

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**COMPARAÇÃO DE TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE
POTÊNCIA REATIVA SOB CONDIÇÕES NÃO-SENOIDAIIS
COM ÊNFASE NA TRANSFORMADA *WAVELET***

DANIEL VIEIRA

ORIENTADOR: MARCO AURÉLIO GONÇALVES DE OLIVEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PUBLICAÇÃO: PPGENE.DM - 466/2012

BRASÍLIA/DF: MARÇO – 2012

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**COMPARAÇÃO DE TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE
POTÊNCIA REATIVA SOB CONDIÇÕES NÃO-SENOIDAIIS
COM ÊNFASE NA TRANSFORMADA *WAVELET***

DANIEL VIEIRA

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA ELÉTRICA.**

APROVADA POR:

**Prof. Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira, DSc (ENC-UnB)
(Orientador)**

**Prof. Rafael Amaral Shayani
(Examinador Interno)**

**Prof. Ivan Marques de Toledo Camargo
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 09 DE MARÇO DE 2012

FICHA CATALOGRÁFICA

VIEIRA, DANIEL

Comparação de Técnicas de Medição de Potência Reativa sob Condições Não-Senoidais com Ênfase na Transformada Wavelet [Distrito Federal] 2012. xvii, 100p., 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, 2012). Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Medição

2. Energia Reativa

3. Wavelet

4. Fator de Potência

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VIEIRA, D. (2011). Comparação de Técnicas de Medição de Potência Reativa sob Condições Não-Senoidais com Ênfase na Transformada Wavelet Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-466/2012, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 100p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Daniel Vieira.

TÍTULO: Comparação de Técnicas de Medição de Potência Reativa sob Condições Não-Senoidais com Ênfase na Transformada Wavelet

GRAU: Mestre

ANO: 2012

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Daniel Vieira

Brasília –DF –Brasil

RESUMO

COMPARAÇÃO DE TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA SOB CONDIÇÕES NÃO-SENOIDAIIS COM ÊNFASE NA TRANSFORMADA WAVELET

Autor: Daniel Vieira

Orientador: Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, dezembro de 2011

A medição eletrônica de potência em sistemas elétricos nos quais a tensão ou corrente sejam distorcidas pode apresentar sérias discrepâncias entre os valores medidos e aqueles definidos teoricamente. Esse cenário se agrava quando se trata da obtenção dos valores de potência reativa, tanto pelo fato de as definições teóricas ainda não estarem completamente consolidadas, quanto devido à inexatidão dos medidores eletrônicos para exibir valores coerentes com a realidade.

Nesse contexto, este trabalho faz uma análise das técnicas de medição para faturamento de potência reativa em instalações de baixa tensão com grandes distorções harmônicas. Primeiramente, apresentam-se as definições de potência sob condições não-senoidais e os problemas atrelados a essas acepções e, em seguida, são analisados e comparados seis métodos de medição: técnica do triângulo de potências, deslocamento de 90° , integração da tensão, derivação da tensão, transformada de Fourier e, por fim, a transformada *wavelet* para a qual é dada especial atenção.

Utilizando-se algoritmos dessas técnicas de medição implementados computacionalmente, fazem-se simulações de sinais de tensão e corrente com distorções harmônicas. Os resultados revelam que diversas formas de medição apresentam erros grandes quando submetidas a sinais não-senoidais, mesmo nos casos em que a tensão e corrente tenham distorções dentro de valores de referência.

Adicionalmente, realiza-se uma análise de sensibilidade que demonstra que a escolha da técnica de medição mais apropriada depende fortemente da definição de potência reativa. Em especial, conclui-se que a utilização da transformada *wavelet* fornece bons resultados em todos os cenários, com esforço computacional significativamente menor que aquele da tradicional transformada de Fourier. Conclui-se ainda que a utilização do fator de deslocamento como forma de faturamento tem vantagens sobre o uso do fator de potência verdadeiro, visto que se trata de uma grandeza independente das distorções harmônicas na tensão de fornecimento e que pode ser facilmente medida pelo uso de transformadas e também por algumas técnicas simples de medição eletrônica.

ABSTRACT

COMPARISON OF REACTIVE POWER MEASUREMENT TECHNIQUES UNDER NON-SINUSOIDAL CONDITIONS FOCUSED ON WAVELET TRANSFORM

Author: Daniel Vieira

Supervisor: Marco Aurélio Gonçalves de Oliveira

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Brasília, December 2011

This paper analyzes reactive power measurement techniques in low voltage installations with high harmonic distortion levels. First, we present the definitions of power under non-sinusoidal conditions and their outcomes, and then we analyze and compare six different methods of reactive power measurement: power triangle technique, 90° displacement of voltage, voltage integration, voltage differentiation, Fourier transform, and wavelet transform.

By using computationally implemented algorithms, we perform simulations with typical non-sinusoidal voltage and current signals. The results show that several measurement techniques engender large errors when obtaining reactive power in systems with harmonic distortions, even when the voltage and current distortions are within reference values.

Finally, a sensitivity analysis is carried out and helps infer that the appropriate choice of the measurement technique depends strongly on the definition of reactive power (considering all harmonic distortions or only the fundamental component). In particular, we conclude that the use of wavelet transform provides good results in all cases, with significantly less computational effort than that of traditional Fourier transform.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura da dissertação	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Histórico da Regulamentação do Fator de Potência	5
2.2	Experiência Internacional	12
2.2.1	Austrália	13
2.2.2	Holanda	14
2.2.3	França	17
2.2.4	Filipinas	18
2.2.5	Estados Unidos	19
2.2.5.1	Califórnia	20
2.2.5.2	Washington, Oregon e Wyoming (PACIFIC POWER COMPANY, 2010)	20
2.2.5.3	Idaho e Utah (ROCKY MOUNTAIN POWER, 2010)	21
2.3	Definições de Potência	22
2.3.1	Potência Elétrica em condições puramente senoidais (MANGILI JÚNIOR, 1995)	23
2.3.2	Potência Elétrica sob condições não-senoidais	25
2.3.2.1	Definições de Budeanu (LOPES, 1995)	25
2.3.2.2	Definições de Fryze (SUHETT, 2008)	29
2.3.2.3	Definições propostas pela Norma IEEE 1459-2010 (IEEE, 2010)	31
2.3.2.4	Resumo	33
2.4	Definição do fator de potência no Brasil	35
2.4.1	Cálculo por meio das Energias	35
2.4.2	Cálculo por meio das Potências	36
2.5	Considerações Finais	39
3	MEDIÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA E FATOR DE POTÊNCIA	42
3.1	Considerações Iniciais	42

3.2	Técnicas de Medição de Potências	43
3.2.1	Triângulo de Potência (MOULIN, 2002)	43
3.2.2	Deslocamento de 90°	45
3.2.3	Integração do sinal de tensão (CATALIOTTI, COSENTINO e NUCCIO, 2008)	46
3.2.4	Derivação do sinal de tensão (IEEE, 2010)	47
3.2.5	Transformada de Fourier	47
3.2.6	Transformada Wavelet	50
3.2.6.1	Conceitos e aspectos gerais da Transformada Wavelet	50
3.2.6.2	Análise Wavelet	51
3.2.6.3	Definição da Transformada Wavelet (TW)	54
3.2.6.4	Aplicação da Análise Wavelet em Qualidade da Energia Elétrica	58
3.2.6.5	Medição de Potência Ativa, Reativa e Fator de Potência	60
3.3	Implementação de Rotinas para Obtenção da Potência Reativa	62
3.3.1	Taxa de amostragem	63
3.3.2	Sinais de entrada	64
3.3.3	Simulações	68
3.3.4	Procedimentos da análise de sensibilidade	68
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	70
4.1	Análise dos erros de medição	70
4.1.1	Caso 1 ±Residência de consumo médio	70
4.1.2	Caso 2 ±Residência de consumo alto	72
4.1.3	Caso 3 ±Prédio comercial em horário de expediente	73
4.1.4	Caso 4 ±Prédio comercial durante a madrugada	74
4.1.5	Constatações comuns a todos os casos	75
4.2	Análise de sensibilidade	76
4.2.1	Sensibilidade na medição da potência reativa	76
4.2.1.1	Erros em relação a 3s	76
4.2.1.2	Erros em relação a 0	78
4.2.2	Sensibilidade na medição do fator de potência e de deslocamento	79
4.2.2.1	Erros em relação a (@	80
4.2.2.2	Erros em relação a (2	81
4.3	Considerações finais	82
5	CONCLUSÕES	83
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

**APÊNDICE - ALGORITMOS IMPLEMENTADOS PARA OBTENÇÃO DOS
VALORES DE POTÊNCIA REATIVA**

92

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - LIMITES DO FATOR DE POTÊNCIA POR NÍVEL DE TENSÃO DE CONEXÃO ADOTADOS NA AUSTRÁLIA. FONTE: ESC (2008).....	14
TABELA 2.2 ±DEFINIÇÕES DE POTÊNCIA SEGUNDO BUDEANU, FRYZE E NORMA IEEE 1459-2010	34
TABELA 2.3 ±COMPONENTES DE POTÊNCIA NA FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL.....	34
TABELA 2.4 ±EXPRESSÕES UTILIZADAS PARA DETERMINAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA	41
TABELA 3.1 ±FREQUÊNCIA CENTRAL DA WAVELETFMÃE COIF5 EM 5 DIFERENTES NÍVEIS DE DECOMPOSIÇÃO PARA UM SINAL COM TAXA DE AMOSTRAGEM DE 8,4 KHZ	64
TABELA 3.2 ±PERFIL DA CORRENTE UTILIZADA NOS CÁLCULOS DO CASO 1	66
TABELA 3.3 ±PERFIL DA CORRENTE UTILIZADA NOS CÁLCULOS DO CASO 2.....	67
TABELA 3.4 ±PERFIL DA CORRENTE UTILIZADA NOS CÁLCULOS DO CASO 3	67
TABELA 3.5 ±PERFIL DA CORRENTE UTILIZADA NOS CÁLCULOS DO CASO 4.....	67
TABELA 4.1 ±VALORES NA MEDIÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA PARA AS SEIS TÉCNICAS DE MEDIÇÃO ANALISADAS PARA RESIDÊNCIA DE CONSUMO MÉDIO	70
TABELA 4.2 ±ERROS DAS TÉCNICAS DE MEDIÇÃO EM RELAÇÃO À TRANSFORMADA DE FOURIER PARA UNIDADE CONSUMIDORA RESIDENCIAL DE CONSUMO MÉDIO	72
TABELA 4.3 ±ERROS DAS TÉCNICAS DE MEDIÇÃO EM RELAÇÃO À TRANSFORMADA DE FOURIER PARA UNIDADE CONSUMIDORA RESIDENCIAL DE CONSUMO ALTO	73
TABELA 4.4 ±ERROS DAS TÉCNICAS DE MEDIÇÃO EM RELAÇÃO À TRANSFORMADA DE FOURIER PARA PRÉDIO COMERCIAL EM HORÁRIO DE EXPEDIENTE	74
TABELA 4.5 ±ERROS DAS TÉCNICAS DE MEDIÇÃO EM RELAÇÃO À TRANSFORMADA DE FOURIER PARA PRÉDIO COMERCIAL DURANTE A MADRUGADA.....	75

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1	±DISTRIBUIÇÃO DO CONSUMO FINAL DE ENERGIA ELÉTRICA NA DISTRIBUIÇÃO NO BRASIL EM 2009 POR NÍVEL DE TENSÃO. FONTE: (ANEEL, 2010).....	1
FIGURA 3.1	±TRIÂNGULO DE POTÊNCIAS.....	44
FIGURA 3.2	±ALGUNS EXEMPLOS DE WAVELETS-MÃE: (A) HAAR; (B) COIFLETS DE ORDEM 5; (C) DAUBECHIES DE ORDEM 2; (D) DAUBECHIES DE ORDEM 4; (E) BIORTOGONAL 2.4 DE DECOMPOSIÇÃO; (F) BIORTOGONAL 2.4 DE RECONSTRUÇÃO.	54
FIGURA 3.3	±REPRESENTAÇÃO DE UM SINAL EM VÁRIOS NÍVEIS UTILIZANDO A TRANSFORMADA WAVELET....	56
FIGURA 3.4	±ESQUEMA DO PLANO TEMPO VS. FREQUÊNCIA PARA (A) SFTF E (B) TW	58
FIGURA 3.5	±EXEMPLO DE DISTÚRBIOS ELÉTRICOS NO PLANO TEMPO VS. FREQUÊNCIA PARA (A) SFTF E (B) TW	59
FIGURA 3.6	- FORMA DE ONDA DA TENSÃO UTILIZADA NAS SIMULAÇÕES	66
FIGURA 4.1	±ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO ERRO DE MEDIÇÃO DAS TÉCNICAS ANALISADAS EM RELAÇÃO A SQUANTO À VARIAÇÃO DA THD DE TENSÃO.	77
FIGURA 4.2	±ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO ERRO DE MEDIÇÃO DAS TÉCNICAS ANALISADAS EM RELAÇÃO A SQUANTO À VARIAÇÃO DA THD DE TENSÃO.	78
FIGURA 4.3	±VARIAÇÃO DO (2E (@OM O AUMENTO DA DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DA TENSÃO.	79
FIGURA 4.4	±ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO ERRO DE MEDIÇÃO DAS TÉCNICAS ANALISADAS EM RELAÇÃO A (@QUANTO À VARIAÇÃO DA THD DE TENSÃO.....	80
FIGURA 4.5	±ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO ERRO DE MEDIÇÃO DAS TÉCNICAS ANALISADAS EM RELAÇÃO A (2QUANTO À VARIAÇÃO DA THD DE TENSÃO.....	81

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
Coif	- Wavelet mãe da família das Coiflets
DNAEE	- Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
THD	- Distorção Harmônica Total (do inglês, Total Harmonic Distortion)
IEC	- Comissão Eletrotécnica International (do inglês, International Electrotechnical Commission)
IEEE	- Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (do inglês, Institute of Electrical and Electronics Engineers)
Fd	- Fator de Deslocamento
FP	- Fator de Potência
0	- Potência não-ativa
PRODIST	- Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
3	- Potência reativa
3 ₅	- Potência reativa resultante da tensão e corrente na frequência fundamental da rede elétrica (60 Hz)
3 _B	- Potência reativa definida por Budeanu
3 _F	- Potência reativa definida por Fryze
TF	- Transformada de Fourier
THDV	- Distorção Harmônica Total da Tensão (do inglês, Total Harmonic Distortion of Voltage)
TW	- Transformada Wavelet
ψ ; T;	- Função Escala
W; T;	- Função Wavelet
ψ^j	- Coeficientes escala no nível de resolução F
ψ^j	- Coeficientes wavelet no nível de resolução F

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

O transporte da energia elétrica representa mais de 30% do custo total para os consumidores finais (ANEEL, 2011). Assim, um sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica robusto e eficiente, com controle efetivo da potência reativa que flui nas redes, leva à diminuição de perdas e aumento da capacidade de transporte de energia, reduzindo custos e favorecendo o desenvolvimento do país.

Tendo em vista que a maior parcela do consumo de energia elétrica se concentra em unidades consumidoras conectadas em redes de distribuição de baixa tensão (Figura 1.1), é importante que a análise do fluxo de potência reativa leve em consideração as particularidades desse nível de tensão.

