

MARCOS ROGÉRIO CÂNDIDO

APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA WAVELET
NA ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA
EM FORNOS ELÉTRICOS A ARCO

São Paulo
2008

MARCOS ROGÉRIO CÂNDIDO

APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA WAVELET
NA ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA
EM FORNOS ELÉTRICOS A ARCO

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Engenharia.

Área de concentração:
Sistemas de Potência

Orientador: Prof. Dr. Luiz Cera Zanetta Jr.

São Paulo
2008

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 06 de dezembro de 2008.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Cândido, Marcos Rogério

Aplicação da transformada wavelet na análise da qualidade de energia em fornos elétricos a arco / M.R. Cândido. -- ed.rev. -- São Paulo, 2008.

151 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Forno elétrico 2.Energia (Qualidade) 3.Análise de ondaletas-wavelets (Análise de séries temporais) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Francisco e Geralda,
por tudo o que fizeram e fazem por mim.

AGRADECIMENTOS

Aos professores Dr. Luiz Cera Zanetta Jr. e Dr. Carlos Eduardo de Moraes Pereira, pela dedicação, orientação e paciência ao longo do desenvolvimento dessa tese.

Ao amigo Jefferson Monteiro de Paula, pela dedicação no processo de elaboração e simulação do algoritmo.

Aos diretores e gerentes da Votorantim Metais e Votorantim Química pelo incentivo constante para a conclusão deste trabalho, cabe destacar os srs. Luis Carlos Mendes de Brito - Gerente de Operações da Votorantim Química - e José Milton Júnior - Gerente da Laminação à Quente da Siderúrgica Barra Mansa.

As demais pessoas que contribuíram, acreditando e incentivando nos momentos mais difíceis.

“Nunca deixe que lhe digam
que não vale a pena acreditar no
sonho que se tem”
(Trecho da música “Mais uma vez”
de Renato Russo e Flávio Venturini)

RESUMO

Neste trabalho, desenvolveu-se um novo método para a detecção e classificação dos distúrbios que afetam a qualidade de energia elétrica em sistemas elétricos industriais na presença de fornos elétricos a arco. Durante o processo de fusão dos fornos elétricos a arco, ocorrem diversos eventos que afetam o sistema elétrico ao qual estão inseridos, tendo como características: forma de onda do sinal de corrente altamente desequilibradas e com grande distorção devido aos harmônicos, efeitos de cintilação; bem como afundamento e elevação nos sinais de tensão. O método ora proposto foi aplicado a sinais reais, permitindo a detecção e classificação dos distúrbios múltiplos na forma de onda do sinal de tensão, proveniente da operação dos fornos elétricos a arco. Para tal, foi usada como base do algoritmo, uma técnica baseada na Transformada Wavelet, aplicada aos sinais não-estacionários de uma instalação industrial com três fornos elétricos a arco.

Palavras-chave: Wavelet. Distúrbios múltiplos. Qualidade de energia. Fornos elétricos a arco.

ABSTRACT

A new method for the detection and classification of the disturbances that affect the electric power quality in industrial electric systems with electric arc furnaces was developed in this work. During the fusion process of the electric arc furnaces, may occur several events that affect the electric system to which it is inserted may occur, having as characteristic: waveform of the signal of current highly unbalanced and with great distortion due to the harmonic, scintillation effects; as well as sag and swell in the voltage signals. The method proposed was applied to real signals, allowing the detection and classification of the multiple disturbances in the waveform of the voltage signal originating from the operation of the electric arc furnace. For this purpose, a technique based on Wavelet Transform will be used and applied to the not-stationary signals of an industrial installation with three electric arc furnaces.

Keywords: Wavelet. Multiple disturbances. Power quality. Electric arc furnace.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Sistema elétrico industrial com 3 fornos a arco.....	24
Figura 2.2 - Potência de entrada do forno durante uma corrida.....	25
Figura 2.3 - Forma de onda da tensão de um forno elétrico a arco.....	26
Figura 2.4 - Corrente e tensão teórica durante o processo de estabelecimento do arco elétrico em um sistema de 60 Hz	27
Figura 2.5 - Sistema de controle de eletrodos.....	29
Figura 2.6 - Curvas de corrente e tensão de um forno a arco com transformador para dois <i>tap</i> 's distintos e dois fatores de potência	30
Figura 2.7 - Visualização dos eletrodos e formação do arco elétrico	31
Figura 2.8 - Tipos de arco elétrico.....	32
Figura 2.9 - Característica do comprimento do arco em função da corrente e da tensão.....	33
Figura 2.10 - Circuito simplificado para mostrar o comportamento qualitativo do sistema	34
Figura 2.11 - Característica $FP = f(a)$	36
Figura 2.12 - Tensões, correntes e potências ativa e reativa instantâneas com arco puramente resistivo	37
Figura 2.13 - Ciclogramas obtidos das medições de campo para alguns ciclos	38
Figura 2.14 - Comportamento do arco elétrico com três segmentos de reta.....	39
Figura 2.15 - Característica não linear do arco conforme Ozgun e Abur (1999)	39
Figura 2.16 - Tensão de arco	41
Figura 2.17 - Corrente de arco	41
Figura 2.18 - Curva de carga para o FEA1 com circuito equilibrado com o reator $L3$	44
Figura 2.19 - Curva de carga para o FEA1 com circuito equilibrado sem o reator	46
Figura 2.20 - Curva de carga do forno em função da indutância do reator, de fase fusão e corrente mínima de 38 kA	47
Figura 2.21 - Forma de onda da tensão em função do tempo no FEA1	48
Figura 2.22 - Forma de onda da tensão em função do tempo no FEA1	49
Figura 2.23 - Forma de onda da tensão em função do tempo no FEA1	49

