

# Apuração dos Indicadores de QEE na Rede de Distribuição e a Análise Evolutiva com Técnica de Estratificação das Amostras

Se Un Ahn ; Denile Cominato Boer; Eduardo F. Nunes

**Resumo** – O trabalho descreve o desenvolvimento da aplicação do RIQEE - Registrador de Indicadores de Qualidade de Energia Elétrica na implantação da CIQ - Central Integrada de Qualidade na CPFL. O artigo demonstra a importância da seleção das informações para a gestão da QEE, além de apresentar uma proposta metodológica para análise das perturbações. As análises diretas dos dados históricos diários (difusos) podem levar à conclusões equivocadas. A técnica apresentada neste presente trabalho, baseada na seleção das amostras, permite uma análise mais direta e uma reclassificação dos fenômenos em função da sua identidade estatística. Essa análise evolutiva, com técnicas de estratificação mostrou-se eficiente e sugere-se que a mesma possa ser utilizada para avaliação correta e sistemática de Qualidade de Energia Elétrica, além de orientar as providências para as medidas corretivas e preventivas. Em estudos recentes, essa técnica proporcionou a identificação da perturbação característica em certos dias da semana.

**Palavras chave:** - Extração de Amostras; Metodologia de análise de dados; Indicadores; Sistema de Gestão; Gestão de QEE.

## I. INTRODUÇÃO.

O processo de diagnóstico de qualidade de energia elétrica (QEE) é normalmente feito pela medição direta “in loco” e a partir dessa medição, com auxílio de um programa próprio, processam-se as análises e as providências cabíveis. No projeto “PD 12 - Conformidade da Potência” (concluído em 2004) foi desenvolvido um equipamento de baixo custo, denominado RIQEE, destinado à apuração de indicadores de qualidade. Além de fomentar o conhecimento técnico, este primeiro projeto possibilitou uma nova metodologia de gerenciamento da Qualidade de Energia Elétrica da CPFL [1 e 2].

Além do desenvolvimento do dispositivo indicador de qualidade - RIQEE implantado inicialmente nas subesta-

ções de redes de distribuição, foi também desenvolvido e implantado um sistema gerenciador de informações denominado CIQ – Central Integrada de Qualidade [2] em um novo projeto de P&D (PD212 – CIQ – Central Integrada de Inteligência da Qualidade, concluída em 2009).

Estas duas ferramentas juntas são utilizadas hoje na CPFL para uma análise verdadeiramente representativa de QEE. Algumas aplicações de análises já foram implantadas na central CIQ, promovendo melhorias e facilidades aos usuários, tais como indicadores, limites regulatórios, limites das concessionárias, entre outras.

Entretanto, identificou-se a necessidade de desenvolver uma nova metodologia de análise dos indicadores já processados, pois o banco de dados constituía-se de valores diários, seqüenciados cronologicamente, de forma não comportada (caótica), devido a um fator não controlável e inerente dos níveis de perturbação, caracterizados por aumentos e decréscimos. Os registros apurados em seqüência cronológica podem fornecer uma falsa interpretação na gravidade dos problemas e prejudicar nos processos de mitigação.

Neste artigo propõe-se uma metodologia alternativa que contempla uma pré-análise dos dados e estratificação por dia-de-semana (se for significativo), ou em outros casos, uma estratificação em função das intervenções de mitigação da perturbação pela concessionária e cliente.

## II. INDICADOR DE QEE DA CPFL.

### A. Objetivo.

Desenvolver e implantar uma metodologia de análise dos indicadores de qualidade de energia procedentes das medições em campo, diminuindo as análises exaustivas dos engenheiros e com maior foco na identificação dos problemas e encaminhamento das soluções técnicas.