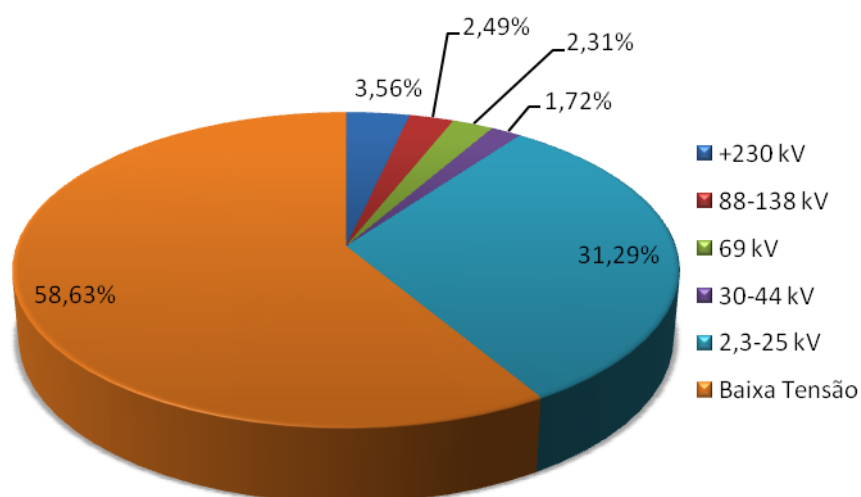


Figura 1.1 ±Distribuição do consumo final de energia elétrica na distribuição no Brasil em 2009 por nível de tensão. Fonte: (ANEEL, 2010)

Quase 80% do consumo na baixa tensão é referente a unidades consumidoras residenciais e comerciais (ANEEL, 2010). Esse tipo de consumidor tem como característica típica o

vasto uso de equipamentos eletrônicos, tais como computadores, lâmpadas com reatores, televisores, equipamentos de refrigeração com microcontroladores, etc (ELETROBRAS, 2008). Essas cargas, por serem altamente não-lineares, produzem correntes harmônicas elevadas que, associadas a níveis de distorção harmônica da tensão que em geral não são negligenciáveis (GRANDI e CARNEIRO, 2009), podem gerar erros na medição de energia reativa pelos medidores de energia elétrica (VELASCO, 2007).

Assim, distorções harmônicas em redes típicas de baixa tensão devem ser minuciosamente avaliadas, de modo a se estabelecer seu impacto nas medições de energia reativa para que então sejam estudadas as alternativas de ação para melhoria dessas redes.

1.2 OBJETIVOS

Para melhor utilizar as redes de transporte de energia elétrica e evitar perdas por causa da circulação de corrente reativa, é imperioso gerenciar melhor o fator de potência nas redes de baixa tensão. Esse controle pode levar a ganhos com redução da expansão da geração (devido à melhor utilização da energia gerada, pela redução das perdas) e de investimentos em redes, levando a maior eficiência energética e menores custos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

Entretanto, esse controle da potência reativa que flui nas redes elétricas não pode simplesmente se dar pelo estabelecimento de limites mais rigorosos de fator de potência, sem antes entender as características da energia reativa que flui nas redes com cargas não-lineares. Trata-se de uma tarefa desafiadora, visto que não há no mundo uma definição única da potência reativa sob condições não-senoidais que possa ser utilizada para fins de faturamento (IEEE, 2010).

Nesse contexto, o presente trabalho se propõe a aglutinar as informações referentes à potência reativa e fator de potência de modo que se possa melhor entender essas grandezas e, a partir daí, apresentar as definições hoje existentes, bem como as formas de medição atualmente utilizadas. Em seguida, essas metodologias são aplicadas a casos simulados de forma a compará-las, estabelecendo-se as vantagens e desvantagens de cada uma e

apontando quais poderiam ser as melhores definições para efeitos de regulamentação e utilização prática.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para atingir tais objetivos, a dissertação é composta da presente Introdução, juntamente com quatro outros capítulos.

O Capítulo 2 se inicia com um relato de como se desenvolveu a regulamentação acerca do fator de potência e cobrança do excedente de reativos no Brasil, complementando com a experiência internacional em alguns países específicos. Em seguida, apresentam-se as principais definições de potência reativa sob condições não-senoidais discutidas atualmente: definições de Budeanu, de Fryze e da norma IEEE 1459-2010. Esse capítulo termina com uma análise de como a regulamentação brasileira se adere às definições teóricas.

Com o intuito de medir apropriadamente a potência reativa, os medidores eletrônicos utilizam técnicas estabelecidas para regime puramente senoidal que variam de acordo com o fabricante e com o modelo do equipamento. Assim, o Capítulo 3 mostra as principais técnicas de medição de potência reativa utilizadas em medidores eletrônicos, dispõe sobre seu comportamento sob condições não-senoidais, apresenta a forma de implementação computacional de cada uma dessas técnicas e mostra como foram obtidas as rotinas para realização dos estudos. Tendo em vista que a técnica de medição que utiliza a transformada wavelet ainda é incipiente e não há descrição detalhada do processo na literatura nacional, boa parte do Capítulo foi reservada para a devida explicação desse método.

Os algoritmos desenvolvidos são utilizados para obtenção dos valores de potência reativa medidos por cada uma das técnicas explicadas no Capítulo 3 e os resultados são apresentados no Capítulo 4. Essa parte da dissertação mostra os resultados obtidos para valores de tensão com distorção harmônica típicos no Brasil e correntes provenientes de medições de trabalhos de outros autores em quatro diferentes unidades consumidoras. São analisados os erros de medição de cada técnica e, em seguida, uma análise de sensibilidade

permite avaliar quais os impactos das distorções harmônicas da tensão nos erros de medição de potência reativa em cada caso estudado.

Finalmente, o Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas dos estudos, esboçando quais são as melhores técnicas de medição de energia reativa para cada tipo de aplicação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRICO DA REGULAMENTAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

A regulamentação do fator de potência no Brasil, em nível federal, remonta à década de 1960, mais precisamente, a partir do Decreto nº. 59.414, de 25 de outubro de 1966 (BRASIL, 1966). Antes dessa data, havia apenas algumas alusões em normas e portarias genéricas. O referido Decreto dividiu os consumidores em três classes distintas: os de

Nesse contexto, o decreto determinou que os consumidores de todas as classes deveriam manter o fator de potência o mais próximo possível da unidade, estabelecendo limites a partir dos quais seria aplicado um multiplicador à fatura de energia ativa daqueles consumidores de forma a penalizá-los pelo excedente de energia reativa indutiva. Esses limites foram estabelecidos em 0,90 para consumidores do Serviço de Transmissão e 0,85 para os demais consumidores. Cabe destacar que não se considerava a energia reativa capacitiva fornecida pelas unidades consumidoras como um problema, sendo os limites do fator de potência estabelecidos apenas para energia reativa indutiva absorvida. Além disso, o limite era aplicado para o valor médio do fator de potência, verificado ao longo do mês. Assim, caso o FP ficasse abaixo do limite, o faturamento resultante era multiplicado pelo FP de referência (0,90 ou 0,85) e esse produto era dividido pelo FP efetivamente verificado.

A norma em questão estabeleceu ainda que a medição para esse tipo de faturamento poderia ser de caráter permanente ou transitório, entretanto não dava maiores explicações acerca de quais deveriam ser os parâmetros a serem considerados na medição transitória (tempo mínimo de medição, frequência de medição, etc.), nem expunha de maneira clara como deveria ser calculado o fator de potência. Evidentemente, as questões relativas à qualidade da energia elétrica eram, naquela época, muito incipientes, podendo-se inferir que o FP ao qual se refere o Decreto seria o cosseno do ângulo de defasagem entre a tensão e corrente na frequência fundamental da rede.

Alguns meses mais tarde, em agosto de 1967, o Decreto nº. 61.137 (BRASIL, 1967) alterou a parte relativa ao controle do fator de potência do Decreto nº. 59.414. Essa nova redação excluiu a possibilidade de as concessionárias faturarem consumidores residenciais de baixa tensão pelo baixo FP e estabeleceu limite único de 0,85 para os demais consumidores.

No ano seguinte, o Decreto nº. 62.724 (BRASIL, 1968) extinguiu a classificação das unidades consumidoras em Serviço de Transmissão, Primário e Secundário e reclassificou-as em:

- x Grupo A: consumidores ligados em tensão igual o superior a 2,3kV; e
- x Grupo B: consumidores ligados em tensão inferior a 2,3kV.

Esse Decreto modificou novamente a regulamentação do FP, incluindo as unidades consumidoras residenciais ligadas na baixa tensão no rol dos consumidores que poderiam ser taxados caso o FP verificado fosse menor que 0,85.

Em 1975, o Decreto nº. 75.887 (BRASIL, 1975) aumentou o valor que deveria ser pago caso os limites não fossem respeitados, de modo que, para FP verificado menor que 0,85, o faturamento resultante deveria ser multiplicado por 0,858 (ao invés de 0,85, como era até 1975) e esse produto dividido pelo FP verificado.

Além disso, esse Decreto excluiu da redação contida no Decreto anterior a parte relativa à medição poder ser em caráter transitório ou permanente. Contudo, uma Portaria do Ministério de Minas e Energia do mesmo ano já determinava que a medição deveria ser permanente para consumidores do Grupo A e que, para as unidades consumidoras do Grupo B, poderia ser feita a medição transitória, desde que respeitado o período mínimo de 72 horas consecutivas de medição. Essa medição transitória poderia ser utilizada para faturamento dos meses subsequentes até que o consumidor comunicasse ter modificado seu FP.

Alguns anos mais tarde, o Decreto nº. 86.463 (BRASIL, 1981) trouxe nova redação para a regulamentação do fator de potência então existente, estabelecendo que o limite

continuará em 0,85, mas dando ao DNAEE a prerrogativa de determinar como seria calculado o acréscimo na fatura de energia elétrica devido ao baixo FP. Dessa forma, a Portaria DNAEE nº. 095 (DNAEE, 1981) instituiu as equações para o cálculo do ajuste na fatura de energia quando o FP verificado em determinada unidade consumidora fosse menor que 0,85, conforme segue:

$$A_j = \left[\frac{D_m \cdot T_d}{C_m \cdot T_c} \cdot F_p - 0,85 \right] \cdot F_{sp} \quad \text{Eq. 2.1}$$

Onde:

A_j = valor do ajuste;

D_m = demanda medida;

T_d = tarifa de demanda;

C_m = consumo medido;

T_c = tarifa de consumo;

F_p = fator de potência medido.

Note-se que, nem o Decreto nº. 86.463 nem a Portaria do DNAEE trouxe novidades relativas à forma de medição ou aos limites regulamentados do FP.

Algumas normas do final da década de 1980 (DNAEE, 1986) (DNAEE, 1988) chegaram a estabelecer detalhes sobre especificidades relacionadas ao faturamento de energia e demanda reativas. Essas normas abordavam aspectos relativos aos procedimentos quando da inoperância dos medidores e à forma de faturamento do FP em casos específicos. Contudo, não foram propostas modificações substanciais na forma de cálculo e medição ou nos limites do FP nesse período.

Entretanto, no começo da década de 1990, vários atos normativos inovadores relativos à regulamentação do FP no Brasil foram estabelecidos. Esses atos modificaram os limites e estabeleceram formas de cálculo, medição e tarifação que balizaram o tratamento da questão até a forma como é feita atualmente.

Inicialmente, foi publicado o Decreto nº. 479 (BRASIL, 1992), que transfere ao DNAEE a competência para estabelecer os limites mínimos do fator de potência indutivo e capacitivo, bem como a forma de medição e o critério de faturamento da energia reativa excedente a esses limites. Com isso e com base em estudos de grupos de trabalho da ELETROBRAS ((1987) e (1991)), o referido órgão emitiu a Portaria nº. 085/1992 (DNAEE, 1992), que é inteiramente dedicada à questão do FP, estabelecendo valores de referência indutivo e capacitivo \pm de acordo com os horários do dia \pm definindo o método de cálculo e as formas de medição e faturamento da energia e demanda reativas equivalentes ao fator de potência verificado.

Em linhas gerais, a Portaria nº. 085 estabelece os seguintes tópicos:

- x O fator de potência de Referência abaixo do qual os consumidores serão faturados de maneira a pagar pela energia reativa consumida ou fornecida passa a valer 0,92;
- x Os limites são aplicáveis ao FP indutivo durante o dia (das 06h às 24h) e capacitivo durante a madrugada (das 0h às 06h);
- x O FP para consumidores com tarifa binômica e medição apropriada passa a ser apurado em valores verificados em cada intervalo de uma hora, ao invés de valores médios mensais, como era feito até então;
- x O faturamento correspondente à energia ou demanda reativa excedente é feito com base na energia ativa consumida no intervalo de uma hora, multiplicada por um fator que leva em consideração o FP de referência (0,92) e o valor do FP verificado naquele intervalo;
- x A medição continua podendo ser permanente ou transitória, desde que observado o período mínimo de 72 horas, da mesma forma que já vinha sendo feito desde a década de 1980;
- x É apresentada, pela primeira vez em um regulamento nacional, a definição do FP:
 $B \cos \phi$; em que o ângulo ϕ é calculado a partir do fornecimento de energia (ou potência) ativa e do fornecimento ou recebimento de energia (ou potência) reativa.

Da análise desta nova norma, percebe-se que suas principais inovações são o faturamento devido ao baixo FP tanto indutivo quanto capacitivo, a medição horária do FP (de maneira

que um baixo FP durante um certo intervalo não pudesse mais ser compensado por um alto FP em outro intervalo) e a definição do FP como sendo $\cos \phi$; Nesse último quesito, a definição proposta em 1992 já era necessária devido ao crescimento acentuado de cargas não-lineares no sistema, levando a maiores concentrações de distorções harmônicas, que já preocupavam a comunidade científica há algum tempo e começavam a inquietar as empresas de energia elétrica.

Outro ponto importante a se ressaltar é que essa definição de FP dizia apenas que o ângulo ϕ seria calculado com base na energia ou potência ativa e na energia ou potência reativa sem, contudo, determinar a maneira exata de se calculá-lo. Essa lacuna na regulamentação foi coberta pela publicação da Resolução nº. 613 (DNAEE, 1993) que definiu o FP da seguinte forma:

$$\cos \phi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad \text{Eq. 2.2}$$

Além dessa modificação, a referida Portaria alterou também alguns quesitos relativos ao faturamento equivalente à energia reativa excedente, permitindo que fossem utilizados os FP médios mensais até março de 1996, a partir de quando os FP deveriam ser calculados em cada intervalo de uma hora quando houvesse medição apropriada.

Essa norma estabelecia também que, a critério do concessionário, mesmo quando não houvesse medição apropriada (ou seja, quando o FP considerado era o médio mensal), poderia ser levada em consideração a energia reativa capacitiva, além da indutiva, e o FP deveria ser calculado somando-se os módulos dessas energias. Contudo, em dezembro do mesmo ano, a Portaria nº. 1.569 (DNAEE, 1993) modificou esses critérios, determinando que, para unidades consumidoras de alta tensão faturadas na estrutura tarifária convencional quando não houvesse medição e para unidades atendidas em baixa tensão, o FP médio poderia ser utilizado, mas não poderia ser considerada a energia reativa capacitiva.

A partir de 1997, com a Portaria nº. 466 (DNAEE, 1997), o faturamento devido a baixo FP passou a integrar as Condições Gerais de Fornecimento e, para unidades consumidoras do Grupo A, a medição passa a ser de forma permanente.

No final desse mesmo ano, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL iniciou seus trabalhos e, três anos depois, as Condições Gerais de Fornecimento foram revistas, resultando na publicação da Resolução Normativa nº. 456 (ANEEL, 2000), que incluiu a quase totalidade das disposições acerca do FP no âmbito da distribuição de energia elétrica (tensões até 230kV) e revogou as disposições anteriores acerca do assunto.

Nesse novo cenário, a definição do FP foi mais bem explicitada, assim como a das grandezas envolvidas na sua determinação. A seguir, são apresentadas essas novas definições:

- x Fator de potência: razão entre a energia elétrica ativa e a raiz quadrada da soma dos quadrados das energias elétricas ativa e reativa, consumidas num mesmo período especificado.
- x Energia elétrica ativa: energia elétrica que pode ser convertida em outra forma de energia, expressa em quilowatts-hora (kWh).
- x Energia elétrica reativa: energia elétrica que circula continuamente entre os diversos campos elétricos e magnéticos de um sistema de corrente alternada, sem produzir trabalho, expressa em quilovolt-ampère-reactivo-hora (kvarh).

Ou seja, o FP passa a ser calculado por meio da seguinte equação:

$$BLL = \frac{E_{\text{ativa}}}{\sqrt{E_{\text{ativa}}^2 + E_{\text{reativa}}^2}} \quad \text{Eq. 2.3}$$

A forma de faturamento pela energia reativa excedente não sofreu grandes variações nessa Resolução, permanecendo a possibilidade de medição temporária para unidades consumidoras atendidas em baixa tensão (Grupo B) – caso no qual o fator de potência utilizado seria o indutivo médio – e medição horária para consumidores do Grupo A.

