de um curto-circuito trifásico, DENA, 2005.

Geração de potência reativa

A ideia básica de um sistema de geração elétrica é a de transportar potência ativa de um gerador a um consumidor, energizando os campos elétricos (tensões) e campos magnéticos (correntes), assim como da potência reativa que deve estar disponível dentro do sistema.

Atualmente, a principal fonte de potência reativa é o próprio gerador e, dentro de um sistema convencional de energia, os geradores estão diretamente acoplados à rede. Os geradores de energia eólica usualmente estão desacoplados da rede por meio de conversores de frequência.

Por isso, este tipo de geração não é capaz de entregar potência reativa à rede e os próprios conversores são os grandes consumidores desta potência.

Este problema é maior quando ocorre tempestade com vento forte. Nesta situação, os geradores que estão diretamente acoplados nas centrais de energia convencionais devem ser desconectados da rede para manter a estabilidade do sistema. Vale ressaltar que essa potência reativa perdida pelo desligamento desses geradores posteriormente poderia ser necessária para a operação dos conversores de frequência dos parques eólicos e isso de novo causaria problemas na estabilidade do sistema.

Desempenho do NSM “Network Safety Management”

As leis alemãs para a operação da rede exigem das concessionárias de distribuição que assegurem o fornecimento de energia para o consumidor final de forma estável e contínua. Isso inclui que o sistema tem de ter um comportamento estável quando acontecer a saída de uma linha de transmissão devido a um curto-circuito, o que é conhecido como segurança (n-1).

Além disso, deve ser possível manter uma linha para alimentação da carga quando outra tenha saído, permanecendo o sistema estável. Todas essas regras de operação têm de ser levadas também em consideração quando acontecer situações de sobrecarga, devido a alterações das unidades eólicas de geração e baixa carga da rede.

Por isso, as concessionárias realizam um permanente cálculo de fluxo de carga “on-line” (n-1), que serve como base para a atuação de seus sistemas de administração de segurança (NSM), possibilitando, assim, a desconexão de um determinado gerador de energia quando ocorre uma sobrecarga no sistema. Para simplificar a operação, as concessionárias organizaram suas redes em vários subsistemas, cada um deles conectado a transformadores de 220 kV ou 380 kV. Para cada subsistema, um máximo de corrente para as linhas e equipamentos foi definido.

Foi estabelecido, desde 2006, que cada gerador a ser conectado a um determinado subsistema terá de ser instalado a uma unidade de controle. Estas unidades de controle permitem ao operador do sistema determinar a quantidade de energia renovável ou convencional a ser utilizada ou liberada de acordo com sua necessidade.

Simulação de cenários de penetração da geração eólica

Para realizar o estudo de simulação e comparação de diferentes cenários com e sem expansão da rede, foram realizados os seguintes passos: primeiro, foi escolhido uma rede modelo na qual estão instalados diferentes subestações (SE) com unidades eólicas (WP) e com geração elétrica convencional (CS) que estão interligados dentro de uma topologia em anel (ver Figura 6).

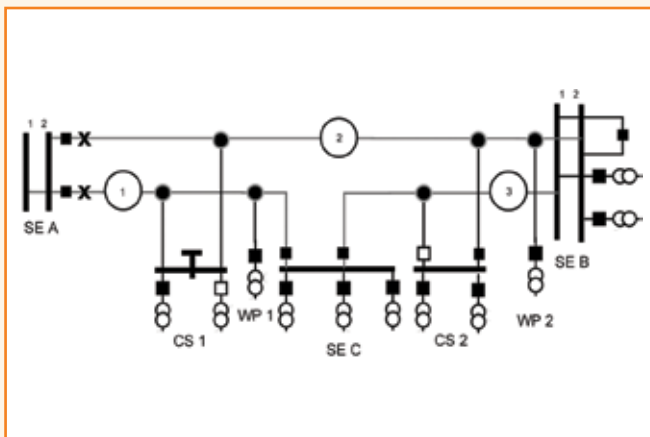


Figura 6 – Modelo de sistema elétrico de potência.

Para essa rede modelo foi montada uma base de dados com informações de todos os parâmetros elétricos de cada uma das subestações existentes (tensão, potência ativa, reativa, etc.), considerando sua evolução durante 2006. Dentro desta base foram escolhidos dias específicos que representassem a cada uma das estações do ano (verão, inverno, etc.), tomando em consideração a informação de um dia da semana e outro do fim de semana. Todos os dados foram coletados a cada 15 minutos.

Usando os dados dos dias escolhidos foi calculado o fluxo de carga dinâmico “Dynamic load flow” com ajuda do software Elektra e aplicando o método de Newton Raphson com um máximo de 99 iterações para cada um dos casos antes mencionados, cujos resultados são mostrados na Tabela 3.

TABELA 3 – CÁLCULO DO FLUXO DE CARGA DINÂMICO NA BASE DE DADOS DE 2006.

