



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GCE 21  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

## **GRUPOXIV**

### **GRUPO DE ESTUDO DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - GCE**

#### **FERRAMENTA DE ANÁLISE ESTATÍSTICA APLICADA A COMPENSAÇÃO REATIVA FIXA**

**Luiz Cláudio Teixeira Nunes\***

**Edison Bormio Junior**

**Alex Alexandre**

**CPFL Piratininga**

## **RESUMO**

A perda de energia nas linhas de transmissão e nos transformadores de subestação representa um montante significativo do total de perda técnica das distribuidoras. Valor que não pode ser desprezado. Assim, um plano estruturado de compensação reativa torna-se necessário.

O objetivo das empresas concessionárias é tornarem-se cada vez mais eficientes. Essa eficiência será atingida com análises estatísticas. Esse trabalho apresenta uma ferramenta de análise estatística aplicada à conservação de energia através da alocação de bancos de capacitores fixos nas saídas dos alimentadores das subestações.

Entre outros benefícios, a alocação de capacitores posterga investimentos, melhora o fator de potência e conserva energia através da redução da perda técnica.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Perda Técnica, Compensação Reativa, Conservação de Energia, Planejamento.

### **1.0 - INTRODUÇÃO**

A alocação de bancos de capacitores tem relação direta com a qualidade e custo da energia distribuída. Cargas adequadamente compensadas diminuem o fluxo de energia reativa no sistema elétrico e trazem benefícios técnicos e econômicos.

Os benefícios técnicos são demonstrados pela conservação de energia gerada pelas reduções dos carregamentos das redes de distribuição, transformadores de subestações e linhas de transmissão. O alívio no sistema reduz a perda técnica, melhora o perfil de tensão de fornecimento e aumenta o tempo de vida útil dos equipamentos da concessionária.

Arelado aos benefícios técnicos encontram-se os benefícios econômicos. Os benefícios econômicos são amplos e abrangem postergações de investimentos por problemas de tensões e carregamentos, redução da energia comprada devido à redução da energia perdida e possíveis ganhos tarifários.

Com o objetivo de reduzir o fluxo de energia reativa circulante nos sistemas da CPFL Paulista e CPFL Piratininga, foi desenvolvida uma ferramenta para alocação de compensação reativa fixa na saída dos alimentadores. Sua principal função é compensar o sistema a montante, no caso, transformadores de subestações e linhas de transmissão.

Juntas, a CPFL Paulista e CPFL Piratininga possuem 1275 alimentadores. Para verificar a real necessidade e o montante de compensação reativa fixa a ser instalada é necessário estudar cada alimentador, analisar suas

(\*) Rodovia Campinas Mogi-Mirim, km 2,5 – Bloco 3 – CEP 13088 900 Campinas SP – Brasil  
Tel: (+55 19) 3756-8319 – Fax: (+55 19) 3756-8212 – Email: lnunes@cpfl.com.br

curvas características, eliminar possíveis erros de medição e corrigir algumas manobras de curta duração. Assim, elaborar um plano de compensação torna-se uma tarefa difícil e demorada para o planejador. A Ferramenta de análise estatística para alocação de compensação reativa na saída dos alimentadores exclui todos esses passos.

Essa ferramenta utiliza as propriedades da distribuição normal aplicadas a uma amostra representativa das medições anuais de energia reativa de todos os alimentadores. Nela, os erros de medição e manobras de curta duração são eliminados automaticamente do processo e um plano de compensação é elaborado para o estado normal de operação dos alimentadores. Assim, uma decisão segura é obtida automaticamente, cabendo ao planejador somente sua implementação. A experiência do planejador, ainda que importante e necessária, passa a ocupar um plano secundário com esse modelo.

Para demonstrar a eficiência da ferramenta são realizadas comparações com casos reais estudados pela equipe de planejamento da CPFL, de forma empírica e individualizada para cada alimentador, com o plano de compensação elaborado pela ferramenta. São apresentados também os benefícios técnicos e econômicos do plano de compensação reativa fixa na saída dos alimentadores para o sistema da CPFL Paulista.

## 2.0 - DISTRIBUIÇÃO NORMAL

Os estudos estatísticos são realizados através da análise de uma população. Porém, para inúmeros casos são inviáveis estudar toda a população. Assim, amostras são utilizadas para realizar inferências sobre a população em estudo. Uma amostra é um subconjunto que representa satisfatoriamente toda a população.

