



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO –GET

GRUPO DE ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E GESTÃO DA TECNOLOGIA DA INOVAÇÃO - GET

REDUÇÃO DE PERDAS ELÉTRICAS ATRAVÉS DE NOVO ENFOQUE NA OTIMIZAÇÃO DO FLUXO DE REATIVOS DE 60 HZ NAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO

**Ernesto Alberto Mertens Jr(*)
Elektro Eletricidade e Serviços S/A**

**Flavio Resende Garcia
SADEFEM**

RESUMO

A maneira mais simples de melhorar a eficiência da rede de distribuição é através do controle de reativos. As linhas de transmissão, subestações e parte dos circuitos de distribuição, operam de forma eficiente. Em boa parte do sistema de média tensão e em toda baixa tensão, existe grande potencial para aumento da eficiência. Grande parte do sistema opera em condições não adequadas. Considerando-se a extensão de um alimentador, aproximadamente 25% da rede se beneficia da compensação de reativos promovida pelos capacitores instalados, e os 75% restantes não. Conclui-se que há necessidade de repensar as abordagens atuais adotadas para correção.

PALAVRAS-CHAVE

Reativos, Perdas, Capacitores, Correção

1.0 - INTRODUÇÃO

Existe um consenso geral de que a melhoria da eficiência energética é a solução mais econômica, eficaz e rápida para minimizar impactos ambientais, poupar recursos naturais, diminuir custos, assim como reduzir os investimentos em infra-estrutura.

Segundo regulamentos da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, as concessionárias de distribuição de energia elétrica devem aplicar um percentual mínimo da receita operacional líquida em Programas de Eficiência Energética (Lei nº 9.991). Este programa tem por objetivo demonstrar à sociedade a importância e a viabilidade econômica de ações de combate ao desperdício de energia elétrica e de melhoria da eficiência energética de equipamentos, processos e usos finais de energia. As concessionárias realizam diversos trabalhos através de investimentos em eficiência energética. Este processo visa melhorar a eficiência energética de processos industriais e também de outros segmentos de mercado, tendo sempre por objetivo a melhora da eficiência.

Assim, se há preocupação para que as cargas operem de maneira mais eficiente, devemos buscar no sistema elétrico esta mesma premissa de eficiência.

A maneira mais simples de melhorar o nível de eficiência da rede de distribuição é através do controle da circulação de reativos no sistema elétrico. Quanto menor for a energia reativa excedente fluindo pelas redes, maior

(*) Rua Ary Antenor de Souza, nº 321 – Jardim Nova América - CEP 13.333-496 - Campinas, SP, – Brasil
Tel: (+55 19) 2122-1477 – Fax: (+55 19) 2122-1351 – Email: ernesto.mertens@elektro.com.br

será a capacidade de transporte de energia ativa (kW), permitindo assim uma redução das perdas técnicas no sistema elétrico.

O fator de potência (FP) é o indicador utilizado pelo setor elétrico para avaliar a ocupação “supérflua” do sistema elétrico. Por esse motivo existe grande preocupação em se manter o referido indicador o mais próximo da unidade.

No Brasil, os consumidores de energia elétrica podem ser penalizados com a cobrança da energia reativa quando o fator de potência de suas cargas for menor que o limite mínimo de 0,92 pu (indutivo ou capacitivo, dependendo do horário de operação), definido por regulamentação específica (Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição).

Recentemente, vem ocorrendo no país, algumas discussões visando à elevação do FP de 0,92 pu para 0,95 pu. Em alguns países já se utiliza valores mais próximos da unidade, tais como 0,93 pu e 0,95 pu (Bélgica, Alemanha, Suíça, etc.).

Quanto menor for a energia reativa excedente fluindo pelas redes, maior será a capacidade de transporte de energia ativa (kW), permitindo assim uma redução das perdas elétricas no sistema elétrico como um todo.

2.0 - AVALIAÇÃO DOS CRITÉRIOS PARA CORREÇÃO DE REATIVOS NO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

Quando da análise de um sistema elétrico de distribuição, verifica-se que as linhas de transmissão, as subestações e parte dos circuitos de distribuição em média tensão, operam de forma bastante eficiente no aspecto de reativos, ou seja, possuem fator de potência sempre superior ao 0,92 exigidos pela regulamentação.

