

Capítulo VI

Eficiência energética nas instalações elétricas

Por José Starosta*

Este capítulo apresentará os principais aspectos e técnicas de eficiência energética nas instalações elétricas sem considerar as intervenções diretas nas cargas e processos, contudo, objetivará apresentar o comportamento das perdas elétricas nos componentes das instalações e como minimizá-las. O tema trata de busca de desperdícios pontuais e cada redução de um ponto percentual do consumo total por redução de desperdício ou otimização da utilização merece reconhecimento e fundamentalmente é ponto de motivação para a busca de outros pontos de melhorias e consequente redução do consumo de energia, na mesma linha que a recomendação da norma ISO 50001, com a metodologia “PDCA”. Apesar de a matriz energética brasileira ser relativamente limpa, os aspectos relacionados à sustentabilidade sempre devem ser considerados.

Algumas considerações qualitativas encontradas sobre as perdas em instalações elétricas e que merecem destaque foram:

- As perdas podem ser desmembradas em fixas (que independem da operação da carga e perdas variáveis, que dependem da operação da carga); ou ainda perdas = perdas fixas + perdas variáveis (f (carga));
- De acordo ao documento IEEE 739, as perdas em industriais variam entre 2% e 5% da carga;

- De acordo com Beeman, D., as perdas joule em condutores nas instalações podem variar desde 2,5% até 7,5% do consumo em instalações industriais (*);

- De acordo com Mc Donald e Hickok as perdas podem variar até 20% do consumo (*).

(*). Notas de aula do Prof. Aderbal de Arruda Penteadou.

As instalações elétricas são normalmente consideradas a partir do ponto de acoplamento comum (PAC), entre a concessionária e o consumidor. Note-se que, apesar de não se interferir em cargas e nos processos, o consumo de energia nas instalações é diretamente afetado e alterado pela qualidade da energia entregue às próprias cargas, equipamentos e componentes elétricos. Seguem considerações sobre aspectos de redução de perdas nas instalações por conta da própria qualidade da energia citada e aqueles relacionados aos componentes e equipamentos.

Influência da qualidade de energia na eficiência energética

Regulação de tensão e compensação reativa

A regulação de tensão pode ser interpretada como o comportamento da tensão de operação em relação à tensão nominal (a análise temporal

é muito mais significativa do que um valor isolado e tomado por medição instantânea). Quanto mais próximo da tensão nominal for o comportamento da tensão de operação medida nos barramentos melhor será o rendimento dos motores, o comportamento dos acionamentos; os sistemas de iluminação vão operar de forma mais adequada, os capacitores não estarão sujeitos a sobretensões, os circuitos não estarão sujeitos a sobrecorrentes, os transformadores operarão com menores perdas, os sistemas de sincronismo com outras fontes como geradores de back-up ou UPS não apresentarão anormalidades, enfim, a regulação de tensão adequada e maximizada é o ponto de partida para a redução de perdas nas instalações.

A referência [1] apresenta um bom desenvolvimento do assunto, e equaciona a regulação de tensão (entre outras definições análogas) conforme a expressão 1.

$$\text{Reg (\%)} = \frac{|V_{2(NL)}| - |V_{2(FL)}|}{V_{2(FL)}} \cdot 100\%$$

Expressão 1 – definição de regulação de tensão

Fonte: Pereira, Clever - Circuitos Polifásicos e Magnéticos

$V_{2(NL)}$ – tensão secundária sem carga

$V_{2(FL)}$ – tensão secundária com carga ou “ à plena carga”.

Uma medição de tensão ao longo do tempo pode gerar diversas interpretações como tensão máxima, tensão típica ou tensão mínima. Recomenda-se adotar valores que ilustrem o real comportamento da tensão de operação.

Observando-se a modelagem do transformador com suas impedâncias primárias e secundárias ilustradas na Figura 1, pode-se concluir que tão melhor será a regulação de tensão quanto melhor for o fator de potência da carga e daí pode-se interpretar que os dois assuntos (regulação de tensão e compensação reativa) devem sempre ser tratados simultaneamente.

Não existe uma relação quantitativa direta entre redução de perdas e regulação de tensão, uma vez que existe uma forte dependência da carga que está sendo alimentada e para cada tipo de carga será obtido um tipo de resultado.

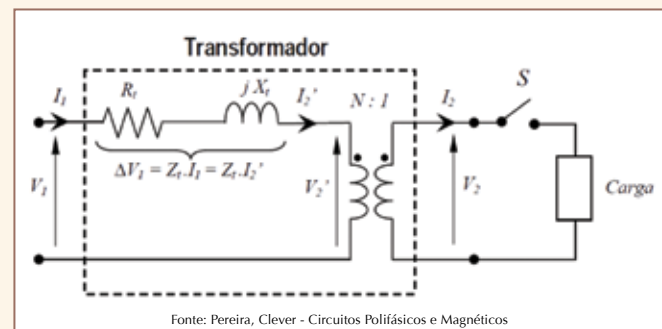


Figura 1 – Modelo de transformador

Ilustrando o conceito apresentado, a Figura 2 apresenta os registros efetuados (valores eficazes integrados ciclo a ciclo) em período de aproximadamente 20 minutos no secundário de transformador com carga industrial variável. A linha tracejada indica o instante em que um compensador de energia reativa com filtro passivo sintonizado com manobra estática foi conectado ao sistema.