A distribuição normal é uma importante distribuição de probabilidade que caracteriza uma população ou amostra, e pode ser aplicada em inúmeros fenômenos. Sua distribuição é simétrica e sua variação sobre o eixo das abscissas está diretamente relacionada com o valor de desvio padrão  $\sigma$ .

As propriedades da distribuição normal são:

1. Distribuição simétrica em relação à média ( $\mu$ );
2.  $f(x)$  possui um máximo para  $x = \mu$ ;
3.  $f(x)$  tende à zero para  $+\infty$  ou  $-\infty$ ;
4.  $f(x)$  tem dois pontos de inflexão cujas abscissas valem  $\mu - \sigma$  e  $\mu + \sigma$ .

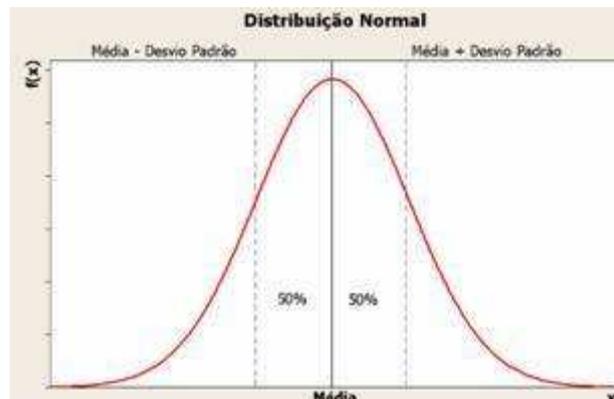


Figura 1 – Propriedades da distribuição normal

Com a média ( $\mu$ ) e desvio padrão ( $\sigma$ ) amostrais conhecidos é possível determinar intervalos de confiança. Os intervalos de confiança possibilitam realizar inferências sobre a população em estudo. Com o auxílio de tabelas da distribuição normal, estimam-se as áreas (probabilidades) sob a curva normal.

## 3.0 - CARACTERÍSTICA DAS CURVAS DE CARGA REATIVA

As curvas de energia reativa medidas no alimentador, em condição normal de operação, apresentam comportamentos muito semelhantes. Características como formato, frequência e amplitude variam pouco, pois dependem diretamente do tipo da carga instalada. Com isso, diversas inferências estatísticas podem ser realizadas com uma amostra representativa das medições dos alimentadores.

A Figura 2 mostra quatro medições semanais de energia reativa em um alimentador da CPFL Paulista em diferentes meses do ano. Nela, são verificados comportamentos muito semelhantes para as diversas curvas diárias.

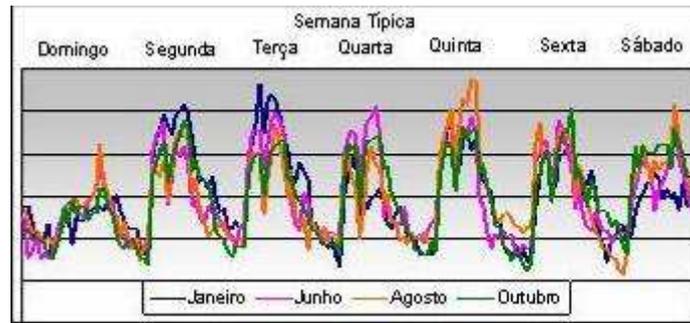


Figura 2 – Medições de energia reativa no alimentador

Alguns alimentadores apresentam variações do nível de carga reativa durante o ano devido a sua sazonalidade. As curvas de carga de alimentadores que atendem localidades turísticas e irrigações agrícolas, por exemplo, apresentam variações significativas de patamar. Assim, para análise das características das curvas reativas desses alimentadores, torna-se necessário levantamento de uma amostra representativa correspondente a um ano de medição.

Durante um ano, falhas em medidores e transferências temporárias de carga entre alimentadores são comuns e alteram o comportamento das curvas. A Figura 3 mostra o comportamento anual de três conjuntos de curvas de carga: com comportamento típico (esperado), com influência de perturbações e com sazonalidade de temporada de veraneio.

Para os estudo das curvas de carga reativa dos alimentadores, o efeito da sazonalidade deve ser considerado enquanto as perturbações devem ser eliminadas da análise. Considerando o grande números de alimentadores existentes nas empresas de energia, essa seleção de curvas para cada alimentador não é uma tarefa trivial.

Para cada amostra de medições anuais são necessárias medidas para eliminar o efeito das transferências de carga e corrigir falhas de medição, além de domínio sobre a sazonalidade do alimentador. Esse conhecimento individualizado das características de cada alimentador é uma tarefa demorada para a equipe de estudo.