### B. Indicador.

O RIQEE foi desenvolvido em parceria com a UNICAMP, Expertise e Reason Tecnologia. Este equipamento foi desenvolvido para solucionar a questão da análise de QEE de um modo sistemático, e não mais pontual, para atender uma reclamação ou uma solicitação do cliente, gestor ou do órgão regulador. [3]

---

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

S. U. Ahn e D. C. Boer trabalham na ‘CPFL Energia’ (e-mails: [seun@cpfl.com.br](mailto:seun@cpfl.com.br) e [decboer@hotmail.com](mailto:decboer@hotmail.com)).

E. Nunes trabalha na ‘Expertise Engenharia. ([eduardo@expertise-eng.com.br](mailto:eduardo@expertise-eng.com.br))



Curta Duração (VTCD) são representadas pelo seu afundamento e duração.

Os pontos de medição cujo valor amostrado extrapola aos limites estabelecidos pela CPFL, com base nos valores estabelecidos pelo PRODIST (ANEEL), entram automaticamente em “quarentena” (em estado de observação), no qual a CIQ realiza um acompanhamento da evolução desses indicadores. Esse acompanhamento pela CIQ tem como objetivo identificar se houve realmente alguma mudança significativa naquele ponto de medição, ou se foi apenas um evento esporádico causado, por exemplo, por uma manobra na subestação.

Para isso foram desenvolvidos na CIQ dois tipos de máscara:

Máscara para acompanhamento dos indicadores em um ciclo de 7 dias, com janela de tempo determinada pelo ciclo de carga, que se repete na indústria semanalmente;

Máscara para acompanhamento dos indicadores no ciclo de uma estação, em 3 meses, para cada dia da semana separadamente.

A metodologia de correlação também é usada na Central Integrada da QEE para comparar diferentes indicadores em um mesmo ponto de medição. Através da tabela de correlação montada, obtêm-se então os grupos chamados de correlacionados. Todos os pontos de medição que apresentam alta correlação entre eles formam um grupo correlacionado. A tabela 1 mostra os grupos formados.

TABELA 1. Tabela de Grupos Correlacionados

Grupo1	Grupo2	Grupo3	Grupo4	Grupo5	Grupo6	Grupo7
Piracicaba	Saltinho	Cosmópolis	Indaiatuba Tr2	Morumbi	Sumaré	Nova Veneza
São Pedro	Ipê	Indaiatuba Tr1	-	Cosmópolis	-	-
Morumbi	Campo Verde	-	-	Orquídea	-	-
Campinas	Chapadão	-	-	Paulínia	-	-
Cosmópolis	Colonial	-	-	Souzas	-	-
Morro Azul	-	-	-	-	-	-
NAP	-	-	-	-	-	-
Orquídea	-	-	-	-	-	-
Paulínia	-	-	-	-	-	-
Taquaral	-	-	-	-	-	-

A formação de grupos correlacionados possibilita uma distribuição otimizada e eficaz de medidores de QEE na rede da CPFL Energia, pois a identificação desses grupos possibilita remanejamento dos pontos de medição.

#### IV. EXTRAÇÃO DE AMOSTRAS

As informações do banco de dados da CIQ são exportadas em arquivo texto com indicação do local da perturbação e os respectivos valores dos indicadores, por data (um valor apurado por dia). Porém, para o presente trabalho serão exemplificados os indicadores de DHT de corrente, tensão, PST e desequilíbrio de tensão, e a sua evolução ao longo do período de observação.

O uso da técnica de estratificação das amostras é útil para facilitar uma conclusão rápida e no auxílio para análise de alternativas de mitigação. Notadamente os níveis devem ser analisados separadamente. Essa estratificação pode melhorar a representação dos grupos mais significativos estatisticamente.

#### A. Distorção Harmônica Total de Corrente

A primeira análise possível corresponde aquela com todos os valores do indicador apurado. A figura 02 apresenta um gráfico de 254 dias consecutivos de indicadores de DHT-I. Observa-se uma evolução crescente da linha de tendências, próximo aos 8% (no final do período).