Porém, explorando-se um pouco mais o assunto, verifica-se que em boa parte das linhas de distribuição de média tensão e praticamente em toda a rede de baixa tensão, existe um grande potencial para o aumento da eficiência energética do sistema de distribuição, permitindo assim uma significativa redução no nível de perdas elétricas.

A grande maioria das distribuidoras realiza a correção dos reativos adotando a regra dos dois terços do tronco do alimentador, conforme mostrado na figura 1. Dessa forma, quando da avaliação do FP na saída de um alimentador de distribuição, tem-se como resultado valores entre 0,92 pu e 1,0 pu.

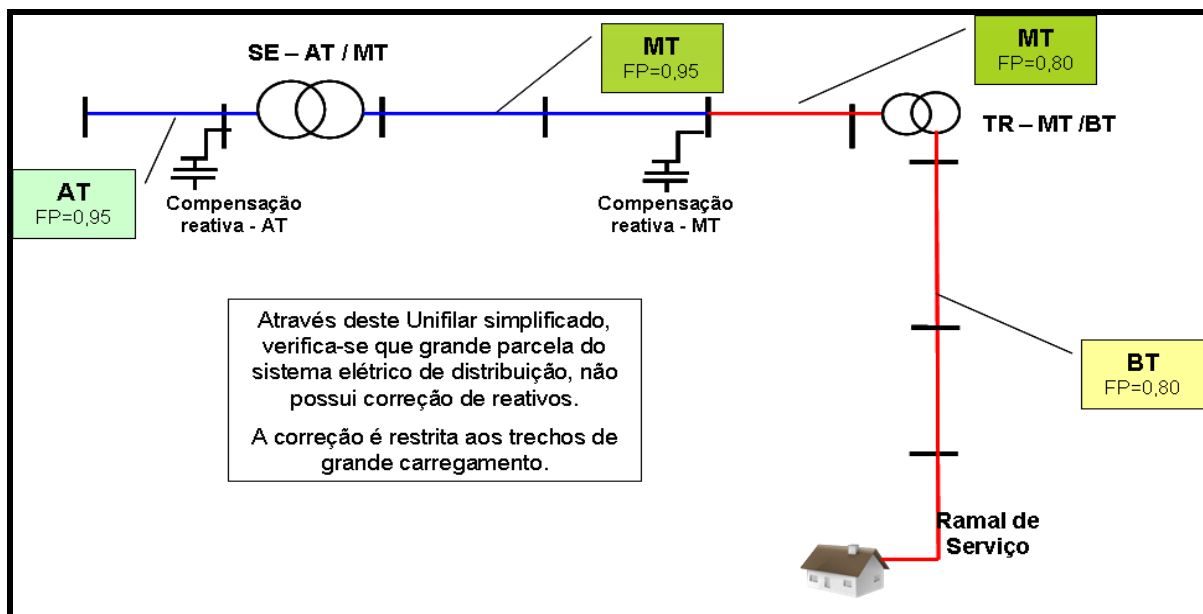


Figura 1 – Critérios para compensação de reativos nas redes de distribuição.

Avaliando-se esta forma de compensação de reativos, verifica-se que há um grande potencial para a redução de perdas técnicas, apenas otimizando a sistemática de correção de reativos adotada pela maioria das distribuidoras.

Valores altos de fator de potência (próximos a 1,0 pu) indicam uso eficiente da energia elétrica, enquanto valores baixos evidenciam seu mau aproveitamento, além de representar uma redução da capacidade de transporte de potência ativa no sistema elétrico.

Conforme já citado, o fator de potência indica qual porcentagem da potência total fornecida (kVA) é efetivamente utilizada na realização de trabalho útil (kW). Assim, o fator de potência representa o nível de eficiência no uso do sistema elétrico.

Para mostrar a relevância dessa questão, considera-se o exemplo a seguir:

Exemplo numérico: Para suprir uma carga com potência ativa de 100 kW e fator de potência igual a 0,70 pu são necessários 143 kVA de potência total. Para a mesma carga de 100 kW, mas com fator de potência igual a 0,92 pu, são necessários apenas 109 kVA de potência total, o que representa uma diferença de 24% no fornecimento em kVA. Em outras palavras, pode-se dizer que o aumento do fator de potência promoveu uma liberação equivalente de capacidade do sistema elétrico local igual a 34 kVA.