Com o objetivo de reduzir esse tempo de análise, desenvolveu-se uma ferramenta de análise estatística para alocação de bancos de capacitores fixos na saída dos alimentadores do sistema da CPFL Paulista e CPFL Piratininga.

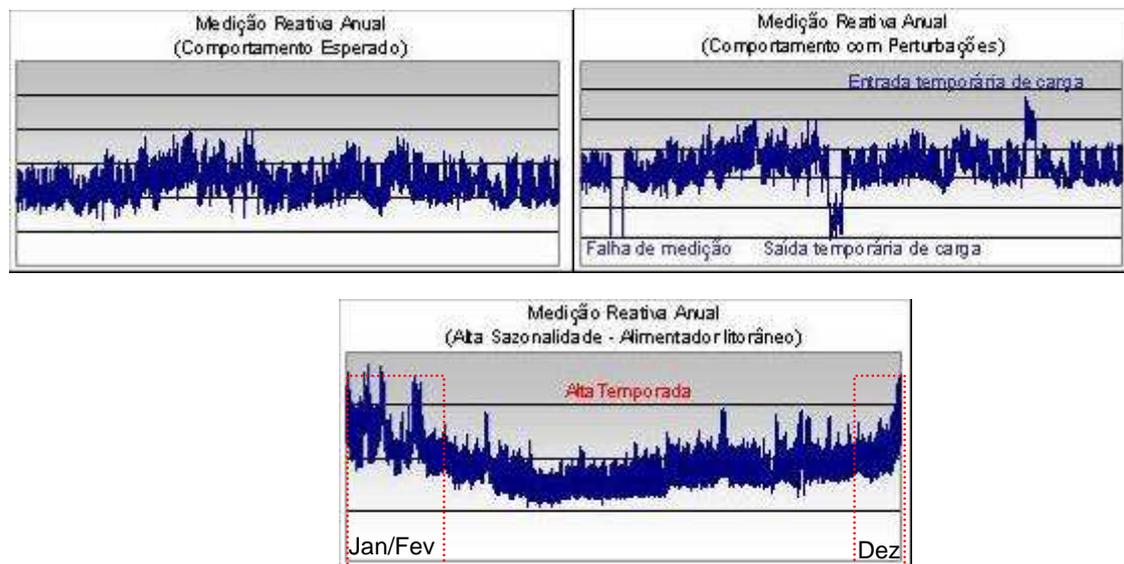


Figura 3 – Conjunto de curvas reativas

#### 4.0 - METODOLOGIA DE ANÁLISE ESTATÍSTICA

Mesmo considerando o efeito da sazonalidade e as perturbações de curta duração, as medições de energia reativa nos alimentadores possuem uma distribuição normal. Isso possibilita a utilização de diversas propriedades estatísticas que indicam a real necessidade de compensação e o montante a ser instalado em cada alimentador.

O montante de compensação deve ter valor muito próximo aos menores valores de medições de reativos no ano. Entretanto, as perturbações e a sazonalidade dificultam esse processo e podem levar o planejador a uma falha no dimensionamento do banco de capacitores. Para considerar os efeitos da sazonalidade e eliminar as falhas e manobras de curta duração do cálculo aplica-se o seguinte procedimento estatístico:

**Passo 1** - Calcula-se a Média amostral ( $\mu$ ) das medições de energia reativa em cada alimentador;

**Passo 2** - Calcula-se o Desvio Padrão amostral ( $\sigma$ ) das medições de energia reativa em cada Alimentador;

**Passo 3** - Para cada alimentador é aplicado o seguinte algoritmo:

**Se  $\mu - 1,64 \times (\sigma) > 250$**   
**Então**  
 $BC = \mu - 1,64 \times (\sigma)$   
**Senão**  
 $BC = 0$   
**Fim Se**

**Passo 4** – Resultado: Plano de compensação reativa fixa na saída dos alimentadores

A equação  $BC = \mu - 1,64 \times (\sigma)$  indica, quando necessário, o tamanho do banco de capacitores a ser instalado na saída do alimentador. Ao se utilizar o parâmetro 1,64 o algoritmo elimina os menores pontos de energia reativa medidos (aproximadamente 5%), fazendo com que todas as perturbações sejam expurgadas do processo estatístico. O parâmetro 250 indica o tamanho menor banco de capacitores a ser proposto no processo.

