



# VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005  
Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 13 7583  
Tópico: Sistemas de Monitoramento e Tratamento de dados

## A TRANSFORMADA DE FOURIER JANELADA APLICADA A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

SILVIO A. DE SOUZA\*

EESC-USP

MÁRIO OLESKOVICZ

EESC-USP

DENIS V. COURY

EESC-USP

### RESUMO

Esta pesquisa traz a detecção, localização e classificação automatizada de eventuais distúrbios relacionados à qualidade da energia elétrica (QEE). Da situação atual, tem-se que variações nas formas de ondas dos sinais de tensão como: elevação, afundamento, interrupção, oscilação transitória e ruído, são freqüentes, chamando a atenção para a qualidade da energia elétrica fornecida pelas concessionárias e da decorrente interconexão entre os sistemas. Como será apresentada, a análise de tais fenômenos será realizada dispondo da Transformada de Fourier Janelada (TFJ). As simulações de tais distúrbios são provenientes da aplicação do *software* ATP (*Alternative Transients Program*), cujas características seguem corretamente um sistema real da concessionária CPFL - Companhia Paulista de Força e Luz. Pelos resultados observados fica evidente a grande potencialidade da TFJ aplicada à avaliação de fenômenos relacionados a QEE.

### PALAVRAS-CHAVE

Transformada de Fourier Janelada, Qualidade da Energia, Distúrbios em Redes Elétricas.

### 1.0 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o estudo voltado à Qualidade da Energia Elétrica (QEE) tem sido muito enfatizado devido ao aumento do número de cargas sensíveis a perturbações na tensão de fornecimento aos sistemas.

A ocorrência de distúrbios, como aqueles ocasionados por descargas atmosféricas, correntes de magnetização de transformadores, faltas sustentadas, correntes de partida de grandes motores, ou ainda pelos efeitos de chaveamentos de capacitores em linhas de transmissão, podem provocar inúmeras interferências indesejáveis e, conseqüentemente, acarretar em efeitos econômicos não desprezíveis, ocasionando prejuízos tanto às concessionárias como aos consumidores.

Entre muitos apontamentos da literatura, Dugan et al., 1996, define o termo qualidade da energia como qualquer problema manifestado na tensão, corrente ou desvio de freqüência, que resulte em falha ou má operação dos equipamentos de consumidores.

Atualmente, a QEE é avaliada pela concessionária e órgãos governamentais através de específicos índices, como DEC e FEC, cujas definições se encontram na Resolução N<sup>o</sup> 24 da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (ANEEL, 2000). No entanto, estes índices não consideram certas alterações nas formas de onda e na freqüência manifestadas sobre determinado sistema elétrico. Sendo assim, para uma completa análise, cabe ressaltar que todos os fenômenos relacionados a QEE devem ser detectados, localizados e classificados.

Ferramentas como a Transformada Rápida de Fourier (TRF), Redes Neurais Artificiais (RNAs) e Transformada *Wavelet* (TW) têm sido usadas para análise de distúrbios em Sistemas Elétricos de Potência (SEP) relacionados a QEE (Aggarwal e Kim, 2000; Huang et al., 1998). Dentre estas, a TRF apresenta uma representação no domínio da freqüência de uma

função do tempo, mantendo exatamente as mesmas informações da função no tempo (Michelin, C., 1998).

Para se obter informações mais precisas no estudo de fenômenos ligados a QEE, a obtenção de informações em ambos os domínios, tempo e frequência, são fundamentais na caracterização de tais situações. Essas informações podem ser obtidas por meio da Transformada de Fourier Janelada (TFJ) (Hensley, G. et al., 1999). Neste sentido, a TFJ será empregada nesta pesquisa para se obter as informações desejadas à detecção, localização e classificação dos distúrbios relacionados a QEE. As principais considerações e observações decorrentes desta aplicação serão explanadas no que segue.

## 2.0 A TRANSFORMADA DE FOURIER JANELADA

A TFJ discreta decompõe um sinal variante no tempo em componentes no domínio do tempo e da frequência e, portanto, permite caracterizar de forma mais eficiente a evolução no tempo de cada componente do sinal (Gu, Y.H.; Bollen, M.H.J., 2000).