2.1 AVALIANDO UM SISTEMA REAL TÍPICO

Com base em uma avaliação preliminar de um circuito primário em 13,8 kV, com extensão total da ordem de 340 km (tronco + ramais primários + rede de baixa tensão), o resultado foi o seguinte:

Fator de Potência MÉDIO ao longo das 24 horas de um dia útil:

Saída do alimentador (visto da SE) = 0,96 pu

Saídas para os ramais rurais = 0,69 pu

Rede de baixa tensão (urbano com predominância residencial) = 0,83 pu

Assim, podemos verificar que grande parte do sistema opera em condições não adequadas do ponto de vista do FP, ou seja, considerando-se a extensão do alimentador (MT e BT), aproximadamente 25% da rede elétrica se beneficia da compensação de reativos promovida pelos capacitores instalados, e os 75% restantes estão muito abaixo do ideal.

Para se ter uma idéia da dimensão desta situação, a tabela I apresenta as extensões das redes primárias e secundárias da Elektro:

Tabela I – Extensões das redes primárias e secundárias da Elektro.

Redes Urbanas – Base 2009		
Primária – MT	Secundária – BT	Total MT + BT
11.022 km	19.558 km	30.580 km

Pratica adotada nas Redes Urbanas para correção		
Primária – MT	Secundária – BT	% de rede corrigida
75%	0%	27%
8.267 km	0 km	8.267 km

Pela análise realizada acima se verifica que mais de 70% dos circuitos urbanos não possuem controle no aspecto do fator de potência, sendo os mesmos compostos pela parcela de Rede Primária (MT) não corrigida, e a totalidade da rede Secundária de BT.

2.2 AVALIAÇÃO REDES RURAIS

Nas redes primárias rurais (com tensões típicas de 13,8 kV) tem-se também uma situação muito parecida com o que foi verificado nas redes urbanas, ou seja, situação favorável para a redução de perdas técnicas.

Os religadores automáticos são dispositivos de proteção utilizados normalmente para “isolar” as áreas urbanas das áreas rurais, portanto, quando utilizados com essa finalidade, refletem características das redes quase que exclusivamente rurais.

Em uma avaliação de diversos circuitos de distribuição com características rurais, obteve-se através do monitoramento de grandezas elétricas nos religadores, o seguinte diagnóstico, conforme mostrado na tabela II, a qual apresenta o resultado dos valores médios de corrente de carga e do fator de potência, além de algumas características referentes à potência instalada dos transformadores e as respectivas extensões de rede.

Tabela II - Resultado dos valores médios de corrente de carga, fator de potência, potência instalada dos transformadores e extensões de rede.

Religadores	Corrente média	FP médio	KVA instalado	Extensão km
A	55	0,70	13360	252
B	53	0,76	10025	410
C	33	0,75	9674	175
D	34	0,49	8265	264
E	41	0,81	7395	244
F	38	0,79	5915	80
G	22	0,69	5772	114
H	49	0,64	5512	55
I	28	0,74	5453	712
J	16	0,82	4980	161
K	16	0,70	3998	72
L	20	0,68	3815	76
TOTAL	34	0,71	84164	2615
	Corrente média geral	Fator Potência médio geral	Soma kVA Total	Soma extensão total

Pela análise da tabela II, verifica-se através dos valores de fator de potência que há grande potencial de ganhos nestas redes. O valor médio obtido da amostra de 12 pontos resultou um FP = 0,71 pu. Essa situação é devida principalmente ao grande volume de transformadores com baixo carregamento existentes nas redes rurais.

A figura 2 demonstra o perfil da corrente de carga, assim como do FP ao longo de um dia útil em um religador de um circuito rural típico.