Através de uma amostragem sistemática, utiliza-se 25% das medições anuais para cada alimentador. Do total de quatro medições horárias, apenas uma é utilizada. Essa amostragem não compromete o cálculo, pois considera a sazonalidade de cada alimentador, além de reduzir o tamanho do banco de dados e o esforço computacional.

A Figura 4 apresenta a metodologia aplicada as medições mostradas na Figura 3. Para todos os casos observam-se características da distribuição normal como: maior concentração de pontos distribuídos no centro, menor distribuição de pontos nas extremidades do gráfico e valores próximos entre a mediana e a média.

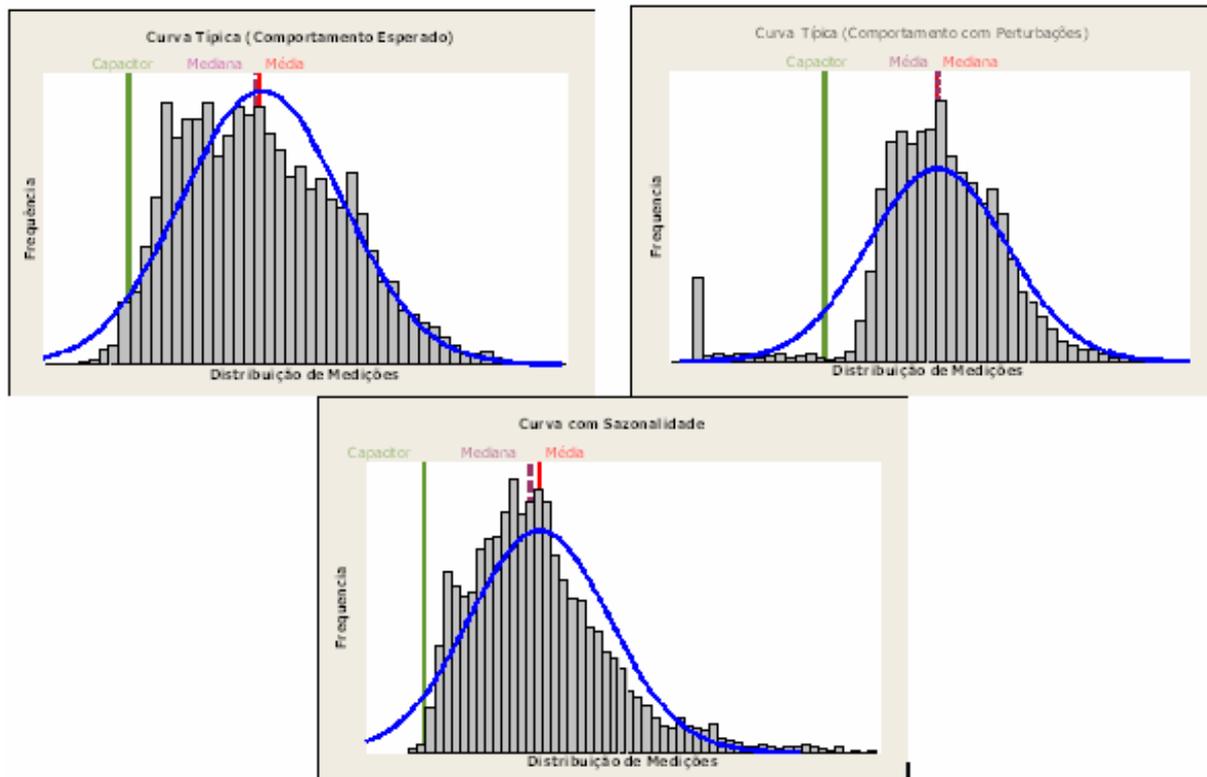


Figura 4 – Distribuição dos pontos medidos para as curvas

## 5.0 - FERRAMENTA DE ANÁLISE ESTATÍSTICA APLICADA A COMPENSAÇÃO REATIVA FIXA

A ferramenta de análise estatística aplicada à compensação reativa fixa requer como entrada de dados uma listagem anual de uma amostra das medições de todos os alimentadores, com informações referentes à identificação do alimentador, data/hora, potência reativa e potência ativa. Automaticamente, todos os dados são agrupados por alimentador. Para cada agrupamento é aplicado o procedimento estatístico.