Dado um sinal  $x(m)$ , a TFJ discreta é definida como:

$$X_t(e^{j\omega}) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} w(t-m)x(m)e^{-j\omega m} \quad (1)$$

onde:

$\omega = 2\pi k/N$  é a frequência em radianos;  
 $N$  é o número de bandas de frequências;  
 $w(m)$  é a janela simétrica selecionada de tamanho  $L$  e  $L \leq N$  se a reconstrução do sinal é requerida.

Na equação (1),  $w(t-m)$  é a seqüência de janelas as quais determinam a porção de entrada do sinal em análise para um período em particular,  $t$ . A TFJ claramente é uma função de duas variáveis: do índice tempo ( $t$ ), o qual é discreto, e da variável frequência ( $\omega$ ), a qual é contínua.

Ao considerar  $X_t(e^{j\omega})$  como a transformada de Fourier de uma seqüência  $w(t-m)x(m)$ ,  $-\infty < m < \infty$ , para  $t$  fixo, temos que a TFJ será função do índice tempo ( $t$ ), o qual toma todos os valores inteiros de modo à "deslizar" a janela  $w(t-m)$  ao longo da seqüência  $x(m)$ . Este processo é descrito na Figura 1, onde o sinal e a janela são representados, por conveniência, como funções contínuas, mesmo sendo estes definidos para valores inteiros de  $m$  e  $t-m$ .

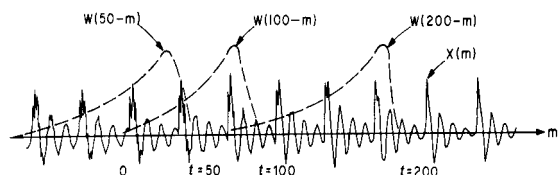


Figura 1. Esboço de  $x(m)$  e  $w(t-m)$  para vários valores de  $t$ .

As condições para a existência da TFJ são claramente definidas, uma vez que a condição suficiente para a TRF convencional existir, é que, a seqüência  $w(t-m)x(m)$  seja absolutamente integrável. Como é freqüente o caso de  $w(t-m)$  apresentar duração finita, esta condição é claramente satisfeita.

O modelo de uma seqüência da janela tem um efeito importante na natureza da TFJ. Se assumirmos  $X_t(e^{j\omega})$  como a TRF de seqüência  $w(t-m)x(m)$ , e se considerarmos que a TRF das equações (2) e (3) abaixo existem para um dado  $t$  fixo, então a resposta desse processo é dada pela convolução das transformadas de  $w(t-m)$  e  $x(m)$ .

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m)e^{-j\omega m} \quad (2) \quad \text{e} \quad W(e^{j\omega}) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} w(m)e^{-j\omega m} \quad (3)$$

Como será evidenciado na seção 2.1, através das Figuras 2, 3 e 4, os espectros das janelas utilizadas neste trabalho apresentam duas características principais. A primeira diz respeito ao lóbulo principal, onde quanto mais largo este for, mais largos serão os picos dos senóides, o que vem a diminuir a capacidade de discriminar frequências próximas. A segunda característica ressalta que quanto maior a amplitude do lóbulo secundário, menor será a capacidade de detectar senóides mais fracas (Yehia H. C., Vieira M. N., 2002). Os picos e o declínio dos níveis dos lóbulos secundários indicam a habilidade da janela em encontrar pequenos transitórios na presença de um sinal extenso, enquanto a largura de banda indica a perda na resolução em frequência.

A seguir serão comentadas as definições dos três tipos de janelas empregadas neste estudo.

### 2.1 Janelas utilizadas na análise

A janela retangular é unitária sobre o intervalo em observação, e pode ser considerada como um conjunto de seqüência finitas aplicadas ao um sinal em análise. Tal janela é definida pela eq. 4 e a Figura 2 que ilustra sua respectiva resposta em frequência.

$$w(n) = \begin{cases} 1, & n = 0, 1, \dots, M-1 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4)$$

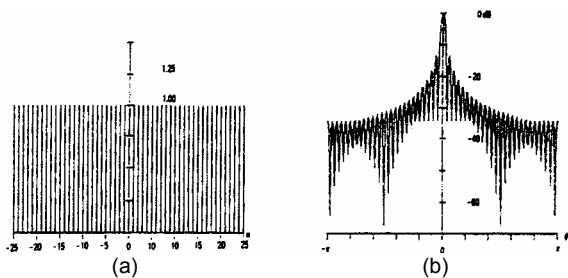


Figura 2. (a) Janela Retangular (b) Resposta em frequência, magnitude (dB)

A **janela de Kaiser** é definida por:

$$w(n) = \begin{cases} \frac{I_0[\beta(1 - [(n - \alpha)/\alpha]^2)^{1/2}]}{I_0(\beta)}, & 0 \leq n \leq M \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5)$$

Onde  $\alpha = M/2$ , e  $I_0(\cdot)$  representa a função Bessel de ordem zero modificada de primeira ordem. A Figura 3 ilustra tal janela.