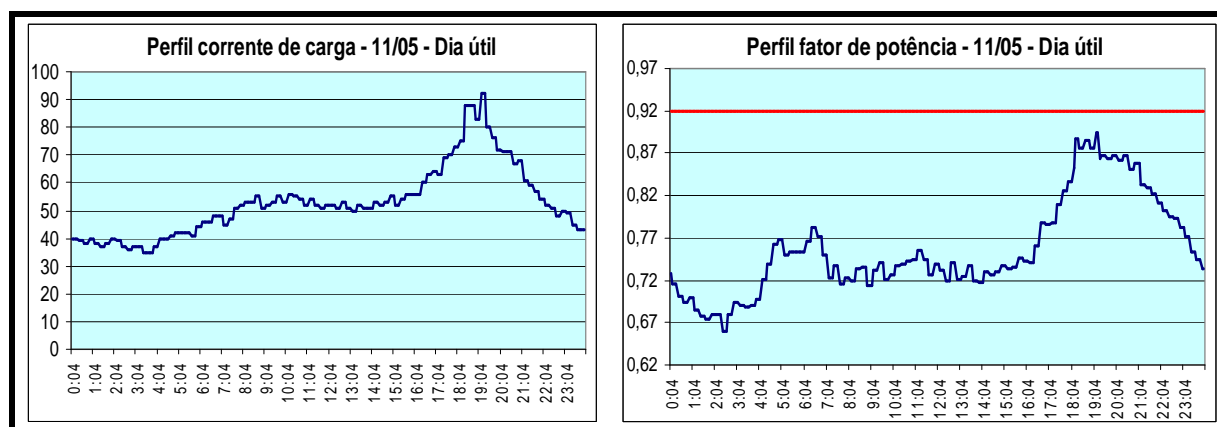


Figura 2 – Perfil da corrente de carga e fator de potência.

A figura 3 demonstra como é a situação dos reativos ao longo do sistema como um todo e os respectivos valores médios de FP na saída do circuito e nos religadores presentes neste sistema elétrico.

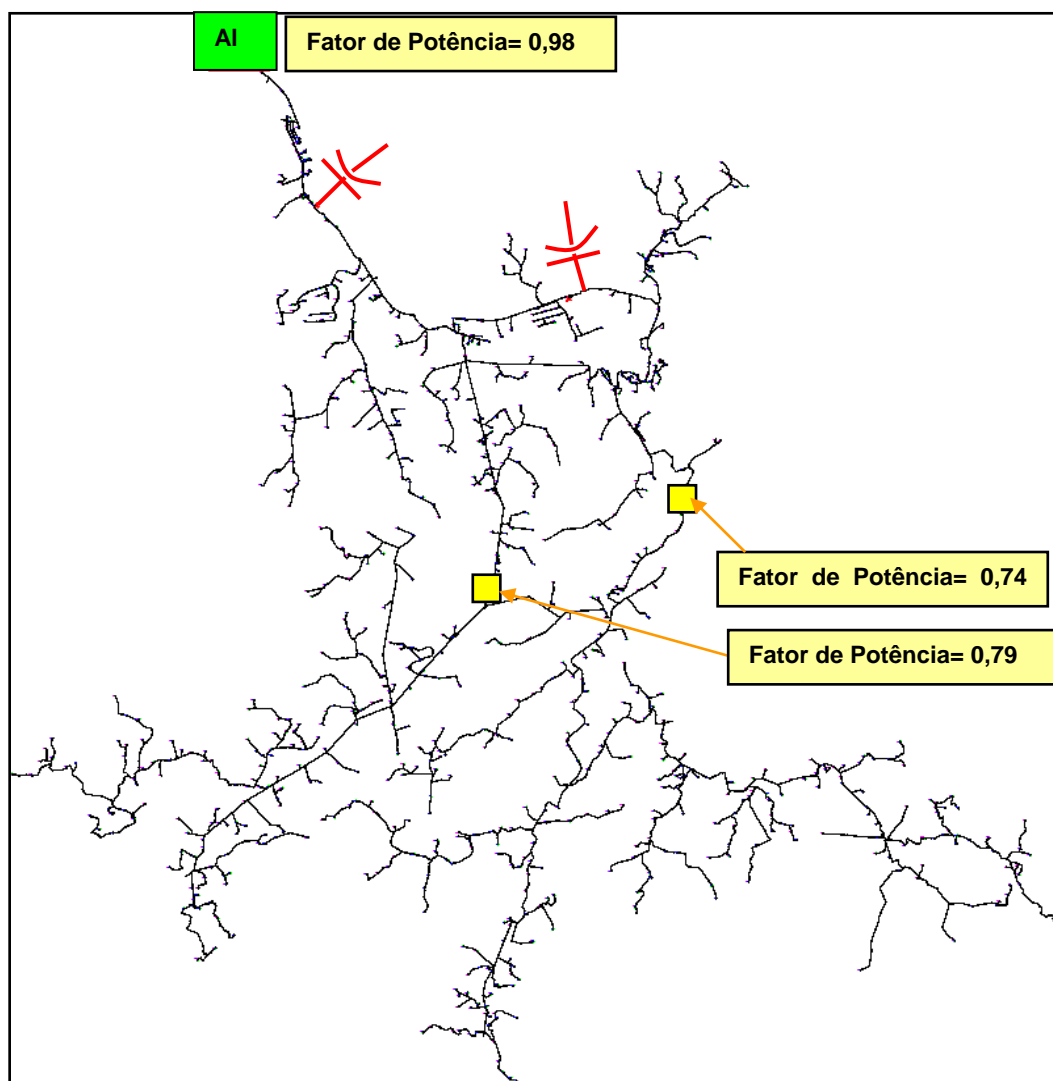


Figura 3—Situação dos reativos ao longo do sistema como um todo e respectivos valores médios de FP.

