

# Utilização de Filtros Harmônicos Passivos em Redes Secundárias de Distribuição: Tecnologia e Desempenho.

S. Un. Ahn<sup>1</sup>; J. Camargo<sup>2</sup>; D. S. Marcelino<sup>2</sup>; N. R. Nogueira<sup>3</sup>; F. R. Garcia<sup>3</sup>; A.C. Naves<sup>3</sup>; M. R. Gouvêa<sup>4</sup>; N. Kagan<sup>4</sup>.

<sup>1</sup>CPFL - <sup>2</sup>Expertise Engenharia - <sup>3</sup>NOTERC - <sup>4</sup>SADAFEM - <sup>5</sup>ENERQ/USP.

**Resumo** – Este artigo trata dos resultados obtidos no projeto, desenvolvimento e aplicação de filtros de harmônicos passivos em circuitos secundários do sistema elétrico de distribuição da CPFL. O trabalho visa mostrar o dimensionamento, especificação técnica, pesquisas tecnológicas para melhoria de produto, bem como as medições de energia e harmônicos realizadas e a análise da performance dos filtros passivos no que tange a melhoria dos níveis de tensão, redução de carregamento de transformadores e redução dos níveis de distorção harmônica nos circuitos secundários de distribuição. Também serão mostrados os resultados das análises termográficas executadas em 03 filtros de harmônicos garantindo a operação segura dos reatores com tecnologia a núcleo de ferro para este tipo de aplicação.

**Palavras chaves** - Compensação reativa, distorções harmônicas, filtragem de harmônicos, reatores, núcleo de ferro e núcleo de ar.

## I. INTRODUÇÃO

Em virtude dos estudos de planejamento serem feitos separadamente para o circuito primário e para o circuito secundário de cada sistema de distribuição, a compensação reativa tem sido feita, tradicionalmente, apenas no sistema primário, o que limita a sua eficiência técnica e econômica. Desta forma, a compensação de reativos no secundário dos transformadores de distribuição não tem sido considerada pelas concessionárias. Os ganhos que podem ser obtidos da possibilidade de compensar reativos no sistema secundário, com a redução de perdas técnicas em função dos maiores níveis de corrente na baixa tensão (BT), rápido atendimento a Resolução 505 da ANEEL, e aliado a investimentos menores nos equipamentos, têm atraído a atenção de algumas concessionárias para este tipo de aplicação.

A diminuição dos custos nos equipamentos em BT é obtida através do não chaveamento de grandes parcelas de reativos, nem da necessidade de instalação de transdutores de tensão e/ou corrente, para possibilitar a atuação do controle dos bancos, normalmente feitos por relés de tempo/tensão na média tensão. A experiência adquirida na aplicação de reativos em BT nas indústrias demonstra uma grande confiabilidade neste tipo de aplicação.

Outro fator importante a ser avaliado é a questão do aumento dos níveis de distorção harmônica causados pelas cargas residenciais e/ou comerciais aplicados diretamente na rede elétrica, agravando os problemas de tensão e sobrecarga nos transformadores, afetando assim a vida útil dos mesmos.

Todos os aspectos acima descritos levaram a CPFL a desenvolver dentro do seu Programa de Pesquisa e Desenvolvimento, uma pesquisa para avaliar a instalação de bancos de capacitores para compensação de reativos e filtragem de harmônicos em baixa tensão.

Este artigo vem mostrar que a aplicação correta de bancos de capacitores com propriedade de filtragem de harmônicas na rede secundária pode representar uma solução de baixo custo para redução de carregamento e perdas elétricas, regulação de tensão e aumento da vida útil dos transformadores através da redução da circulação de componentes harmônicos.

O foco do trabalho, portanto, é permitir que os planejadores do sejam dotados de mais recursos para planejar tanto o sistema de distribuição primário como o secundário, quebrando assim o paradigma de compensar reativo apenas na média tensão.

## II. DESENVOLVIMENTO DOS BANCOS DE CAPACITORES COM FILTRAGEM HARMÔNICA

Dentro do PD-69 foi desenvolvido um padrão para banco de capacitor operando como filtro harmônico, a partir de medições de níveis harmônicos, carregamento e demais características dos transformadores de distribuição grande porte instalados em postes na Baixada Santista. As características deste padrão estão indicadas na tabela 01.