Ressalta-se, porém, que foram introduzidas pequenas modificações com relação ao horário de cobrança do FP capacitivo, da seguinte forma:

- x Apenas os fatores de potência inferiores a 0,92 **capacitivo**: durante o período de 6 horas consecutivas (determinado pela distribuidora) entre 23h30 e 06h30, e
- x Apenas os fatores de potência inferiores a 0,92 **indutivo**: no restante do dia

É importante ressaltar que o intuito da regulamentação não é simplesmente cobrar pela energia reativa que flui na rede elétrica, mas, sobretudo, incentivar que os consumidores adaptem suas instalações de modo que o FP seja corrigido e assim não haja cobrança de excedente de reativos.

Em 2008, os Procedimentos de Distribuição ±PRODIST (ANEEL, 2008) começaram a vigorar e algumas das disposições técnicas acerca do FP passaram a fazer parte dessa norma. Entretanto, as definições estabelecidas pela Resolução nº. 456 permaneceram inalteradas, tendo simplesmente sido acrescentada a possibilidade de cálculo do FP pelas Potências (e não somente pelas Energias), conforme segue:

$$B \ll \frac{\int_0^T \dot{Q} \, dt}{\int_0^T \dot{E} \, dt} \quad K Q B \ll \frac{2}{\sqrt{2^6 E 3^6}}$$

Nesse caso, os conceitos de Potência também são importantes e, portanto, seguem as definições estabelecidas pelo PRODIST (ANEEL, 2008):

Potência aparente: Corresponde ao produto entre tensão eficaz e corrente eficaz em um dipolo elétrico. Para sistemas bifásicos ou trifásicos utiliza-se a composição $H Q W U H \quad D V \quad I D V H V \quad W 5 L C S U J B V H Q W D R D \quad V^3 L X V W H P D \quad H O p W U$ potência média que seria transmitida para tensões e correntes senoidais e em fase carga resistiva equivalente, simplificada levando às mesmas perdas joule no sistema.

Potência ativa: Energia total consumida/fornecida durante determinado intervalo de tempo que produz trabalho, dividida pelo próprio tempo, expressa em watts (W) e seus múltiplos.

Potência reativa: Definida como a raiz quadrada da diferença dos quadrados da potência aparente e da potência ativa, expressa em volt-ampères reativos (var) e seus múltiplos.

Em 2010, a Resolução nº. 414 (ANEEL, 2010) eliminou a possibilidade de medição transitória para faturamento por excedente de reativos em qualquer nível de tensão e atualizou a forma de faturamento. Contudo, ainda não foi definido explicitamente se a energia reativa medida deve ou não considerar distorções harmônicas na rede.

Com o crescimento de cargas não-lineares, sobretudo na baixa tensão, a definição mais precisa da potência reativa faz-se cada vez mais necessária. De forma a se estabelecer um panorama mais amplo da questão, são apresentadas a seguir as principais formas de controle do fluxo de energia reativa nas redes elétricas adotadas internacionalmente, considerando-se as definições de fator de potência e energia reativa, bem como os valores de referência na baixa tensão e formas de faturamento.

2.2 EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL

Uma vez que o fluxo de energia reativa pelas redes elétricas pode levar a perdas consideráveis, tanto por aquecimento quanto por utilização de parte da capacidade do sistema, a maioria dos países tem normas relativas à limitação da energia reativa nas redes elétricas.

Nesse sentido, apresentam-se nesta seção as experiências na maneira de controle de reativos adotadas em alguns países. O primeiro caso a ser analisado é o da Austrália, por se tratar de um país com dimensões continentais — assim como o Brasil — e regulamentação relativamente centralizada (limites únicos estabelecidos para todo o país). A Holanda também faz parte do rol de países cuja regulamentação foi estudada por possuir grande detalhamento, inclusive com definições apresentadas em Lei e em regras de medição.

Além disso, devido à sua originalidade e contraste com as normas adotadas no Brasil, a regulamentação francesa também é apresentada. Adicionalmente, abordam-se as regulamentações adotadas pelas Filipinas e, por fim, pelos Estados Unidos, que possuem regulamentação bastante descentralizada, extremamente diferente da brasileira e da australiana, uma vez que os Estados têm liberdade de estabelecer normas independentes para controle da energia reativa nas redes em seus territórios.

2.2.1 Austrália

Na Austrália são adotados limites para o Fator de Potência mínimo das instalações, assim como o utilizado no Brasil. A principal diferença entre as normas desses dois países é no que diz respeito ao faturamento quando o limite é ultrapassado. Enquanto aqui é cobrado um valor proporcional ao FP verificado na instalação, lá o faturamento se dá por meio da cobrança da potência reativa efetivamente consumida e superior à quantidade permitida (ESC, 2008).

De acordo com o Código de Distribuição do país (ESC, 2008, p. 41), o fator de potência é definido como o $\frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$. Adicionalmente, as componentes de potência necessárias para seu cálculo são definidas como:

- x Potência Ativa: razão na qual a Energia Ativa é suprida.
- x Energia Ativa: integral no tempo do produto da tensão pela componente em fase da corrente.
- x Potência Reativa: razão na qual a Energia Reativa é suprida
- x Energia Reativa: integral no tempo do produto da tensão pela componente em quadratura da corrente.
- x Potência Aparente: raiz quadrada da soma dos quadrados da Potência Ativa e da Potência Reativa.

Percebe-se claramente que as definições estabelecidas referem-se à corrente como sendo formada por duas componentes: uma ativa e outra reativa, o que se encaixa perfeitamente com a definição proposta por Fryze (Cf. item 2.3.2.2).

Ressalta-se ainda que esse modelo não limita as componentes de potência somente à frequência fundamental da rede, de modo que o cálculo do FP leva em consideração eventuais distorções presentes na forma de onda.

A regulamentação estabelece os limites a serem adotados pelos consumidores conectados à rede de distribuição de energia elétrica conforme Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Limites do Fator de Potência por nível de tensão de conexão adotados na Austrália. Fonte: ESC (2008)

Tensão (kV)	Potência					
	< 100 kVA		≥ 100 kVA e < 2 MVA		≥ 2 MVA	
	Indutivo	Capacitivo	Indutivo	Capacitivo	Indutivo	Capacitivo
< 6,6	0,75	0,8	0,8	0,8	0,85	0,85
≥6,6 e <66	0,8	0,8	0,85	0,85	0,9	0,9
66	0,85	0,85	0,9	0,9	0,95	0,98

Um ponto interessante a se constatar é que os limites do FP só são válidos nos casos em que a potência ativa ou a aparente represente mais de 50% da potência máxima permitida para conexão naquele nível de tensão. Isso quer dizer que pequenas cargas não necessitam, necessariamente, corrigir seu fator de potência, visto que, em geral, a potência reativa demandada por esses consumidores será relativamente pequena.

2.2.2 Holanda

Na Holanda, há uma norma feita pelo Órgão Regulador (Energikamer) que define certos critérios de Medição (DTE, 2007). Nesse documento, são apresentados alguns conceitos bastante específicos de energia e potência.

A potência é calculada conforme a definição original internacionalmente adotada pela comunidade científica, cuja expressão, apresentada com maiores detalhes no decorrer deste Capítulo, é transcrita abaixo:

$$2 L \frac{S}{i} \pm R E @ P \quad \text{Eq. 2.4}$$

De maneira semelhante, a energia ativa consumida ou fornecida entre dois instantes t_1 e t_2 pode ser calculada pela fórmula:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt \quad \text{Eq. 2.5}$$

Adicionalmente, a norma holandesa (DTE, 2007) define a potência ativa total como a soma das componentes de potência em cada uma das frequências, considerando-se a divisão da tensão e da corrente em componentes harmônicas, conforme equação abaixo, que será também apresentada e comentada com maiores detalhes no item seguinte.

$$P = \sum_k U_k I_k \cos \phi_k \quad \text{Eq. 2.6}$$

Além disso, para fins de medição da potência média entre dois instantes t_1 e t_2 (que pode ser, por exemplo, 15 minutos ou 1 hora), a norma apresenta a seguinte fórmula:

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt \quad \text{Eq. 2.7}$$

Já a potência reativa deve ser calculada com base nas potências ativa e aparente:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad \text{Eq. 2.8}$$

Onde:

$$S = UI$$

A definição estabelecida pelo órgão da Holanda ressalta ainda que essa equação geral da potência reativa (Eq. 2.8), válida para sistemas com distorções na forma de onda da tensão ou da corrente, pode também ser aplicada ao caso puramente senoidal, para o qual também é válida a seguinte definição:

$$Q = UI \sin \phi$$

Ressalta-se que a regulamentação daquele país estabelece que o caso sem distorções é que é um evento excepcional, e não o contrário.

Com base nos conceitos acima, o fator de potência geral foi definido na Holanda como (DTE, 2007):

$$\left(2 L \frac{2}{5} \right)$$

No caso específico em que a tensão e a corrente não apresentam distorções, a norma permite o cálculo do fator de potência por meio do deslocamento entre a tensão e a corrente:

$$\left(2 L \frac{8 + ? K \circ}{8 +} L ? K : \circ ; \right)$$

Cabe ainda destacar que a ³ / H L G D (O H W U L F da Holanda (HOLANDA, 1998) define o Fator de Potência como sendo ³ R T X R F L H Q W H S X U D (HOLANDA, 1998, p. 113) e dá a definição de ... : T; como o ³ fator de potência no caso de tensão e FR U U H Q W H S X U D (HOLANDA, 1998, p. 113) D L V ´

Assim, conclui-se que a Holanda faz visivelmente distinção ao valor do FP quando em condições senoidais e distorcidas, ficando bem claro que, no caso de tensões e correntes não-senoidais, deve ser utilizada a forma geral de cálculo, que compreende essas distorções.

Com relação ao controle da utilização da rede, o país estabelece que o Fator de Potência da instalação elétrica como um todo deve variar entre 0,85 indutivo e 1, exceto durante eventos transitórios e em períodos de carga muito baixa (DTE, 2007, p. 8). Esses limites podem ser diferentes caso a distribuidora de energia e o usuário da rede estabeleçam tais medidas em acordos contratuais.

2.2.3 França

As definições acerca de potência e energia elétrica reativas na França são dadas por meio de uma decisão conjunta de diversos ministérios (FRANÇA, 2009). Inicialmente, é importante destacar que a França não utiliza a definição de fator de potência para penalização ou faturamento de energia reativa. Em vez disso, é utilizada como referência a relação entre potência ativa e reativa, denominada $\tan \phi$:

Entretanto, a norma francesa também define a “relação tangente ϕ ” como sendo a medida da defasagem entre os sinais de tensão e de corrente.

O limite adotado para a relação $\tan \phi$ é de 0,4. Isso quer dizer que o consumidor pode utilizar energia reativa até o limite de 40% do seu consumo de energia ativa. Para fins de comparação com os limites de fator de potência adotados nos demais países, o valor de $\tan \phi$ igual a 0,4 significa um ... “ ϕ ”; L ... “ ϕ ” ...: $\phi = 23,7^\circ$ L r ϕ t z

Com base nessa aceção, depreende-se que, mesmo em um sistema com distorções nas formas de onda, o ângulo ϕ é aquele entre as componentes fundamentais da tensão e da corrente.

Entretanto, as definições das potências e da energia reativa são mais abrangentes (FRANÇA, 2009):

Potência Reativa e Energia Reativa: a Potência Reativa é igual à Potência Ativa multiplicada pela relação $\tan \phi$; A Energia Reativa designa a integral de durante um período de tempo determinado. A Energia Reativa é guardada na forma de campo eletromagnético nos ambientes das redes elétricas não é consumida pelos usuários

Potência Ativa (|) designa, em um ponto qualquer da rede elétrica, o fluxo de energia médio em regime permanente

Potência Aparente (•) representa a amplitude do sinal de potência instantânea em um ponto qualquer da rede elétrica

Nota-se portanto que, apesar de o limite utilizado pela norma (P_{CT}) ser nitidamente definido fazendo-se um paralelo com o $\cos\phi$, os conceitos das componentes de potência não se limitam a tensões e correntes puramente senoidais. Essas discrepâncias permitem concluir que, assim como na maioria dos demais países, na França ainda não se definiu se as distorções harmônicas eventualmente presentes nos sinais de tensão ou corrente devem ou não ser consideradas no cálculo da energia reativa.

Contudo, os limites de energia reativa aplicam-se somente a unidades consumidoras conectadas à alta tensão e àquelas conectadas na Baixa Tensão com potência instalada maior que 36 kVA (CRE, 2009). Desse modo, unidades consumidoras de carga pequena, geralmente com maiores níveis de distorção harmônica, não são faturadas pelo excedente de reativos, o que explica parcialmente a baixa necessidade de padronização das definições.

Acerca do faturamento devido à ultrapassagem do limite de 0,4, a norma da França estabelece que, quando não há dispositivo de medição apropriado para contabilizar o fluxo de energia reativa de determinada instalação, a distribuidora de energia elétrica pode estabelecer modalidades de estimação de tais valores, desde que isso esteja presente na sua documentação técnica de maneira transparente e não discriminatória (CRE, 2009).

2.2.4 Filipinas

A definição de Fator de Potência nas Filipinas é feita no Código de Distribuição (ERC, 2001, p. 13) e se parece bastante com aquela adotada pela Austrália, conforme segue:

Fator de Potência: quociente entre Potência Ativa e Potência Aparente

Energia Ativa: integral no tempo da Potência Ativa, medida em watt-hora (Wh) ou seus múltiplos.

Potência Ativa: média no tempo da potência instantânea em um período da onda elétrica, medida em watt (W) ou seus múltiplos. Para circuitos e sistemas CA, é o produto do valor RMS (ou eficaz) da tensão pelo valor RMS da componente da

corrente em fase. Em um sistema ~~trifásico~~, é a soma da Potência Ativa de cada fase.

Energia Reativa: integral no tempo da Potência Ativa, medida em ~~varh~~ ou seus múltiplos.

Potência Reativa: componente da potência elétrica que representa a troca alternada de energia armazenada (indutiva ~~ou~~ ~~capacitiva~~) entre fontes e cargas ou entre dois Sistemas, medida em ~~var~~ ou seus múltiplos. Para circuitos ou Sistemas CA, é o produto da tensão RMS pelo valor RMS da componente da corrente alternada em quadratura. Em um sistema trifásico, é a soma da ~~Potência~~ ~~Reativa~~ de cada fase.

Potência Aparente: produto do valor RMS (ou eficaz) da corrente pelo valor RMS da tensão. Para circuitos e sistemas CA, é a raiz quadrada da soma dos quadrados da Potência Ativa e Reativa, medida em ~~VA~~ ~~ou~~ ~~VA~~ ~~ou~~ ~~seus~~ ~~múltiplos~~.

A norma filipina estabelece que todos os usuários do sistema de distribuição devem manter um fator de potência não inferior a 85% indutivo no Ponto de Conexão, entretanto, cabe à distribuidora estabelecer as penalidades para FP abaixo de um determinado valor e incentivos para FP acima desse valor.

2.2.5 Estados Unidos

Nos Estados Unidos, pelas suas características de independência dos Estados em diversos assuntos, a regulamentação do fator de potência no âmbito da distribuição de energia elétrica, incluindo suas definições, limites adotados e forma de penalização ou faturamento, é definida de maneira autônoma por cada unidade da federação.

Dessa forma, são apresentadas aqui as principais características normativas do fator de potência e faturamento de energia reativa em seis Estados: Califórnia, Idaho, Washington, Oregon, Wyoming e Utah.

2.2.5.1 Califórnia

A distribuidora de energia elétrica na Califórnia pode requerer do consumidor que ele instale equipamentos para aumentar o Fator de Potência de qualquer um de seus aparelhos, incluindo lâmpadas de neon, fluorescentes ou de tubos de outros gases, soldadores elétricos, etc., para não menos de 85% indutivo ou capacitivo (CPUC, 2007).

A distribuidora pode ainda requerer que a forma de onda da corrente absorvida por cada equipamento de qualquer tipo esteja em conformidade com as boas práticas de engenharia.

