

Por Mateus Teixeira, Luiz Gamboa, Pedro Block, Otávio Shiono, Ricardo Scholz, Diogo Dahlke, Henry Salamanca, Alexandre Albarello, Fabio Retorta\*

# Capítulo I

## Introdução

Toda instalação industrial, independentemente de seu ramo de atuação e tamanho, possui um sistema de distribuição de energia elétrica. Dependendo do tamanho, do layout da planta, da fonte de energia e operação, o sistema pode ser mais ou menos complexo. No que diz respeito ao parque industrial brasileiro, podemos encontrar desde grandes plantas eletrointensivas com seu sistema próprio de geração, como é o caso de grandes siderúrgicas e papelarias, indústrias de porte médio que recebem energia em extra-alta (EAT) e alta tensão (AT) diretamente de concessionárias de energia elétrica, assim como pequenas indústrias conectadas diretamente à baixa tensão (BT) de transformadores de distribuição das concessionárias.

Seja qual for o caso, o projeto, a operação e a manutenção desse sistema passa pela análise de uma série de normas técnicas, ensaios elétricos e boas práticas que juntos colaboram para uma melhor eficiência na utilização da energia elétrica e baixo custo de manutenção do sistema e de equipamentos, sejam eles parte integrante do sistema de distribuição, como cabos e transformadores, sejam eles cargas elétricas, como dispositivos eletroeletrônicos e motores elétricos. Além disso, tais observações são de vital importância para a garantia da segurança pessoal e patrimonial durante a utilização da energia elétrica dentro do

ambiente industrial, aspectos fundamentais que podem acarretar num impacto financeiro e social danoso à indústria.

Dessa forma, medições, ensaios e ações devem ser sempre considerados desde o momento do projeto, passando pelo comissionamento da planta e ao longo dos anos de operação do sistema elétrico. Exemplo disso está no levantamento da resistividade do solo, que, realizado antes do projeto e construção da indústria, pode resultar em um sistema de aterramento e proteção de descargas atmosféricas que consiga evitar, ao longo dos anos, queimas de equipamentos elétricos e danos pessoais. Da mesma forma, a realização de ensaios elétricos na subestação principal, condutores e painéis de distribuição de carga podem identificar possíveis falhas nos equipamentos, evitando danos desde a energização inicial da planta.



Figura 1 - Subestação de energia em 13,8 kV.



Figura 2 - Painéis elétricos de baixa tensão.

Com isso em mente, o presente artigo, primeiro de uma série de 12, tem como objetivo apontar para um conjunto de ensaios elétricos e boas práticas a serem adotados por técnicos e engenheiros eletricitas que estejam envolvidos, direta ou indiretamente, com o projeto, instalação, operação e manutenção de sistemas industriais de distribuição de energia elétrica. Assim, os próximos itens têm por objetivo chamar atenção para alguns aspectos importantes a serem observados no sistema elétrico de

uma indústria, os quais serão mais bem detalhados ao longo dos próximos meses.

## DIAGNÓSTICOS E ENSAIOS ELÉTRICOS EM INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS

Os ensaios elétricos que são realizados durante o comissionamento de uma instalação industrial, além de validar as condições operacionais dos equipamentos, permitem estabelecer parâmetros de referência para os ensaios periódicos definidos para as manutenções preventiva, corretiva e preditiva. O detalhamento e a periodicidade dos ensaios requeridos dependem da importância do equipamento na instalação, sendo, portanto, maiores para geradores, transformadores de potência, tensão e corrente,



Figura 3 – Grupo motor-gerador utilizado em instalações industriais.

Alguns ensaios tradicionais, como os de isolamento elétrico em CC e AC, têm tratamento diferenciado quanto às variáveis que intervêm para cada equipamento. Parâmetros como a temperatura requerem fatores de correção específicos. O efeito da tensão e da frequência da fonte utilizada, de acordo com o material isolante e o grau de envelhecimento da isolação, podem revelar problemas incipientes.

As instalações industriais merecem cuidados especiais, uma vez que dificilmente possuem quantidades significativas de equipamentos similares para cada tensão operativa, diferentemente das concessionárias de energia, que adotam critérios de acompanhamento baseados em estatísticas de falhas e defeitos, com amostragens significativas. As pesquisas também são dominadas pelas concessionárias, uma vez que a legislação as obriga a investir uma fração de recursos da tarifa de energia para esta finalidade e organizam mais grupos e eventos de manutenção.