Como resultado, os alimentadores são classificados em ordem decrescente, priorizando aqueles que necessitam de maiores bancos de capacitores. Além do tamanho do banco de capacitores a ser instalado (kVAr Capacitor), são realizadas comparações entre o fator de potência médio antes da conexão do banco de capacitores (Fp atual) e o fator de potência médio após a conexão do banco de capacitores (Fp proposto). A Figura 5 mostra parte do plano de compensação reativa proposto para a região Sudeste da CPFL Paulista.

A Figura 6 mostra as curvas de energia reativa e fator de potência, comparando a medição real do alimentador CVE-04 e suas curvas previstas após a compensação reativa fixa. Com a alocação do banco de capacitores tem-se pequeno fluxo de energia reativa nos períodos de carga leve e desconsideração da falha de medição ocorrida no início do período, comprovando a eficiência da modelagem estatística.

Alimentador	KVAr Mínimo	KVAr Máximo	kVAr Médio	kVAr Desvio	% Desvio	Fp Atual	Fp Proposto	kVAr Capacitor
TRE-02	-510,00	3598,00	2973,68	594,88	20,00	0,535	0,688	1998,08
FIG-03	0,00	3021,00	2073,32	308,57	14,88	0,858	0,990	1567,27
PAU-08	-19,00	3545,00	2257,35	458,23	20,30	0,908	0,988	1505,86
NDD-07	748,00	3175,00	1975,30	293,54	14,86	0,841	0,968	1493,89
BDA-08	0,00	3822,00	2220,06	672,01	30,27	0,872	0,963	1117,97
NAP-06	12,00	2461,00	1608,83	311,75	19,38	0,904	0,989	1097,55
SCE-08	0,00	2519,00	1562,88	294,02	18,81	0,908	0,990	1080,69
PAU-04	403,00	2813,00	1653,89	356,94	21,58	0,825	0,972	1068,51
MAZ-06	86,00	3590,00	1778,29	446,92	25,13	0,921	0,985	1045,34
FIG-02	0,00	2287,00	1501,09	278,60	18,56	0,875	0,986	1044,38
TRE-03	61,00	2461,00	1550,16	321,26	20,72	0,870	0,982	1023,29
MDE-09	-6,00	3513,00	2068,87	648,56	31,35	0,894	0,968	1005,23
CVE-05	0,00	2057,00	1423,88	256,13	17,99	0,886	0,988	1003,82
JAR-02	255,00	3357,00	1531,13	322,35	21,05	0,876	0,982	1002,47

Figura 5 – Parte do plano de compensação reativa para a região Sudeste da CPFL Paulista