Apesar de qualquer consumidor poder ser obrigado a controlar seu próprio fator de potência, a cobrança por um valor baixo só pode ser feita para unidades consumidoras com potência instalada acima de 20 kW. Nesses casos, a demanda reativa máxima (medida em intervalos de 15 min) que exceder em 40% a demanda ativa máxima (medida no mesmo intervalo de 15 min) pode ser faturada em 0,60 centavos de dólar por kvar de demanda Reativa excedente (CPUC, 2010).

Em outras palavras, o faturamento se dá nos mesmos moldes daquele adotado pela França, inclusive com o mesmo limite de 40%, equivalente a um fator de potência de 0,928.

2.2.5.2 Washington, Oregon e Wyoming (PACIFIC POWER COMPANY, 2010)

A cobrança da demanda por Potência Reativa excedente do Estado de Washington, Óregon e Wyoming são igualmente similares àsquelas da França. Lá, a regulamentação estabelece que haverá cobrança da potência reativa que exceder o limite de 40% da potência ativa.

Quanto à definição, no Estado de Wyoming há o seguinte conceito (ROCKY MOUNTAIN POWER, 2009):

Fator de Potência: porcentagem determinada pela divisão da demanda média do consumidor pela Potência em kVA média, vezes 100

Não há informações acerca da necessidade de consideração de distorções harmônicas nos cálculos e também não é possível inferir que não devam ser consideradas. Contudo, é interessante ressaltar que, nesses Estados, a cobrança da energia reativa excedente é válida somente para consumidores não-residenciais.

2.2.5.3 Idaho e Utah (ROCKY MOUNTAIN POWER, 2010)

O fator de potência é definido nesses Estados como a porcentagem determinada pelo quociente entre a potência média usada pelo consumidor em kW (Potência Real) e a potência média em kVA (Potência Aparente) imposta pelo consumidor à distribuidora, vezes 100.

De maneira geral, a regulamentação estabelece que o faturamento de energia reativa é no sentido de incentivar o consumidor a reduzir sua carga reativa. Assim sendo, a potência reativa demandada pode ser determinada seja por medição permanente, seja por teste. Na determinação por teste, o valor da demanda por potência reativa obtida permanece o mesmo até que um novo teste seja realizado.

Além disso, outro ponto geral estabelecido pela regulamentação em Idaho e Utah é que a instalação de um equipamento de correção do fator de potência deve ser feita de maneira que sua conexão e operação sejam aceitas pela distribuidora de energia elétrica local.

Com relação ao faturamento de excedentes, em Idaho, se o fator de potência médio for menor que 85% indutivo, a potência ativa medida será acrescida de ¾ de 1% por cada 1% que o fator de potência for menor que 85%.

Por exemplo, para um FP de 82% e uma demanda de potência ativa de 100kW, tem-se que a demanda ativa total a ser faturada (com o acréscimo devido ao baixo FP) será:

$$P_{a} = P_{r} \times \frac{1}{\text{FP}}$$

$$P_{a} = 100 \text{ kW} \times \frac{1}{0,82} = 122 \text{ kW}$$

Essa regra é válida para consumidores residenciais, rurais, comerciais e industriais, sejam eles de grande ou de pequeno porte.

Em Utah, a regra de faturamento é a mesma, contudo o limite é de 90%. Além disso, o faturamento a maior devido ao baixo FP não se aplica aos consumidores residenciais.

De maneira geral, é possível perceber que o faturamento pelo excedente de reativos se dá de modo bem particular para cada uma das regiões analisadas. Nota-se também que a maioria delas carece de definições mais específicas, de modo a se determinar se o cálculo deve ou não levar em consideração as distorções harmônicas.

Um dos prováveis motivos por trás dessa falta de definição regulatória é a ausência de uma padronização efetiva das definições no âmbito acadêmico. Assim sendo, a seção seguinte deste capítulo mostra a teoria de potências ativas e reativas em ambientes com tensões e correntes não puramente senoidais e apresenta as diferentes concepções discutidas atualmente pela comunidade científica.

2.3 DEFINIÇÕES DE POTÊNCIA

Um estudo do Grupo de Trabalho do IEEE sobre sistemas com formas de onda não-senoidais apresentado em janeiro de 1996 já se preocupava com as definições de potência e fator de potência naquela época (ARSENEAU, BAGHZOUZ, et al, 1996). Contudo afirmava, apesar da explícita manifestação contrária de alguns dos autores, que cerca de 99% da potência ativa que flui nas redes de energia elétrica é potência ativa fundamental (60/50Hz). Por outro lado, um estudo realizado oito anos depois (CIGRÉ, 2004) apresenta uma compilação de resultados de diversas medições nas quais fica demonstrado que, para redes de média tensão (1 a 35kV), a Distorção Harmônica Total de Tensão (THDV) é de mais de 3,5%, o que certamente faz com que a potência ativa fundamental fluindo nas redes de baixa tensão seja menos de 99% do total, ao contrário do que fora assumido pelo estudo do IEEE.

Nesse sentido, a simples utilização de expressões como \dots ; ou \dots ; para definição do fator de potência não seria adequada aos casos em que há grande distorção harmônica, notadamente em redes secundárias de distribuição. Assim, apresentam-se a seguir algumas definições discutidas atualmente pelos profissionais do setor elétrico para sistemas não-senoidais, de modo a fornecer um alicerce para a regulamentação das grandezas a serem medidas para fins de faturamento do excedente de reativos.

2.3.1 Potência Elétrica em condições puramente senoidais (MANGILI JÚNIOR, 1995)

Em condições senoidais, a tensão e a corrente podem ser representadas pelas expressões:

$$v(t) = \sqrt{2} V_m \cos(\omega t + \theta_v) \quad \text{Eq. 2.9}$$

$$i(t) = \sqrt{2} I_m \cos(\omega t + \theta_i) \quad \text{Eq. 2.10}$$

De tal modo, a potência instantânea pode ser determinada pelo produto das duas grandezas acima, conforme segue:

$$\begin{aligned}
 p(t) &= v(t) \cdot i(t) = \sqrt{2} V_m \cos(\omega t + \theta_v) \cdot \sqrt{2} I_m \cos(\omega t + \theta_i) \\
 &= 2 V_m I_m \cos(\omega t + \theta_v) \cos(\omega t + \theta_i) \\
 &= 2 V_m I_m \left[\frac{\cos(\omega t + \theta_v + \omega t + \theta_i) + \cos(\omega t + \theta_v - \omega t - \theta_i)}{2} \right] \\
 &= V_m I_m \left[\cos(2\omega t + \theta_v + \theta_i) + \cos(\theta_v - \theta_i) \right] \\
 &= V_m I_m \cos(\theta_v - \theta_i) + V_m I_m \cos(2\omega t + \theta_v + \theta_i)
 \end{aligned} \quad \text{Eq. 2.11}$$

P Q

Dessa expansão, tem-se que a potência instantânea é composta por duas partes distintas: uma que possui um termo constante em relação ao tempo multiplicado por um termo de valor médio unitário ($V_m I_m \cos(\theta_v - \theta_i)$) e outra parte que multiplica uma senóide e, portanto, tem valor médio nulo ($V_m I_m \cos(2\omega t + \theta_v + \theta_i)$).

Nesses termos, o produto $V_m I_m \cos(\theta_v - \theta_i)$ é a potência ativa P também denominada potência real, que pode ser igualmente calculada pela forma geral:

$$2 L \frac{S}{i} \pm L @ P \frac{S}{i} \pm R E @ P \quad \text{Eq. 2.12}$$

À amplitude da componente que fica oscilando como uma senoide de frequência ω e tem valor médio nulo, deu-se o nome de potência reativa (Q). Em sistemas de corrente alternada senoidal, essa componente da potência está relacionada com a circulação de energia entre as capacitâncias e indutâncias do circuito sem, contudo, produzir trabalho.

A soma dos quadrados das duas componentes (ativa e reativa) resulta em:

$$\begin{aligned} 2^6 E 3^6 L 8^6 \neq K^6 O ; E 8^6 \neq O A^6 J ; \\ L 8^6 \neq > K^6 O ; E O A^6 J ; ? \\ L 8^6 \neq L : 8 \neq 6 \end{aligned}$$

Ao produto S é dado o nome de potência aparente S . Nesse caso, a potência aparente relaciona-se com as demais componentes pela seguinte expressão:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad \text{Eq. 2.13}$$

Note-se que, por não representarem potências que efetivamente realizam trabalho, as potências aparente e reativa não são representadas pelas unidades do SI e sim por unidades especialmente convencionadas para elas (VA e var, respectivamente).

Por fim, o fator de potência é definido por:

$$\cos \phi = \frac{P}{S} \quad \text{Eq. 2.14}$$

Essa definição pode ser simplificada por:

$$\cos \phi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad \text{Eq. 2.15}$$

Essa simplificação é comumente utilizada, mas deve-se levar em consideração que ela pressupõe que as tensões e correntes nos sistemas tenham forma de onda puramente senoidal.

Em condições puramente senoidais, todas as componentes de potência e o fator de potência são bem conhecidos e seus efeitos, formas de controle, medição e gerenciamento estão consolidados. Entretanto, alguns conceitos, principalmente no que se refere à componente de potência reativa, são alvos de questionamentos no meio científico quando a tensão ou corrente apresentam distorções em suas formas de onda.

2.3.2 Potência Elétrica sob condições não-senoidais

Existem diversas formas de tratamento das potências elétricas em sistemas com distorções harmônicas. Algumas são mais comumente aceitas por apresentarem forte embasamento científico e outras por serem de fácil entendimento e medição. A seguir, são apresentadas algumas das acepções mais utilizadas atualmente, quais sejam, as definições segundo Budeanu, Fryze e Norma IEEE 1459-2010.

2.3.2.1 Definições de Budeanu (LOPES, 1995)

Um dos principais modelos utilizados para definição de potências em regime não-senoidal é o apresentado por Budeanu. Muito antes da propagação das cargas não-lineares nas redes elétricas, Budeanu já se preocupava com o assunto e em 1927 publicou um trabalho que norteou os debates acerca do tema desde então, apesar de diversas contestações ao longo dos anos.

Para entender as definições propostas por Budeanu, primeiramente é necessário que se tenha em mente os conceitos de representação de funções por senos e cossenos definidos no final do século XIX por Jean B. Fourier (SODRÉ, 2003). Pela série de Fourier, qualquer sinal periódico pode ser decomposto em:

$$R; P; L \quad \left[E \right] \quad \dots \quad \frac{J \hat{e} T}{E} \quad \dots \quad \frac{J \hat{e} T}{A} \quad \text{Eq. 2.16}$$

Em que E_0 é a componente contínua do sinal, J é a ordem harmônica, A_J é a amplitude da componente harmônica do sinal na frequência $\frac{d}{2}$.

No caso específico em que a função é ímpar¹, como geralmente é o caso das tensões e correntes em um sistema elétrico, a representação da função pode ser reduzida a (SODRÉ, 2003):

$$R; P; L \quad \left[E \right] \quad \dots \quad \frac{J \hat{e} T}{A} \quad \text{Eq. 2.17}$$

Tendo em vista que E_0 representa a componente contínua da grandeza, em muitos casos seu valor é desprezível quando se trata de grandezas elétricas, pois não são encontrados valores significativos de tensão ou corrente contínuas nas redes típicas (IEEE, 2010).

A componente E_1 que representa a parte relativa à frequência fundamental da grandeza ($J = 1$), normalmente possui maior módulo e é de natureza fundamental. Os demais elementos ($J \geq 2$) representam as componentes harmônicas superiores.

Com base na Série de Fourier dos sinais de tensão e corrente, o modelo de Budeanu apresenta uma possibilidade de expressão das potências em um sistema elétrico com distorções harmônicas. Para tanto, as grandezas primárias são definidas conforme segue:

$$R; L \quad \left[\bar{A} \right] \quad \dots \quad \frac{J \hat{e} T}{E} \quad \dots \quad \frac{J \hat{e} T}{A} \quad \text{Eq. 2.18}$$

$$E; L \quad \left[\bar{A} \right] \quad \dots \quad \frac{J \hat{e} T}{E} \quad \dots \quad \frac{J \hat{e} T}{A} \quad \text{Eq. 2.19}$$

Nesse sentido, as tensões e correntes eficazes podem ser calculadas por:

¹ Funções ímpares são funções simétricas em relação à origem (B: T; L: FB: FT;)

$$8 L \overline{\dot{u}_a} \dot{u}_a^6 \quad \text{Eq. 2.20}$$

$$+L \overline{\dot{u}_a} \dot{u}_a^6 \quad \text{Eq. 2.21}$$

Partindo dessas tensões e correntes com componentes harmônicas, Budeanu aplicou a definição da potência aparente (S) como produto da tensão e corrente eficazes.

$$5 L \overline{\dot{u}_a} \dot{u}_a^6 \quad \text{Eq. 2.22}$$

Substituindo-se as expressões Eq. 2.18 e Eq. 2.19 na Eq. 2.12, obtêm-se os valores de potência ativa (2») e reativa (3») segundo Budeanu:

$$2» L \dot{u}_a \dot{u}_a^6 \quad \text{Eq. 2.23}$$

$$3» L \dot{u}_a \dot{u}_a^6 \quad \text{Eq. 2.24}$$

Onde:

$$\hat{u}_a = L \hat{u}_a F \hat{u}_a$$

Ou seja, as potências ativa e reativa são a soma de cada parcela proporcional à tensão e corrente em cada uma das frequências harmônicas.

Entretanto, quando se faz a soma quadrática de 2» e 3», o resultado não é equivalente à potência aparente. Assim, Budeanu definiu uma potência de distorção (S»), calculada conforme equação abaixo:

$$S» = L \overline{\dot{u}_a} \dot{u}_a^6 \quad \text{Eq. 2.25}$$

Dessa forma, a somatória quadrática das potências ativa, reativa e de distorção, resulta no valor da potência aparente:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + \sum_{k=2}^{\infty} D_k^2 \quad \text{Eq. 2.26}$$

Com relação ao fator de potência, as formulações originalmente propostas por Budeanu não englobavam essa grandeza. Entretanto, suas definições permitem o cálculo dessa relação, da seguinte forma:

$$\cos \phi = \frac{P}{S} \quad \text{Eq. 2.27}$$

Alternativamente, o fator de potência pode ser dado por:

$$\cos \phi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + \sum_{k=2}^{\infty} D_k^2}} \quad \text{Eq. 2.28}$$

Há ainda uma terceira forma de cálculo dessa grandeza, considerando-se apenas as componentes fundamentais para o cálculo das potências ativa e aparente, conforme segue:

$$\cos \phi = \frac{P}{S} \quad \text{Eq. 2.29}$$

$$\cos \phi = \frac{P}{S} \quad \text{Eq. 2.30}$$

$$\cos \phi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad \text{Eq. 2.31}$$

Percebe-se que o ϕ assim definido representa a defasagem (deslocamento) entre as componentes fundamentais de tensão e corrente. ϕ é o ângulo de deslocamento, amplamente utilizado na Engenharia Elétrica atualmente. Essa nomenclatura permite diferenciá-lo do termo de fator de potência de considera eventuais distorções presentes nos sinais.

Aqui, já é possível perceber que as definições de Budeanu permitem o cálculo do fator de potência em três diferentes formas (Eq. 2.27, Eq. 2.28 e Eq. 2.31). Essa é uma das deficiências apontadas por pesquisadores quanto ao método de Budeanu. Na realidade, o

problema está exatamente na definição da potência reativa. De fato, S_r pode ser dividida em duas partes, uma correspondente à potência reativa relativa à frequência fundamental (S_{r5}) e outra advinda das componentes harmônicas do sistema ($S_{r\hat{a}}$):

$$S_r = S_{r5} + S_{r\hat{a}} = \sum_{n=5}^{\infty} U_n I_n \sin \phi_n + \sum_{n=2}^{\infty} U_n I_n \sin \phi_n \quad (2.24)$$

O problema nesse caso é que, em diversas ocasiões, $S_{r\hat{a}}$ pode ser negativa, o que leva a Potência Reativa total a ser menor que aquela circulante devido à componente fundamental (S_{r5}), gerando diversas dificuldades para o cálculo de compensação de reativos e para a melhoria do fator de potência, por exemplo (IEEE, 2010).