Dessa forma, é importante concentrar esforços na seleção de ensaios com maior relação custo-benefício para se estabelecer critérios de manutenção adequados nas instalações industriais, além de acompanhar a evolução das técnicas atualmente em uso.

Para ilustrar essa evolução, podem-se usar como exemplo as técnicas de diagnóstico aplicadas a transformadores de potência isolados com óleo mineral. Duas tendências podem ser observadas. A primeira tem relação com a adoção cada vez mais frequente de técnicas não invasivas de acompanhamento. No lugar de ensaios

de isolamento AC e DC, que requerem paradas e desligamentos, são coletadas periodicamente amostras de óleo isolante do tanque principal, que podem indicar, desde problemas incipientes, como no caso da degradação das características do óleo – como aumento da acidez, fator de potência, teor de umidade, etc., identificadas nos ensaios físico-químicos –, até a detecção de perigo iminente de falha da isolação – quando há presença de gases provenientes de pontos quentes ou centelhamento obtidos na gascromatografia. Outros indicadores de envelhecimento da celulose, como o teor de furfuraldeídos, também são obtidos por coleta de óleo com o equipamento energizado.

A segunda tendência que pode ser destacada é a utilização de equipamentos que realizam baterias programáveis de ensaios integrados, possibilitando a obtenção de dados e diagnósticos imediatos, além das facilidades de registro e emissão de relatórios. Dessa forma, reduz-se o tempo de execução de ensaios que antes requeriam vários equipamentos, fontes e conjuntos de cabos de ensaio para a mesma finalidade.

Junto a essas tendências, têm sido desenvolvidos novos ensaios, como a medição da relação de transformação e a impedância de curto-circuito de um transformador em função da frequência. Com a curva resposta em frequência destas grandezas, em módulo e ângulo, podem-se distinguir deformações radiais ou axiais dos enrolamentos, ou problemas de curto-circuito entre chapas e entreferros no núcleo magnético. Cada uma destas variações se apresenta em faixas diferentes de frequência. Para realizar ensaios desse tipo, até recentemente, era necessário deslocar o transformador para laboratórios especializados.

Outro exemplo que ilustra a evolução das técnicas de diagnóstico refere-se aos testes em para-raios de ZnO. Tradicionalmente, são realizados ensaios periódicos de isolamento em CC e CA, bem como o acompanhamento por termovisão, que visa comparar aquecimentos diferenciais entre seções ou regiões do mesmo equipamento ou com relação aos vizinhos, de igual modelo, instalados na mesma barra. A interpretação dos resultados depende da experiência da equipe e de

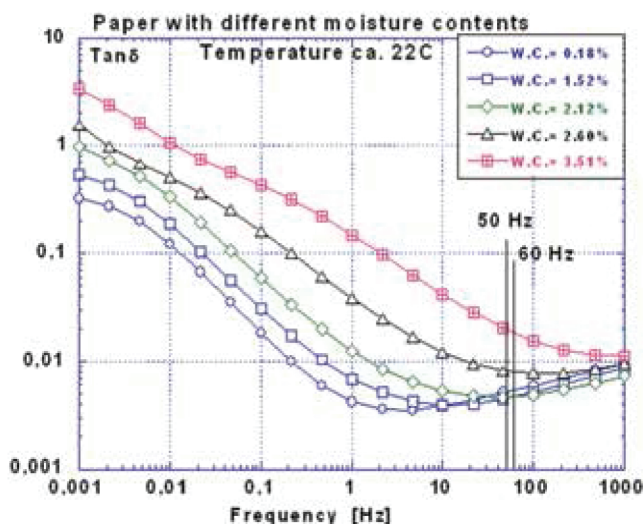


Figura 4 – Espectro de tangente delta da isolação de transformadores de potência.





**Figura 5 - Transformador de distribuição sob ensaio de Impulso atmosférico.**

um histórico dos parâmetros de equipamentos da mesma família, no caso dos ensaios de isolamento. Esses equipamentos apresentam um comportamento da resistência de isolamento muito sensível com a temperatura e com a tensão de ensaio.

