

Capítulo XI

Transitórios

Por Gilson Paulillo, Mateus Duarte Teixeira e Ivandro Bacca*

O termo transitório tem sido aplicado à análise das variações do sistema de energia para denotar um evento que é momentâneo e indesejável. De outra forma, entende-se por transitórios eletromagnéticos as manifestações ou respostas elétricas locais ou nas adjacências, oriundas de alterações súbitas nas condições operacionais de um sistema de energia elétrica.

Os sistemas elétricos estão sujeitos a inúmeros fenômenos transitórios, variando desde as oscilações eletromecânicas (baixas frequências) até as rápidas variações de tensões e correntes causadas por chaveamentos ou mudanças bruscas de estado.

Geralmente, a duração de um transitório é muito pequena, mas de grande importância, uma vez que os equipamentos presentes nos sistemas elétricos estarão submetidos a grandes solicitações de tensão e/ou corrente.

Os fenômenos transitórios podem ser classificados em dois grupos, os chamados transitórios impulsivos e os transitórios oscilatórios.

Transitórios impulsivos

Um transitório impulsivo é uma súbita alteração não desejável no sistema, que se encontra em condição de regime permanente, refletido nas formas de ondas

da tensão e/ou corrente, sendo unidirecional na sua polaridade (primeiramente positivo ou negativo).

Em razão da alta frequência, os transitórios impulsivos são amortecidos rapidamente devido à resistência dos componentes do sistema. Geralmente, não são conduzidos para muito longe do ponto onde foram gerados. Estes transitórios podem excitar ressonâncias naturais do sistema elétrico e provocar outros tipos de transitórios, como os transitórios oscilatórios.

Normalmente são causados por descargas atmosféricas com frequências bastante diferentes daquela da rede elétrica. A Figura 1 ilustra a aplicação de uma descarga atmosférica na fase A de um determinado sistema elétrico.

A Figura 2 apresenta a forma de onda da corrente da descarga atmosférica aplicada ao sistema em análise. Como resposta do sistema à aplicação dessa descarga, a Figura 3 apresenta as formas de onda das tensões fase-fase no receptor. Pode-se observar que a aplicação de um transitório impulsivo, isto é, uma descarga atmosférica, ocasionou transitórios oscilatórios.

Os transitórios impulsivos são normalmente caracterizados pelo seu tempo de aumento e decaimento, os quais podem ser revelados pelo conteúdo espectral do sinal em análise. Como exemplo,

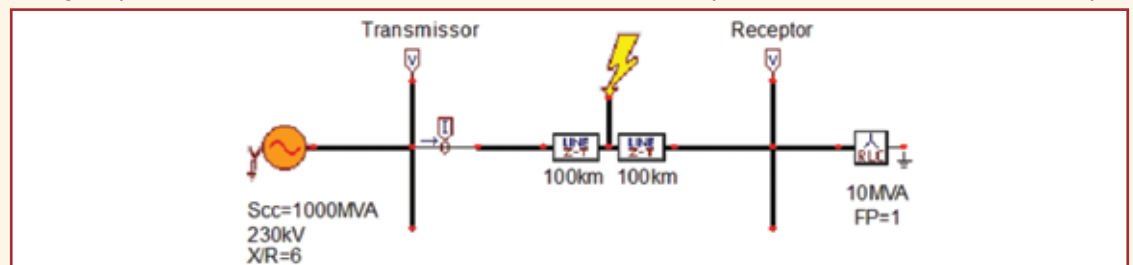


Figura 1 – Aplicação de uma descarga atmosférica em um determinado sistema elétrico.

um transitório impulsivo $1,2 \mu\text{s} \times 50 \mu\text{s}$ com 2.000 V nominalmente aumenta de zero até seu valor de pico de 2.000 V em $1,2 \mu\text{s}$ e decai a um valor médio do seu pico em $50 \mu\text{s}$.

Como anteriormente citado, a causa mais comum de transitórios impulsivos são as descargas atmosféricas. Devido à alta frequência do sinal resultante, a forma dos transitórios impulsivos pode ser alterada rapidamente pelos componentes do circuito e apresentar características significantes quando observadas de diferentes partes do sistema de energia.