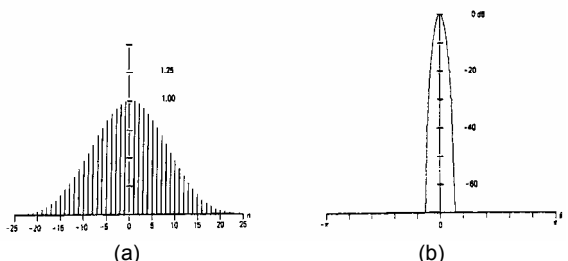


Figura 3. Janela de Kaiser (b) Resposta em frequência com  $\beta = 3.0$ , magnitude (dB)

A **janela de Hanning** é definida como segue:

$$w(n) = \begin{cases} 0.5 - 0.5 * \cos\left(\frac{2\pi n}{M-1}\right), & 0 \leq n \leq M-1 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (6)$$

A Figura 4, mostra a janela de Hanning e sua respectiva resposta em frequência.

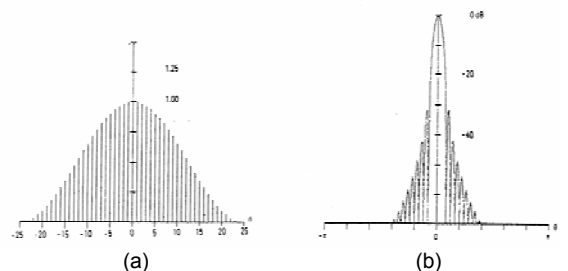


Figura 4. (a) Janela de Hanning (b) Resposta em frequência, magnitude (dB)

### 3.0 O SISTEMA ELÉTRICO EM ANÁLISE

As grandezas analisadas referem-se a valores amostrados de tensões de um sistema elétrico real (Figura 5), cujos dados foram fornecidos e trabalhados em conjunto com a CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz) pela aplicação do *software* ATP - *Alternative Transients Program*.

Neste circuito, o transformador da subestação (138/13,8 kV), os transformadores de distribuição 3 e 13 (T3 e T13) e o transformador particular 4 (Tp4), foram modelados de acordo com suas curvas de saturação e dados obtidos da CPFL. Já para os demais, consideraram-se somente os seus pontos de ligação com o sistema. Os transformadores particulares 1, 2 e 3 (Tp1, Tp2 e Tp3) compreendem cargas particulares referidas ao primário com uma parcela RL em paralelo com um banco de capacitores para a devida correção do fator de potência de 0,75 para 0,92. Os demais transformadores de distribuição compreendem somente cargas RL referidas ao primário, considerando-se um fator de potência geral de 0,9538. Os conjuntos formados pelos transformadores 1 e 2 (T1 e T2), 4, 5, 6 e 7 (T4, T5, T6 e T7), 8, 9, e 10 (T8, T9 e T10), 11, 12 e 14 (T11, T12 e T14) foram representados somente por cargas equivalentes, cujo ponto de conexão com o sistema é como indicado na Figura 5.

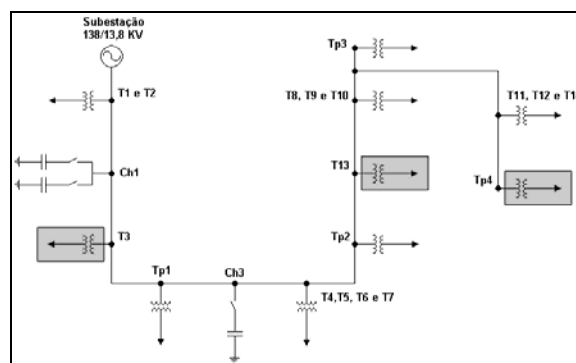


Figura 5. Diagrama do sistema elétrico de distribuição analisado.