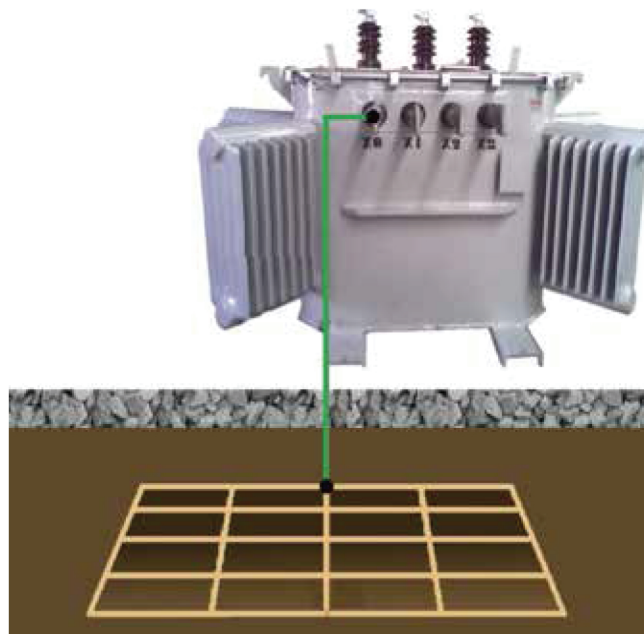
Não raro, a evolução entre um defeito incipiente e a falha do para-raios – durante um surto atmosférico ou até em operação normal –, é rápida demais para ser detectada em ensaios periódicos preventivos. Problemas de vedação são típicos para a ocorrência deste tipo de falha intempestiva. Uma das técnicas desenvolvidas para verificar descargas parciais internas consiste em se utilizar transdutores de corrente para alta frequência no cabo de aterramento do para-raios. Dessa forma, defeitos de fabricação no revestimento polimérico das pastilhas de ZnO, que geram centelhamentos na faixa de dezenas a centenas de kHz, podem ser detectados antes de o defeito evoluir para uma falha catastrófica.

Um resumo do estado da arte das técnicas de diagnóstico aplicáveis aos equipamentos elétricos de maior relevância nas instalações industriais será apresentado nesta revista durante 2017.

### ENSAIOS DE ATERRAMENTO EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS

Entre os principais objetivos de um aterramento elétrico estão: prover um caminho de baixa impedância para as correntes em condições normais de operação (componentes de sequência zero) e de falta para a terra (sem afetar a continuidade do serviço); garantir a segurança pessoal dentro dos limites toleráveis para choque elétrico provenientes das tensões de passo, toque e transferidas numa instalação elétrica; além de fornecer uma referência adequada para o sistema de proteção da instalação. Junto com seu adequado dimensionamento, é necessário realizar medições periódicas para garantir a integridade do sistema de aterramento.

Muitas instalações industriais possuem malhas de aterramento cuja medição deve respeitar a norma ABNT NBR 15749:2009 - Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento. É fácil verificar que, quando não se respeitam as distâncias mínimas entre eletrodos do circuito de medição, os valores obtidos são não conservativos. Estas distâncias dependem das dimensões da malha e de eventuais interligações



**Figura 6 - Malha de aterramento proposta para o neutro de transformadores de distribuição.**

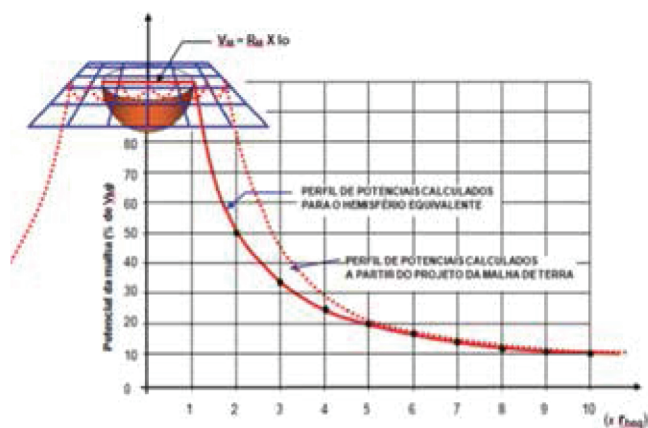
com outras malhas, o que muitas vezes impossibilita a medição da resistência de aterramento se não houver um planejamento cuidadoso.