Tabela 01: Especificação do Filtro Padrão
Tensão Efetiva no ponto de instalação: 220 V
Frequência do Sistema: 60 Hz
Frequência de Sintonia: 288 Hz
Resistência Equivalente Total: $F_{\text{sistema}} = 1,94$ mili Ohms e $F_{\text{sintonia}} = 4,25$ mili Ohms.
Corrente Fundamental Circulante (60Hz) = 130,07 A
Corrente Harmônica Circulante = 60,93 A
Corrente Total por Ramo ( $I_1 + I_h$ ) = 143,63 A
Potência Efetiva Fornecida para Correção do FP (60Hz) = 49,56 kvar.
Capacitor utilizado: 120 kvar, 350 V e $I_{\text{nom}} = 197,95$ A
Indutância do Reator: 0,1175 nH $I_{\text{total reator}} (I_1 + I_h) = 188$ A.
Fator de Qualidade Mínimo => $F_{\text{sistema}} = 22,82$ e $F_{\text{sintonia}} = 50$ .

Foram construídos e instalados cinco filtros de harmônicos, visando testar as tecnologias disponíveis, principalmente no que tange a reatores de sintonia: reatores a núcleo de ar e reatores a núcleo de ferro. Os reatores a núcleo de ar têm uma maior suportabilidade a condução de correntes harmônicas, porém com dimensões maiores e um maior custo. Já os reatores a núcleo tradicionais, apesar de serem de menor

tamanho e menor custo, tem baixa suportabilidade à circulação de correntes harmônicas, saturando mais facilmente e perdendo as características de filtragem pré-definidas, levando até mesmo a ampliações harmônicas e perda de vida útil do conjunto capacitor-reator.

O primeiro filtro foi desenvolvido com reator com núcleo de ar e foi considerado muito “grande” em função do tamanho dos reatores, apresentando dificuldades para instalação. Um novo projeto para o reator foi desenvolvido, utilizando a uma nova tecnologia para o reator com núcleo de ar, que reduziu significativamente as dimensões do filtro, culminando com a construção de um segundo protótipo, porém com custos mais elevados do que o primeiro.

Tendo em vista as dificuldades do binômio, dimensão e custo, uma pesquisa foi desenvolvida dentro do Projeto de P&D-69 da CPFL buscando a utilização de reatores a núcleo de ferro com uma maior suportabilidade aos harmônicos sem a ocorrência de saturação para as frequências do espectro harmônico e uma melhor dissipação térmica. O resultado desta pesquisa gerou um terceiro protótipo considerando a aplicação de reator com núcleo de ferro especial, culminando com a construção de três novos filtros. As figuras 7, 8 e 9 apresentam as fotos dos protótipos desenvolvidos, a partir do padrão adotado.

Os cinco filtros foram instalados nas seguintes ET - Estações Transformadoras:

1. ET- 1735 – 225 KVA – Rua Padre Anchieta – Centro – São Vicente, Papelaria JAMBO, filtro com Reator de Núcleo de ferro.
2. ET-6211 – 225 KVA - Bairro Rio Branco – Praia Grande, filtro com reator de Núcleo de Ar, padrão reduzido.
3. ET-6913 – 300 KVA - Rua Almeida de Moraes - Santos - YARA CENTER - Santos, filtro com reator de Núcleo de Ferro.
4. ET-7749 - 300 KVA – Rua Padre Anchieta - Centro – São Vicente, BANCO ITAU, filtro com reator com Núcleo de Ferro.
5. ET-5827 – 225 KVA - Rua Jacob Emerick – Centro - S.Vicente, filtro com reator com Núcleo de Ar.

### III. RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

As medições foram realizadas no secundário de cada transformador onde foram instalados os filtros de harmônicos e no circuito alimentador dos referidos equipamentos. Foram utilizados dois medidores de qualidade de energia (IMS Smart Meeter T), sendo um na entrada do filtro e outro na saída do transformador para as cargas. Das 05 instalações acima, foram escolhidas 02 que melhor representam os resultados obtidos na instalação dos filtros de harmônicos destas instalações, 01 com reator a núcleo de ar e a outra com reator a núcleo de ferro: Papelaria Jambo e Yara Center.