Figura 2.24 - Forma de onda da tensão em função do tempo no FEA1	50
Figura 2.25 - Corrente de arco	50
Figura 2.26 - Conteúdo harmônico fase a	51
Figura 2.27 - Comportamento da tensão, corrente e potências instantâneas do arco elétrico.....	56
Figura 2.28 - Potências ativa, reativa e aparente das componentes harmônicas	58
Figura 2.29 - Medições de tensão, corrente e variação de potências instantâneas ..	59
Figura 2.30 - Potências ativa, reativa e aparente das componentes harmônicas de tensão e corrente	61
Figura 3.1 - Exemplos de plano tempo-frequência (Fourier X Wavelet)	67
Figura 3.2 - Exemplo de Wavelet Haar.	69
Figura 3.3 - Exemplos de Wavelets Daubechies.....	70
Figura 3.4 - Forma de onda com distúrbio do tipo afundamento e elevação.....	71
Figura 3.5 - Algoritmo completo de identificação e classificação de distúrbios múltiplos	72
Figura 3.6 - Identificação da fase do sinal de referência através da aplicação do método dos mínimos quadrados	75
Figura 3.7 - Determinação da amplitude do sinal de referência através do cálculo do valor eficaz do sinal real.....	75
Figura 3.8 - Aspecto dos sinais real e de referência	76
Figura 3.9 - Coeficientes Wavelet de primeira ordem	77
Figura 3.10 - Energia dos coeficientes Wavelet de primeira ordem	77
Figura 3.11 - Indicação do instante de início da montagem de vetores	78
Figura 3.12.a - Coeficientes de detalhamento 1, 2, 3 e 4.....	79
Figura 3.12.b - Coeficientes de detalhamento 5, 6, 7 e 8.....	80
Figura 3.12.c - Coeficientes de detalhamento 9, 10, 11 e 12	80
Figura 3.13 - Energia dos 12 níveis de detalhamento dos sinais real e de referência	81
Figura 3.14 - Diferença percentual de energia entre os diversos níveis de detalhamento (real x referência)	82
Figura 3.15 - Afundamento teórico e identificação do instante de ocorrência	83

Figura 3.16 - Espectro da diferença de energia para o início e término do afundamento teórico.....	83
Figura 3.17 - Elevação teórica e identificação do instante de ocorrência.....	84
Figura 3.18 - Espectro de diferença energia para uma elevação teórica	85
Figura 3.19 - “ <i>Notching</i> ” teórico e identificação do instante de ocorrência	86
Figura 3.20 - Espectro da diferença de energia para um “ <i>notching</i> ” teórico.....	86
Figura 3.21 - “ <i>Spike</i> ” teórico e identificação do instante de ocorrência	87
Figura 3.22 - Espectro de energia para um “ <i>spike</i> ” teórico	88
Figura 3.23 - Sinal com a presença de afundamento e elevação teóricos	89
Figura 3.24 - Identificação do instante de ocorrência de cada distúrbio.....	89
Figura 3.25 - Espectro da diferença de energia para o afundamento e elevação teóricos	90
Figura 3.26 - Sinal ideal com distúrbios múltiplos e localização dos instantes de ocorrência dos distúrbios	91
Figura 3.27 - Classificação de diversas falhas através da diferença percentual de energia para os diversos níveis de detalhamento Wavelet	91
Figura 3.28 - Distribuição da diferença percentual de energia para o distúrbio teórico	92
Figura 3.29 - Registro do sinal de tensão obtido do forno a arco e o sinal de referência ideal.....	94
Figura 3.30 - Forma de onda em análise e a identificação do instante de ocorrência dos distúrbios múltiplos	95
Figura 3.31 - Forma de onda em análise e a identificação do instante de ocorrência dos distúrbios múltiplos	95
Figura 3.32 - Forma de onda em análise e a identificação do instante de ocorrência dos distúrbios múltiplos	96
Figura 3.33 - Distribuição de energia ao longo dos níveis de detalhamento Wavelet para os distúrbios	97
Figura 3.34 - Distribuição de energia ao longo dos níveis de detalhamento Wavelet para os distúrbios	98
Figura 3.35 - Distribuição de energia ao longo dos níveis de detalhamento Wavelet para os distúrbios	99