Em sistemas de distribuição, o caminho mais provável para

as descargas atmosféricas é por meio de um condutor fase, no primário ou no secundário, causando altas sobretensões no sistema. Uma descarga diretamente na fase geralmente causa flashover na linha próxima ao ponto de incidência e pode gerar não somente um transitório impulsivo, mas também uma falta acompanhada de afundamentos de curta duração e interrupções. Altas sobretensões transitórias podem também ser geradas por descargas que fluem ao longo do condutor terra. Existem numerosos caminhos através dos quais as correntes de descarga podem fluir pelo sistema de aterramento, tais como

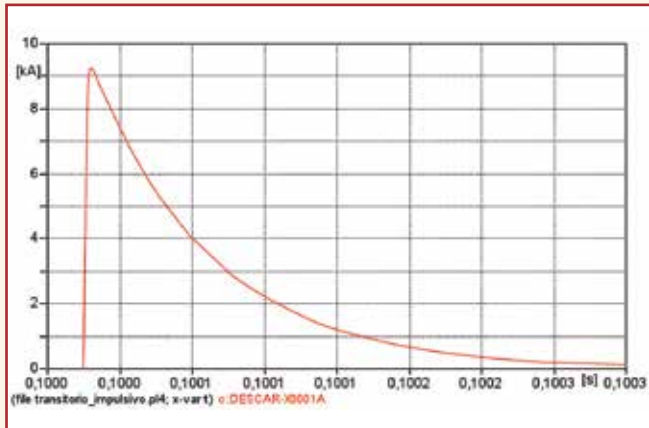


Figura 2 – Corrente proveniente da descarga atmosférica.

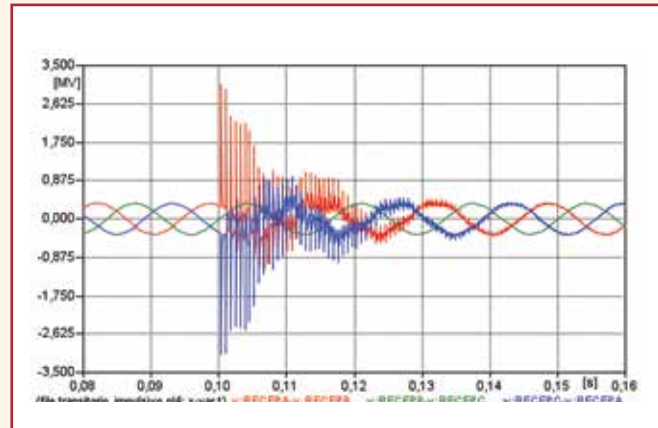


Figura 3 – Tensão fase-fase no receptor do sistema analisado.

o terra do primário, o terra do secundário e as estruturas do sistema de distribuição.

Os principais problemas de qualidade da energia causados por estas correntes no sistema de aterramento são os seguintes:

- Elevação do potencial do terra local, em relação a outros terras, em vários kV. Equipamentos eletrônicos sensíveis que são conectados entre duas referências de terra, tal como um computador conectado ao telefone por meio de um modem, podem falhar quando submetidos aos altos níveis de tensão;
- Indução de altas tensões nos condutores fase, quando as correntes passam pelos cabos a caminho do terra.

Em se tratando de descargas em pontos de extra alta tensão, o surto se propaga ao longo da linha em direção aos seus terminais, podendo atingir os equipamentos instalados em subestações de manobra ou abaixadoras. Entretanto, a onda de tensão, ao percorrer a linha, desde o ponto de incidência até as subestações abaixadoras para a tensão de distribuição, tem o seu valor de máximo consideravelmente atenuado, e assim, consumidores ligados na baixa tensão não sentirão os efeitos advindos de descargas atmosféricas ocorridas em nível de transmissão. Contudo, os consumidores atendidos em tensão de transmissão e supostamente localizados nas proximidades do ponto de descarga estarão sujeitos a tais efeitos, podendo ocorrer a danificação de alguns equipamentos de suas respectivas instalações. Como principais medidas para mitigar os efeitos desses transitórios destacam-se o uso de filtros, supressores de surtos (para-raios) e transformadores isoladores.

Transitórios oscilatórios

Também como para o caso anterior, um transitório oscilatório é uma súbita alteração não desejável da condição de regime permanente da tensão, corrente ou ambas, em que as mesmas incluem valores de polaridade positivos ou negativos. É caracterizado pelo seu conteúdo espectral (frequência predominante), duração e magnitude da tensão.