Os resultados a seguir mostram as principais grandezas elétricas monitoradas no secundário dos transformadores e dos filtros de harmônicos:

- Tensões RMS nos transformadores (Figuras 01 e 05);
- Potência Ativa e Potência Reativa nos transformadores (figuras 02 e 06);
- Distorção harmônica total de tensão nos transformadores (figuras 03 e 07);
- Distorção harmônica total de corrente nos filtros de harmônicos (figuras 04 e 08).

#### A. Resultados de Medição 01: Condomínio Comercial YARA CENTER:

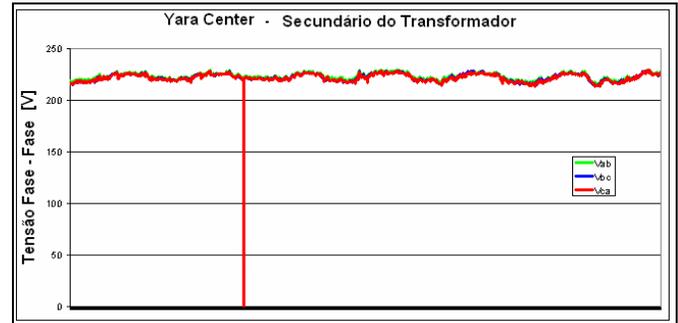


Fig. 1- Tensão RMS fase-fase no secundário do transformador.

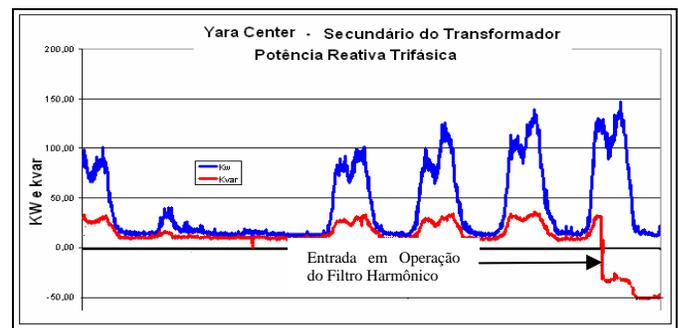


Fig. 2 – Potencia Reativa trifásica no secundário do transformador.

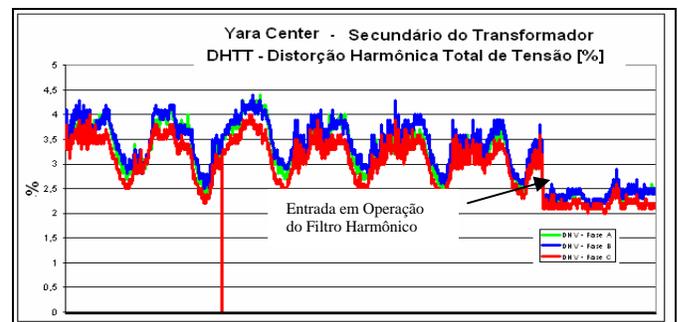


Fig. 3 – Distorção harmônica total de tensão no secundário do transformador.

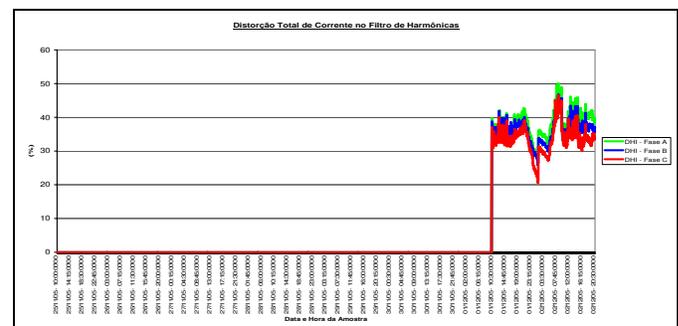


Fig.4 – Distorção Harmônica Total de Corrente no Filtro de Harmônicos.