De acordo com a definição da Expressão 1, a regulação de tensão para o pior caso de tensão antes da ligação do filtro é de:

$$\text{Reg1(\%)} = (450 - 420) / 420 = 7,1\% ;$$

E, após a ligação e operação do filtro, a regulação de tensão é:

$$\text{Reg2(\%)} = (450 - 440) / 420 = 2,3\%$$

A regulação de tensão variou de valores da ordem de 7% para 2% em função da operação do compensador de energia reativa citado.

- Redução de perdas em função da compensação reativa:

Sob o ponto de vista de eficiência energética são várias as vantagens da instalação de capacitores, entre as quais:

- Redução das correntes elétricas com conseqüente redução das perdas "Joule" proporcionais ao quadrado das correntes;
- Redução da potência aparente (kVA) e possibilidade de desligamento de transformadores;
- Melhora da regulação de tensão das instalações com conseqüências no rendimento de motores e outras cargas;
- Isenção de pagamento de excedente de energia reativa para as concessionárias.

Já sob o ponto de vista de qualidade de energia a

compensação de energia reativa pode ser uma excepcional ferramenta para a melhora da regulação de tensão (já citado) e correção de afundamentos (caso de sistemas de compensação de manobra estática), porém, a inserção de capacitores em um sistema elétrico com característica praticamente indutiva dará origem a um circuito LC com frequência de ressonância típica que depende das duas componentes e pode ser facilmente estimada.

Caso esta instalação em que capacitores são inseridos possua cargas não lineares como aquelas controladas pelos variadores de velocidade (conversores de frequência) que possuem correntes harmônicas em sua alimentação, poderá ocorrer o fenômeno da ressonância ou ressonância harmônica.

A ressonância ocorre quando a frequência de ressonância do conjunto rede e capacitor fica próxima a uma das frequências presentes no espectro de corrente da carga. Explicando melhor, a corrente elétrica de um conversor de 6 pulsos possui componentes de 5^a, 7^a, 11^a, 13^a e outras menores, além da corrente fundamental em 60 Hz. Se a frequência de ressonância do sistema (rede e capacitor) ficar próxima de uma destas correntes presentes no espectro de corrente do conversor haverá a ressonância.

A ocorrência da ressonância pode ser identificada com a circulação de correntes harmônicas pelos capacitores, explosão dos capacitores, queima de componentes da instalação, elevação da distorção de tensão nos barramentos e piora da regulação de tensão. Também acidentes são reportados por conta da ressonância.

Cuidados devem ser tomados na instalação de capacitores em instalações que contenham cargas distorcidas, sobretudo se o sistema de compensação for do tipo "automático".

A oportunidade de implantação de compensação reativa deve considerar necessariamente outros aspectos de ganhos associados e não só a redução e eliminação do pagamento de

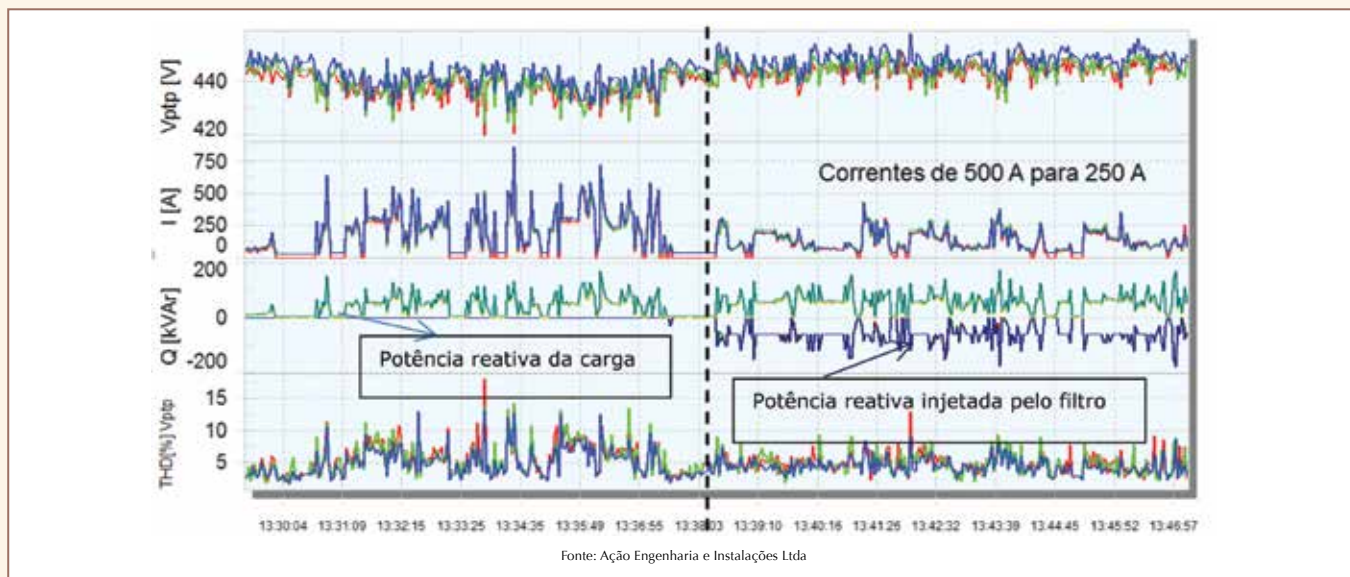


Figura 2 – registro de variáveis elétricas em operação de carga industrial – com e sem compensação reativa e filtro de harmônicas

excedentes de energia reativa para as concessionárias.