Outro aspecto importante levantado pelos opositores desse modelo é que a compensação de reativos com base no valor de S_r (Eq. 2.24) pode levar a um aumento de S_{r5} , na mesma proporção, o que não melhoraria muito o fator de potência (dependendo da maneira como se calcula essa grandeza) e poderia causar perdas elétricas desnecessárias ao sistema.

Contudo, apesar das críticas ao modelo de Budeanu, suas definições ainda são amplamente utilizadas e aceitas internacionalmente.

2.3.2.2 Definições de Fryze (SUHETT, 2008)

Em 1932, Fryze formulou uma teoria que não utiliza o domínio da frequência para definição das potências em regime não-senoidal (as tensões e correntes não são decompostas em componentes harmônicas).

Segundo esse modelo, a corrente elétrica é composta de dois elementos: a parte ativa e a parte reativa, podendo ser expressa, no domínio do tempo, como:

$$i(t) = i_a(t) + i_r(t) \quad (2.32)$$

Em valores eficazes, a equação acima pode ser reescrita da seguinte forma:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \phi \quad \text{Eq. 2.33}$$

Assim, de acordo com o método de Fryze, a potência ativa é derivada da componente $\cos \phi$ e a potência aparente é dada pelo produto entre os valores eficazes da tensão e da corrente total $(U \cdot I)$. Nesse caso, a potência reativa está relacionada à componente restante da corrente ($I \cdot \sin \phi$) e pode ser facilmente determinada pela multiplicação da equação Eq. 2.33 pelo quadrado da tensão:

$$\begin{aligned} P &= U \cdot I \cdot \cos \phi \\ I^2 &= \frac{P}{U \cdot \cos \phi} \\ I &= \sqrt{\frac{P}{U \cdot \cos \phi}} \end{aligned} \quad \text{Eq. 2.34}$$

Assim como no caso de Budeanu, o fator de potência pode ser calculado no método de Fryze como sendo o quociente entre a potência ativa e a aparente, conforme segue:

$$\cos \phi = \frac{P}{U \cdot I} \quad \text{Eq. 2.35}$$

Em analogia ao $\cos \phi$ definido na Eq. 2.28, pode-se determinar o fator de potência de Fryze da seguinte forma:

$$\cos \phi_F = \frac{P}{U \cdot \sqrt{P^2 + Q^2}} \quad \text{Eq. 2.36}$$

Como, pela definição, $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$, tem-se que:

$$\cos \phi_F = \frac{P}{U \cdot \sqrt{P^2 + (S^2 - P^2)}} = \frac{P}{U \cdot S} \quad \text{Eq. 2.37}$$

Entretanto, apesar de teoricamente as equações Eq. 2.36 e Eq. 2.37 serem equivalentes, sua implementação prática pode gerar algumas imprecisões indesejáveis e essa é uma das principais críticas ao método de Fryze.

Isso acontece porque, em muitos dos casos reais, a determinação do FP é feita depois de medidas as potências ativa e reativa, conforme Eq. 2.36. Como, no método de Fryze, a energia reativa é obtida de maneira indireta, os erros provenientes da medição de S e P são propagados (FILIPSKI e LABAJ, 1992).

2.3.2.3 Definições propostas pela Norma IEEE 1459-2010 (IEEE, 2010)

A norma IEEE 1549-2000, substituída pela norma IEEE 1459-2010, apresentou, como resultado de contribuições de diversos pesquisadores reunidos em um grupo de trabalho, algumas definições a serem utilizadas na medição de potência elétrica sob condições senoidais e distorcidas.

De maneira geral, as definições de potência ativa, reativa, aparente e fator de potência para condições senoidais são as mesmas já consagradas no meio científico e industrial e comentadas no início do presente Capítulo. Assim, tornam-se desnecessários comentários adicionais.

Já no tocante às definições de potência para condições não senoidais, a norma traz algumas nuances interessantes que merecem melhor análise.

Primeiramente, destaca-se que a potência ativa definida pelo IEEE é o valor médio da potência instantânea, tal qual utilizado nas definições de Fryze.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) dt$$

Entretanto, utilizando expressões no domínio da frequência para a tensão e a corrente, a norma divide essa potência em duas partes distintas: uma referente à componente harmônica fundamental (P_1 : potência ativa fundamental) e outra equivalente à soma das demais componentes harmônicas (P_h : potência ativa harmônica):

$$P = P_1 + P_h$$

Onde:

$$2_5 L \ 8_5 \ \neq \ K:O_5;$$

$$2_A L \ \acute{I} \ 8_U \ \neq \ K:O_U; \ L \ 2 \ F \ 2_5$$

$$\hat{U}^6$$

Ressalta-se que essa separação é justificada na medida em que, para análise de motores elétricos de corrente alternada submetidos a condições não puramente senoidais, a potência ativa total não é tão importante, já que a presença da potência ativa harmônica L pode levar à diminuição do conjugado do motor, ao aumento das perdas no ferro e no cobre e ao aparecimento de ruídos indesejáveis (RODRIGUES, 2009). É importante ainda lembrar que esses motores são, de longe, a maior parte das cargas do sistema elétrico nacional (ELETROBRAS, 2008).

De maneira semelhante à definição da potência ativa fundamental, a norma estabelece também a potência reativa fundamental (3_5), calculada com base na tensão e corrente em 60 Hz e no seno do ângulo entre essas duas grandezas:

$$3_5 L \ 8_5 \ \neq \ O \ A: \hat{U}_5; \tag{Eq. 2.38}$$

Em consequência dessas definições, surge naturalmente a potência aparente fundamental (5_5), definida como o produto da tensão 8_5 pela corrente \neq . Nesse caso, vale a relação:

$$5_5 L \ 2_5^6 \ E \ 3_5^6$$

Vale ainda enfatizar que a definição de potência aparente permanece a mesma daquela adotada nos dois modelos anteriormente relatados: $5 L \ 8 \cdot \neq$

Outro conceito importante trazido pela IEEE 1459 é o de potência não-ativa (0) que, $D \ Q \ W \ H \ U \ L \ R \ U \ P \ H \ Q \ W \ H \ \ H \ U \ D \ F \ \neq \ K: \ H \ F \ I \ L \ F \ G \ V \ t \ F \ L \ D \ \acute{O} \ L \ (\ W \ H \ D \ D \ W \ X \ Q \ G \ H \ S)$ todas as potências que não são enquadradas como potência ativa (tanto fundamental quanto harmônica) e é calculada pela seguinte equação:

$$0 L \ \sqrt{5_5^6 \ F \ 2_5^6} \tag{Eq. 2.39}$$

Nota-se que a potência fictícia P_0 tem a mesma definição daquela proposta por Fryze para a potência reativa.

Obedecendo-se a esses conceitos, o fator de potência nesse método é calculado pela relação entre a potência ativa e a aparente:

$$(\cos \phi = \frac{P}{S}) \quad \text{Eq. 2.40}$$

Do mesmo modo, o fator de deslocamento é dado por:

$$\left(\cos \theta = \frac{P}{P_0} \right) \quad \text{Eq. 2.41}$$

Como se pode verificar, a norma não traz grandes inovações quanto às definições de potência, apenas mostrando as mais conhecidas e selecionando as que melhor têm explicado o comportamento das potências em regime não senoidal. Constata-se também que é ressaltada a possibilidade de se separar as componentes em 60 Hz daquelas derivadas das correntes e tensões harmônicas.

2.3.2.4 Resumo

De maneira geral, as definições de potência ativa apresentadas pelos três métodos levam a resultados similares. Assim, o cálculo de P pela definição (Eq. 2.12) ou pelas componentes harmônicas (Eq. 2.23), resulta praticamente nos mesmos valores, não havendo vigorosas contestações de pesquisadores acerca de qual forma de cálculo deve ser priorizada.

Do mesmo modo, tanto Budeanu, quanto Fryze e a norma IEEE definem potência aparente como o produto dos valores eficazes da tensão e da corrente. Alternativamente, S também pode ser calculada pela definição de Budeanu (Eq. 2.26).

A principal diferença entre as definições reside, portanto, no cálculo da potência reativa. No intuito de clarificar tais distinções, a Tabela 2.2 a seguir apresenta um resumo de

como é calculado o valor das componentes de potência para cada um dos três modelos apresentados:

Tabela 2.2 ±Definições de potência segundo Budeanu, Fryze e Norma IEEE 1459-2010

Grandeza	Budeanu	Fryze	IEEE 1459-2010
Potência Ativa	$2 \sum_{\alpha} L \dot{u}_{\alpha} i_{\alpha} \cos \varphi_{\alpha}$	$2 \sum_{\alpha} L \frac{S_{\alpha}}{4} \cos \varphi_{\alpha}$	$2 \sum_{\alpha} L \dot{u}_{\alpha} i_{\alpha} \cos \varphi_{\alpha}$
Potência Reativa	$3 \sum_{\alpha} L \dot{u}_{\alpha} i_{\alpha} \sin \varphi_{\alpha}$	$3 \sum_{\alpha} L \sqrt{S_{\alpha}^2 - P_{\alpha}^2}$	$0 \sum_{\alpha} L \sqrt{S_{\alpha}^2 - P_{\alpha}^2}$
Potência Aparente	$5 \sum_{\alpha} L \sqrt{S_{\alpha}^2 + 3P_{\alpha}^2}$	$5 \sum_{\alpha} L S_{\alpha}$	$5 \sum_{\alpha} L S_{\alpha}$

É importante destacar que a Norma IEEE 1459-2010 não define um valor de potência reativa que abrange a frequência fundamental e as componentes harmônicas, mas destaca o conceito de potência **não-ativa**, representado na Tabela acima, no qual estariam presentes as partes relativas à potência reativa devidas à interação de tensão e corrente em uma mesma frequência, juntamente com aquelas resultantes do produto entre u e i de frequências diferentes.

Se considerarmos apenas as componentes fundamentais da tensão e da corrente, têm-se, além das equações da Tabela 2.2 ± as definições que se seguem e que são comumente utilizadas:

Tabela 2.3 ±Componentes de potência na frequência fundamental

Grandeza	Definição
Potência Ativa	$2 \sum_{\alpha} L \dot{u}_{\alpha} i_{\alpha} \cos \varphi_{\alpha}$
Potência Reativa	$3 \sum_{\alpha} L \dot{u}_{\alpha} i_{\alpha} \sin \varphi_{\alpha}$
Potência Aparente	$5 \sum_{\alpha} L \dot{u}_{\alpha} i_{\alpha}$
Fator de Deslocamento	$(2 \sum_{\alpha} L \frac{S_{\alpha}}{S} \cos \varphi_{\alpha})$

2.4 DEFINIÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA NO BRASIL

Com o intuito de se analisar em qual dos modelos se encaixa o fator de potência regulamentado atualmente no Brasil, é necessário recorrer novamente às definições estabelecidas pelas normas vigentes. A definição textual é apresentada na Res. nº414/2010 (ANEEL, 2010) e no Módulo 1 do PRODIST (ANEEL, 2008):

³Fator de potência: razão entre a energia elétrica ativa e a raiz quadrada da soma dos quadrados das energias elétricas ativa e reativa, consumidas num mesmo período especificado.

Adicionalmente, o Módulo 8 do PRODIST faz algumas considerações acerca do fator de potência e apresenta duas possibilidades de cálculo, uma por meio das energias e outra com o uso das potências, conforme segue:

$$\left(2 L \frac{E_a}{\sqrt{E_a^2 + E_r^2}} \right) \text{ K Q } 2 L \frac{2}{\sqrt{2^6 E 3^6}} \quad \text{Eq. 2.42}$$

Nesse contexto, para que se possam estabelecer as definições de maneira mais clara, serão feitas considerações sobre cada uma das equações acima em separado.

2.4.1 Cálculo por meio das Energias

As definições de energia são dadas de maneira bastante equivalente na Resolução nº. 414/2010 e no Módulo 1 do PRODIST . A seguir, é transcrito o conceito dado por essas normas à energia ativa:

³Energia elétrica ativa: energia elétrica que pode ser convertida em outra forma de energia, expressa em quilowatt-hora (kWh). (ANEEL, 2010)

Nota-se que a norma não faz menção alguma acerca de a energia ativa ou reativa referirem-se exclusivamente às componentes em 60Hz. Desse modo, pode-se depreender que a energia ativa é a mesma daquela expressa nos modelos de Budeanu, Fryze e na

norma IEEE 1459-2010, considerando todas as componentes harmônicas que realizem trabalho.

No que tange à energia reativa, a norma define:

3Energia elétrica reativa: energia elétrica que circula continuamente entre os diversos campos elétricos e magnéticos de um sistema de corrente alternada, sem produzir trabalho, expressa em quilowatts reativos-hora (kvarh). (ANEEL, 2010)

De acordo com as definições de Budeanu, a energia reativa é dada por:

$$Q = \sum_{h=2}^{\infty} U_a I_a \sin \phi_h$$

Note-se que o valor obtido da aplicação dessa equação é apenas uma soma algébrica de todas as componentes harmônicas do que seria, no caso senoidal, a amplitude do termo oscilatório que compõe a potência instantânea e não produz trabalho. Assim, esse valor não representa necessariamente a energia que circula entre os campos elétricos e magnéticos sem produzir trabalho sendo apenas parte desse valor. Para que fosse considerada toda essa energia que flui na rede e não produz trabalho, a componente de Distorção definida por Budeanu também deveria ser considerada.

Por outro lado, caso fossem consideradas as definições de Fryze, a energia reativa seria, em regime não-senoidal, aquela resultante da diferença entre a energia aparente e a ativa. Como, pela definição, a componente ativa é aquela que efetivamente produz trabalho, o restante é composto por grandezas oscilatórias de valor médio nulo e, nesse sentido, podem ser entendidas como as definidas pela norma.

2.4.2 Cálculo por meio das Potências

Da equação Eq. 2.42, depreende-se que o fator de potência depende de 2 e 3, sem fazer menções diretas à Potência Aparente 5. Todavia, a definição da potência reativa é feita

com base em sendo, portanto, necessária sua definição. A seguir, são transcritos os três conceitos oriundos do Módulo 1 do PRODIST e algumas considerações acerca de cada um deles.

Potência aparente: Corresponde ao produto entre tensão eficaz e corrente eficaz em um dipolo elétrico. Para sistemas bifásicos ou trifásicos utiliza-se a potência equivalente à potência média que seria transmitida para tensões e correntes senoidais e em fase com uma carga resistiva equivalente, simplesmente levando às mesmas perdas joule no sistema. (ANEEL, 2008)

Do começo da definição, pode-se entender que se trata da potência aparente total, definida igualmente nos modelos de Budeanu, Fryze e norma IEEE, conforme Eq. 2.22.

Contudo, não se pode negligenciar que a complementação da definição restringe um pouco o conceito apresentado ao estabelecer que a potência aparente equivale à potência ativa. Este conceito não está em harmonia com aquele apresentado no início da definição, uma vez que poderia talvez ser entendido como a utilização apenas da componente fundamental (60Hz) da tensão e corrente para o cálculo dos valores eficazes. Nesse caso, a expressão correta seria a de S_1 (Eq. 2.30).

Nesse contexto, não se pode afirmar qual das duas expressões (Eq. 2.22 ou Eq. 2.30) seria a correta do ponto de vista regulatório, uma vez que a definição dá margem às duas interpretações. Assim, de forma a tentar entender melhor as definições propostas pela regulamentação brasileira, é necessário analisar o conceito da potência ativa, conforme segue:

Potência ativa: Energia total consumida/fornecida durante determinada intervalo de tempo que produz trabalho, dividida pelo próprio tempo, expressa em watts (W) e seus múltiplos.

Potência reativa: Definida como a raiz quadrada da diferença dos quadrados da potência aparente e da potência ativa, expressa em volt ampères reativos (var) e seus múltiplos. (ANEEL, 2008)

Percebe-se que, na definição de λ , não há limitação alguma à frequência fundamental ou à utilização de tensões e correntes puramente senoidais. Nota-se ainda que a correta interpretação de λ esbarra novamente nas definições apresentadas no item 2.3.