Outro aspecto importante a ser considerado é quando se interligam aterramentos com finalidades diferentes. É o caso de compartilhar aterramentos para descargas atmosféricas –SPDA –, de frequência industrial para equipamentos eletrônicos, comunicação e controle. Nesses casos, eventos tais como faltas por falha da isolamento de equipamentos e máquinas, ocorrência de descargas atmosféricas e desequilíbrio de correntes em frequência industrial, podem transferir ou induzir tensões e correntes perigosas aos componentes mais sensíveis desses sistemas.

Quando o sistema de aterramento da instalação industrial é complexo e inclui as malhas da subestação e da geração própria, o projeto deve contemplar recomendações específicas, como as do Guia de compatibilidade para SEs e usinas do Cigré. Não raro, quando se desconsideram esses critérios, a simples medição da resistência de aterramento pode ser ineficiente para avaliar falhas em componentes do sistema de aterramento.

O valor da resistência de aterramento se mantém praticamente constante durante a vida útil da instalação, uma vez que depende basicamente da resistividade do solo, da profundidade dos eletrodos e da área ocupada por estes, além da sazonalidade. Dessa forma, a funcionalidade pode estar comprometida severamente, como no caso do rompimento de uma conexão de equipamento ligado à terra, sem que o valor de resistência tenha mudado.

Técnicas específicas são necessárias para a avaliação das conexões enterradas. Também é necessário escolher a instrumentação adequada para esse fim, que pode ser baseada em AC, DC ou alta frequência. Métodos de injeção de corrente na faixa de 25 kHz requerem de um levantamento cuidadoso dos potenciais numa malha de SE para se detectar problemas de conexão. Terrômetros do tipo alicate podem



**Figura 7 - Potenciais de superfície em malhas de aterramento.**

auxiliar para uma avaliação rápida e microohmímetros com maior capacidade de corrente são indicados para dirimir dúvidas desses diagnósticos antes de se proceder a uma inspeção e manutenção corretiva das conexões enterradas.

Quanto à medição do valor global de resistência de aterramento de uma instalação, equipamentos comerciais podem ser inadequados para instalações quando em operação, especialmente se o circuito de medição de potenciais é suscetível a correntes induzidas com valor, frequência e forma de onda de regime. Esse problema é comum com o emprego de equipamentos comerciais portáteis de potência reduzida, onde a qualidade da medição depende fortemente da resistência

de aterramento do eletrodo auxiliar de corrente. Ambientes de alta interferência e solos de alta resistividade são especialmente críticos na escolha do método e da instrumentação a serem adotadas.

Entre os métodos atualmente desenvolvidos está o uso da corrente de frequência industrial que é escoada pelo sistema de aterramento em operação. Transdutores de corrente fornecem a corrente residual (corrente líquida injetada no solo pela malha de terra) e os potenciais de superfície são levantados na forma de uma curva de potenciais, cujo valor é diretamente proporcional à corrente que nesse momento está sendo medida, dividida pela constante  $R_m$  (Resistência da malha) sob análise. Esse método dispensa o uso de fontes de corrente e tem sido empregado em SEs e torres de transmissão em operação com sucesso.

O método de medição em alta frequência pode ser muito útil quando se deseja desacoplar malhas de aterramento com finalidades diferentes, mas interligadas. Uma aplicação específica é o desacoplamento das malhas de torres de LTs interligadas pelo cabo para-raios à malha da SE sob teste. Entretanto, alguns cuidados devem ser tomados em função da quantidade de LTs envolvidas e do valor da resistência da malha da SE. Medidas adicionais podem ser necessárias para uma correta aplicação do método.

Assim, para uma correta avaliação do sistema de aterramento de uma instalação industrial, é necessária uma análise cuidadosa dos métodos de medição e instrumentação disponíveis hoje no mercado.



O detalhamento destas variáveis e alguns exemplos típicos serão objeto de um artigo a ser apresentado em uma próxima edição da revista.