Transitórios oscilatórios de baixa frequência

Um transitório com uma componente de frequência primária menor do que 5 kHz, e uma duração de 0,3 ms a 50 ms, é considerado um transitório oscilatório de baixa frequência. Estes transitórios são frequentemente encontrados nos sistemas de subtransmissão e de distribuição das concessionárias e são causados por vários tipos de eventos. O mais comum provem da energização de bancos de capacitores, que tipicamente resulta em uma tensão transitória oscilatória com uma frequência primária entre 300 Hz e 900 Hz. O pico da magnitude pode alcançar 2,0 pu, mas são tipicamente 1,3 pu a 1,5 pu com uma duração entre 0,5 e 3 ciclos dependendo do amortecimento do sistema. A Figura 4 apresenta um sistema

composto por uma concessionária e um banco de capacitores. A tensão no barramento e a corrente do banco de capacitores encontram-se ilustradas nas Figuras 5 e 6, respectivamente.

Considerando o crescente emprego de capacitores pelas concessionárias para a manutenção dos níveis de tensão, e pelas indústrias com vistas à correção do fator de potência, têm-se verificado uma preocupação especial no que se refere à possibilidade de se estabelecer uma condição de ressonância, devido às oscilações de altas frequências, entre o sistema da concessionária e a indústria, e assim ocorrer uma amplificação das tensões transitórias, bem superiores às citadas anteriormente, que podem atingir níveis de 3 pu a 4 pu.

Um procedimento comum para limitar a magnitude da tensão transitória é transformar os bancos de capacitores do consumidor, utilizados para corrigir o fator de potência, em filtros

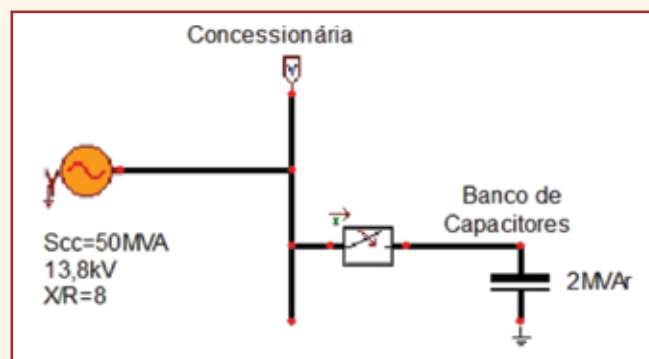


Figura 4 – Energização de um banco de capacitores.

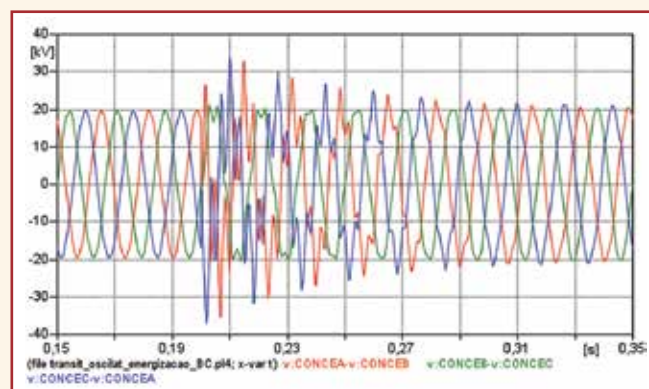


Figura 5 – Tensão fase-fase no barramento de conexão do banco de capacitores.

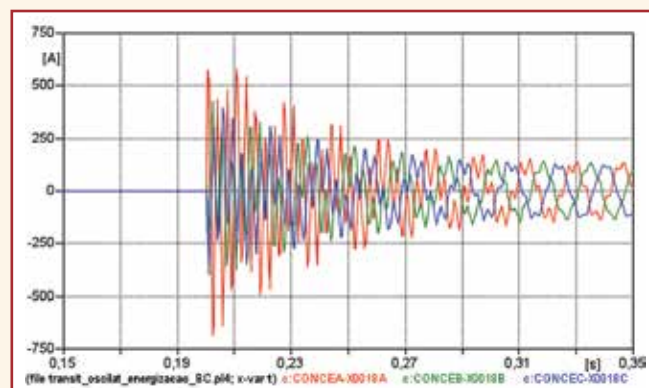


Figura 6 – Corrente do banco de capacitores.

harmônicos. Uma indutância em série com o capacitor reduzirá a tensão transitória na barra do consumidor a níveis aceitáveis. No sistema da concessionária, utiliza-se o chaveamento dos bancos com resistores de pré-inserção. Com a entrada destes resistores no circuito, o primeiro pico do transitório, o qual causa maiores prejuízos, é significativamente amortecido.