Além destes, três bancos de capacitores (um de 1200 kVAr e dois de 600 kVAr cada) estão instalados ao longo do sistema (BC 1, 2 e 3). O alimentador principal é constituído por cabo nu CA-477 MCM em estrutura aérea convencional, e seus trechos são representados por elementos RL acoplados.

Para a geração de um conjunto de casos abrangendo as diferentes situações que podem ocorrer no sistema, faltas e chaveamento dos bancos de capacitores foram simulados em diversos pontos do sistema sob condições variadas, utilizando-se do *software* ATP com uma frequência de amostragem de 7,68 kHz. Desta forma obteve-se um conjunto de testes formado por 90 distintas situações. Destas, 32 situações referem-se a afundamentos de tensão (0,1 a 0,85 p.u.), 26 a elevações de tensão (0,1 a 0,69 p.u.), 8 a interrupções de energia, 12 a ruídos e 12 a oscilações transitórias devido ao chaveamento de determinados bancos de capacitores.

#### 4.0 ANÁLISE AUTOMÁTICA DOS DISTÚRBIOS

Na seqüência, os passos que tornaram possível a implementação computacional das tarefas de detecção, localização e classificação dos fenômenos anteriormente caracterizados serão apresentados.

##### 4.1 Detecção e localização do distúrbio

Para a detecção do distúrbio foi considerado o janelamento dos sinais em distúrbio e em regime, utilizando-se janelas de um ciclo, com passos de deslocamento de meio ciclo, conforme ilustra a Figura 6. Nestas janelas, houve a comparação entre as amplitudes de cada amostra, referente a cada janela de ambos os sinais sob análise, de maneira a acusar o início de qualquer distúrbio quando da diferença entre essas amostras superior a um determinado limiar. Assim, pela lógica implementada, o evento é detectado e localizado no tempo e, automaticamente, a função de classificar o ocorrido é ativada.

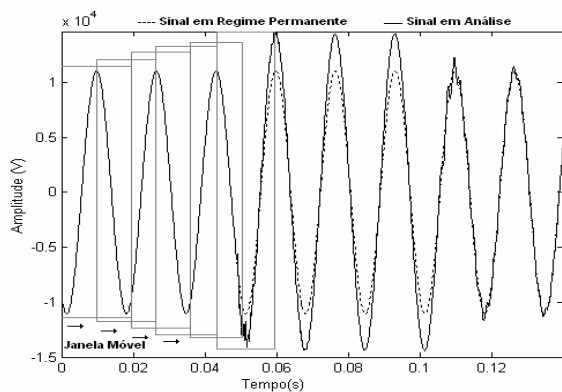


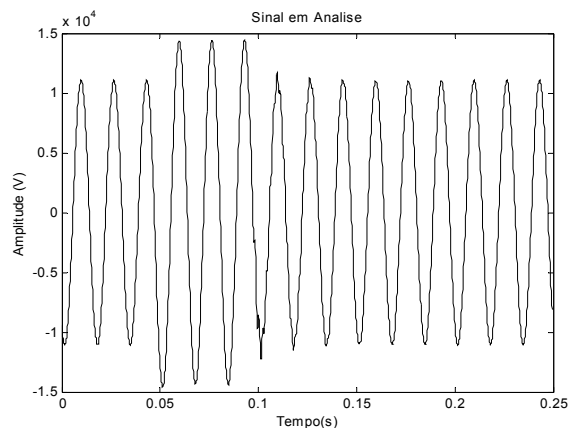
Figura 6. Janelamento dos sinais de análise e em regime.

##### 4.2 Classificação dos distúrbios

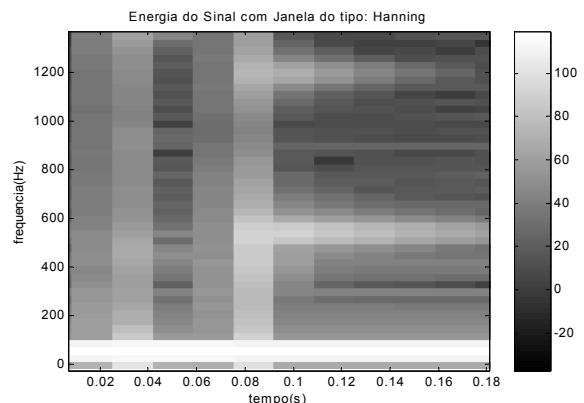
A classificação é realizada por meio da TFJ com a utilização das três janelas citadas anteriormente. O sinal analisado corresponde a janelas de 2 ciclos de duração com passos de movimentação de 1 ciclo. Os mesmos foram avaliados por meio da função *specgram*, utilizando-se do *software* Matlab. A Figura 7 ilustra esse conceito, utilizando, por exemplo, a janela de Hanning para analisar uma elevação de tensão de 30 %.