A expressão geral que considera a redução de perdas em função da compensação reativa é:

$$\% \text{ redução das perdas} = 100\{1 - (FP1/FP2)^2\}$$

Expressão 1 – Avaliação da redução de perdas em função da variação do fator de potência.

Em que:

FP1=fator de potência antes da compensação reativa

FP2=fator de potência depois da compensação reativa

No caso ilustrado da Figura 1, a redução de perdas decorrente da variação do fator de potência de 80% para 99% será:

% redução das perdas = $100\{1 - (80/99)^2\} \sim 35\%$; portanto se as perdas totais no sistema elétrico fossem de 5% do consumo da carga antes da compensação; o ganho relativo à redução das perdas seria de aproximadamente 1,7% ($35\% * 5\%$) do consumo da carga; valor bastante significativo neste contexto.

Alguns aspectos devem ser considerados na compensação reativa:

- A compensação reativa reduz a corrente do circuito e corrige o fator de potência para valores da ordem de 99% (de 80%);
- Os picos de corrente são reduzidos pela injeção de potência reativa em tempo real; portanto a regulação de tensão também é função da compensação dos picos de corrente reativa;
- A redução de corrente do circuito reduz em função da compensação reativa;
- A redução de perdas tem influências combinadas em função de redução de corrente nos circuitos e transformador, correção do fator de potência e da própria regulação de tensão;
- A redução das correntes harmônicas e consequente redução da distorção de tensão é outro fator importante tratado na sequência no texto.

Desequilíbrio de tensão

O fenômeno tratado pelo módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição (Prodist), da Aneel, como “desequilíbrio de tensão” é definido matematicamente como a relação da tensão de sequência negativa e da tensão de sequência positiva no ponto de acoplamento comum entre a concessionária e consumidor – PAC. Contudo, esta definição pode ser aplicada a qualquer ponto de um sistema de potência. A expressão 2 apresenta a definição matemática do assim definido fator de desequilíbrio de tensão (FD).

$$FD\% = (V-/V+).100$$

IDENTIFICAÇÃO DA GRANDEZA	SÍMBOLO
Fator de desequilíbrio	FD
Magnitude da tensão de sequência negativa (RMS)	V-
Magnitude da tensão de sequência positiva (RMS)	V+
Magnitudes das tensões trifásicas de linha (RMS)	V_{ab+} V_{bc} e V_{ca}

Fonte: módulo 8 – prodist

Expressão 2 – cálculo do desequilíbrio de tensão

A origem deste fenômeno está relacionada à ocorrência de situações típicas em instalações elétricas e em alguns casos pode ser corrigida ou pelo menos atenuada. As razões mais conhecidas para a ocorrência deste fenômeno são:

- No caso de problemas nas fontes, como curto entre espiras em transformadores ou geradores, a solução é a correção da máquina elétrica/equipamento. Estas anomalias são normalmente detectáveis por testes efetuados em campo e cada vez mais adotados por empresas alimentadas por subestações próprias, como rotina de manutenção preventiva. Uma vez detectado o problema, a solução é a correção em oficina de assistência técnica habilitada.
- Defeito em capacitores: quando a correção de fator de potência é efetuada com a instalação de capacitores na média tensão, normalmente, a injeção é efetuada por capacitores monofásicos ligados entre fases e neutro ou entre fases. Neste caso, havendo a queima de algumas células monofásicas isoladamente, ou mesmo de fusíveis de proteção, a injeção de energia reativa não será equilibrada e, como consequência, haverá em maior ou menor proporção o desbalanceamento de tensão, por conta da injeção de energia reativa desequilibrada. Do ponto de vista quantitativo, o desbalanceamento dependerá da potência de curto no ponto em que os capacitores estão instalados e da quantidade de células queimadas em relação ao total, em cada uma das fases. Na baixa tensão, o mesmo fenômeno poderá ocorrer, uma vez que um capacitor trifásico é formado por células monofásicas, isto é, a queima de “parte” de um capacitor trifásico (ou mesmo de um banco de capacitores) incorrerá em desbalanceamento de tensão.
- Cargas monofásicas não equilibradas entre as fases proporcionarão consumos de corrente desequilibradas, causando por consequência desequilíbrio de tensões.
- Outras causas para o desequilíbrio podem estar associadas a outros fatores como pontos de mau contato, defeitos em dispositivos de acionamentos e mesmo motores com enrolamentos em má condição de operação.

A principal consequência do desequilíbrio de tensão é o aumento das perdas elétricas. Em outras palavras, sistemas elétricos desequilibrados ou desbalanceados provocam aumento considerável das perdas elétricas contribuindo para o

desperdício de energia elétrica. Soluções para a correção de redes desbalanceadas são, portanto, além de adequações econômicas e operacionais, ações sustentáveis do ponto de vista ambiental.

No entanto, caso os valores de desbalanceamento sejam significativos, podem chegar a desligar plantas industriais ou prédios comerciais pela atuação do relé de proteção específico.

A Figura 3 apresenta o comportamento da elevação de perdas em motores devido ao desequilíbrio de tensão na alimentação. O que se pode observar é que valores da ordem de 2% de desequilíbrio impõem ao motor alimentado aumento de perdas da ordem de 8%. Valores acima de 1% de desequilíbrio costumam ser objeto de análise das causas, notadamente em sistemas de distribuição.