### B. Resultados de Medição 02: Papelaria JAMBO:

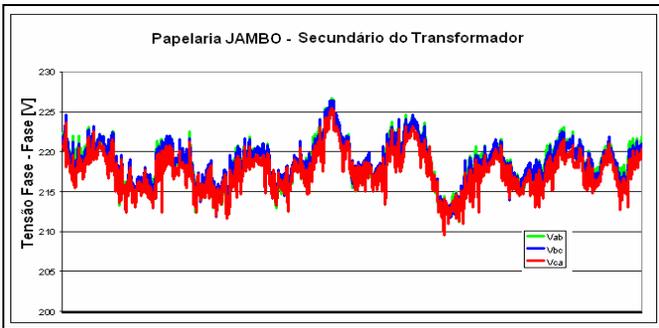


Fig. 5 Tensão RMS fase-fase no secundário do transformador.

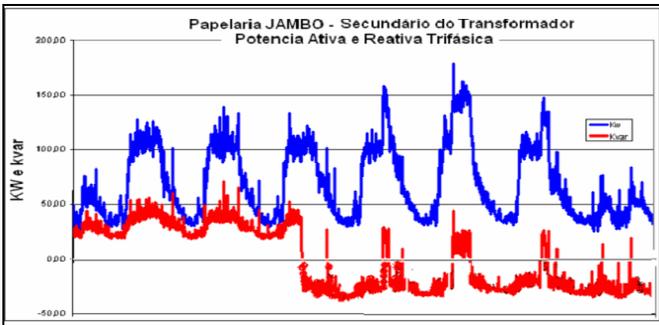


Fig. 6. Potencia Reativa trifásica no secundário do transformador.

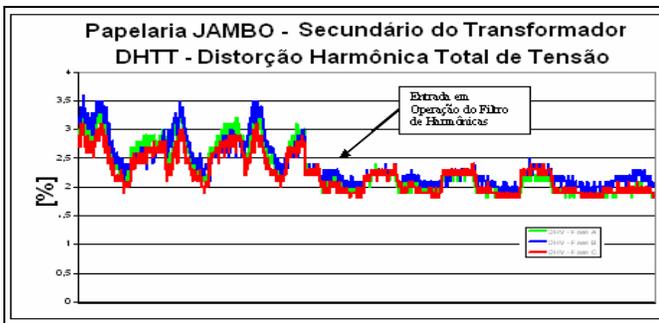


Fig. 7 – Distorção harmônica total de tensão no secundário do transformador.

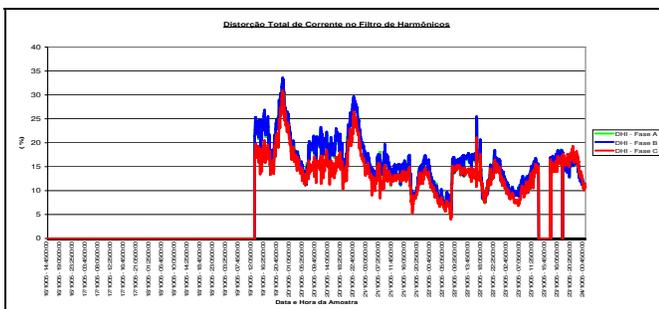


Fig.8 – Distorção Harmônica Total de Corrente no Filtro de Harmônicos.

### C. Avaliação dos Resultados da Instalação dos Filtros Harmônicos na Papelaria Jambo e na Yara Center:

Os resultados das medições efetuadas no lado do Secundário dos Transformadores da ETs foram:

#### ET 6913 - YARA CENTER:

- Redução dos níveis de distorção máxima de tensão de 4,5% para 2,8%.
- Aumento no nível de tensão de 2 a 4 Vrms, melhorando o perfil de tensão, e aumentando a potência média fornecida em função do aumento da tensão de alimentação.
- Redução da potência reativa no secundário do transformador ficando até capacitivos em momentos de baixa carga, justificando um temporização na operação.
- Filtragem harmônica de até 50% da corrente fundamental do filtro reduzindo as componentes harmônicas e a distorção de tensão na barra.