Percebe-se na Figura 7(b), de acordo com a barra de tons cinza situada ao lado desta, que o tom cinza mais claro representa uma maior concentração de energia, enquanto, o tom cinza mais escuro, uma menor presença de energia nas devidas faixas de frequência correspondentes.

De acordo com exposto acima, observa-se que uma maior concentração de energia é vista na faixa de frequência do sistema (60 Hz), na horizontal, e outras na vertical, as quais indicam os prováveis tempos de início e fim do distúrbio. Em outras faixas essa energia é significativamente diminuída, mostrando assim, uma interpretação coerente ao conteúdo espectral de tal afundamento.



(a)



(b)

Figura 7. (a) Elevação de Tensão de 30% (b) Espectrograma de tal Elevação utilizando a janela de Hanning.

Uma análise espectral para uma elevação de tensão de 30% é ilustrada na Figura 8, onde são consideradas as componentes harmônicas até a 50ª ordem. Tais componentes, extraídas do espectrograma ilustrado na Figura 7(b), são normalizadas em relação à magnitude da frequência fundamental. As informações obtidas desse processo, quando comparadas a um sinal em regime permanente, permitem a caracterização do distúrbio em análise.

Na classificação das elevações, afundamentos e interrupções de tensão, as harmônicas da 2ª a 50ª ordem possuem amplitudes desprezíveis, como evidencia a Figura 8, e amplitude diferenciada apenas em relação à componente fundamental.

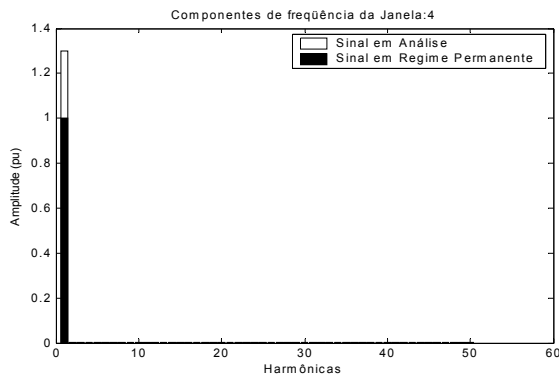


Figura 8. Análise espectral para uma elevação de tensão de 30%.

Com base no sistema elétrico em análise e como também observado por SANTOS, C.J. et al. (2002), significantes componentes harmônicas de 7<sup>a</sup> e 8<sup>a</sup> ordem (420 e 480 Hz) foram observadas quando da situação de chaveamento de bancos de capacitores. Sendo assim, este fato foi empregado para acusar e classificar certos eventos como transitórios oscilatórios de baixa frequência.

Para a situação de ruído superposto ao sinal em análise, foi convencionado que, se pelo menos 45 destas componentes de frequências forem maiores que zero e menores que um dado limiar, está condição, determinada de forma empírica, bastaria para classificá-lo como tal.

### 4.3. Estimação da duração dos distúrbios

Esta seção trata da estimativa da duração de distúrbios como afundamentos, elevações e interrupções de tensão.

Após a detecção e localização do início do distúrbio e, conseqüentemente da classificação do mesmo, tem-se a informação da janela a qual contém o início do distúrbio, como por exemplo, a janela 1 ilustrada na Figura 9. Sobre a janela de detecção formada por um ciclo do sinal em análise e, com um deslocamento de mesma proporção, a lógica implementada foi direcionada a determinar a duração do distúrbio sobre o sistema.

A partir da janela 1, é feita uma comparação entre a amplitude desta com uma janela subsequente, neste exemplo, com a janela 2, para indicar se há ou não uma diferença significativa entre ambas. Quando da diferença maior que um determinado limiar o fim do distúrbio é acusado, como pode ser constatado na análise entre as janelas 4 e 3, Figura 9.