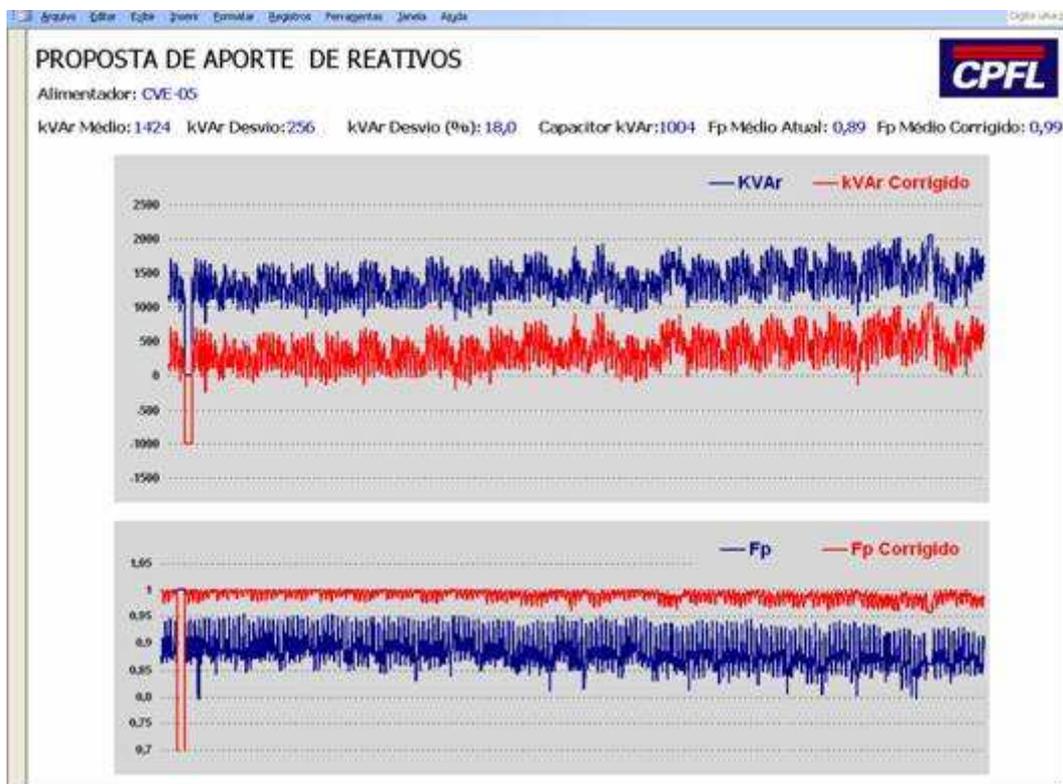


Figura 6 – Comparação entre as curvas reais e curvas esperadas para o Alimentador CVE-05

## 6.0 - RESULTADOS OBTIDOS PARA A CPFL PAULISTA

A CPFL Paulista possui 985 alimentadores. Desse total, 859 possuem medição de energia reativa e, portanto, podem ser estudados pela ferramenta proposta.

As amostras de medições dos 859 alimentadores são processadas automaticamente. Como resultado, obtém-se um plano de compensação reativa fixa na saída dos alimentadores para as três regionais da CPFL Paulista. Nesse caso, são utilizados módulos de 300 kVAr, distribuídos conforme mostra a Figura 7.

Para demonstrar a confiabilidade do modelo estatístico, foram selecionados alguns alimentadores cujas medições apresentaram comportamentos atípicos no ano de 2006, conforme mostra a Figura 8.