#### ET 1735 - Papelaria Jambo:

- Redução dos níveis de distorção máxima de tensão de 3,5% para valores inferiores a 2,5%.
- Aumento no nível de tensão de 3 a 5 Vrms, melhorando o perfil de tensão, e aumentando a potência média fornecida em função do aumento da tensão de alimentação.
- Redução da potência reativa no secundário do transformador ficando até capacitivos em momentos de baixa carga, justificando um temporização na operação.
- Filtragem harmônica de até 35% da corrente fundamental do filtro reduzindo as componentes harmônicas e a distorção de tensão na barra.

Os resultados obtidos em termos de tensão somente não foram melhores em função dos filtros de harmônicos terem sido instalados para operação fixa no sistema mesmo em períodos de baixa carga.

Nesses períodos de baixa carga os mesmos deveriam ter sido retirados de operação pelo controle automático por tempo colocado no equipamento, que ficou desabilitado durante a instalação e medição em campo.

Em todas as ET's as medições nos Filtros mostraram que as correntes e a distorção harmônica de corrente dentro dos valores especificados para o filtro de harmônicos.

### D. Fotos dos Filtros de Harmônicos Instalados na Rede Elétrica da CPFL na Baixada Santista:

As fotos a seguir visam mostrar as instalações dos filtros de harmônicos com núcleo de ar e com núcleo de ferro e permitem um comparação visual dos equipamento nos quesitos de tamanho e facilidade de instalação.

A figura 9 apresenta o primeiro filtro com reator com núcleo de ar instalado.

A Fig. 10 mostra o segundo filtro com reator com núcleo de ar, porem com um novo projeto/tecnologia mais reduzido.

As figuras 11 e 12 mostram filtros com reator com núcleo de ferro desenvolvidos para este tipo de aplicação e a figura 13 mostra um operador efetuando termografia em filtros com núcleo de ferro, que serão mostradas na seqüência deste trabalho, garantindo a operação segura dos mesmos.



Fig. 9 – Primeira instalação com filtro de núcleo de ar instalado.



Fig. 12 - Segunda instalação do filtro com núcleo de ferro.



Fig. 10 - Segundo filtro de núcleo de ar com tamanho reduzido.



Fig. 13 - Teste de termografia



Fig. 11 - Primeira instalação com filtro com núcleo de ferro.

As diversas concepções realizadas para o mesmo projeto tiveram como objetivo principal a busca de um equipamento (filtro de harmônicos) mais adequado para a instalação ao tempo e em poste, sob os pontos de vista de tamanho, peso e facilidade de instalação. As fotos demonstram que a migração da tecnologia do reator de núcleo de ar para reatores com núcleo de ferro reduziu, sensivelmente, o tamanho da estrutura, reduziu custos e facilitou bastante a aplicabilidade destes equipamentos em postes.

#### IV. TERMOGRAFIA NOS FILTROS COM REATOR COM NÚCLEO DE FERRO

Em virtude da importância do controle da temperatura dos filtros com reator de núcleo de ferro, foi necessário avaliar a temperatura alcançada por estes equipamentos em operação normal, principalmente em períodos onde a temperatura ambiente é muito elevada. As figuras 14, 15 e 16 apresentam os resultados das termografias efetuadas nos filtros de harmônicos instalados no poste em frente do condomínio YARA CENTER em Santos e nos postes em frente à Papelaria Jambo e em frente ao Banco Itaú em São Vicente.

Estas medições termográficas foram realizadas no dia 23/02/2006 e demonstram que as temperaturas medidas estão dentro dos limites de projeto do reator, sem alteração das suas características físicas e elétricas.

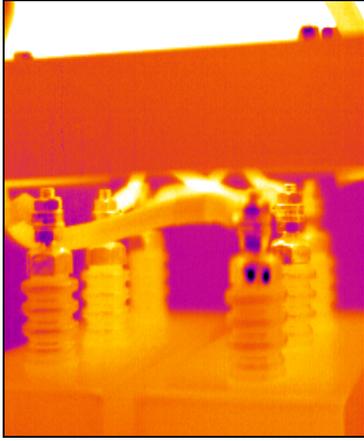


Fig. 14 – Termografia no filtro do Condomínio YARA CENTER – Santos

→ Maior temperatura de 46° nas buchas dos Capacitores do filtro instalado na entrada do Condomínio Yara Center em Santos.