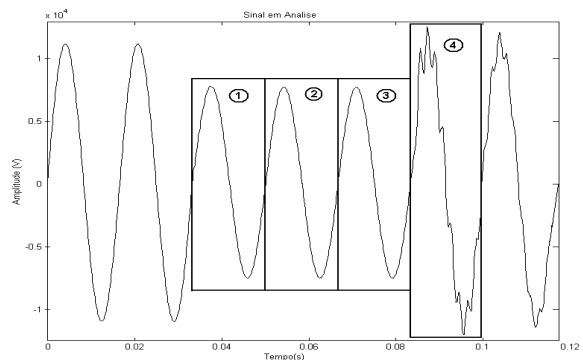


Figura 9. Ilustração do processo de detecção do fim do distúrbio.

## 5.0 RESULTADOS OBTIDOS DA APLICAÇÃO DO ALGORÍTMO PROPOSTO

Todos os 90 casos gerados, caracterizando cinco tipos de distúrbios relacionados a QEE, foram submetidos à análise do algoritmo implementado para validação da metodologia apresentada.

### 5.1 Detecção e localização dos distúrbios

A Tabela 1 ilustra os instantes iniciais de tais fenômenos, estimados pela técnica apresentada. Ressaltam-se os baixos erros encontrados com relação ao início real dos distúrbios.

Tabela 1. Tempos de detecção inicial dos distúrbios.

	Ângulo de Inserção (°)	Início Real do Distúrbio (s)	Localização do Distúrbio (s)	Erro Encontrado (%)
Elevação de Tensão	0	0,0454	0,0456	0,02
	90	0,0488	0,0489	0,01
Afundamento de Tensão	0	0,0445	0,0447	0,02
	90	0,0485	0,0489	0,04
Interrupção de Tensão	0	0,0445	0,0447	0,02
	90	0,0485	0,0489	0,04
Transitório Oscilatório	0	0,0446	0,0447	0,01
	90	0,0488	0,0489	0,01
Ruídos		0,0649	0,0650	0,01

### 5.2 Classificação e estimativa dos distúrbios

Todos os casos de elevações, afundamentos e interrupções de tensão, apresentados à lógica, foram corretamente classificados através da aplicação da TFJ. A Tabela 2, mostra a média dos erros através da comparação entre os tipos de janelas empregadas e os distúrbios analisados.

As Tabelas 3, 4 e 5 ilustram os ângulos de incidência da falta considerados (0° ou 90°), as magnitudes obtidas de tais situações pelo emprego da janela de Hanning e a duração dos mesmos estimados pelo algoritmo, bem como os erros percentuais levantados para alguns dos casos avaliados.

Tabela 2. Erros médios obtidos através da análise Janelas versus Distúrbios.

	Média dos Erros Referente aos Distúrbios (%)		
	Elevações de Tensão	Afundamentos de Tensão	Interrupções de Tensão
Janela Retangular	1,2366	0,9701	0,2294
Janela de Hanning	1,1585	1,0199	0,3175
Janela de Kaiser	1,2353	0,9522	0,2300

Tabela 3. Amplitudes estimadas dos respectivos espectrogramas para os casos de interrupção de tensão.

Casos	Ângulo de Inserção (°)	Interrupção de Tensão (%)	Janela de Hanning (%)	Duração Estimada pelo Algoritmo (s)	Erro de Duração (%)
1.	0	92	91,9734	0,0516	3,10
2.	0	94	93,4015	0,0517	3,29
3.	0	96	95,5982	0,0517	3,29
4.	0	99	98,4823	0,0511	2,15
5.	90	92	92,4568	0,0539	7,24
6.	90	94	93,8917	0,0545	8,26
7.	90	96	96,1116	0,0553	9,58
8.	90	99	99,2029	0,0559	10,55

Tabela 4. Amplitudes estimadas dos respectivos espectrogramas para os casos de elevação de tensão.