### METROLOGIA NA INDÚSTRIA

Em processos produtivos, desvios de medição levam a desvios nos processos e consequentes prejuízos. Imaginemos um processo de produção contínuo, em que o envase de um líquido depende da medição do volume do líquido dispensado. Um erro de medição de -1% do volume diz que a cada frasco 1% a mais de líquido é envazado, representando um frasco de prejuízo a cada 100 unidades, em que em um volume de um milhão de frascos ao mês temos 10000 frascos perdidos em volume, e ao final de um ano 120000 frascos. Agora imaginemos que esse erro de -1% em volume aumenta mensalmente a uma taxa de -0,01% devido a um defeito no sensor do processo, dessa forma, ao final de um ano, teremos 126600 frascos de prejuízo, ou seja, 6600 frascos a mais de prejuízo, devido a um pequeno incremento de -0,01% no erro de medição. É uma conta simplória com valores inteiros para representar o quanto um pequeno erro na medição pode impactar no caixa de uma empresa.

Outro exemplo clássico é a medição de energia elétrica, em que o erro dos milhares de medidores pode resultar em uma perda brutal de receita para as distribuidoras de energia caso os medidores não mantenham sua qualidade de medição ao longo dos vários anos que permanecem funcionando ininterruptamente. Esses dois exemplos mostram a importância da medição em processos produtivos e o quanto um pequeno descuido pode impactar em resultados, em outras palavras, eis a importância da chamada metrologia.

A metrologia é a ciência das medidas e das medições, abrangendo todos os aspectos teóricos e práticos para assegurar a exatidão exigida em determinado processo produtivo. A metrologia é parte formadora da base de qualidade das indústrias, sendo fundamental para a competitividade das empresas. Medir corretamente é enxergar a realidade física do mundo que estamos inseridos, permitindo assim interação e controle nos processos perante as necessidades humanas.



Figura 8 - Fornos para calibração de sensores de temperatura.

É dividida em três áreas: científica, industrial e legal. A metrologia científica tem por base padrões de medição nacionais e internacional sendo a referência de comparação metrológica para a indústria; no Brasil, o Inmetro é o órgão responsável. A metrologia legal está relacionada a sistemas de medição nas áreas de saúde, segurança e meio ambiente. E a metrologia industrial atua nos sistemas de medição industriais que controlam processos produtivos e são responsáveis pela garantia da qualidade dos bens de consumo.

Um padrão de medição é um instrumento de referência com grande estabilidade ao longo do tempo, e incerteza de medição ao menos três vezes inferior ao instrumento a ser comparado com ele, sendo os padrões nacionais do Inmetro os instrumentos com maior estabilidade e menor incerteza do Brasil. Esses padrões nacionais são periodicamente comparados aos padrões internacionais do Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM), na França, garantindo, assim, a uniformidade e rastreabilidade das medidas com relação ao resto do mundo.



Figura 9 - Padrão de calibração de grandezas elétricas.

Metrologicamente, um instrumento de medição possui duas características importantes relativas à qualidade das suas medidas: erro de medição e incerteza de medição. O erro de medição se refere ao desvio permanente do valor medido com relação ao valor medido por um padrão de medição. A incerteza de medição representa o intervalo de valores em que é estatisticamente provável que se encontre o valor real da medida, em outras palavras, considera com determinado grau de confiança os principais parâmetros que interferem no instrumento e no processo de medição de forma a desviar o valor lido do valor correto.

A calibração é o ato de comparar a medição de determinado instrumento a um padrão de medição, determinando assim seu erro e incerteza de medição associados a cada faixa de medição. O ajuste, ou reparo, é o ato de corrigir a leitura do equipamento readequando os valores obtidos para dentro dos limites adequados ao processo em que é usado, sendo que, normalmente, os ajustes são realizados pelos fabricantes e redes autorizadas. Esses termos ganharam esses significados a partir de 1996, pois, antes desta data, o termo calibração era sinônimo de ajuste. Ainda hoje, 20 anos após a atualização das terminologias, faz-se

confusão com ambos os termos muitas vezes se referindo ao ajuste de um equipamento como calibração.

A importância da metrologia é proporcional ao desejado incremento na qualidade de bens e serviços para o atendimento das populações, melhorando a aceitação dos produtos, e evitando desperdícios de matérias primas com processos inadequados.

## QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

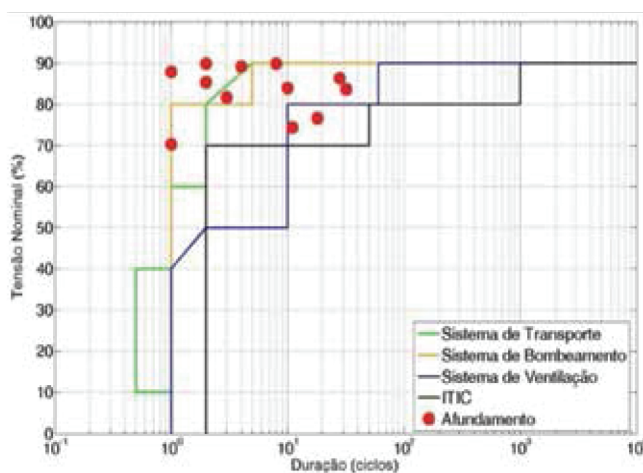
O termo qualidade da energia elétrica (QEE) está relacionado com qualquer desvio que possa ocorrer na magnitude, forma de onda ou frequência da tensão e/ou corrente elétrica, que resulte em falha ou operação indevida de equipamentos elétricos. Dessa forma, a ocorrência de distúrbios de qualidade de energia, introduzidos pela concessionária ou dentro da própria indústria, pode trazer impactos consideráveis, sobretudo econômicos, para o setor industrial.

Alguns cuidados na definição de equipamentos industriais podem ser determinantes na suportabilidade dos mesmos eventos, como variações de tensão de curta duração, como afundamentos de tensão e surtos elétricos, assim como na geração de distúrbios como distorções harmônicas de tensão e corrente, que podem gerar sobretensões ressonantes e aquecimento em condutores e conexões. Da mesma forma, a distribuição criteriosa de cargas monofásicas desde o projeto pode evitar a ocorrência de desequilíbrios de tensão ao longo do sistema que

podem, por exemplo, causar aquecimento e consequente queima de motores de indução.

A observação de indicadores e limites presentes em recomendações e normas, nacionais e internacionais, é fundamental para, a despeito do caráter regulatório, o correto funcionamento e preservação da vida útil de equipamentos eletroeletrônicos.

Documentos, como o Submódulo 2.8 do Operador Nacional do Setor Elétrico (ONS) e o Módulo 8 do Prodlist, da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), devem nortear ações voltadas à medição e mitigação de distúrbios de QEE. DA mesma forma, documentos internacionais,

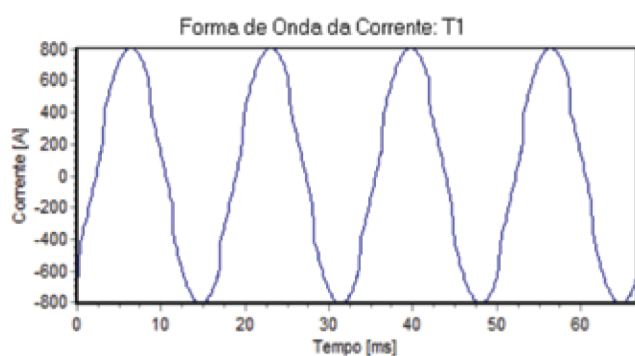


**Figura 10 - Curvas de sensibilidades de processos industriais relacionadas com medições em campo de afundamentos de tensão.**



como a IEEE Std 519, IEEE Std. 1159, além de um conjunto de normas da IEC série IEC 61000-4, auxilia muito na definição de metodologias e equipamentos de monitoração, além de estabelecerem alguns limites para conexão de cargas perturbadoras no sistema elétrico.

Assim, baseado em indicadores normativos e medições de campo consistentes, estudos computacionais colaboram para a identificação das causas e elaboração de soluções, as quais, na maioria das vezes, devem ser customizadas para cada caso. Tais soluções podem passar pela instalação de equipamentos como filtros sintonizados ou ativos, para o caso de problemas de distorções harmônicas, ou compensadores estáticos ou condicionadores de energia para o caso de variações de tensão de curta duração (VTCD), a alterações na distribuição de carga em um dado circuito de distribuição ou até mesmo a mudança da tensão de alimentação da planta.