Com exceção aos grandes centros urbanos, as características da rede apresentada se repetem em grande parte do sistema de distribuição.

2.3. AVALIAÇÃO DO REATIVO NOS CONSUMIDORES DE BAIXA TENSÃO

Grande parte dos consumidores de energia elétrica está na baixa tensão, portanto, é importante uma avaliação do comportamento dos mesmos no aspecto do fator de potência. Com a recente alternativa de aplicação de medidores eletrônicos para faturamento, as concessionárias passaram a possuir um medidor de baixo custo com capacidade de medir tanto a energia ativa quanto a reativa, permitindo assim uma avaliação do FP nos consumidores de BT.

No caso particular da Elektro, onde foram instalados mais de 9000 medidores desse tipo, porém, não há o controle de quais desses consumidores tomaram alguma ação para evitar a cobrança do reativo excedente. Estima-se que 20 a 30 % dos consumidores adotem a providência para resolver o problema. Do total atualmente instalado, verificou-se que 57% (5177) dessas instalações apresentam valores de fator de potência abaixo do valor exigido (0,92 pu). A figura 4 apresenta uma avaliação desses consumidores.

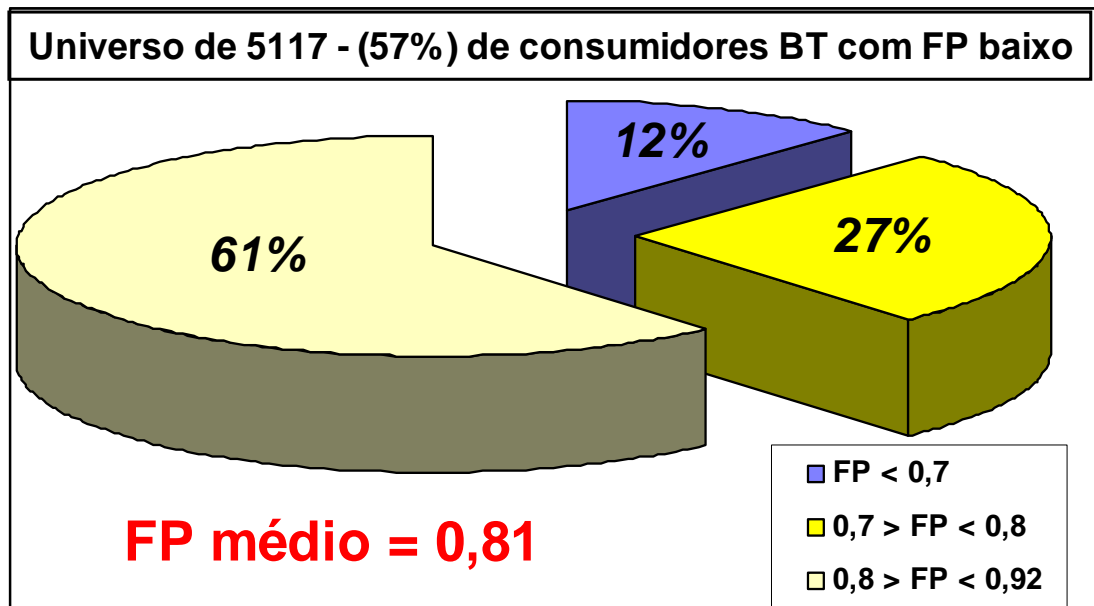


Figura 4 – Avaliação dos consumidores em relação ao fator de potência.

Esta análise visa apenas demonstrar que a maioria das cargas presentes nos consumidores não atende o fator de potência mínimo de 0,92 pu, portanto, a circulação de reativos na rede de BT não é desprezível, sendo importante uma reavaliação nos atuais procedimentos de correção.

As perdas de energia elétrica ocorrem em forma de calor e são proporcionais ao quadrado da corrente total. Como essa corrente cresce com o excesso de energia reativa, estabelece-se uma relação direta entre o incremento das perdas técnicas e o baixo fator de potência, provocando o aumento do aquecimento de condutores e transformadores.