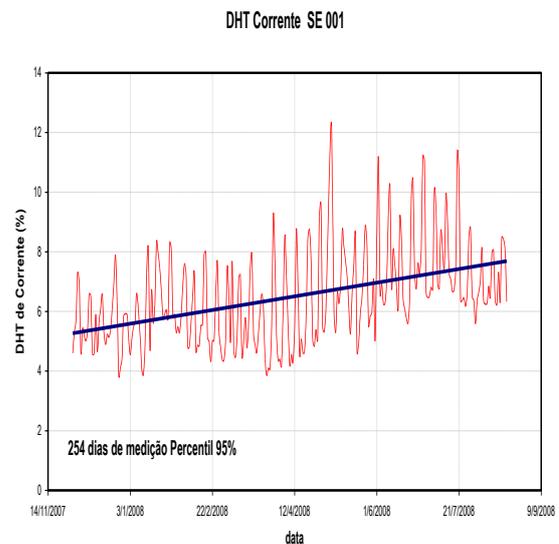


Fig. 02 – DHT de Corrente Diária (254 dias contínuos).

A tabela 02 apresenta os mesmos indicadores classificada pelos dias da semana. Nota-se que os valores das médias de domingo e segunda-feira estão em torno de 8,20%, enquanto que nos dias de terça a sábado estão próximos de 5,90%.

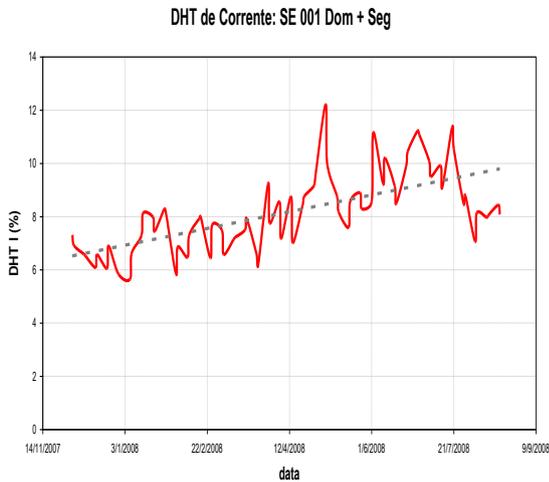
Ressalta-se que o propósito do presente trabalho é de identificar o impacto dessa nova metodologia de análise e não das causas e possíveis soluções para essas perturbações.

**TABELA 02. ESTRATIFICAÇÃO DE PERTURBAÇÃO POR DIAS DE SEMANA**

Indicador:	Dist. harmônica T. Corrente						
Local....:	SE 001	Ponto....: TRAF01					
	Dom	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sáb
media	8.14	8.21	5.88	5.79	5.56	5.50	6.10
DesPad	1.57	1.33	1.02	1.03	1.11	0.97	1.02
DesPad %	19.3%	16.2%	17.3%	17.9%	19.9%	17.6%	16.6%
NumDias	38	37	35	35	38	35	36
NumDia Tot	254						

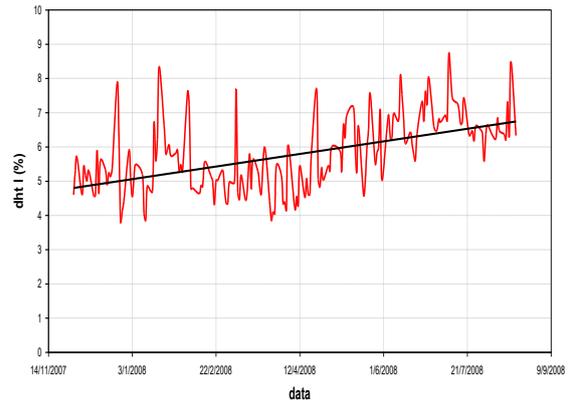
Na figura 03 tem-se gráfico de indicadores de DHT-I aos domingos e segundas-feiras. Sua linha de tendência está em torno 10% em setembro de 2008. Se não forem tomadas medidas preventivas estima-se que esse efeito poderá alcançar o limite de 14% (limite IEEE 519) em 2 anos.