Transitórios oscilatórios com frequências primárias menores do que 300 Hz também podem ser encontrados em sistemas de distribuição. Estes são geralmente associados com a ferroressonância e a energização de transformadores. Transitórios envolvendo capacitores em série podem também ser incluídos nesta categoria. Estes ocorrem quando o sistema responde pela ressonância com componentes de baixa frequência na corrente de magnetização do transformador (segunda e terceira harmônica) ou quando condições não usuais resultem em ferroressonância. A ferroressonância é um fenômeno caracterizado por sobretensões formas de ondas irregulares e está associado com a excitação de uma ou mais indutâncias através de uma capacitância série [ANSI/IEEE Std 100-1984].

Oscilações de ferroressonância podem aparecer nos TPCs devido à possibilidade de uma capacitância entrar em ressonância com algum valor particular de indutância dos componentes que contém núcleo de ferro. Esta situação não é desejável no caso dos TPCs, uma vez que informações indesejáveis poderiam ser transferidas aos relés e aos instrumentos de medição.

A Figura 7 ilustra um sistema elétrico onde ocorre o fenômeno da ferroressonância. Nesse sistema o indutor não linear representa o equivalente de um transformador e a capacitância em série representa as capacitâncias do sistema.

As Figuras 8 e 9 apresentam, respectivamente, a tensão e corrente obtida nesse sistema.

Transitórios oscilatórios de média frequência

Um transitório com componentes de frequência entre 5 kHz e 500 kHz, com uma duração média de dezenas de microssegundos (ou vários ciclos da frequência principal), é referenciado como transitório oscilatório de média frequência. Estes podem ser causados pelo chaveamento de disjuntores para a eliminação de faltas e podem também ser o resultado de uma resposta do sistema a um transitório impulsivo, que também podem ser causados pela energização de linhas de transmissão.

A Figura 10 apresenta um sistema onde será realizada a energização de uma linha de transmissão. As tensões fase-fase

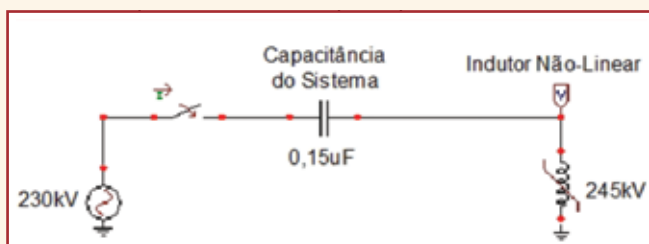


Figura 7 – Sistema elétrico em que ocorre uma ferroressonância.

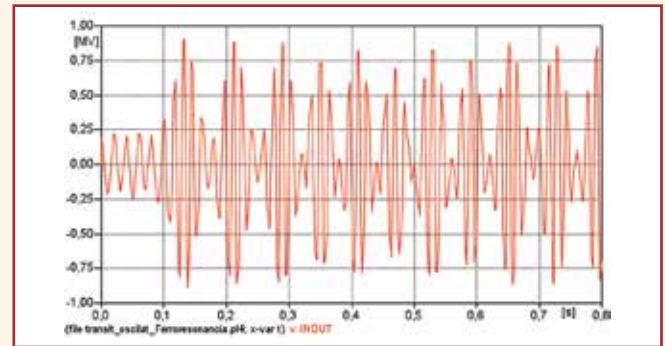


Figura 8 – Tensão sobre o indutor não linear.

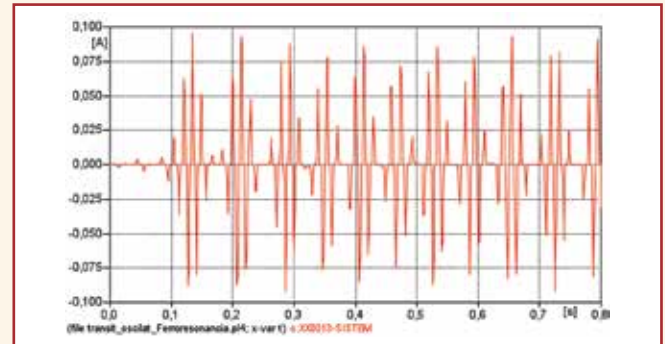


Figura 9 – Corrente do sistema.