2.4. AVALIAÇÃO REDE SECUNDÁRIA DE BAIXA TENSÃO.

Visando uma avaliação mais detalhada, foram realizadas diversas medições em circuitos de baixa tensão com predominância residencial. A seguir demonstra-se um caso exemplo:

- Rede secundária radial, alimentada através de um transformador de 45 kVA, 60Hz, primário 13,8kV, conectado em Δ e secundário 220/127V em Y aterrado, com cargas predominantemente residenciais, apresentando picos de cargas de alto fator de potência (acima de 0,95 pu) a partir das 19:00hs, que chegam a sobrecarregar o transformador em até 150%. No período diurno, o consumo ativo diminui significativamente, reduzindo o fator de potência para valores entre 0,73 pu e 0,90 pu, com valor médio de 0,85. De forma a permitir uma avaliação dos benefícios da correção dos reativos neste nível de tensão, foi planejado a adequação do fator de potência, neste setor.

No gráfico mostrado na figura 5, verifica-se o perfil do fator de potência neste circuito, ao longo de três semanas, conforme a seguir:

- Primeira semana sem nenhum tipo de compensação, FP varia entre 0,73 pu e 0,97 pu.
- Segunda semana, foi ligado um banco de capacitor fixo de 8,3 kvar para utilização em poste, FP variou entre 0,94 pu e 1,0 pu.
- Terceira semana, foi desligado o capacitor de 8,3 kVAr de poste, e instaladas pequenas unidades capacitivas junto aos medidores de faturamento dos consumidores, totalizando 6,9 kVAr, nesta nova condição o FP variou entre 0,9 pu e 1,0 pu.

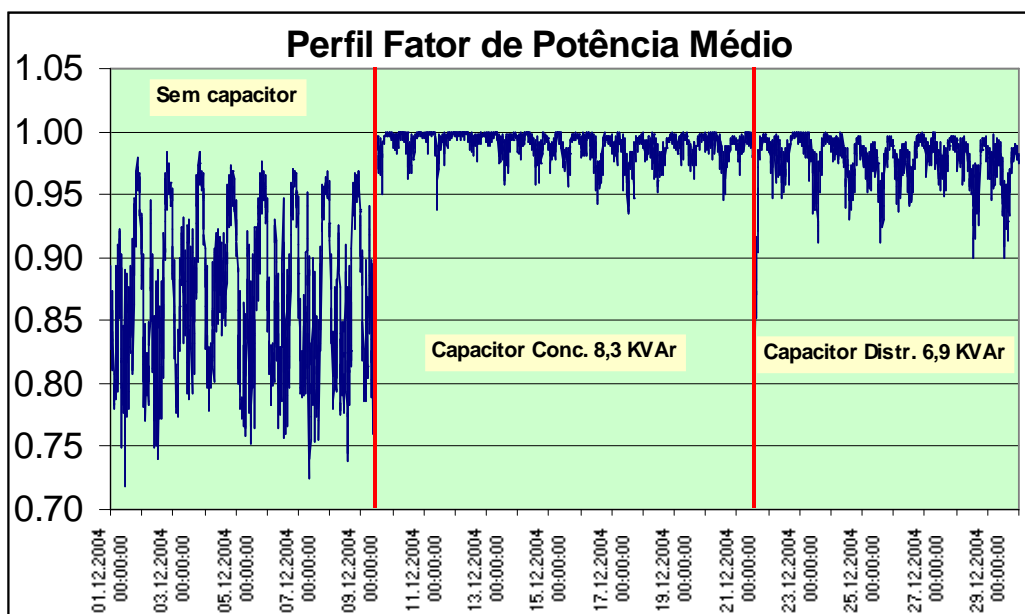


Figura 5 – Comportamento do fator de potência durante três semanas de avaliação.