Figura 3.36 - Distribuição da diferença percentual de energia total nos diversos níveis de resolução Wavelet	100
Figura 3.37 - Forma de onda em análise com elevação e afundamento, com incremento positivo e negativo na amplitude, e diversos distúrbios ..	101
Figura 3.38 - Distribuição de energia ao longo dos níveis de detalhamento Wavelet para os distúrbios	102
Figura A.1 - Constituição esquemática de um forno elétrico a arco	115
Figura A.2 - Sistema de fixação de eletrodos de um forno elétrico a arco	117
Figura A.3 - Vista de um forno elétrico a arco industrial.....	117
Figura A.4 - Fluxograma do processo siderúrgico de uma usina integrada.....	120
Figura A.5 - Fluxo indicativo de usina integrada a coque (esquerda) e de uma usina semi-integrada (direita).....	121
Figura A.6 - Produção x consumo na aciaria elétrica da Siderúrgica Barra Mansa	123
Figura A.7 - Produção x consumo anual na aciaria elétrica da Siderúrgica Barra Mansa	124
Figura A.8 - Produção x consumo na laminação a quente de aço longo na Siderúrgica Barra Mansa	125
Figura A.9 - Produção x consumo anual na laminação a quente de aço longo na Siderúrgica Barra Mansa	126
Figura A.10 - Consumo médio anual das principais áreas na produção, refino e laminação de aço na Siderúrgica Barra Mansa	126
Figura B.1 - Diagrama unifilar para a operação do forno em regime permanente a 60 Hz.....	129
Figura B.2 - Circuito equivalente em pu para os três transformadores de 131 / 23 kV	131
Figura B.3 - Circuito equivalente na condição de máxima corrente	133
Figura D.1 - Relação da variação da tensão e freqüência aplicada a lâmpadas incandescentes	148

Figura D.2 - Forma de onda típica quando ocorre flutuação de tensão ($F=50\text{ Hz}$) . 149

Figura D.3 - Variação da Tensão em função da frequência para lâmpadas
incandescentes situadas na faixa de 40 a 100 W para tensões
desde 125 até 225 V 150

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 OBJETIVO GERAL.....	16
1.2 MOTIVAÇÃO	17
1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
1.4 ESTRUTURA DA TESE	20
 2 ANÁLISE DO FORNO ELÉTRICO A ARCO COMO UMA CARGA ESPECIAL.....	 22
2.1 CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS.....	22
2.2 ARCO ELÉTRICO	27
2.2.1 Generalidades	27
2.2.2 Arco elétrico com comportamento resistivo linear.....	34
2.2.3 Comportamento não linear do arco elétrico	37
2.3 OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES OPERATIVAS.....	42
2.4 OSCIOGRAMAS DE TENSÕES E CORRENTES	47
2.5 ANÁLISE DA POTÊNCIA EM CONDIÇÕES DE TENSÕES E CORRENTES DISTORCIDAS	 51
2.6 QUALIDADE DE ENERGIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS	61
2.6.1 Afundamentos (“sag’s”) e elevações de tensão (“swell’s”)	62
2.6.2 Distorção de tensão devido a harmônicos	62
 3 ALGORITMO PARA DETERMINAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE DISTÚRBIOS MÚLTIPLOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS	 66
3.1 TRANSFORMADA WAVELET	66
3.1.1 Introdução às Famílias Wavelet	67
3.1.1.1 Wavelet Haar	69
3.1.1.2 Wavelets Daubechies.....	69

3.2 ANÁLISE DE DISTÚRBIOS MÚLTIPLOS.....	70
3.3 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO DE IDENTIFICAÇÃO DE DISTÚRBIOS MÚLTIPLOS.....	71
3.3.1 Equações utilizadas no desenvolvimento do algoritmo de detecção de distúrbios múltiplos.....	73
3.3.2 Identificação de distúrbios múltiplos - Descrição do algoritmo	74
3.3.3 Classificação dos distúrbios múltiplos.....	79
3.4 ANÁLISE DE DISTÚRBIOS MÚLTIPLOS EM SINAIS IDEALIZADOS.....	82
3.5 CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO DE DISTÚRBIOS MÚLTIPLOS	92
3.6 ANÁLISE DE DISTÚRBIOS MÚLTIPLOS EM UM SISTEMA REAL	94
3.7 VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DO ALGORITMO EM SINAIS DE LONGA DURAÇÃO	100
 4 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS ...	104
 REFERÊNCIAS	107
 APÊNDICE A - FORNOS A ARCO	114
 APÊNDICE B - ANÁLISE DO FORNO ELÉTRICO A ARCO EM REGIME PERMANENTE	129
 APÊNDICE C - DADOS DO SISTEMA ELÉTRICO.....	135
 APÊNDICE D - EFEITO “ <i>FLICKER</i> ” EM FORNOS A ARCO.....	147