Casos	Ângulo de Inserção (°)	Elevação de Tensão (%)	Janela de Hanning (%)	Duração Estimada pelo Algoritmo (s)	Erro de Duração (%)
1.	0	10	10,2450	0,0514	2,72
2.	0	20	19,8694	0,0524	4,58
3.	0	30	30,0578	0,053	5,66
4.	0	40	40,0251	0,0523	4,40
5.	0	50	50,0222	0,0514	2,72
6.	0	69	68,8696	0,0517	3,29
7.	90	10	10,2386	0,0555	9,91
8.	90	20	19,8989	0,0567	11,82
9.	90	30	30,0817	0,0573	12,74
10.	90	40	40,0838	0,0564	11,35
11.	90	50	50,1080	0,0555	9,91
12.	90	60	56,0732	0,0569	12,13
13.	90	69	68,9543	0,0559	10,55

Tabela 5. Amplitudes estimadas dos respectivos espectrogramas para os casos de afundamento de tensão.

Casos	Ângulo de Inserção (°)	Afundamento de Tensão (%)	Janela de Hanning (%)	Duração Estimada pelo Algoritmo (s)	Erro de Duração (%)
1.	0	10	9,9422	0,0508	1,57
2.	0	20	19,8041	0,051	1,96
3.	0	31	30,7632	0,0515	2,91
4.	0	40	40,6471	0,0519	3,66
5.	0	50	49,6228	0,0512	2,34
6.	0	60	59,6506	0,0515	2,91
7.	0	70	69,9298	0,0514	2,72
8.	0	80	79,8416	0,0515	2,91
9.	0	85	85,7473	0,0516	3,10
10.	90	10	9,94160	0,055	9,09
11.	90	20	20,1300	0,0551	9,26
12.	90	31	31,1318	0,0558	10,39
13.	90	40	41,0187	0,056	10,71
14.	90	50	50,1760	0,0555	9,91
15.	90	60	60,2416	0,0556	10,07
16.	90	70	69,9547	0,0555	9,91
17.	90	80	79,8809	0,0556	10,07
18.	90	85	85,7883	0,0558	10,39

Todos os casos de transitórios oscilatórios e ruídos foram corretamente classificados, seguindo a metodologia apresentada na seção 4.2.

## 6.0 CONCLUSÕES

Esta pesquisa apresentou um estudo da Transformada de Fourier Janelada aplicada à QE.

O algoritmo desenvolvido permitiu uma correta diferenciação entre os tipos de distúrbios apresentados, com um índice de acerto de 100%. Já para a estimação da duração dos distúrbios, este apresentou erros esporádicos próximos a 12%.

Pelos resultados obtidos, pôde-se constatar a aplicabilidade da TFJ na análise da avaliação de distúrbios relacionados à QE.

## 7.0 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos-USP pelas facilidades proporcionadas quando do desenvolvimento deste trabalho, bem como ao apoio financeiro recebido por parte da CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

## 8.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (2000), “Resolução N.º 24”.
- [2] DUGAN, R.C. et al. (1996). *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill.
- [3] GU, Y.H.; BOLLEN, M.H.J.(2000). *Time-Frequency and Time-Scale Domain Analysis of Voltage Disturbances*. Power Delivery, IEEE Transactions on, Volume: 15 Issue: 4, Oct.
- [4] HENSLEY, G. et al. (1999). *Applications of the windowed FFT to electric power quality assessment*. Power Delivery, IEEE Transactions on Volume: 14 Issue: 4, Oct.
- [5] HUANG S. J. et al. (1998). *Application of Wavelets to Classify Power System Disturbances*. Electric Power Systems Research, 47 Feb.:87-93.
- [6] KEVIN GARD, (1997). *FFT Windows for Intermodulation Analysis of Microwave Circuits From Transient Simulation*. IEEE MTT-S International, Vol. 3, 8-13, Jun.
- [7] KIM, C.H.; AGGARWAL, R. (2000). *Wavelet transforms in power systems*. Power Engineering Journal Apr.:81-87.
- [8] MICHELIN, C. (1998). *Transformada de Fourier e Transformada de Fourier Rápida*. Ribeirão Preto. 125 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo.
- [9] SANTOS, C.J.; COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; ARRUDA, E. F. (2002). *Transitórios Devidos ao Restabelecimento de Alimentadores num Sistema Elétrico de Distribuição na Presença de Bancos de Capacitores Fixos Instalados em Derivação*. XV SENDI. Salvador, Bahia.
- [10] YEHIA H. C.; VIEIRA M. N. (2002). *Processamento de Sinais em Engenharia de Áudio*. Anais do Primeiro Seminário Brasileiro de Engenharia de Áudio. Belo Horizonte.