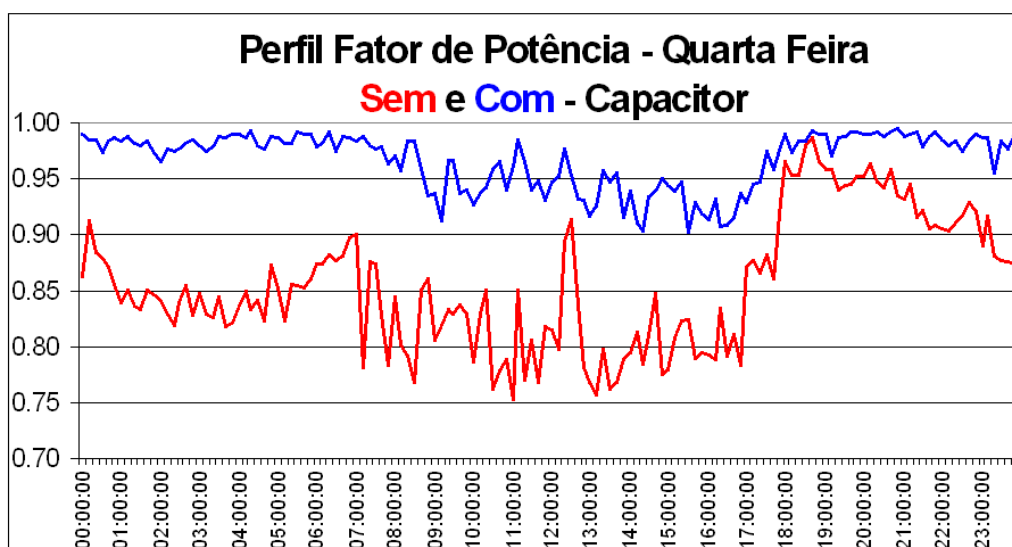


Figura 6 – Comportamento do fator de potência ao longo de um dia útil.

Através da análise das figuras 5 e 6 é possível constatar uma significativa melhora na redução de reativos neste circuito. As duas soluções apresentadas para compensação são válidas, porém, a compensação individual (terceira semana) é a mais indicada do ponto de vista de perdas elétricas. A instalação dos capacitores o mais próximo possível das cargas representa do ponto de vista técnico, a melhor solução, pois inclui a vantagem de reduzir as perdas energéticas em toda a rede, inclusive no “ramal de serviço” que supre os consumidores, otimizando assim a circulação de reativos no circuito como um todo.

Através da aplicação da correção de reativos neste caso exemplificado, foi realizada uma avaliação específica referente ao efeito sobre as perdas no transformador.

Na tabela III são apresentados os valores das perdas observadas apenas no transformador, antes e depois da compensação reativa.

Tabela III – Perdas no transformador antes e depois da compensação.

Caso	Perdas [kW] <u>sem</u> compensação	Perdas [kW] <u>com</u> compensação	Redu ção kW	Reduça o %
Carga pesada	1,09	1,05	0,04	3,7%
Carga leve	0,41	0,35	0,06	14,6%

Da análise da tabela III, observa-se uma redução percentual de perdas da ordem de 4% sob carga pesada e quase 15% sob carga leve. A grande diferença de redução entre a carga pesada e a leve é devido ao FP no horário de ponta ser superior a 0,9 pu, devido ao grande volume de chuveiros (cargas resistivas) neste horário. Já no restante do período, o fator de potência oscila entre 0,73 pu e 0,90 pu, com valor médio de 0,85 pu. Considerando tal situação, a redução de perdas no transformador ao longo das 24 horas do dia é de ordem de 13%.

O transformador de distribuição é um componente bem conhecido, as informações de perdas elétricas de todo parque de transformação do sistema pode ser facilmente calculado. Os mesmos possuem perdas no ferro e no cobre. As perdas no ferro são em princípio constantes, pois sua variação é função da tensão. As perdas no cobre, por sua vez, variam gradativamente com o quadrado da carga, portanto, dependem da corrente circulante.

Para as condições citadas no caso exemplo, os ganhos esperados com a compensação de reativos serão:

Redução de perdas no transformador = 130 W (resultado das simulações = 13%). Considerando que boa parte dessa perda é referente às perdas no cobre será assumido um comportamento homogêneo ao longo dos dias, logo: Redução das perdas no transformador = 130 W x 24 h x 30 dias x 12 meses = 1.123,2 kWh/ano

Considerando-se que o caso exemplo se refere a um transformador de 45 kVA, pode-se obter através de uma relação simplificada que 1.123,2 kWh/45kVA = 25 kWh/ano por kVA instalado no sistema de distribuição.