Assim, se se considerar a potência aparente apenas na frequência fundamental (60Hz), a expressão resultante para a potência reativa seria $3 L \sqrt{5^6 F 2^6}$ e, nesse caso, não encontraria equivalência com nenhuma das definições constantes dos principais modelos de potência em sistemas elétricos com formas de onda não senoidais analisados (Budeanu, Fryze e IEEE 1459-2010).

Ao contrário, assumindo-se que a potência ativa é o $\frac{3}{2} \frac{S}{\sqrt{5}}$ a potência reativa já teria precisamente a mesma expressão da denominada $\frac{3}{2} \frac{S}{\sqrt{5}}$ conforme as definições do IEEE.

$$3 L \sqrt{5^6 F 2^6} L 0$$

Ressalta-se que essa expressão para cálculo de λ é a mesma definida por Fryze (Eq. 2.34).

Cabe aqui salientar que o cálculo por meio das potências leva à equação $(\frac{2}{3} L \sqrt{5})$ uma vez que a substituição da equação ac LPD DFDEDULD SRU $\frac{3}{2} H [W L Q$.
 3. Nesse caso, o fator de potência estabelecido pela norma poderia ser aquele definido pela comunidade científica considerando-se as distorções harmônicas ou, se se considerasse a potência aparente como sendo $\frac{5}{3}$, estaria mais próximo da definição do fator de deslocamento.

Portanto, conclui-se que a regulamentação tal qual estabelecida atualmente deixa margem à interpretação acerca de o fator de potência levar ou não em consideração os componentes harmônicos presentes no sistema.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Definindo-se o FP como:

$$2 = \frac{P}{\sqrt{3} S} \quad (2)$$

e considerando-se as diversas expressões para 2 e 3 constantes da Tabela 2.2 e da Tabela 2.3, é possível distinguir três diferentes valores para o fator de potência, quais sejam:

$$x \text{ Se } 2 = \frac{P}{\sqrt{3} S} \quad (2)$$

Esse é o fator de potência verdadeiro. O valor calculado por essa equação possui diversas formas de cálculo (2 pode ser obtido por integração, mesmo que computacionalmente, ou pelas componentes harmônicas da potência ativa segundo Budeanu), mas considera indubitavelmente as distorções contidas nos sinais de tensão ou corrente. A depender da interpretação dada à norma vigente, pode-se entender que esta forma de cálculo é a adotada no Brasil para fins de controle e faturamento pelas concessionárias de distribuição de energia elétrica.

$$x \text{ Se } 2 = \frac{P}{\sqrt{3} S} \quad (2)$$

Trata-se aqui do fator de deslocamento. Essa grandeza reflete apenas a utilização da rede para transporte de energia reativa na componente fundamental, sendo comumente utilizada para determinação de bancos de capacitores em cargas indutivas.

$$x \text{ Se } 2 = \frac{P}{\sqrt{3} S} \quad (2)$$

Neste caso, 2 considera todas as componentes harmônicas e 3 é aquela definida por Budeanu, o que dá origem a uma grandeza de utilização do sistema que considera apenas uma parte da potência não-ativa, levando sempre a valores do fator de potência maiores que aqueles calculados pela primeira definição. Isso faz com que o resultado obtido não seja algo que considere a utilização do sistema como um todo, como é o caso do fator de potência verdadeiro, nem uma medida do fluxo de potência fundamental pela rede, como o faz o fator de deslocamento. No entanto, apesar de

parecer uma definição que foge dos conceitos, esse método é frequentemente utilizado por alguns medidores eletrônicos de energia para cálculo do fator de potência por ser de fácil implementação computacional (FILIPSKI e LABAJ, 1992) e, por essa razão, foi considerado para os estudos deste trabalho.

De maneira geral, o fator de potência verdadeiro é a definição que melhor representaria as perdas na rede elétrica, uma vez que considera todos os fluxos que fazem a corrente aumentar e, conseqüentemente, as perdas também. Entretanto, quando o sistema apresenta distorções na forma de onda, nem sempre é trivial atribuir as responsabilidades pelas distorções (SANTOS, COSTA e OLIVEIRA, 2009). Nesse sentido, como o valor em questão é normalmente mais baixo do que o fator de deslocamento, podem ocorrer casos em que um consumidor seja indevidamente penalizado (tenha que pagar pelo excedente de reativos) sem ter dado causa a isso. Assim, além de o consumidor estar sendo prejudicado pelo fornecimento de energia com qualidade questionável, teria que pagar por um excedente de reativos que não lhe cabe.

Outro ponto que deve ser analisado é a possibilidade de o consumidor corrigir o problema que deu causa ao baixo fator de potência. Isso porque a regulamentação permite a cobrança de reativos com o intuito de dar um sinal econômico ao consumidor para que ele invista em soluções que trariam melhor aproveitamento do sistema (ANEEL, 2010). Nisto, é necessário avaliar se a utilização do fator de potência verdadeiro não levaria a casos em que sua correção ficaria impossível ou inviável, sendo talvez mais confiável a utilização do fator de deslocamento.

Por outro lado, os custos relativos às implementações de medidores mais complexos que permitiriam separar as componentes harmônicas para cálculo do fator de deslocamento em um sistema com distorções e a eventual possibilidade de os ganhos advindos dessa medida não serem consideráveis podem levar à possibilidade de utilização de outra definição do fator de potência para a caracterização dos sistemas.

Finalmente, verifica-se que cada uma das definições possui características específicas que precisam ser bem analisadas de modo a se escolher a mais apropriada. Nesse contexto, as considerações apresentadas no presente Capítulo foram no sentido de se entender as

definições existentes para a potência reativa e o fator de potência sob condições distorcidas, que podem ser resumidas de acordo com a Tabela 2.4.

Tabela 2.4 Expressões utilizadas para determinação do fator de potência

Nomenclatura Utilizada	Expressão Matemática	Cálculo dos Componentes
Fator de Potência	$(2 L \frac{2}{5}$	$2 L \frac{S}{1} \pm L @ P$ $5 L 8 +$
Fator de Deslocamento	$(\& L \frac{2_5}{5_5} L \dots ' \cdot \hat{1} 5;$	$2_5 L 8_5 \dots ' \cdot \hat{1} 5;$ $5_5 L 8_5$
Fator de Potência de Budeanu	$(2_{E_s} L \frac{2_{\gg}}{\yen 2_{\gg}^6 E 3_{\gg}^6}$	$2_{\gg} L \acute{1} 8_{\acute{a}} \frac{?}{\acute{a}} K:O_{\acute{a}};$ $3_{\gg} L \acute{1} 8_{\acute{a}} \frac{O}{\acute{a}} A \acute{U}_{\acute{a}};$

Para que se possam fazer comparações efetivas dessas definições e bem caracterizar as vantagens e desvantagens de cada uma, é importante entender as técnicas utilizadas na medição dessas grandezas, de modo que se tenha um paralelo dos procedimentos empregados na prática com as definições teóricas. Assim, o Capítulo seguinte apresenta formas de medição comumente utilizadas e proporciona ênfase especial aos métodos que utilizam a Transformada Wavelet por serem relativamente novos, de simples implementação e baixo custo computacional.

3 MEDIÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA E FATOR DE POTÊNCIA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o intuito de se obter os valores de energia reativa e fator de potência segundo algumas das definições apresentadas no Capítulo anterior, são empregadas pelos fabricantes de medidores eletrônicos técnicas construtivas e computacionais variadas que levam àqueles valores ou a valores próximos. Contudo, muitas dessas técnicas são projetadas para condições puramente senoidais, mas são aplicadas largamente nos casos reais com distorções harmônicas (CATALIOTTI, COSENTINO e NUCCIO, 2008).

Há uma série de critérios que são levados em conta na hora da escolha do método de medição dessas grandezas para fins de faturamento, tais como: simplicidade de cálculo, facilidade de implementação, aderência a algum modelo ou definições existentes, precisão, quantidade de cálculos, rapidez de processamento, quantidade de informações que podem ser extraídas, etc (EDISON ELECTRIC INSTITUTE, 2002).

Nesse contexto, são apresentadas no presente Capítulo algumas das técnicas atualmente utilizadas, fazendo-se, ao mesmo tempo, um paralelo delas com as definições estabelecidas no Capítulo anterior.

Foram escolhidos seis métodos, a saber: triângulo de potências, deslocamento de 90° , integração, derivação, Transformada de Fourier e Transformada Wavelet. Os cinco primeiros foram estudados devido a sua ampla utilização nos medidores atuais, bem como por causa da simplicidade nos cálculos em alguns deles. Já a Transformada Wavelet foi contemplada na presente dissertação por se tratar de uma técnica relativamente nova na medição de energia elétrica, mas bastante promissora devido à quantidade e qualidade das informações que podem ser extraídas, além da menor quantidade de cálculos e maior rapidez em relação aos algoritmos de Fourier.

Cabe ressaltar que não se pretende aqui estudar exaustivamente as técnicas de medição, com seus erros, formas de implementação etc., mas, sim, tentar mostrar como os modelos atualmente existentes são, na prática, implementados e quais as consequências das técnicas utilizadas quando as formas de onda da tensão ou da corrente apresentam distorções harmônicas.

Assim, a presente análise objetiva determinar as vantagens e desvantagens de cada método e, além disso, permitir a elaboração das rotinas, programadas em MatLab® e apresentadas no Apêndice desta Dissertação, para que possam ser realizadas as devidas comparações e escolha das melhores definições para fins de faturamento e controle do fator de potência nas redes.

3.2 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE POTÊNCIAS

Medidores eletrônicos obtêm o valor da potência por meio de técnicas de processamento de sinais que variam de acordo com o modo de construção e o cálculo adotado pelo fabricante. Nesse sentido, esta seção apresenta seis diferentes técnicas de medição usadas na indústria atualmente para obtenção dos valores de potência elétrica e mostra os impactos gerais de cada método de medição na obtenção da potência reativa sob condições não-senoidais.

3.2.1 Triângulo de Potência (MOULIN, 2002)

Uma das formas mais simples de se medir a potência reativa é utilizando a técnica do triângulo de potência. Essa ferramenta usa a relação entre as potências ativa, reativa e aparente, estabelecida em regime senoidal, para obtenção de uma das componentes da potência (Figura 3.1).

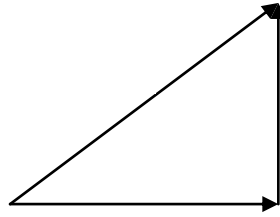


Figura 3.1 – Triângulo de potências

O cálculo da potência ativa é feito de acordo com a equação:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) dt$$

Em sistemas computacionais, com a discretização da equação acima, tem-se:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u_k i_k$$

Essa grandeza é calculada conforme equação acima, não importando se se trata de regime senoidal ou distorcido e, mais ainda, independentemente do modelo utilizado. Assim, há um consenso na comunidade científica com relação à medição de P

Adicionalmente, a potência aparente pode ser facilmente medida e calculada pelo produto entre os valores eficazes de u e i em que a tensão e corrente elétricas são medidas pela amostragem normal, considerando-se todas as eventuais componentes harmônicas do sinal.

L

Nesse contexto, a técnica do triângulo de potências é utilizada para obtenção da potência reativa, da seguinte forma:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \tag{Eq. 3.1}$$

Como essa técnica utiliza a relação entre as componentes de potência estabelecida para regime senoidal, sua precisão depende da forma de onda da tensão e da corrente. Assim, para sinais com distorções harmônicas, os valores obtidos para $P_{\text{re}}/P_{\text{at}}$ compreendem aqueles definidos por Budeanu (Cf. item 2.3.2.1) como potência reativa adicionados dos resultantes da interação entre componentes harmônicas diferentes (potência de distorção). Assim, esse método de cálculo não permite a obtenção de $P_{\text{re}}/P_{\text{at}}$ ou P_{re} , já que o valor de P_{re} aqui obtido seria equivalente a $P_{\text{re}} + P_{\text{d}}$ (Eq. 2.26).

Assim sendo, essa técnica permite o cálculo da energia reativa tal como definido por Fryze (Eq. 2.34). Analogamente, quando se determina P_{re} dessa maneira, tem-se também a potência não-ativa P_{na} , estabelecida pela Norma 1459 (IEEE, 2010).

3.2.2 Deslocamento de 90°

Outra forma de se obter a potência reativa é deslocando-se um dos sinais de entrada (tensão ou corrente) de um ângulo de 90°. Essa defasagem pode ser obtida pela utilização de filtros, de circuitos integradores ou pelo deslocamento no tempo equivalente a 90° (¼ do período T) (CATALIOTTI, COSENTINO e NUCCIO, 2008).

Assim, aplicando-se o deslocamento à corrente, a potência reativa pode ser determinada por:

$$P_{\text{re}} = \frac{S}{2} \sin 2\theta = \frac{V_{\text{eff}} I_{\text{eff}}}{2} \sin 2\theta$$

Com a equação acima, obtém-se o valor de P_{re} em condições puramente senoidais. Contudo, considerando-se as definições de P_{re} sob condições não-senoidais, a equação fica:

$$P_{\text{re}} = \frac{S}{2} \sin 2\theta = \frac{V_{\text{eff}} I_{\text{eff}}}{2} \sin 2\theta = \frac{V_{\text{eff}} I_{\text{eff}}}{2} \left(\sin 2\theta_1 + \sin 2\theta_2 + \dots + \sin 2\theta_n \right)$$

$$= \frac{S}{2} \left(\sin 2\theta_1 + \sin 2\theta_2 + \dots + \sin 2\theta_n \right)$$

$$= \frac{S}{2} \left(\sin 2\theta_1 + \sin 2\theta_2 + \dots + \sin 2\theta_n \right)$$

$$= \frac{S}{2} \left(\sin 2\theta_1 + \sin 2\theta_2 + \dots + \sin 2\theta_n \right)$$

$$= 4 L 3_5 F 2_6 F 3_7 E 2_8 E 3_9 \hat{a} \quad \text{Eq. 3.2}$$

Assim, observa-se que, para as componentes harmônicas, o deslocamento de 90° leva ao surgimento de termos adicionais à potência reativa. Esses termos são correspondentes a potências ativas ou reativas, positivas ou negativas, dependendo da ordem harmônica.

Logo, os valores obtidos para P nesse caso não refletem, de maneira adequada, nenhum dos modelos previamente abordados (Budeanu, Fryze ou IEEE-1459).

Vale ressaltar que, para sinais puramente senoidais, a técnica de medição por meio do deslocamento do sinal de corrente (ou de tensão) em 90° permite a obtenção da potência reativa sem grandes erros. Na realidade, como o deslocamento é feito com base em um tempo equivalente a 1/4 do período, se a frequência real da rede (por exemplo, 59,8 Hz) for diferente da nominal (60 Hz), alguns ajustes devem ser realizados, de forma a se compensar esse erro na frequência. Isso é comumente feito nos medidores eletrônicos que utilizam essa técnica, por meio da multiplicação por um valor que relaciona a frequência nominal e a frequência real da rede (SUHETT, 2008).

3.2.3 Integração do sinal de tensão (CATALIOTTI, COSENTINO e NUCCIO, 2008)

Seja $v(t) = V_m \sin(\omega t)$ o sinal de tensão e $i(t) = I_m \sin(\omega t + \phi)$ o sinal de corrente correspondente à senóide deslocada de 90°.

$$P_{\text{receptiva}} = \frac{1}{4} \int_0^{2\pi} v(t) i(t) dt = \frac{1}{4} \int_0^{2\pi} V_m \sin(\omega t) I_m \sin(\omega t + \phi) dt$$

Aplicando-se essa técnica a sinais de tensão e corrente com distorções harmônicas, a potência reativa resultante é:

$$P_{\text{receptiva}} = \frac{1}{4} \int_0^{2\pi} v(t) i(t) dt = \frac{1}{4} \int_0^{2\pi} \sum_k V_k \sin(k\omega t) \sum_l I_l \sin(k\omega t + \phi_l) dt$$

$$M_{I_{cep}} = \frac{1}{5} \left(\frac{E_t}{t} \right)^6 \left(\frac{E_u}{u} \right)^7 \left(\frac{E_v}{v} \right)^8 \left(\frac{E_w}{w} \right)^9 \quad \text{Eq. 3.3}$$

Apesar de o resultado não ser exatamente igual a nenhuma das definições apresentadas acima, o $M_{I_{cep}}$ geralmente tem valor próximo de 5 uma vez que as demais componentes são atenuadas por um fator equivalente à ordem harmônica (FILIPSKI e LABAJ, 1992).