Na figura 04 tem-se o gráfico de DHT-I nos demais dias da semana. Observa-se que os valores estão em torno de 7%. Como os eventos são decorrentes de perturbações de curtíssima duração, as ações de mitigação devem ser executadas nos casos mostrados na figura 03.



**Fig. 03 – DHT de Corrente da SE001 com extração de amostras (domingos e segundas-feiras).**

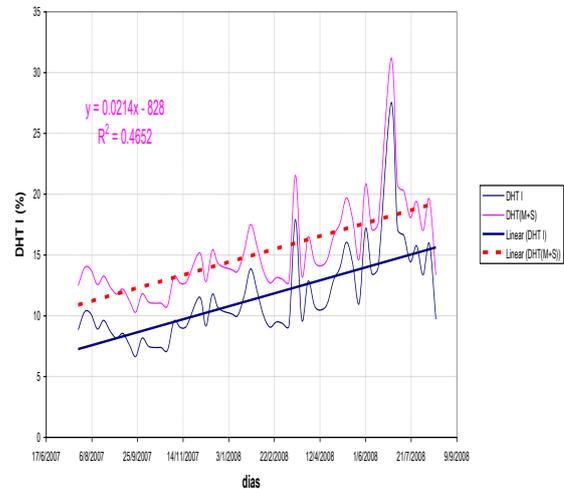
**DHT de Corrente: SE 001 Terça a Sábado**



**Fig. 04 – DHT de Corrente da SE001 com extração de amostras (de terças a sábado).**

Outra técnica de estratificação da amostra consiste em realizar uma análise estatística, selecionando o dia mais crítico e significativo da semana e a partir da curva média é feito a soma de um desvio padrão. Isto corresponde ao aumento do intervalo de confiança de 50% para 84%, conforme representado na figura 05.

**DHT de Corrente SE 002 (Domingo): Análise de Média + 1 Desvio Padrão do pPercentil 95%**



**Fig. 05 – DHT de Corrente da SE002 com extração de amostras (domingos) e análise de sensibilidade da curva média mais um desvio padrão.**

DHT Tensão SE 003 (Dom) Media; e Media + 1 DP

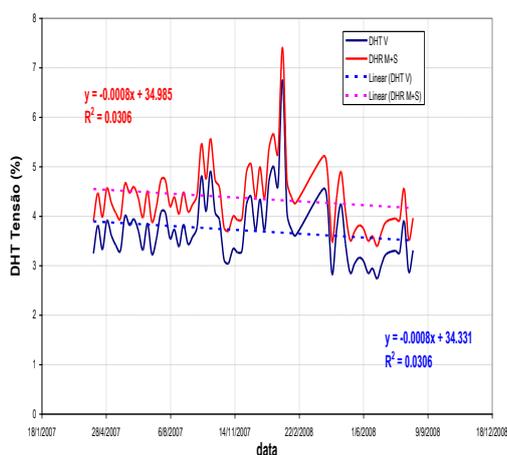


Fig. 06 – DHT de Tensão da SE003 com extração de amostras aos domingos. Indicador  $\mu$  e  $\mu + \sigma$ .