Em continuidade a este raciocínio, pode-se avaliar no universo da Elektro, o quanto de perdas técnicas pode ser evitado, apenas nos transformadores urbanos de distribuição. A Elektro possui atualmente um total de 46.272 transformadores urbanos, que equivalem a cerca de 2.600.000 kVAs urbanos. Assim, pode-se estimar que a perda é da ordem de 25 kWh/ano x 2.600.000 kVAs = 65.000.000 kWh/ano, ou seja, 65.000 MWh/ano. Tendo em vista que o valor médio de compra da energia mais o transporte na Elektro é de R\$ 125,53/ MWh (Dezembro/09), a redução dessas perdas representa mais de 8 milhões de reais ao ano.

Vale destacar que a perda evitada se refere exclusivamente aos transformadores, mas que há também ganhos na rede de baixa tensão. Extrapolando a situação para o Brasil, pode-se constatar que há um grande potencial.

3.0 - CONCLUSÃO

As avaliações feitas acima demonstram que há um vasto campo no sistema de distribuição para se trabalhar na redução de perdas elétricas.

Essa observação detalhada das condições de funcionamento do sistema é cada vez mais necessária, e a pressão por uma demanda crescente por energia, obriga a busca por uma maior eficiência. Dessa forma, será necessária uma atenção especial no controle do sistema elétrico de distribuição, visando minimizar as perdas e tornar a distribuição da energia o mais eficiente possível.

Considerando o enfoque de minimização das perdas, quanto mais distribuída for a compensação, mais efetiva se torna a redução das perdas elétricas, pois a corrente pelo circuito diminui em uma maior parcela da rede. O “espaço” ocupado pela energia reativa poderia ser, utilizado para o atendimento a novas cargas, minimizando novos investimentos no sistema.

A rede de baixa tensão é a que oferece maior oportunidade de ganhos, pois são normalmente circuitos com elevado carregamento, permitindo um retorno financeiro mais rápido, além dos benefícios adicionais de maior disponibilidade nos transformadores e de melhora nos níveis de tensão.

Nas redes rurais, apesar da constatação de potencial redução de perdas, em geral os carregamentos dos circuitos são muito baixos, dificultando o retorno financeiro na correção de reativos nas mesmas.

Outro ponto favorável na aplicação de capacitores de baixa tensão é o fato da reatância de dispersão dos transformadores, ficar em série com os capacitores, resultando em um efeito semelhante ao de um filtro dessintonizado, reduzindo o risco de uma amplificação significativa na circulação harmônica.

Mas um fato é inquestionável, a circulação de reativos no sistema de distribuição pode e deve ser reduzida para um melhor nível de eficiência da rede de distribuição.

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] - Resolução ANEEL nº 456.

[2] – Projeto de P&D - "Metodologia para Otimização do Desempenho da Rede Secundária", Elektro, Unicamp e Lactec, 2003.

[3] – Projeto de P&D - "Desenvolvimento de metodologia para avaliação da melhor topologia de compensação reativa no sistema elétrico de distribuição, envolvendo as redes primárias, secundárias e consumidores finais", Elektro, Unicamp e Lactec, 2007.

[4] - CODI - Comitê de Distribuição de energia elétrica, Manual de Orientação aos Consumidores - Energia Reativa Excedente, 2004.

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Ernesto A. Mertens, nasceu em Guarulhos-SP, Brasil em 5 de julho de 1957, é engenheiro eletricitista formado em 1983 pela Faculdade de Engenharia São Paulo. Mestre em Engenharia Elétrica na área de Automação, obtido na UNESP em 2009.

De 1986 a 1998, trabalhou na CESP – Companhia Energética de São Paulo, na diretoria de Distribuição, tendo exercido atividades nas áreas de Planejamento, Operação, Projetos e Obras; Após a privatização da CESP, passou a exercer suas atividades na ELEKTRO Eletricidade e Serviços S.A.. Atualmente exerce suas atividades na Engenharia, atuando especificamente na área de Qualidade de Energia;



Flávio Resende Garcia, nasceu em Uberlândia-MG, Brasil em 14 de Janeiro de 1967, graduou-se em Engenharia Elétrica em Julho de 1988 e obteve o título de Mestre em Harmônicos e Cargas Elétricas Especiais em Maio de 1992.

Sua experiência profissional inclui empresas como INEPAR (1992-2002), LACTEC (2002-2003), IESA (2003-2006) e SADEFEM (2006-atual) desenvolvendo estudos técnicos nas áreas de Qualidade de Energia Elétrica, Eficiência Energética e Compensação Reativa e participando projetos de P&D em conjunto com Universidades e Institutos de Pesquisa e Desenvolvimento.