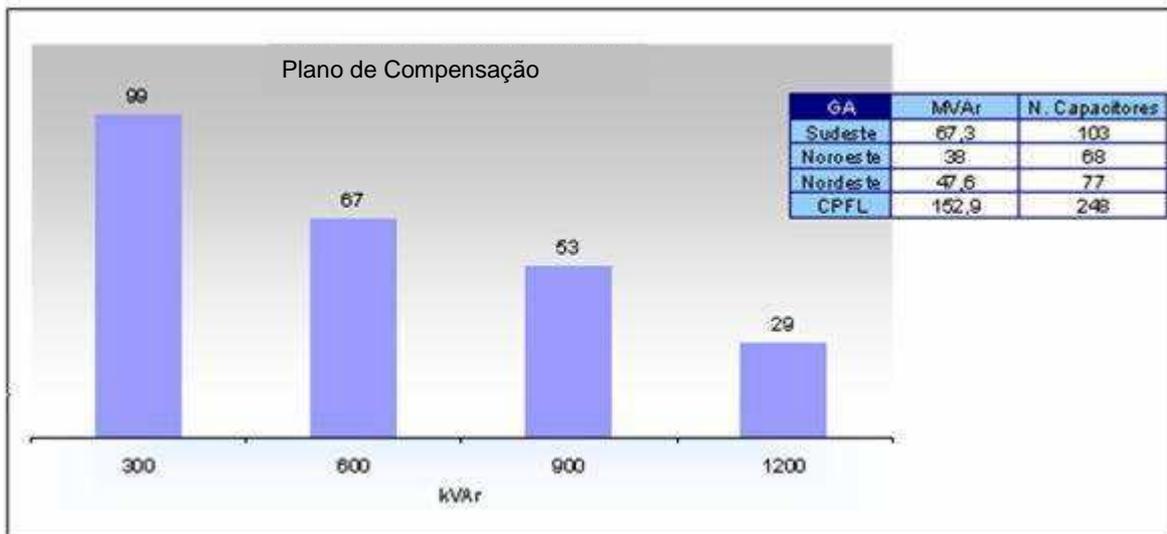


Figura 7 - Plano de compensação reativa fixa para a CPFL Paulista

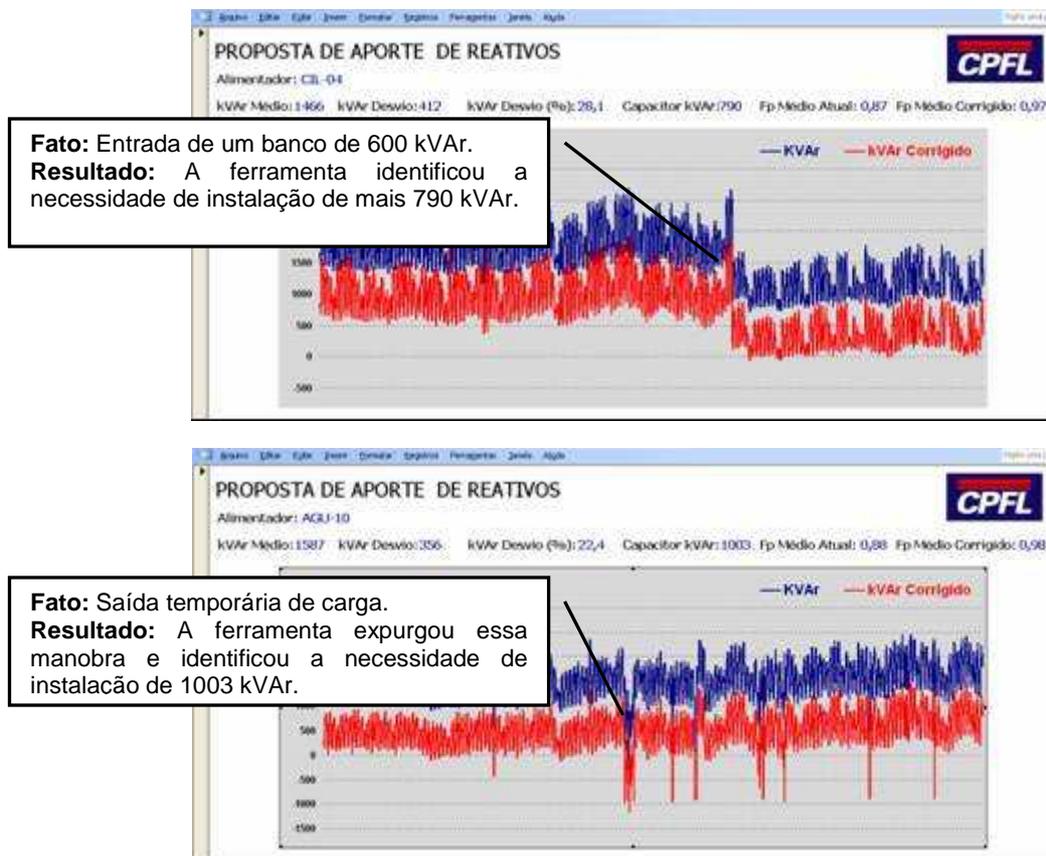


Figura 8 – Alimentadores com comportamentos atípicos ocorridos ano de 2006

Comparando os resultados obtidos pela ferramenta com algumas propostas de compensações reativas realizadas de forma empírica pela equipe de planejamento da CPFL Paulista, utilizando módulos de 300 kVAr, verificam-se resultados altamente satisfatórios. A Tabela 1 apresenta uma comparação entre as duas propostas de compensação reativa para o ano de 2006.

Alimentador	ATH-03	ATH-04	LEO-04	LEO-08	LEO-10	IPI-05
kVAr – Ferramenta	552	589	1665	848	660	344
kVAr – Empírico	600	600	1800	900	600	300

Tabela 1 – Comparação entre as propostas de compensações reativas

Com a implementação do plano de compensação reativa fixa na saída dos alimentadores são esperados diversos benefícios técnicos para as subestações e toda malha de transmissão (69 kV e 138 kV) como: ganho de tensão nos barramentos de alta tensão das subestações, redução do carregamento das linhas de transmissão e transformadores de subestações e aumento do fator de potência nos transformadores da rede básica que suprem o sistema da CPFL Paulista.

Efeito Global	Leve	Média	Pesada	Unidade
Ganho de Tensão nas Barras	0,72	0,45	0,31	kV
Redução Carregamento Lts	0,34	0,51	0,39	%
FP rede básica	0,91 para 0,96	0,87 para 0,89	0,94 para 0,96	indutivo

Tabela 2 – Benefícios Técnicos para o Sistema da CPFL Paulista

## 7.0 - ANÁLISE ECONÔMICA

A viabilidade econômica da compensação reativa fixa é mostrada nesse estudo comparando todos os investimentos necessários para elaboração do plano proposto com a receita gerada pela redução da perda técnica no sistema de alta tensão (subestações e linhas de transmissão) para um horizonte de 5 e 10 anos.

Utilizando como premissas o custo médio da energia comprada de 95,00 R\$/MWh e Taxa de Desconto de 15% são elaborados dois cenários: 1-Otimista e 2-Conservador. Para os dois casos, o resultado é altamente atrativo para a empresa, conforme mostra a Tabela 3.