DHT T SE 003 / Dias Úteis

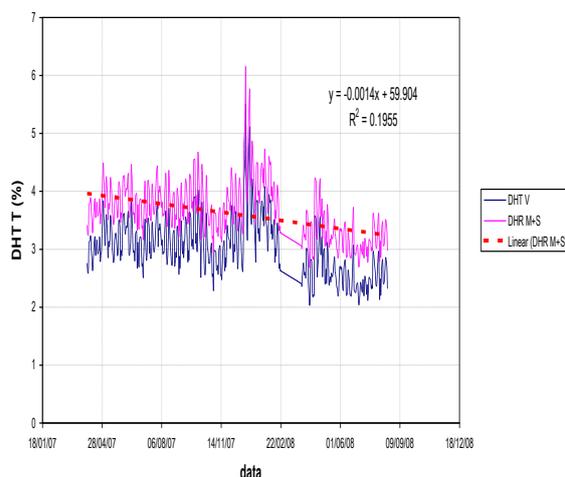


Fig. 07 – DHT de Tensão da SE003 com extração de amostras dos dias úteis. Indicadores  $\mu$  e  $\mu + \sigma$ .

Com base nessa metodologia, é possível identificar visualmente as eventuais violações. No exemplo acima, a análise gráfica permite identificar os pontos da curva em azul que estão acima da linha de tendência em vermelho (pontilhada), cujo intervalo de confiança é maior (84%).

### B. Distorção Harmônica Total de Tensão

Para o exemplo da subestação SE003, os indicadores apurados de DHT-T foram tabelados para 468 dias consecutivos de medições, apresentando uma curva de tendências para valores menores que 3%. Porém, ao estratificar as amostras notou-se que os indicadores de DHT-T aos domingo apresentavam valores entre 20 a 40% maiores que os demais.

Assim, baseado na metodologia apresentada anteriormente, selecionou-se os dados extraídos aos domingos, cujo ao valor da média foi somado um desvio padrão da amostra total. (vide figura 06)

Na figura 07, os indicadores de DHT-T para dias úteis mostram claramente a tendência de apresentar os valores abaixo dos 3%. Enquanto que na figura 06, os valores estão quase todos acima dos 3%, onde se observa que a linha de tendência da curva média mais um desvio padrão estão acima de 4% e ainda apresenta alguns valores entre 5 e 6% (região limítrofe que podem causar eventos indesejáveis aos clientes e as concessionárias). Assim, deve-se tomar uma atenção redobrada para aumento de ocorrências e reclamações nesse caso.

### C. Desequilíbrio de Tensão

Na análise das perturbações referentes ao desequilíbrio de tensão, tanto em subestações de distribuição como nas barras de subtransmissão não foram detectadas diferenças significativas quando aplicada a estratificação por dia de semana das amostras. Portanto, essa análise foi feita com todas as amostras sem diferenciação.

O desequilíbrio de tensão numa SE, em um ano e meio, mostrou um aumento de nível de perturbação de 0,75% para 0,90%. Isto pode representar um ponto de atenção, uma vez que os níveis permitidos são da mesma ordem de grandeza, sendo: 2,0% para o limite global e 1,5% para consumidor. (vide figura 08).

Também, deve-se considerar que um desequilíbrio pode afetar quase todas as cargas trifásicas, provocando custos adicionais de perdas técnicas, perda da vida útil dos equipamentos e de sua operação.

A figura 09 apresenta um valor de desequilíbrio para uma barra de 138 kV. Neste caso, observa-se um valor contínuo de 0,85%, sem demonstrar uma tendência para mudança. Entretanto, considera-se este valor muito alto, já que o esperado é algo em torno de 0,30%.

Deseq de Tensão - SE 04

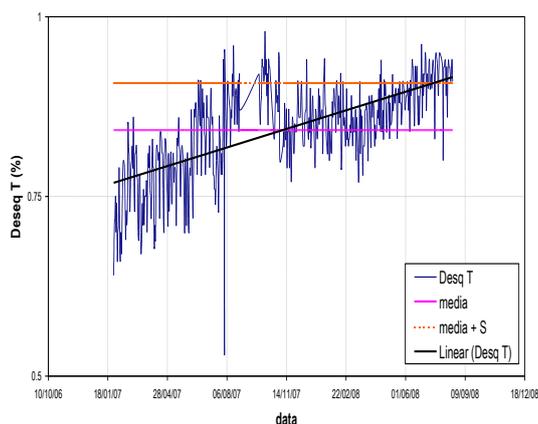


Fig. 08 – Desequilíbrio de Tensão da SE004 sem estratificação de amostras. Indicadores apurados; Indicador  $\mu$ ;  $\mu + \sigma$ ; e linha de tendência dos valores.