3.2.4 Derivação do sinal de tensão (IEEE, 2010)

Em vez de se integrar o sinal de tensão, há medidores que realizam o deslocamento de 90° por meio da derivação desse sinal.

$$H_{cpgt} = \frac{F_s}{X R_4} \frac{R P}{t} \quad \text{Eq. 3.3}$$

Nessa técnica, em sistemas sujeitos a tensões e correntes não puramente senoidais, a potência reativa medida é equivalente a:

$$H_{cpgt} = \frac{F_s}{X R_4} \frac{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_k J_{k-1} \hat{e}_k \hat{e}_k}{t} - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_k J_{k-1} \hat{e}_k \hat{e}_k}{t}}{H_{cpgt} = \frac{1}{5} \left(\frac{E_t}{t} \right)^6 \left(\frac{E_u}{u} \right)^7 \left(\frac{E_v}{v} \right)^8 \left(\frac{E_w}{w} \right)^9} \quad \text{Eq. 3.4}$$

Com essa técnica, ao contrário do que acontece na integração do sinal de tensão, as componentes de potência reativa devidas às distorções harmônicas são majoradas, aumentando a diferença de H_{cpgt} em relação a 5 ou F.

3.2.5 Transformada de Fourier

Tendo em vista que o modelo de Budeanu e as definições da Norma IEEE 1459-2010 utilizam a decomposição dos sinais de tensão e corrente em componentes harmônicas para determinação dos valores de potência, a aplicação da transformada de Fourier por

intermédio de um processador embutido no medidor leva à obtenção de valores que podem ser perfeitamente compatíveis com essas duas definições.

Isto é feito por meio da denominada Transformada Discreta de Fourier, dada por (SODRÉ, 2003):

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi kn/N}$$

Onde:

$x(n)$ é a amostra n do sinal de tensão, em que n varia de 0 a $N-1$;

$X(k)$ é uma sequência de números complexos com o módulo e o ângulo da tensão X na ordem harmônica k

Um dos principais problemas dessa transformada, no entanto, é que ela necessita de grande quantidade de cálculos. Para tanto, os medidores precisariam ter capacidade de processamento bem mais alta do que aquela necessária para o cômputo da potência por meio dos métodos apresentados até agora.

Uma alternativa a esse problema é a utilização da Transformada Rápida de Fourier (FFT) (Fast Fourier Transform, na sigla em inglês), desenvolvida na década de 1960. Essa técnica permite o cálculo do módulo e ângulo das componentes harmônicas de um sinal com bem menos operações do que a DFT. No entanto, esse cálculo ainda exige bem mais operações do que os métodos anteriormente apresentados (SVENSSON, 1999).

O cálculo da potência reativa se inicia pela aplicação da Transformada de Fourier aos sinais de tensão e corrente para determinação dos valores eficazes de tensão e corrente, conforme segue:

$$V_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |V(n)|^2}$$

$$I_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |I(n)|^2}$$

Com base nesses valores, a potência aparente é calculada:

$$5 L 8 +$$

Além disso, o valor de θ em cada componente harmônica, associado ao ângulo entre essas componentes (obtido igualmente da transformada), permite a determinação da potência ativa e reativa (segundo a definição de Budeanu), da seguinte forma:

$$\begin{aligned} 2 L \int_0^{2\pi} u_a i_a dt &= K \cdot O_a; \\ 3 \int_0^{2\pi} u_a i_a dt &= O A \cdot U_a; \end{aligned}$$

Esses valores permitem também a determinação do fator de potência verdadeiro ($\cos \phi = \frac{P}{\sqrt{S}}$) e da potência não-ativa ($Q = \sqrt{S^2 - P^2}$). Do mesmo modo, o fator de potência com as definições de Budeanu pode ser calculado:

$$\cos \phi = \frac{P}{\sqrt{S}}$$

Além disso, uma vez que os valores de tensão e corrente na frequência fundamental são parte do resultado da aplicação da transformada, o fator de deslocamento pode facilmente ser obtido por:

$$\cos \theta = \frac{P}{S} = \cos \theta;$$

Portanto, a utilização da transformada de Fourier na medição de potência elétrica permite a determinação de todas as definições de potência reativa e fator de potência apresentadas no capítulo anterior. Contudo, isso se dá a um custo computacional bastante elevado.

3.2.6 Transformada *Wavelet*

Tendo em vista que a Transformada de Fourier já possui aplicações no setor elétrico bastante estabelecidas, com ótimas referências acerca dos métodos utilizados, assim como conceitos e características bem fundamentados e aceitos pela comunidade científica, optou-se neste trabalho por dar maior atenção à utilização da Transformada *Wavelet*(TW) para obtenção da potência ativa, reativa e fator de potência. Isso porque as *wavelets* possuem características de localização no tempo e na frequência que, a priori, podem ser aproveitadas na medição de grandezas elétricas, somadas a uma quantidade de cálculo computacional menor do que os tradicionais métodos de Fourier.

Assim, primeiramente apresenta-se uma introdução acerca da TW e suas principais características. Em seguida, definem-se os principais conceitos gerais dessa ferramenta e, por fim, expõe-se o método de obtenção das componentes de potência elétrica e do fator de potência P, Q e FP por meio da TW.

3.2.6.1 Conceitos e aspectos gerais da Transformada *Wavelet*

Na última década, a análise *wavelet* tem despertado interesse tanto do ponto de vista teórico como aplicado. O rápido avanço dessa teoria se deve, basicamente, à sua origem interdisciplinar, que tem seduzido pesquisadores de diferentes áreas do conhecimento, e à forma simples e versátil com que certos conceitos são abordados, de forma unificada (MALLAT, 1999) (DAUBECHIES, 1992).

A Transformada *Wavelet* envolve a representação de dados em termos de funções base em diferentes escalas e posições, constituindo-se uma poderosa ferramenta na aproximação de funções, na análise de sinais, na compressão de imagens e nas mais diversas áreas da matemática, da física e da engenharia.

Destaca-se ainda que a análise *wavelet* tem vantagens sobre os tradicionais métodos de Fourier. Ela permite uma análise de multirresolução local tanto no domínio espacial (ou temporal) quanto no domínio das frequências (DAUBECHIES, 1992). Esta propriedade de dupla localização combinada com algoritmos eficientes de análise (cálculo dos coeficientes

da série wavelet de uma determinada função) e síntese (reconstrução desta função a partir dos coeficientes) permite uma lista bastante extensa de possíveis áreas de aplicação: teoria da aproximação, processamento de imagens, análise de sinal, análise numérica e, evidentemente, em Qualidade da Energia (DE OLIVEIRA, 2007).

3.2.6.2 Análise Wavelet

Em análise Wavelet um dos principais conceitos é o de multirresolução, estabelecido por Mallat (1999), que fornece um ambiente natural para a inclusão e aplicação das wavelets.

Assim, a análise de multirresolução consiste de uma sequência de espaços de aproximação V_j que são encaixantes, isto é, $V_{j+1} \supset V_j$. Nesse contexto, pode-se denominar V_{j+1} o complemento de V_j em relação a V_{j+1} ou seja,

$$V_{j+1} = V_j \oplus W_{j+1} \quad \text{Eq. 3.5}$$

Por sua vez, o espaço V_{j+1} pode também ser escrito como resultado da soma direta de um espaço V_j e seu complemento W_{j+1} . Isto possibilita a representação dos dados em multinível, em termos da soma direta.

$$V_{j+1} = V_j \oplus W_{j+1} \quad \text{Eq. 3.6}$$

Em que V_j representa o nível menos refinado e W_{j+1} contém os detalhes da representação em V_{j+1} que não podem ser representados em V_j .

Dessa forma, um espaço V_4 por exemplo, pode ser decomposto em vários níveis diferentes, como exemplo, em cinco níveis:

$$V_4 = V_3 \oplus W_4 = V_2 \oplus W_3 \oplus W_4 = V_1 \oplus W_2 \oplus W_3 \oplus W_4 = V_0 \oplus W_1 \oplus W_2 \oplus W_3 \oplus W_4$$

Com isso em mente, pode-se apresentar a definição de bases. Na representação de vetores num plano cartesiano \mathbb{R}^2 , as bases são os vetores (1,0) e (0,1), de maneira que qualquer

vetor do tipo (x,y) pode ser escrito como uma combinação linear dessa base. De forma análoga, os espaços de aproximação \mathcal{S}_k são gerados pela base $\{ \psi_{k,p} : T; \mathcal{G} \}$ definida como:

$$\psi_{k,p} : T; L t^{\alpha_k} : t^{\beta_k} T F G$$

Ou seja, essas bases são obtidas pela dilatação e translação de uma função $\psi : T$. Dessa forma, qualquer função pertencente a \mathcal{S}_k pode ser representada com elementos dessa base.

Por sua vez, $\psi : T$ é chamada função de escala e satisfaz a seguinte relação:

$$\psi : T; L t^{\alpha} \int D_p : t T F G \quad \text{Eq. 3.7}$$

$\Rightarrow D:$

O conjunto de coeficientes D_p é chamado de filtro e o seu cálculo pode ser encontrado em (DAUBECHIES, 1992). Esses filtros, integrantes da função escala $\psi : T$; são comumente representados por uma curva suave e simétrica, com uma única máxima e uma única mínima, representando as informações de baixa frequência.

Dado o exposto, pode-se definir que uma função $W : T$ é chamada de wavelet se o conjunto $\{ W_{k,p} : T; \mathcal{G} \}$ é uma base para os espaços complementares \mathcal{S}_k em que $W_{k,p} : T; L t^{\alpha_k} W : t^{\beta_k} T F G$. Essa função é chamada de Wavelet Mãe e sua escolha pode variar de acordo com o procedimento que se deseja realizar, havendo algumas que, por suas propriedades específicas, são mais utilizadas na engenharia elétrica (KIM e AGGARWAL, 2001).

Como $W \in \mathcal{S}_k$? \mathcal{S}_k existem os coeficientes C_p tais que:

$$W : T; L t^{\alpha} \int C_p : t T F G \quad \text{Eq. 3.8}$$

$\Rightarrow D:$

Esses coeficientes formadores da função wavelet $W : T$; são determinados por uma única equação de normalização, onde $\int W^2 : T = 1$.

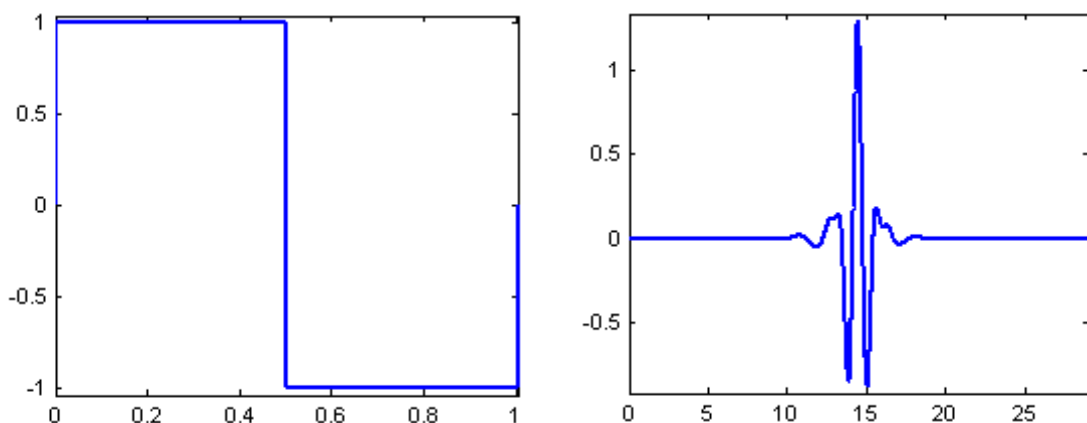
Nesse contexto, a função $\psi: T$; pode ser perfeitamente estabelecida conhecendo-se os coeficientes D_p e, com estes, pode-se caracterizar $W.T$; apenas com os coeficientes C_p

Para o cálculo dos coeficientes D_p e C_p são estabelecidas algumas condições, determinadas com o intuito de garantir as características que se deseja obter para as funções escala e wavelet (número finito de coeficientes não-nulos, ortogonalidade, suavidade, similaridade, etc.) e definidas particularmente para cada wavelet (DAUBECHIES, 1992).

As principais características das funções wavelets são que sua área total sob a curva da função é igual a zero e que sua energia é finita. Isso quer dizer que as wavelets são oscilantes e que têm a energia limitada a uma certa região, ou seja, decaem a zero nas extremidades. Em outras palavras, as wavelets são ondas (oscilantes) que existem apenas num intervalo determinado (ao contrário dos senos e cossenos que, apesar de oscilantes, se estendem de $-\infty$ a ∞).

Devido a essas propriedades, as funções wavelets são localizadas no tempo e na frequência, podendo a transformada wavelet trazer informações referentes a esses dois domínios simultaneamente. Isso não acontece na transformada de Fourier, em que as funções base são senos e cossenos e, portanto, não têm localização no tempo (apenas na frequência).

A seguir, são apresentadas algumas das funções wavelets mais utilizadas atualmente (Figura 3.2).



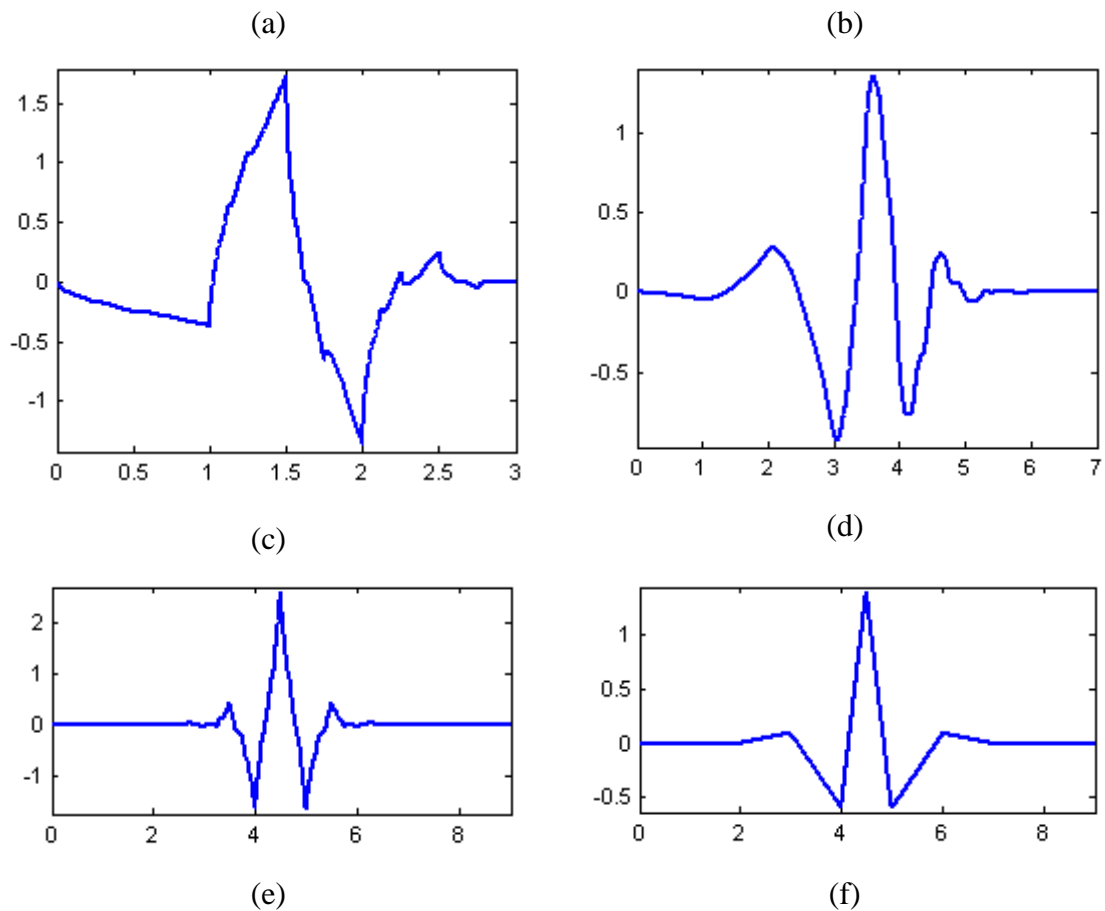


Figura 3.2 Alguns exemplos de wavelet-mãe: (a) Haar; (b) Coiflets de ordem 5; (c) Daubechies de ordem 2; (d) Daubechies de ordem 4; (e) Biortogonal 2.4 de Decomposição; (f) Biortogonal 2.4 de Reconstrução.