LINHAS/DIAS	U [kV]	I [A]	P [MW]	Q [MVAR]
SE A – SE B				
03/01/06	115,5	0,0	0,0	0,0
07/04/06	114,1	0,0	0,0	0,0
05/07/06	114,6	26,6	5,3	0,2
SE A – SE C				
03/01/06	115,2	83,9	14,3	2,2
07/04/06	115,1	74,9	11,9	3,6
05/07/06	115,2	85,6	14,3	2,4
SE B – SE C				
03/01/06	115,2	56,8	8,5	6,3
07/04/06	115,1	44,9	5,4	6,2
05/07/06	115,2	58,6	9,9	5,3

Posteriormente, foram montadas bases de dados com as informações dos anos 2006 e 2007 com as quais se pode comparar e estimar o grau de incremento de novas unidades geradoras, especialmente eólicas, na rede modelo, sendo tomado esse porcentual como representativo para a previsão de futuros cenários de expansão da rede. Aplicou-se a mesma metodologia para os dados de 2007. Depois disso, foram simulados novos futuros cenários considerando um modelo da rede com incremento de novas unidades geradoras, utilizando para isso a porcentagem antes calculada para um horizonte de trabalho de dez anos, calculando-se a potência e energia perdidas para cada um desses casos.

Finalmente, na Figura 7, é ilustrada a curva que representa a energia perdida (MWh) em 2006 nas linhas de transmissão de 110 kV na rede modelo para os diferentes cenários de penetração da geração eólica (0 a 150%).

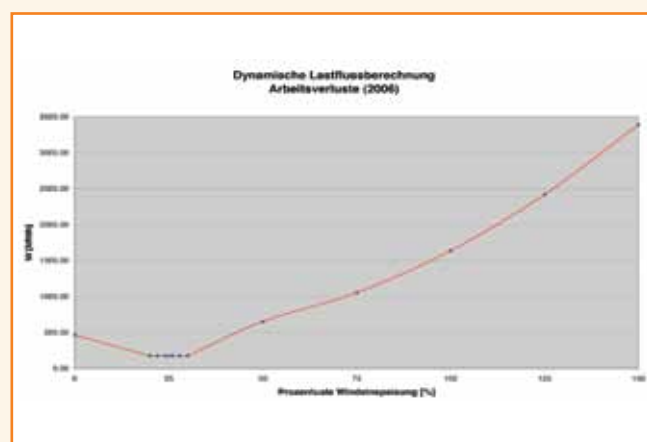


Figura 7 – Cálculo das perdas nas linhas de transmissão (110 kV).

Conclusões

O incremento considerável da utilização da geração eólica requer modificações na análise de sistemas elétricos já que inclui diferentes incertezas e variáveis não controláveis, necessitando de estudos apropriados com simulações e modelagens. O maior problema para um operador de sistemas

elétricos é integrar plantas de geração de energias renováveis dentro de uma rede elétrica já existente.

Nesse sentido, com o incremento considerável das energias renováveis no Brasil e a diversificação de seu sistema elétrico, faz-se necessário no futuro pensar na aplicação de sistemas de segurança para a administração da rede “Network Security Management Systems” (NSMs), junto com o cálculo do fluxo de carga dinâmico da rede.

Referências

- BUNR, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. *Erneuerbare Energie in Zahlen – Nationale und Internationale Entwicklung*. Berlin: Broschüre, Germany, 2005.
- Gesetz, Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich. Act of renewable energy, In *Bundesgesetzblatt Jahrgang, Germany, 2006*.
- DENA, German Energy Agency. *Study demonstrates that large scale integration of wind energy in the electricity system is technically and economically feasible, 2008*.
- PFEIFFER, K.; SCHWARZ, H.; ROSKODEN, L. *Integration of Renewable Energies to the East German Grid – Actual Problems and Possible Solutions*. Proceedings of the WSEAS PE’08, 2008, p. 7-13.
- ENDER, C. *Wind Energy Use in Germany – Status 30.06.2010*. Dewi Magazin, n. 37 Aug. 2010.
- PROINFA. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/programs_display.do?prg=5>. Acesso em: dez. 2010.
- WWEA. Disponível em: <<http://www.wwindea.org/home/index.php>>. Acesso em: fev. 2011.

***Milthon Serna Silva é engenheiro eletricista pela Universidad San Antonio Abad (Peru), Mestrado e Doutorado pela Universidade de São Paulo (Brasil) e Pós-Doutorado em Energias Renováveis – Geração Eólica pela Brandenburg University of Technology (Alemanha). Atualmente é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Sergipe, membro do IEEE e do comitê SC-13 do Cigré.**

Harald Schwarz é engenheiro eletricista pela Technical University Berlin (Alemanha) com ênfases em Sistemas de Potência e Doutorado pela University of Dortmund (Alemanha). Trabalhou na ABB, em Mannheim, no desenvolvimento de transformadores de grande porte e subestações de Extra Alta Tensão (EHT). Atualmente, é professor principal do Departamento de Engenharia Elétrica da Brandenburg University of Technology e diretor do Center for Energy Technology Brandenburg (CEBra).

Klaus Pfeiffer é engenheiro eletricista e doutor em engenharia elétrica pela Technical University Dresden (Alemanha) com ênfase em Geração de Energia Elétrica. Trabalhou como consultor no planejamento de sistemas de distribuição principalmente no desenvolvimento de projetos de proteção seletiva para diferentes concessionárias elétricas da Alemanha. Atualmente, é professor do Departamento de Sistemas de Distribuição e Tecnologia de Alta Tensão da Brandenburg University of Technology.

**Continua na próxima edição
Confira todos os artigos deste fascículo em
www.osetoelettrico.com.br
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o
e-mail redacao@atitudeeditorial.com.br**