Desequilíbrio de Tensão B138kV

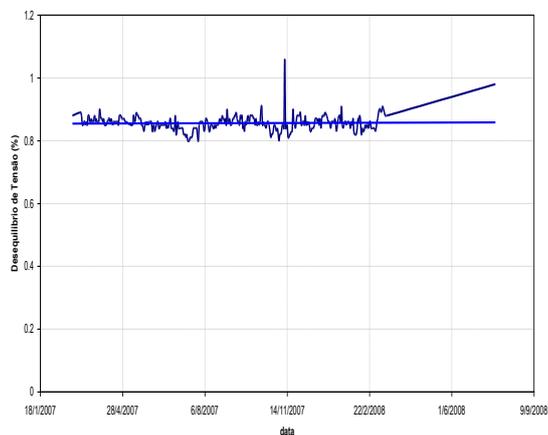


Fig. 09 – Desequilíbrio de Tensão da Barra de 138kV da SE.

#### D. Flutuação de Tensão

Para fenômenos de flutuação de tensão, no qual os valores são estimados (por algoritmo) com base na medição da tensão, foram selecionados 3 SE's (uma próxima a uma siderúrgica, e outras 2 SE's distantes cerca de 30 km, sendo uma na ponta da linha de suprimento e a outra a montante e próximo ao terminal). [6]

Nestes casos, a estratificação das amostras deve ser definida em função das ações executadas pelas concessionárias e/ou cliente, tais como: mudança de linha de suprimento, separação de alimentação, maior taxa de picagem da sucata, aumento de pré-aquecimento com uso do gás e instalação de compensador estático, entre outros. Na figura 10 pode-se observar as diversas intervenções externas e acompanhamentos dos níveis de perturbações.

Análise Comparativa de Pst entre as SEs

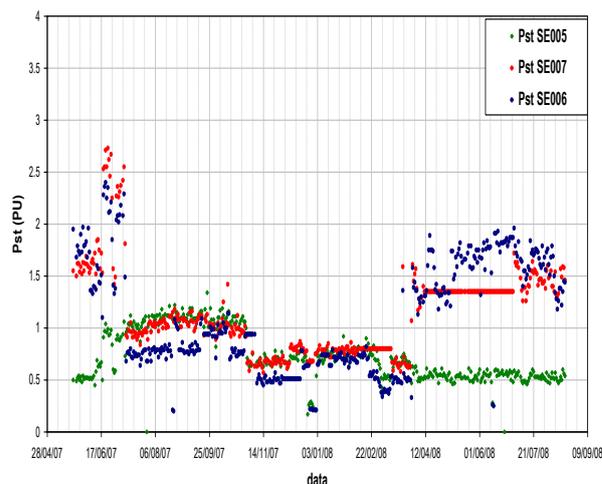


Fig. 10 – Flutuação de Tensão (Pst medição de Flicker). Análise comparativa de 3 SEs e as respectivas influências das ações externas.

#### E. Nota explicativa – alteração da configuração para atender a siderúrgica

Num caso de entrada de operação de um forno a arco (caso real na CPFL) foram observados aumento da perturbação e flutuação de tensão. A figura 11 abaixo representa a variação de flutuação de tensão obtida através da supervisão pela medição, quando da entrada em operação do forno, a partir de maio/2004.

Diversas reuniões entre a CPFL e a siderúrgica foram realizadas, no sentido de propor medidas para a equalização do problema.