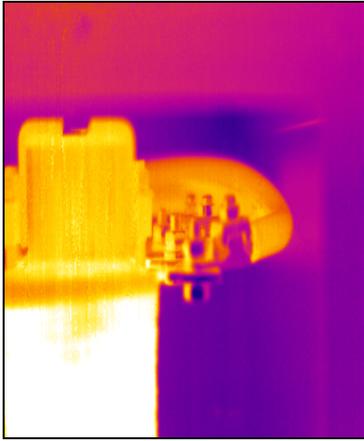


Fig. 15 – Termografia nos filtros instalado na Papelaria Jambo – São Vicente

→ Temperatura de 71° C no enrolamento do reator e 65° no topo do reator a ferro do filtro instalado no poste da Papelaria Jambo em São Vicente.



Fig.16 - Termografia no filtro instalado no Banco Itaú em São Vicente.

→ Temperatura de 40° C na Caixa, 62° no núcleo superior, 68° no enrolamento e 55° no núcleo inferior do filtro instalado no Banco Itaú em São Vicente.

## V. CONCLUSÃO

O trabalho mostra parte dos resultados do Projeto de P&D, intitulado “Sistema de Compensação Reativa Dinâmico, Inteligente, Relocável e Conjugado (MT e BT)” com filtragem harmônica na BT, cujo objetivo principal foi otimizar a compensação reativa nas redes secundárias de distribuição.

O desenvolvimento dos filtros teve um teor de pesquisa, visto que foram desenvolvidos dois modelos para reator com núcleo de ar, e um novo modelo de instalação de reator com núcleo de ferro, totalmente enclausurado cuja preocupação maior foi o gradiente de temperatura e a suportabilidade dos equipamentos.

Além da participação da compensação reativa na SE, a instalação dos cinco filtros harmônicos no lado de BT dos transformadores de distribuição proporcionou, em todas as ET’s, um aumento no nível de tensão de 2 a 5 V rms, melhorando o perfil de tensão e aumentando a potência média fornecida.

Também foi obtida uma significativa redução nos níveis de distorção máxima de tensão. Em algumas das ET’s também houve redução dos níveis de distorção máxima de corrente circulante nos transformadores principalmente nos momentos de maior carregamento.

Como os valores de temperatura registrados por termovisor, em vários pontos internos dos reatores a núcleo de ferro, estão dentro de faixas admissíveis para o equipamento, foi verificado que é possível a aplicação deste tipo de reator em filtros harmônicos para instalação em poste, com os devidos cuidados em sua especificação técnica, dimensionamento e fabricação para evitar problemas de saturação e variação de indutância.

Os resultados proporcionados na melhoria da tensão mostraram que é vantajosa da compensação reativa na BT, mesmo sem filtragem harmônica, pois é uma solução boa e barata para mitigar os problemas de tensão fora da faixa considerada adequada pela Resolução 505 da ANEEL.

Em casos específicos, com forte presença de harmônicos gerados pelas cargas e forte carregamento, a utilização dos equipamentos desenvolvidos se mostrou bastante vantajosa, e pode ser aplicado em qualquer tipo de concessionárias de energia, que necessitem atender a Resolução 505 da ANEEL, bem como reduzir os níveis de distorção harmônica existentes.

Entretanto, apesar de a filtragem de harmônica não ter agregado vantagens significativas para a CPFL, a sua aplicação em outras concessionárias pode ser possível, pelas seguintes razões:

- ✓ Constatou-se que as ET’s da Baixada Santista não apresentam valores elevados de Distorção Harmônica que justifiquem a necessidade de instalação de Filtros de Harmônicas, o que pode não ser verdade em outros pontos da rede elétrica desta e de outras concessionárias.
- ✓ A utilização de reatores a núcleo de ferro permite a aplicação destes filtros em locais onde os espaços disponíveis para instalação destes equipamentos nos postes são muito pequenos, devido a grande quantidade de cabos existentes, pela densidade

de carga, linhas telefônicas, TV a cabo, etc., em uma área bastante povoada.