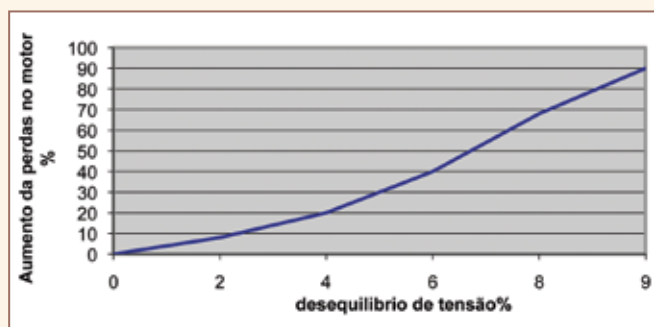


Figura 3 – Aumento das perdas em motor em função do desequilíbrio de tensão.

Conclui-se que o acompanhamento e a medição do desequilíbrio de tensão são ações preventivas importantes não só para redução de perdas elétricas como para a mitigação de fenômenos de qualidade de energia e interferências operacionais em plantas industriais, prédios comerciais e mesmo em residências. Sua avaliação requer o uso de instrumentação adequada às prescrições da IEC 61000-4-15.

As soluções corretivas são tomadas nas fontes, cargas ou mesmo nas instalações elétricas.

Eficiência energética em componentes, equipamentos, concepção e manutenção das instalações elétricas

Eficiência energética nos transformadores

A construção de subestações com diversos transformadores que vão sendo carregados e aliviados à medida que os processos também o são é uma prática comum em indústrias.

Devem ser considerados alguns pontos importantes objetivando a minimização das perdas:

- São infinitas as possibilidades de projeto de transformadores. Já na etapa de projeto, as perdas podem ser minimizadas caso se conheça a faixa de carregamento que os transformadores

irão operar. Neste caso, a especificação deste projeto especial pode ser interessante.

- Transformadores são equipamentos de vida útil longa e a existência de equipamentos com operação inadequada pode ser mais comum do que possa parecer.
- A exemplo dos motores, transformadores podem também ser remanufaturados ou reformados com possível prejuízo às suas características originais de projeto e consequente aumento de perdas.
- Recomenda-se uma periódica análise do carregamento dos transformadores e análise de operação em ponto ótimo.

A Tabela 1a apresenta o comportamento das perdas em transformador a seco industrial de construção recente. A Tabela 1b apresenta o comportamento das perdas de transformador de distribuição que atende a norma ABNT em publicação de 1993. O que se nota é a sensível diferença de comportamento entre os dois projetos, tomando por exemplo um trafo de 1.500 kVA para ambos os casos.

TABELA 1A – PERDAS EM VAZIO (P₀) E PERDAS EM CARGA

POT. TRAFÓ kVA	PERDA EM VAZIO W	PERDAS TOTAIS W	PERDAS EM CARGA W
750	1500	13500	12000
1000	1900	16500	14600
1500	2500	25000	22500
2000	3900	25100	21200
3000	4900	31700	26800

(Pk) em transformador industrial
Fonte: Siemens

TABELA 1B – PERDAS EM VAZIO E PERDAS EM CARGA EM TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO

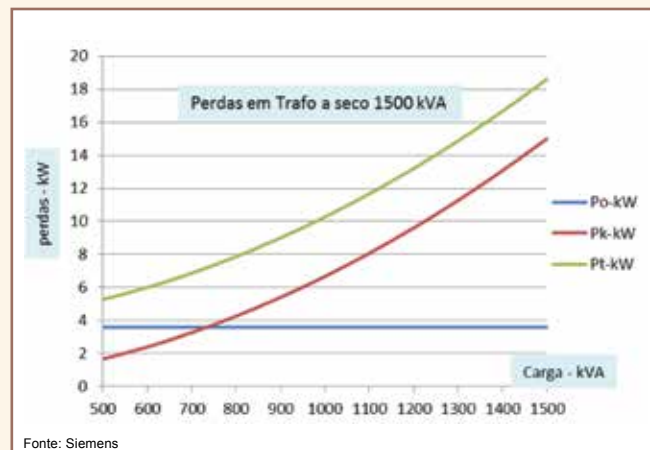
POTÊNCIA (kVA)	BT (V)	PERDAS		
		I ₀ (%)	P ₀ (W)	P _k (W)
750	220	2.00	2750	10900
	380	2.00	2650	10000
	440	2.00	2650	9900
1000	220	1.50	2700	13600
	380	1.50	2700	12000
	440	1.50	2800	12000
1250	220	1.20	3600	18900
	380	1.20	3100	14300
	440	1.20	3100	13500
1500	380	1.00	3900	15300
	440	1.00	3600	15000
2000	380	0.90	4900	20400
	440	0.90	5300	20100
2500	380	0.60	6100	25200
	440	0.60	5800	23300

Fonte: Procel 1993

Na Tabela 1a, o trafo de 1.500 kVA possui perda em vazio de 3.600 W (440 V) contra 2.500 W em transformador de distribuição na Tabela 1b, já a perda em carga (100%) do trafo