Pst BT Próximo à Siderúrgica 138 kV

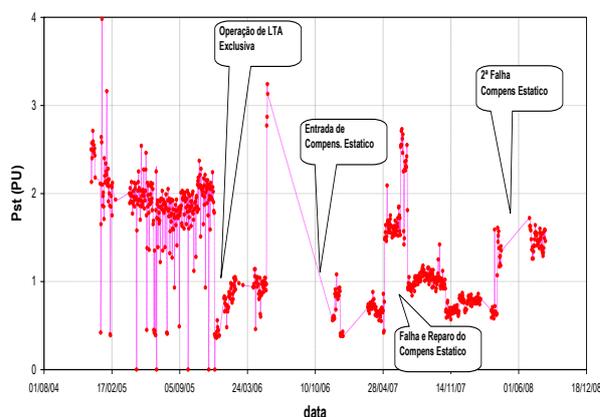


Fig. 11 – Flutuação de Tensão (Pst medição de Flicker). Ponto de medição próximo à planta siderúrgica de 105 MVA.

De caráter provisório, no curto prazo foi proposta alteração da configuração ao atendimento do forno a arco pela CPFL, utilizando uma linha exclusiva para o forno, ficando

as demais cargas da siderúrgica atendidas pela SE006. Ver figura 12.

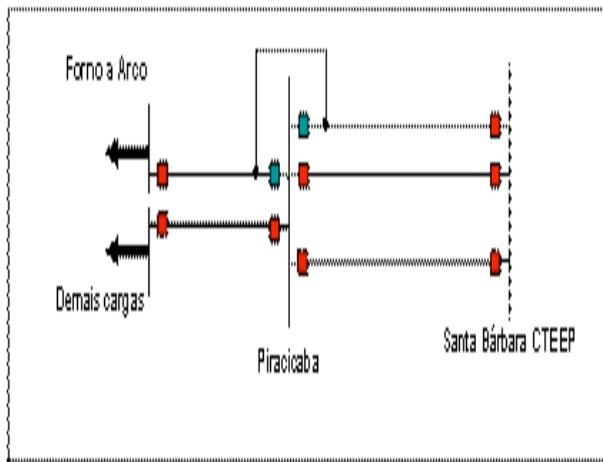


Fig. 12 – Diagrama unifilar simplificado

De caráter definitivo, após cerca de 18 meses (responsabilidade da siderúrgica) foi instalado um compensador estático de 150 MVAR, 33 kV, na siderúrgica, para operar em paralelo com o forno a arco.

Nas figuras 13 e 14 verifica-se a correlação entre as 2 SE's. Neste caso pode-se notar que a perturbação originada da SE007 tem forte influência na SE 006. Enquanto que na SE 005 a influência é concomitante entre a siderúrgica e a SE Terminal de Suprimento.

Na figura 14 observa-se os níveis de Pst os mais baixos.

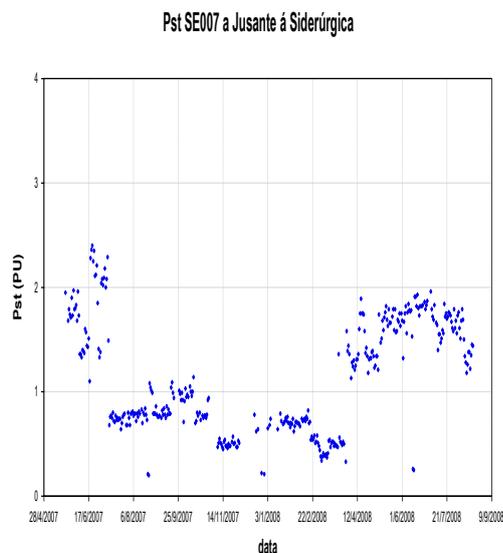


Fig. 13 – Flutuação de Tensão (Pst medição de Flicker). SE distante 30 km após a siderúrgica.