**Figura 11 – Forma de onda da corrente na saída de conversor de energia (PQF)\*.**

Desta maneira, evidencia que a manutenção da qualidade de energia é um desafio para o setor industrial, uma vez que investir num estudo para identificação de problemas de queima de equipamentos ou mesmo adequação à limites impostos por normas reguladoras, pode também significar a economia de vultuosos valores em manutenção e troca de equipamentos.

## EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA INDÚSTRIA

A eficiência energética é um vetor de desenvolvimento para o país. Isto ocorre pelo fato da eficiência energética reduzir gastos, aumentar a competitividade, melhorar a balança comercial (redução da importação de diesel e GLP), postergar investimentos na GT&D (geração, transmissão e distribuição) e reduzir os impactos socioambientais (Metas do Brasil na COP 21).

No Brasil, diversas iniciativas sistematizadas vêm sendo empreendidas há mais de 20 anos. Destacam-se o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), coordenado pelo Instituto Nacional de Metrologia e vinculado ao ministério do Desenvolvimento, da Indústria e do Comércio Exterior (MDIC); Normalização e Qualidade Industrial (Inmetro); o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), cuja coordenação executiva está a cargo das Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobras); o Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural (Conpet), cuja coordenação executiva é de responsabilidade da Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras) –

Procel e o Conpet são vinculados ao Ministério de Minas e Energia; o Programa de apoio a Projetos de Eficiência Energética (PROESCO), cuja coordenação executiva pertence ao Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). Além desses programas, existem os Planos Decenais de Energia (PDEs), Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEF) e o Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030).

No contexto industrial, existe o Programa de Eficiência Energética (PEE), da Aneel, que incentiva a eficiência dos processos, tais como, sistemas motrizes, condicionamento ambiental, aquecimento de água, iluminação, entre outros.

O ponto de partida para a verificação da viabilidade de implantação de um projeto de eficiência energética é a realização do diagnóstico energético da unidade consumidora. Esta etapa consiste, primeiramente, com base na análise das tarifas, identificar os potenciais de eficiência da instalação, assim como sua representatividade no valor média da energia elétrica.

Em uma etapa posterior é realizado um estudo detalhado sobre as possíveis ações de eficiência através de medições, entrevistas e maior entendimento do processo produtivo da instalação. A realização de medições específicas para levantamento de parâmetros necessários ao estudo, por exemplo, o carregamento de motores, pode não ser trivial dependendo das características e particularidades de cada carga.

A medição realizada com medidores de grandezas elétricas ou medidores de qualidade de energia, quando instalados corretamente em pontos estratégicos e por um período de tempo adequado, permitem: calcular os indicadores de uso de energia elétrica; obter a curva de carga; obter o consumo reativo; estimar a participação dos usos finais. Tal tópico será melhor detalhado futuramente em um fascículo específico, com foco nas medições em instalações industriais.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme pode ser visto ao longo deste artigo, são inúmeros aspectos técnicos a serem considerados quando se trata das instalações elétricas de uma determinada indústria. A atenção dispensada sobre esses e outros aspectos será determinante para o correto funcionamento das instalações. Além disso, possibilitará a preservação de sua vida útil, reduzindo os gastos de manutenção e com a conta de energia.

Ao longo dos próximos 11 meses serão apresentados mais detalhes sobre cada um dos tópicos abordados.

(\*) *Figura gentilmente cedida por Sérgio Ferreira de Paula (Uberlândia – 2016).*

*\*Mateus Teixeira, Luiz Gamboa, Pedro Block, Otávio Shiono, Ricardo Scholz, Diogo Dahlke, Henry Salamanca, Alexandre Albarello, Fabio Retorta são especialistas dos Institutos Lactec.*

### CONTINUA NA PRÓXIMA EDIÇÃO

Acompanhe todos os artigos deste fascículo em [www.osetoreletrico.com.br](http://www.osetoreletrico.com.br)  
Dúvidas, sugestões e outros comentários podem ser encaminhados para [redacao@atitudeeditorial.com.br](mailto:redacao@atitudeeditorial.com.br)