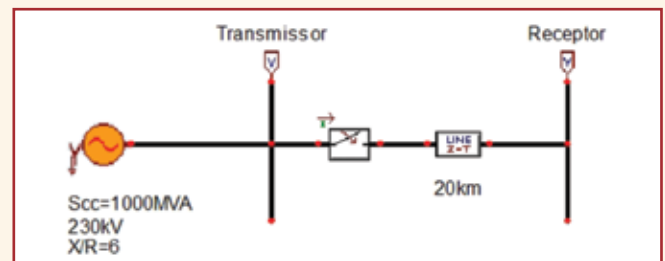


Figura 10 – Energização de uma linha de transmissão.

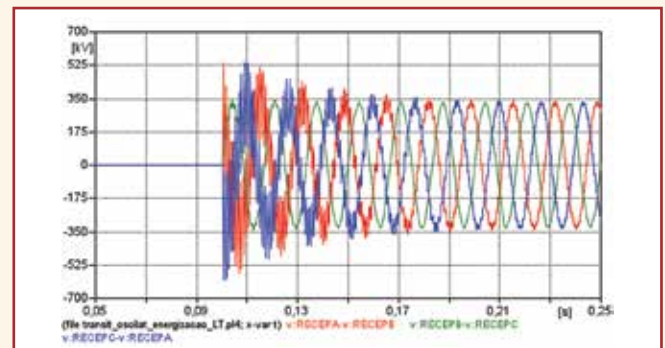


Figura 11 – Tensão fase-fase no transmissor do sistema.

Transitórios oscilatórios de alta frequência

Transitórios oscilatórios com uma componente de frequência maior do que 500 kHz e com uma duração típica medida em microssegundos (ou vários ciclos da frequência principal) são considerados transitórios oscilatórios de alta frequência. Estes transitórios são frequentemente resultados de uma resposta local do sistema a um transitório impulsivo. Também podem ser causados por chaveamento de circuitos indutivos.

A desenergização de cargas indutivas pode gerar impulsos de alta frequência. Apesar de serem de curta duração, estes transitórios

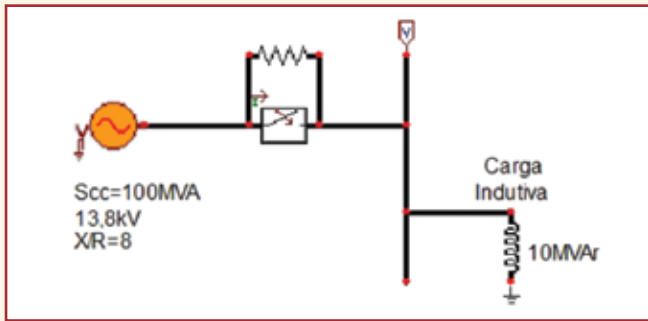


Figura 12 – Desenergização de uma carga indutiva.

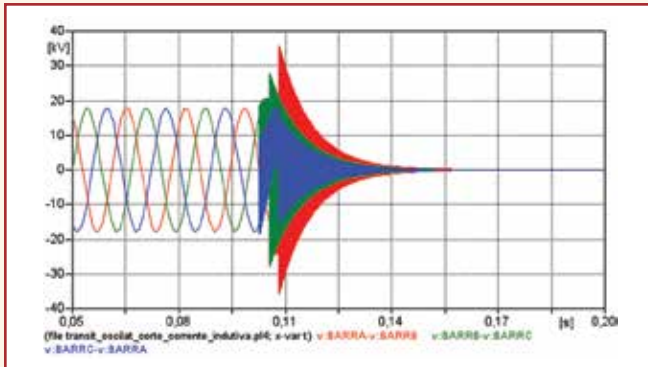


Figura 13 – Tensões fase-fase no barramento da carga indutiva.