Pst SE 005 à Montante da Siderúrgica

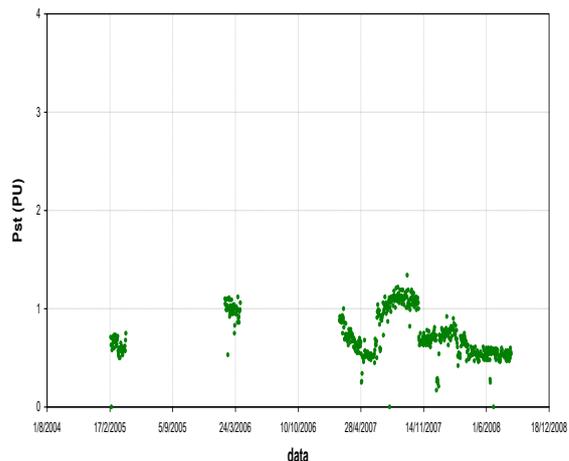


Fig. 14 – Flutuação de Tensão (Pst medição de Flicker). SE distante 30 km, porém antes da siderúrgica e mais próximo da fonte.

## V. CONCLUSÃO

A técnica de estratificação das amostras auxilia na interpretação correta dos fenômenos de perturbação elétrica;

Pode ser implantado de maneira sistemática e fornecer as informações selecionadas pelo usuário;

Poderá auxiliar na mitigação das perturbações, selecionando os dias de maior incidência, bem como as condições de contorno das ocorrências.

Utilização dos indicadores com técnicas de estratificação da informação facilita na identificação do problema de modo objetivo e, portanto, na proposição de soluções técnicas mais adequadas.

## VI. RECOMENDAÇÕES

Ampliar o número de RIQEE's instalados na rede da CPFL, tanto em instalações de AT, MT e BT;

Concluir o estudo das correlações a fim de otimizar e extrair as informações redundantes;

Instalar RIQEE's em indústrias para comparar a QEE do ponto de vista da carga com os indicadores medidos na rede de distribuição da concessionária;

Constituir grupo de análise para as mais diversas perturbações e as suas influências nas cargas especiais dos clientes.

Fornecer informações para o setor, contribuindo no estabelecimento dos limites regulatórios das perturbações de QEE;

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA:

- [1] AHN, S.U. & DECKMANN, S. & ZIMATH, S. & NUNES, E. & CAMARGO, J. & FRANDSEN, R. - *Power Quality Indicator Management System – Simplified and Automatic Monitoring Pro-*

*totype implementation at CPFL. CIRED 19th International Conference on Electricity Distribution - Vienna, 21-24 May 2007;*

- [2] AHN, S. U. & BRITTES, J.L.P. & DIAS, D. P. & DECKMANN, S. M. & CAMARGO, J. & NUNES, E. F. & PEREIRA, V. H. & ZIMATH, S. & OLIVEIRA, J. P. & SEIDEL, C. W. **Central Inteligente de Qualidade de Energia da CPFL**. VII CBQEE – Santos, SP 2007;
- [3] ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. **Módulo 2 - Padrões de Desempenho da Rede Básica e Requisitos Mínimos para suas Instalações;**
- [4] MARAFÃO, F. P. & DECKMANN, S. M. & PAIVA, E.P. **"Monitor Digital de Qualidade da Energia Elétrica: Obtenção On Line de Indicadores de Qualidade"**. 3o SBQEE, Brasília, DF - Agosto 1999;
- [5] ULIANA, Policarpo B. & OLIVEIRA, Jurandir P. - **Comparação funcional entre registradores de Parâmetros de Qualidade de Energia Elétrica (RQE) e Registradores Digitais de Perturbações (RDP)**, IV SBQEE – 2001.
- [6] FACHADA, R. F. - **Utilização de Compensador Estático para Mitigação da Perturbação Causada na Operação de Forno a Arco: Estudo de Caso Real na CpfL Paulista** - XX SNPTEE SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - 22 a 25 Novembro de 2009 Recife - PE