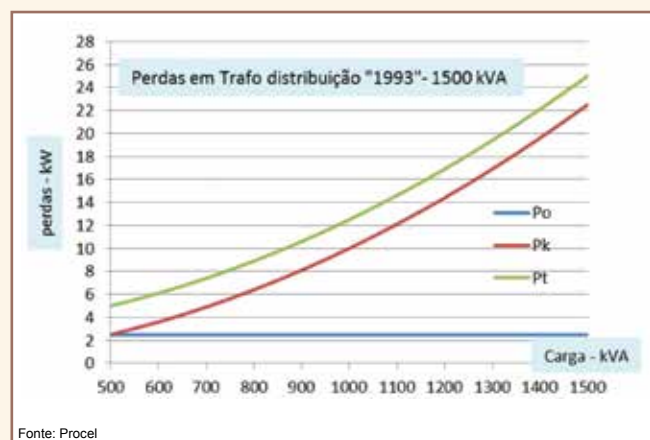
a seco é de 15.000 W contra 22.500 W no trafo de distribuição. Os gráficos das Figuras 4 e 5 apresentam o comportamento das perdas destes dois trafos de 1.500 kVA construídos por projetos diferentes em função do carregamento.

Como era de se prever, os trafos mais modernos possuem perdas totais menores que os antigos. A tendência das normas de transformadores é garantir melhores rendimentos em faixa de operação típica. Alguns cuidados devem ser tomados:



Fonte: Siemens

Figura 4 – Perdas em transformador a seco de 1500 kVA



Fonte: Procel

Figura 5 – Perdas em transformador de distribuição-1500 kVA

- O diagnóstico de eficiência energética deve considerar a tecnologia dos transformadores existentes e os dados reais de perdas, extraídos dos ensaios de rotina. Outras variáveis influenciam as perdas e estimativas sem maiores fundamentos que podem incorrer em erros de projeção. A alternativa de ensaiar os transformadores para se aferir os valores de perdas em vazio e totais nem sempre é possível em campo e deve ser feita em laboratório. Ao menos as perdas em vazio podem ser avaliadas em medição simples com trafo sem carga e temperatura ambiente.

- A operação dos trafos, isto é, o regime de carga é fundamental para se avaliar qual a configuração ótima para manter a operação. Em outras palavras, manter transformadores operando com pouca carga pode ser indício de desperdício, uma vez que as perdas em vazio

são constantes, já as perdas em carga aumentam de forma quadrática ao carregamento.

O caso clássico de desperdício de energia em transformadores considera situações em que diversos transformadores em plantas industriais são operados simultaneamente. Caso os transformadores operem com carga parcial ou mesmo não equilibradas poderá estar havendo desperdício se alguns dos traços possam estar absorvendo as cargas dos outros.

Exemplificando:

- a operação de dois transformadores de 1.500 kVA que seguem o regime de perdas do gráfico da Figura 5 e, considerando o primeiro deles operando a plena carga e o segundo com 50% da carga, a perda calculada será de 25 kW para o primeiro trafo e de 8 kW para o segundo; 33 kW total. Caso seja possível se migrar as cargas de um dos traços para o outro, equilibrando o carregamento, a nova situação será dois traços operando a 1.125 kVA. Neste caso as perdas serão de 28 kW com uma redução das perdas de 15%.

Fontes de backup, UPS, geradores e data centers

Fontes de backup devem também estar adequadas aos cuidados de operação de forma eficiente e os geradores devem manter a mesma regulação de tensão e demais características da qualidade de energia promovida pela fonte principal incluindo desequilíbrio e distorção de tensão.

Já os UPSs possuem maior complexidade no tratamento do tema. O rendimento dos UPSs varia em função da tecnologia de construção, do carregamento, arquitetura da instalação e outras características, como a distorção harmônica de corrente de entrada.

Os UPSs com tecnologia de dupla conversão, construídos com retificadores que operam em alta frequência (IGBTs), atingem rendimentos da ordem de 96% com carga próxima da nominal. À medida que o carregamento diminui, o rendimento também é reduzido. UPSs construídos com retificadores com SCRs possuem rendimentos menores, da ordem de 92% a plena carga. A distorção harmônica de corrente dependerá do número de pulsos do retificador (THDI da ordem de 10% até 30%) superiores às características dos construídos com IGBT (THDI de até 5%).

A arquitetura de interligação dos UPSs é outro ponto que deve ser considerado já que é comum mantê-los em configuração de contingência reduzindo sua carga unitária. Existem diversas configurações possíveis de interligações de UPS e foram tratadas no fascículo técnico de cargas de missão crítica publicado recentemente nesta revista (O Setor Elétrico). Observa-se que quanto maior for a classificação "TIER" menor será a eficiência energética global. Neste ponto há uma relação de compromisso entre eficiência energética e confiabilidade.

Ainda são consideradas algumas arquiteturas em que os UPSs ou parte deles operam no modo "by-pass". As cargas são alimentadas em regime pela rede pela chave estática, sendo transferidas para os inversores no instante em que a rede apresente alguma irregularidade. Neste caso, o rendimento pode atingir 99%.

PUE

O indicador "PUE" utilizado nos data centers considera a relação da energia total consumida no data center e a energia gasta na alimentação das cargas TI, desta forma, quanto mais próximo da unidade maior será a eficiência do data center. Há de se considerar que a avaliação do PUE isoladamente pode levar a uma falsa interpretação e sensação de operação eficiente, uma vez que os valores absolutos de consumo de energia das cargas de tecnologia de informação devem ser também avaliados. De nada adianta possuir um bom sistema de climatização se as próprias cargas TI consomem valores superiores de energia superiores aos de referência.