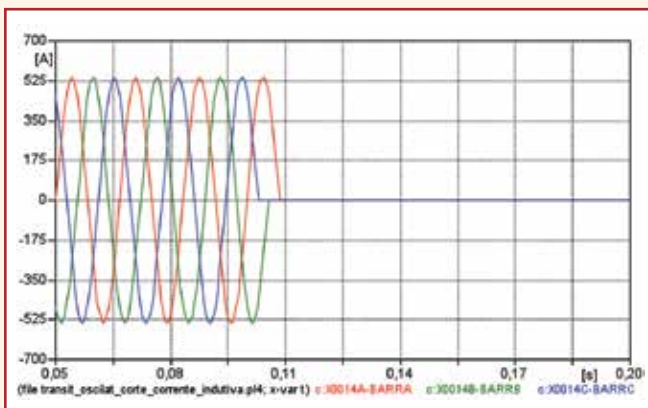


Figura 14 – Corrente do sistema.

podem interferir na operação de cargas eletrônicas. Filtros de alta-frequência e transformadores isoladores podem ser usados para proteger as cargas contra este tipo de transiente. A Figura 12 apresenta um sistema onde será desenergizada uma carga indutiva.

As Figuras 13 e 14 apresentam, respectivamente, as tensões fase-fase no barramento de conexão da carga e a corrente do sistema.

Princípios de proteção contra sobretensões transitórias

Os problemas de sobretensão transitória devem ser controlados pela fonte geradora, alterando-se as características do sistema afetado pelos transientes ou pela utilização de equipamentos de proteção junto à carga. Como exemplo, podemos tomar os transientes gerados pelo chaveamento de capacitores nos sistemas elétricos das concessionárias de energia. Estes podem ser controlados na fonte geradora, realizando o chaveamento no momento da passagem por zero da onda de tensão. Da mesma forma, pode-se evitar a

amplificação deste tipo de transiente não utilizando capacitores em baixa tensão nas instalações dos consumidores finais. Como forma de proteção de equipamentos sensíveis dos consumidores seria a utilização de filtros de linha, bem como o uso de para-raios.

Muitos problemas de transientes em consumidores envolvem o sistema de aterramento das instalações elétricas e sua interação com os sistemas de comunicação, sejam as redes de comunicação local ou sistemas de proteção de equipamentos e controle de processos. Na maioria das vezes, os transientes são drenados pelos equipamentos, como para-raios, varistores, capacitores de surto etc., para o sistema de aterramento. Tais sobretensões podem gerar acoplamentos com os sistemas de comunicação, em que mesmo transientes de baixa magnitude podem causar má operação ou falhas de componentes. Para estes casos, devem-se utilizar tipos especiais de proteção específicos.

Dentre os principais equipamentos de proteção contra sobretensões transitórias podemos citar:

- Supressores de surto, como varistores, centelhadores, capacitores de surto, diodos tipo Zener, etc.;
- Transformadores isoladores;
- Filtros passa baixa;
- Para-raios (ZnO).

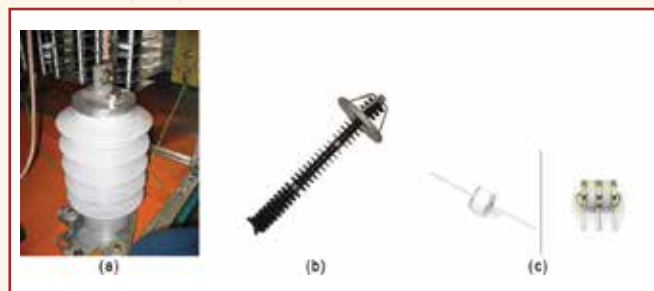


Figura 15 – Equipamentos Supressores de surto: (a) Varistor; (b) Para-raio; (c) Centelhador.

*GILSON PAULILLO é engenheiro eletricista, com mestrado e doutorado em Qualidade de Energia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá. Atualmente, é consultor tecnológico em energia no Instituto de Pesquisas Eldorado, em Campinas (SP). Atuação voltada para áreas de qualidade de energia elétrica, geração distribuída, eficiência energética e distribuição.

MATEUS DUARTE TEIXEIRA é engenheiro industrial e eletricista, mestre em engenharia elétrica e doutorando na Universidade Federal do Paraná (UFPR). Atualmente, é pesquisador do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (Lactec), professor efetivo do curso de engenharia elétrica da UFPR e secretário executivo da Sociedade Brasileira de Qualidade da Energia Elétrica (SBQEE).

IVANDRO BACCA é engenheiro eletricista e mestre pela Universidade Fédereletricista e mestre pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU) em Qualidade da Energia. É engenheiro da Copel Distribuição com atuação na área de manutenção de equipamentos eletromecânicos.

Continua na próxima edição

Confira todos os artigos deste fascículo em www.osetoreletrico.com.br
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail redacao@atitueditorial.com.br