## VI. REFERÊNCIAS

- [1] M.R.Gouvêa, Camargo J., A. C. Naves, F. R. Garcia e N.R. Nogueira - Sistema de Compensação Reativa Dinâmica Inteligente Relocável e Conjugada com Filtragem de Harmônicas – XVI SENDI – 2004.
- [2] Relatórios Técnicos do Primeiro Ciclo do Projeto PD-69.
- [3] IEEE –“IEEE Std 519-1992: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Systems” – 1992.
- [4] *IEEE Std 1531-2003 - Guide for Application and Specification of Harmonic Filters*, November, 24<sup>th</sup>, 2003.

## VII. BIOGRAFIA



**Se Um Ahn** nasceu em Inchon, Coréia sul em 1957. Graduou-se em Engenharia Elétrica pela escola da engenharia do Mackenzie em 1981, obteve seu título de Mestre e de Doutor em engenharia elétrica pela escola politécnica na universidade de São Paulo - USP em 1993 e em 1997, respectivamente. Trabalha desde 1986, como coordenador de pesquisa em sistemas de distribuição na CPFL Piratininga. Suas atividades profissionais incluem: uso das curvas de carga, planejamento da expansão do sistema elétrico



**Flávio Resende Garcia** 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&Dem conjunto com Universidades e Institutos de Pesquisa e Desenvolvimento.



**Alexandre Carvalho Naves**, com graduação pela Universidade Federal de Uberlândia em 1999 e pós-graduação em Qualidade e Racionalização de Energia Elétrica em 2000. Trabalhou em empresas como INEPAR e IESA desde 2001 e atualmente trabalha na SADEFEM S/A na área de engenharia de aplicação em produtos de compensação reativa realizando estudos e medições nas áreas de qualidade de energia elétrica, harmônicos e compensação de reativos em série e em paralelo.



**Josué de Camargo** nasceu em São Paulo/SP, Brasil, em 28 de Abril 1958. Ele foi graduado Engenheiro Eletricista na Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP - Brasil (1981), Engenheiro Civil na Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Brasil (1991). Atua e desenvolve diversos trabalhos na área de Qualidade da Energia Elétrica. É Diretor da Expertise Engenharia Ltda., empresa especializada em prestação de serviços de Qualidade de Energia Elétrica para indústrias e em Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento para o setor de Energia Elétrica brasileiro.



**Daniel de Souza Marcelino**, nasceu em Ituituba/MG, Brasil, em 24 de setembro de 1979, em 2004 se graduou como Engenheiro Eletricista pela Universidade Estadual de Minas Gerais. Desde 2005 trabalha como Engenheiro na Expertise Engenharia LTDA. onde desenvolve projetos de pesquisa na área de Qualidade da Energia Elétrica



Marcos Roberto Gouvêa (M'79, D'94) é engenheiro eletricista, formado pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, em 1972. Recebeu o grau de mestre, em 1979, e o grau de doutor em Engenharia, em 1994, na área de Sistemas de Potência, pela mesma instituição. Em 1972, entrou na Themag Engenharia, trabalhando como engenheiro consultor, onde ficou até 1995. Como comissário-chefe da CSPE (Comissão de Serviços Públicos), Dr. Gouvêa foi o responsável pela área técnica de 1998 a 2000. Desde 1989, é professor do Departamento de Engenharia e Automação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Dr. Gouvêa é autor de mais de 50 artigos, os quais foram apresentados em congressos e publicados em revistas especializadas.



Nelson Kagan obteve o título de mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo, Brasil, em 1988, e o título de PhD em Engenharia Elétrica pela University of London, em 1993. Leciona no Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo desde 1983. Tornou-se professor associado após a defesa de sua tese de livre-docência. Muitos de seus trabalhos concentram-se na área de planejamento de redes de distribuição de energia. Seus interesses nessa área estão relacionados a aplicações de otimização e inteligência artificial com considerações de múltiplos objetivos e incertezas. Seus trabalhos têm sido implementados em diversas empresas de distribuição do setor elétrico brasileiro.