Técnicas como virtualização de servidores, sistemas de monitoração, alguns casos de alimentação de cargas TI em corrente contínua e aumento de limites de temperaturas de operação de servidores são movimentos que contribuem para eficiência energética em data centers.

A distribuição de energia em tensões superiores como 380 V ou 440 V com o uso de transformadores fator K, com soluções combinadas de bloqueio de harmônicas, blindagem, transformação de tensão e distribuição de energia é uma solução bastante empregada com bons resultados positivos na alimentação de cargas TI.

Aspectos térmicos de traços aplicados nas PDUs

O documento 144 da CDA (Cooper Development Association) apresenta dois modelos bastante aplicáveis quando se constata ou quando se prevê a circulação de correntes harmônicas em transformadores. O primeiro destes, definido pela norma "BS 7821Part 4", está associado a uma situação de transformador existente e operando quando as cargas não lineares são instaladas, e o segundo a uma situação que ocorrerá, isto é, o trafo ainda será instalado. Este segundo modelo é apresentado por norma do UL. Vale lembrar que as avaliações devem sempre considerar, além dos aspectos quantitativos, os aspectos qualitativos e operacionais, evitando paranoias que induzem a investimentos desnecessários.

Os dois modelos utilizaram pelos seus proponentes um fator chamado "k" (e não devem ser confundidos), deve-se tomar cuidado para se entender se a questão está em um ou outro caso, ou seja: deseja-se especificar um transformador novo ou definir até que carga um transformador existente poderá

suportar na presença das correntes harmônicas – correntes de neutro e sobrecargas em barramentos e circuitos.

Há de se considerar ainda a sempre importante relação de compromisso em data centers entre os indicadores de confiabilidade na alimentação das cargas TI e a eficiência energética, dois pratos de uma mesma balança.

Acionamentos, conversores/retificadores e outros

A exemplo do exposto no caso de UPS, os conversores estáticos também possuem rendimentos que dependem da tecnologia dos semicondutores que os compõem. Naturalmente os custos de aquisição dos acionamentos são inversamente proporcionais aos seus rendimentos. Nota-se que acionamentos com menor número de pulsos, como o de 6 pulsos, podem causar ainda problemas em função da baixa qualidade de energia.

Aplicação de motores

Existe vasto material publicado que considera a eficiência energética em motores, os “motores de alto rendimento” (comercialmente “W22-premium”) lançados nos anos de 1990 com objetivo de substituição dos motores standard assumiram o seu natural lugar no mercado ao longo destes anos. Mais recentemente, os motores de imã permanente (comercialmente “Wmagnet”) se apresentam como uma nova oportunidade de aplicação com aumento do rendimento em relação à tecnologia anterior de valores da ordem de 1%.

Outras observações em motores devem considerar a tensão de alimentação tão próxima quanto possível à sua tensão nominal (novamente a influência da regulação de tensão) e, sobretudo, que eles sejam dimensionados adequadamente às cargas mecânicas que vão movimentar.

Motores alimentados com tensões superiores às nominais consomem mais energia reativa e têm as perdas incrementadas na proporção do quadrado da relação das tensões (operação e nominal).

Motores operando em baixa carga têm também suas perdas incrementadas (e fator de potência reduzido) conforme a curva de operação dos motores disponível em catálogo do fabricante.

Aspectos de projeto e localização das fontes e cargas

Aspectos clássicos de projetos industriais, como a localização de fontes próximas às cargas, contribuem para a redução de perdas nos circuitos de distribuição. Arquiteturas que consideram distribuição de energia em média tensão e subestações próximas a centros de cargas são em geral as soluções mais eficientes. Os mesmos conceitos podem ser aplicados em prédios comerciais, shopping centers e hospitais.

Carregamento e dimensionamento dos circuitos/ correntes harmônicas

• Corrente nominal e dimensionamento

Dimensionamentos de circuitos de acordo com as normas vigentes são importantes para mantê-los operando em condições seguras, contudo, os aspectos de operação com perdas reduzidas devem considerar a relação da expressão das perdas elétricas (RI2) no dimensionamento.

Maneiras de instalar inadequadas são fontes de importantes perdas, tanto por agrupamento como por influências dos arranjos que causam induções eletromagnéticas e aquecimentos como consequência. Um caso clássico de incremento nas perdas em instalação de circuitos de distribuição é aquele em que circuitos em paralelo são instalados em eletrodutos metálicos distintos sem a consideração de manter o arranjo dos condutores de forma adequada (cada eletroduto deverá conter um conjunto das três fases ou “um conjunto RST em cada eletroduto”).

Outra situação comum considera construções mecânicas em painéis elétricos de forma que uma das fases fica acidentalmente circundada por elementos estruturais do painel formando um “TC”, nesta situação, correntes parasitas serão induzidas na estrutura, aumentando as perdas e o aquecimento. A solução para a situação é “abrir o TC” ou utilizar elementos isolantes para promover a fixação.

O dimensionamento econômico e ambiental de condutores disponibilizado em publicações dos fabricantes [5] explora o tema e, de uma forma geral, são adotadas secções transversais de condutores superiores àquelas que seriam adotadas pelos métodos prescritos pelas normas como a ABNT NBR 5410. As recomendações adotadas pela certificação LEED restringem os limites de queda de tensão a valores máximos de 5%. Este critério, de forma indireta, reduz a resistência dos circuitos e as perdas elétricas como consequência.