CENÁRIO - 1 (2h pesada, 12h média, 10h leve)					
Período de Análise	Investimentos - 2006	Receita VPL 2006	Lucro	B/C	TIR
5 anos	(R\$ 1.817.160)	R\$ 2.446.010	R\$ 628.850	1,35	36%
10 anos	(R\$ 1.817.160)	R\$ 3.662.109	R\$ 1.844.949	2,02	45%
CENÁRIO - 2 (2h pesada, 9h média, 13h leve)					
Período de Análise	Investimentos - 2006	Receita VPL 2006	Lucro	B/C	TIR
5 anos	(R\$ 1.817.160)	R\$ 1.900.206	R\$ 83.046	1,05	23%
10 anos	(R\$ 1.817.160)	R\$ 2.844.944	R\$ 1.027.784	1,57	34%

Tabela 3 – Análise econômica

Com a redução da perda de energia é possível obter benefício tarifário. A cada revisão tarifária, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) define um montante de perda técnica a ser considerado no período entre as revisões. Assim, uma redução da perda técnica nesse período representa um ganho, visto que a empresa esta operando em um nível inferior ao reconhecido na tarifa pelo agente regulador.

## 8.0 - CONCLUSÕES

Quando bem localizados e dimensionados, os bancos de capacitores são equipamentos de extrema relevância para o desempenho, técnico e econômico, das empresas de distribuição de energia.

Devido à quantidade de alimentadores e seus diversos comportamentos de carga, os estudos para compensação reativa tornam-se difíceis e demorados para os planejadores. Com o objetivo de reduzir o tempo de estudo e melhorar o desempenho do sistema de alta tensão da CPFL Paulista e CPFL Piratininga, foi desenvolvida uma ferramenta de análise estatística aplicada à compensação reativa fixa na saída dos alimentadores. O resultado obtido por essa ferramenta apresenta-se muito aderente as reais necessidades das duas concessionárias.

Com a implementação do plano de compensação proposto pela ferramenta são previstos diversos benefícios técnicos e econômicos. Entre esses benefícios, destaca-se um aumento na conservação de energia através da redução da perda técnica.

Comparando os investimentos no plano de compensação reativa fixa na saída dos alimentadores obtido pela ferramenta com a receita gerada pela redução da perda técnica no sistema de alta tensão da CPFL Paulista, tem-se retorno rápido e altamente atrativo para a concessionária.

A utilização de modelos estatísticos torna as concessionárias mais eficientes. Assim, inovações, aperfeiçoamentos e desenvolvimentos de ferramentas baseadas em análises estatísticas podem representar um importante diferencial para as empresas, agregando valor ao negócio e tornando-as cada vez mais eficientes e competitivas.

#### 9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) MONTICELLI, A.J., Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica. São Paulo SP, Editora Edgard Blucher, 1983.
- (2) MONTICELLI, A.J.; GARCIA, A. V., Introdução a Sistemas de Energia Elétrica, Campinas – SP, Editora da Unicamp, 2000.
- (3) FONSECA, J. S.; MARTINS, G. A., Curso de Estatística, São Paulo – SP, Editora Atlas, 1996.
- (4) CIPOLI, J. A.; Engenharia de Distribuição, Rio de Janeiro, Editora Qualitymark, 1993.
- (5) Guia do Usuário, “Meet Minitab”, Versão 14, 2003.
- (6) AMADO, T. F.; Regulação Econômica – Apostila de Especialização em Gestão de Ativos do Setor Elétrico, UNICAMP/CPFL, 2005.
- (7) FUTEMA, M. S.; Noções Básicas de Custo e Valuation – Apostila de Especialização em Gestão de Ativos do Setor Elétrico, UNICAMP/CPFL, 2006.

#### 10.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Luiz Cláudio Teixeira Nunes

Nascido em Juiz de Fora, MG, em 18 de novembro de 1974.

Mestrado (2001) Engenharia Elétrica USP/EESC e Graduação (1999) Engenharia Elétrica U. F. de Juiz de Fora.

Empresa: CPFL PIRATININGA desde 2004 e ELEKTRO de 2000 a 2004.

Engenheiro de Planejamento.

Edison Bormio Junior

Nascido em Bauru, SP, em 18 de dezembro de 1965.

Graduação (1990) Engenharia Elétrica U. F. de Itajubá.

Empresa: CPFL Paulista desde 1993

Engenheiro de Planejamento

Alex Alexandre

Nascido em Tupi Paulista, SP, em 27 de Abril de 1982.

Graduação (2007) Estatística, Unicamp - Universidade Estadual de Campinas.

Empresa: CPFL PAULISTA, desde 2006.

Estatístico