O gráfico da Figura 6 apresenta as perdas em circuitos elétricos trifásicos em função da secção dos condutores que os formam. O que se pode observar é que um circuito com corrente nominal de 200 A em 220 V, por exemplo, alimenta uma carga trifásica de aproximadamente 70 kW. Caso o circuito seja montado com 3 x 120 mm², em distância de 100 metros, a perda estimada será de aproximadamente 2 kW, ou quase 3% de perda em relação à carga nominal, valor não desprezível.

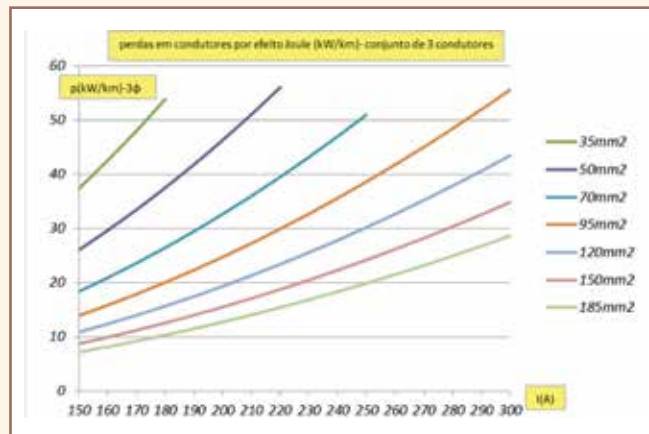


Figura 6 - Perdas em circuitos trifásicos

• Circulação de correntes harmônicas

A presença de cargas não lineares (que possuem correntes harmônicas) nas instalações elétricas pode causar uma série de fenômenos bem conhecidos como sobrecarga nos condutores, especialmente nos condutores neutros, aquecimento e vibração em motores de indução, queima de capacitores por ressonância, aumento da distorção de tensão, aumento das perdas em transformadores devido principalmente ao aumento das perdas de Foucault, entre outros. O incremento destas perdas nos transformadores na presença destas correntes harmônicas é quantificado por expressão que considera a elevação das perdas na proporção do quadrado das correntes harmônicas pelo quadrado da própria ordem harmônica ($\sum I_h^2 \cdot h^2$). A expressão geral considera as perdas totais como:

$$P_t = P_f \cdot \sum I_h^2 \cdot h^2$$

Em que:

- P_t são as perdas totais de Foucault incrementadas devido às correntes harmônicas;
- P_f são as perdas de Foucault na frequência fundamental;
- I_h são as correntes harmônicas;
- h são as ordens harmônicas relativas às correntes presentes.

Como as correntes harmônicas possuem frequências características superiores à frequência fundamental, pode-se prever o aumento das perdas em função da presença e circulação destas correntes em circuitos e transformadores. Esta evolução das perdas é um dos pontos que pode comprometer a operação confiável dos transformadores, construídos, em princípio, para operação com cargas lineares, portanto, isentas de deformação de suas formas de onda de corrente.

O incremento da circulação de correntes harmônicas é típico em situação de ressonância e ocorre quando

capacitores são instalados sem avaliação prévia das harmônicas. Além do aumento das perdas, a situação pode provocar queima e explosão de capacitores.

As soluções para restrição da circulação das correntes harmônicas são, em geral, filtros ativos ou passivos, separação de fontes ou instalações de transformadores de bloqueio.

Ainda, o efeito pelicular típico de correntes com frequências superiores também é um fator de elevação de perdas.

Aspectos de manutenção

A intervenção em manutenção é a que vai, de fato, garantir o sucesso ou o fracasso de um projeto de conservação de energia, já que as medidas são tomadas sobretudo de observações feitas no “dia a dia” e no dia a dia que as medidas serão implantadas paulatinamente.

A correta e planejada rotina de observações, pesquisas e intervenções garantirão ganhos crescentes com a redução de perdas.

Além do que já foi exposto, listam-se a seguir algumas verificações e constatações que estão relacionadas à participação da equipe de manutenção das instalações elétrica objetivando-se o uso racional de energia.

- Constantes verificações e medições de balanceamento de correntes, de tensão, presença de harmônicos, de carregamento de motores e transformadores, e de compatibilidade das tensões fornecidas às cargas;
- Verificação rotineira da isolação dos circuitos, correntes de fuga de equipamentos e aterramento da instalação;
- Garantia de manutenção das especificações de projeto, quando da substituição de equipamentos e materiais elétricos, principalmente quando foram instalados em retrofits, justificados financeiramente na própria operação e manutenção. Existem casos em que determinada ação de uso racional foi implementada, porém, quando há necessidade de intervenção em manutenção, os cuidados técnicos devidos não foram tomados e equipamentos distintos daqueles especificados comprometeram a operação normal do sistema não fornecendo a economia esperada;
- Termografia: técnica inicialmente aplicada em medicina, vem cada vez mais sendo aplicada a sistemas industriais, incluindo o de sistemas elétricos. Consiste em avaliar a condição da temperatura operacional dos componentes e equipamentos, por meio de instrumento sensível à radiação infravermelho emitida pelos corpos quentes;
- Restrição a equipamentos de baixa qualidade. A diversidade de equipamentos e componentes de mercado e seus custos iniciais de aquisição podem além de comprometer a instalação agregar taxas significativas de custos de energia. Convém que se estabeleça uma lista negra com equipamentos em que comprovadamente

se tenha verificado operação abaixo das expectativas. Pesquisa feita pelo IPT apontou a existência de soquetes e equipamentos de conexão elétrica com construção em ferro latonado contrariando-se as normas de fabricação e com altas temperaturas de operação;

- A aplicação generalizada de transformadores de baixa capacidade (até 5 kVA) deve ser precedida de cuidadosa avaliação e, principalmente, especificação.

Comentários finais

As implantações de projetos consistentes de eficiência energética requerem investimentos nas instalações elétricas (industriais ou prediais), considerando as novas premissas de cargas, controles e operação.

A evolução tecnológica dos componentes e materiais elétricos e eletrônicos nas últimas décadas permite às instalações de concepção recente vantagens operacionais e de segurança significativamente superiores àquelas de, por exemplo, 20 anos atrás. De forma geral, seria muito difícil viabilizar a substituição de componentes importantes de uma instalação antiga (transformadores, painéis elétricos, circuitos de força e controle, sistemas de iluminação, bombas e cargas de ar condicionado) sem que apresentem falhas de operação ou condições de franca obsolescência ou ainda que não atendam a determinada norma técnica que deve ser cumprida, caso da NR10. Do ponto de vista de atendimento as normas de instalação (caso da NBR5410 ou NBR5419), vale a pena comentar que a instalação deve atender em linhas gerais a norma vigente à época da obra, isto é, a revisão da norma não implica necessidade de revisão da instalação a menos que seja ampliada ou reformada.

Um projeto de EE que venha a ser implantado é uma excepcional oportunidade de renovação dos componentes da instalação, elevando-se significativamente sua vida útil.

Alguns casos típicos desta aplicação que já discutidos nos parágrafos anteriores são:

- Acionamento de motores e bombas, com a instalação de variadores de velocidade e substituição de chaves compensadoras e estrela-triângulo;
- Motores de alto rendimento: substituição de motores convencionais muitas vezes já com enrolamento substituído por outro de potência adequada e de alto rendimento;
- Substituição de componentes internos de quadros terminais com a automação de circuitos de iluminação;
- Substituição de sistemas inteiros de ar condicionado obsoletos e com gás refrigerante não adequado aos protocolos internacionais de meio ambiente;
- Inserção de medidores de energia e qualidade de energia para rateio e controle;

- Automação de subestações e disjuntores de distribuição
- Troca de transformadores por outros de menor potência e “secos”;
- Adequação do sistema de compensação reativa com sistemas antirressonantes, com manobra isenta de transientes e adequados às condições de operação da carga;
- Conversores de frequência podem ser construídos com IGBT (dependendo da potência) operados em alta frequência e com características de baixa distorção de corrente, porém os custos são elevados;
- Compensação da energia reativa e filtro de harmônicas.

Da mesma forma como citado anteriormente, as instalações elétricas que alimentam estas cargas deverão receber os cuidados para tal, com critérios de projeto e operação adequados, uma vez que estes dispositivos são essenciais para o controle das cargas.

Novos projetos de engenharia são cada vez mais “multifocais”, não bastando atender à premissa inicial sem considerar o ambiente e os entornos. Aspectos de funcionalidade, operação, manutenção, segurança, eficiência energética, ações de sustentabilidade e economia de água e outros insumos, redução de custos globais e naturalmente aspectos sociais, não serão mais dissociados e as novas matrizes de custos deverão considerar todas estas variáveis.

Em uma nova visão dos aspectos econômicos de um projeto, uma ação isolada não trará mais resultados interessantes e um projeto poderá se tornar inviável se não for completo, isto é, com diversos focos de interesse.

As tecnologias de materiais e equipamentos em desenvolvimento e recente implantação consideram como fundamental o uso de fontes limpas e eficientes interligadas

a sistemas de transmissão, distribuição e uso da energia absolutamente eficiente. Este conceito é cada vez mais privilegiado pela legislação dos países que “condena ao desaparecimento” sistemas de baixo custo de aquisição, mas com alto custo para a sociedade, como é o caso das lâmpadas incandescentes e outras com baixo rendimento ou que contenham alta concentração de resíduos como o mercúrio.

Referências

- 1- PEREIRA, Clever. *Circuitos polifásicos e magnéticos* – UFMG.
- 2- Revista *O Setor Elétrico* – caderno de missão crítica – edições de janeiro a maio de 2013.
- 3- STAROSTA, José. *O setor elétrico – colunas técnicas*.
- 4- *Ação Engenharia e Instalações Ltda.* – relatórios técnicos.
- 5- MORENO, Hilton. *Dimensionamento econômico e ambiental de circuitos elétricos*.
- 6- STAROSTA, José. *Uso racional de energia elétrica em instalações comerciais. Dissertação de mestrado junto a Escola Politécnica (USP)*.
- 7- *Normas IEEE – color books*.
- 8- *Catálogo de motores WEG*.
- 9- *Catálogo de transformadores – Siemens*.
- 10- ABNT NBR 5140.
- 11- *Manuais de uso eficiente de energia – Procel*.
- 12- *Manuais de uso eficiente de energia – Agência para aplicação de energia*.
- 13- *Aneel – Prodist – módulo 8*.

*ENG. JOSE STAROSTA, MSC. é Diretor da Ação Engenharia e Instalações Ltda; Presidente da ABESCO e membro da diretoria do DEINFRA-FIESP.

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@atitudeeditorial.com.br