Como se pode observar, cada wavelet-mãe tem uma forma diferente, apresentando propriedades diferentes. Em algumas pode ser detectada regularidade, em outras, simetria e assim por diante. Outro ponto importante a se notar é que todas elas são ondas que possuem área total nula e tendem a zero nas extremidades. Finalmente, cabe ressaltar que as wavelets biortogonais possuem uma função que é utilizada quando da decomposição do sinal (transformada direta) e outra diferente usada para a reconstrução (transformada inversa).

3.2.6.3 Definição da Transformada Wavelet (TW)

Por meio da análise de multirresolução, pode-se escrever a função B: T; em &(MALLAT, 1999) como sendo:

$$B: T; L \int_{\mathbb{D}} \int_{\mathbb{D}} \dot{\phi}_{\mathbb{D}}: T; \quad \text{Eq. 3.9}$$

Onde os coeficientes $\int_{\mathbb{D}} \dot{\phi}_{\mathbb{D}}$ são dados pelo produto interno entre $B: T$; e $\dot{\phi}_{\mathbb{D}}: T$; representado por $O B: T; \ddot{\phi}_{\mathbb{D}}: T$; P e definido como sendo:

$$O B: T; \ddot{\phi}_{\mathbb{D}}: T; R \pm B: T; \dot{\phi}_{\mathbb{D}}: T; @ T$$

De uma forma geral, se $\mathcal{B}_{\gamma_5} \approx \mathcal{B}$ então a função $B: T$; pode ser representada pela base de \mathcal{B}_{γ_5} mais os detalhes de $B: T$; que estão em \mathcal{B} mas não podem ser representados em \mathcal{B}_{γ_5} da seguinte forma:

$$B: T; L \int_{\mathbb{D}} \int_{\mathbb{D}} \dot{\phi}_{\mathbb{D}}^{\gamma_5}: T; E \int_{\mathbb{D}} \int_{\mathbb{D}} \dot{\phi}_{\mathbb{D}}^{\gamma_5}: T; \quad \text{Eq. 3.10}$$

em que $[\mathcal{W}_{\gamma_5}: T; \mathcal{G}_{\mathbb{D}}: \mathbb{D}]$ é uma base do espaço \mathcal{B}_{γ_5}

Da mesma forma que a função pôde ser representada por meio de uma decomposição do sinal original (com coeficientes $\int_{\mathbb{D}} \dot{\phi}_{\mathbb{D}}$) em uma aproximação (coeficientes $\int_{\mathbb{D}} \dot{\phi}_{\mathbb{D}}^{\gamma_5}$) e seus detalhes (coeficientes $\int_{\mathbb{D}} \dot{\phi}_{\mathbb{D}}^{\gamma_5}$), essa nova aproximação ($\int_{\mathbb{D}} \dot{\phi}_{\mathbb{D}}^{\gamma_5}$) pode ser novamente decomposta em uma aproximação mais grosseira, ou seja, em um nível de resolução menos apurado (coeficientes $\int_{\mathbb{D}} \dot{\phi}_{\mathbb{D}}^{\gamma_6}$) e seus detalhes (coeficientes $\int_{\mathbb{D}} \dot{\phi}_{\mathbb{D}}^{\gamma_6}$). Sucessivamente, a nova aproximação poderá ser decomposta, de maneira que a função $B: T$; pode ser representada com vários níveis de resolução da seguinte forma:

$$B: T; L \int_{\mathbb{D}} \int_{\mathbb{D}} \dot{\phi}_{\mathbb{D}}^{\gamma_5}: T; E \int_{\mathbb{D}} \int_{\mathbb{D}} \dot{\phi}_{\mathbb{D}}^{\gamma_5}: T; \quad \text{Eq. 3.11}$$

Esse tipo de representação é denominado ³ representação em multiescala ou em multinível.

Com o intuito de melhor visualizar essa representação, pode-se representar a equação anterior da seguinte forma:

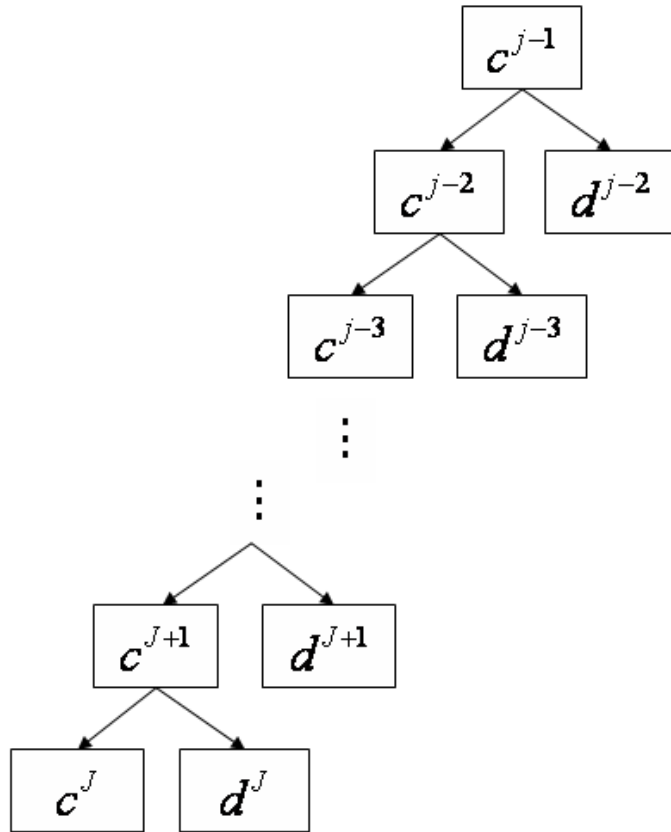


Figura 3.3 Representação de um sinal em vários níveis utilizando a transformada wavelet

Assim sendo, na Transformada Wavelet (TW) é necessário calcular, para um dado sinal, os coeficientes escala e wavelet. Para tanto, existe o Gabor-Laplacian de análise calculado por:

$$\hat{y}_p^{\gamma, 5} L t \acute{I} D: OF t G \hat{y}_{\alpha\epsilon} \quad \text{Eq. 3.12}$$

$$\hat{y}_p^{\gamma, 5} L t \acute{I} C: OF t G \hat{y}_{\alpha\epsilon} \quad \text{Eq. 3.13}$$

Por outro lado, a reconstrução pode ser obtida pelo algoritmo de síntese, dado pela relação:

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad \text{Eq. 3.14}$$

Maiores informações sobre o desenvolvimentos desses algoritmos podem ser encontradas em (CASTILHO, 2001).

Os coeficientes **wavelet** podem ser interpretados como o erro entre a representação dos dados em diferentes níveis. Tipicamente, são pequenos em regiões de suavidade (onde os dados apresentam pequenas variações) e significativos nas regiões de singularidades (os dados apresentam grandes variações). Em outras palavras, os coeficientes **wavelet** podem ser utilizados como indicadores de regularidade local.

Assim, a análise **wavelet** representa, com grande eficácia, características que demonstrem perturbações em sinais de frequências variadas e em tempos distintos. Essa característica vai ao encontro das necessidades de reconhecimento de distúrbios na tensão e corrente elétricas.

Adicionalmente, há que se ressaltar que a transformada **wavelet** requer um esforço computacional bem menor do que a de Fourier. Isso porque, na TW, a quantidade de cálculos envolvida é $J \cdot J$ (onde J é o número de amostras do sinal original), enquanto que, utilizando Fourier, são necessárias J^2 operações matemáticas. Para se ter uma noção da eficiência das **wavelet**, em um sinal de 8.400 amostras são realizadas 32.964 operações para cálculo da TW, contra 70.560.000 na transformada de Fourier.

Em outras palavras, a transformada **wavelet** é uma ferramenta capaz de representar um determinado sinal com boa aproximação na frequência e no tempo. Entretanto, o Princípio da Incerteza também se aplica a essa transformada, de maneira que não é possível conhecer a localização **exata** no tempo e na frequência simultaneamente. Assim sendo, o que acontece na ferramenta **wavelet** é que ela é capaz de triar de maneira mais inteligente quando a localização no tempo é mais importante e quando a localização na frequência é que tem maior valor.

Cabe destacar que a Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT) também oferece uma representação de frequência dividida em intervalos de tempo, a principal diferença da

wavelet com relação à STFT é que a primeira possui maior resolução no tempo quando as frequências são mais elevadas e menor resolução no tempo para baixas frequências, já a STFT possui sempre a mesma resolução para o tempo e para a frequência, conforme Figura 3.4.

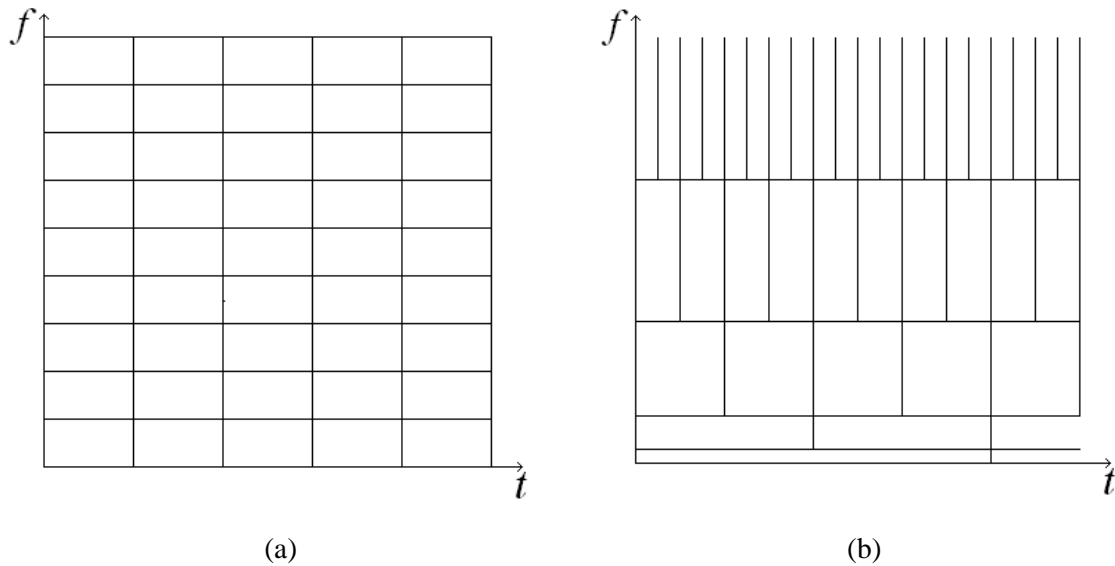


Figura 3.4 Esquema do plano tempo vs. frequência para (a) STFT e (b) TW

Portanto, a transformada wavelet apresenta características que fazem dela uma ferramenta promissora a ser utilizada na engenharia elétrica e, em particular, em qualidade da energia elétrica. Dentre essas características, destacam-se a localização no tempo e na frequência, bem como a eficiência de seus algoritmos.

3.2.6.4 Aplicação da Análise Wavelet em Qualidade da Energia Elétrica

A transformada de Fourier, em especial a STFT, tem sido bastante utilizada na análise de problemas de engenharia elétrica por apresentar certa localização no tempo e grande definição na frequência. No entanto, ao longo da década de 1990 e início dos anos 2000, a transformada wavelet ganhou bastante espaço em detrimento da STFT por possibilitar melhor adequação da resolução no tempo ou na frequência, de acordo com as necessidades de cada problema (SANTOSO, POWERS e GRADY, 1994).

Conforme mostrado anteriormente, a transformada de Fourier não apresenta informações relativas ao tempo, restringindo-se apenas à frequência. Como alternativa a essa limitação,

a STFT proporciona uma análise na qual há informações tanto no tempo quanto na frequência, sendo a resolução nesses dois domínios fixa. Essa característica da STFT faz com que ela possa não ser adequada para a correta análise de certos problemas de engenharia.

Como exemplo, problemas relacionados a harmônicas, por se tratarem de distúrbios contínuos ao longo do tempo, não necessitam de grande definição temporal, entretanto necessitam de melhor localização na frequência, já que a presença de harmônicas em 180 Hz, por exemplo, pode ser bem mais problemática em sistemas trifásicos a frequência fundamental de 60 Hz do que sinais em 120 ou 300 Hz.

Por outro lado, distúrbios gerados pela energização de um capacitor ou por um curto-circuito têm frequências mais elevadas e não é tão importante saber se se trata, por exemplo, de 2.400 Hz ou 2.460 Hz, já que ambos terão efeitos bem similares. Todavia, nesses casos, é extremamente importante saber o momento exato (ou quase exato) da ocorrência do fenômeno. Em outras palavras, é necessária uma alta resolução no tempo e uma baixa resolução na frequência.

Assim, a TW é bem mais aderente às necessidades inerentes ao tratamento de sinais relacionados à qualidade de energia elétrica do que a STFT (ROBERTSON, 1996), conforme pode ser observado na Figura 3.5:

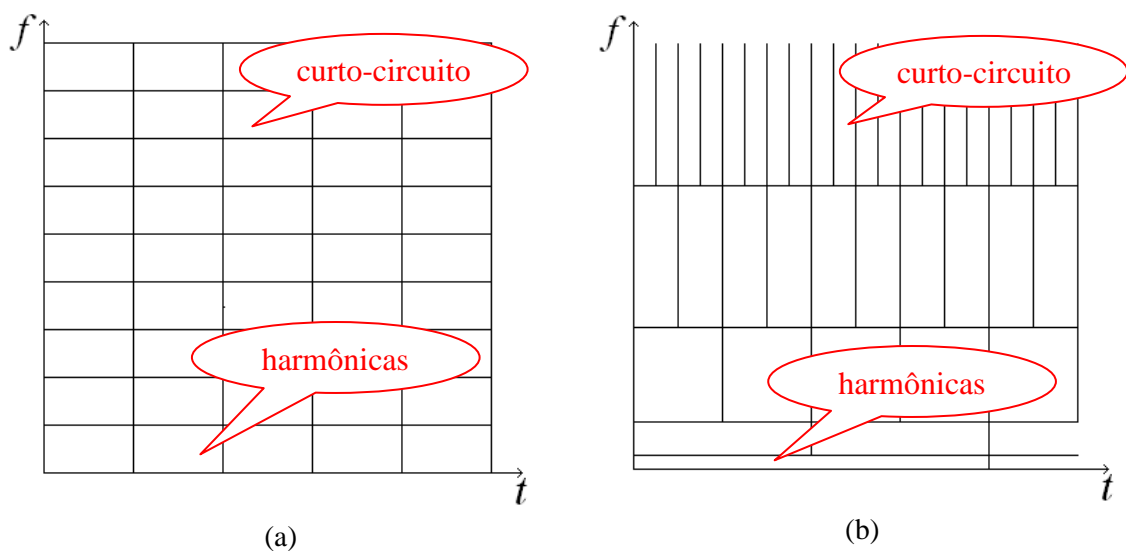


Figura 3.5 Exemplo de distúrbios elétricos no plano tempo vs. frequência para (a) SFTF e (b) TW

3.2.6.5 Medição de Potência Ativa, Reativa e Fator de Potência

Com o início da aplicação da TW em diversos setores da Engenharia e os bons resultados obtidos na área de qualidade de energia elétrica (AL-RAWI e DEVANEY, 1998) (DRIESEN, 1996), não demoraram a surgir trabalhos voltados à medição de potência, utilizando essa metodologia para cálculo de distorções na potência, englobando caracterização do fator de potência, da potência ativa, reativa e cálculo das potências de distorção.

Yoon e Devaney (1998), pioneiros nessa área, propõem um cálculo teórico da potência ativa com base na TW e testam seu método por meio do estudo de sinais de simulação e da análise de dados provenientes de um sistema de potência industrial real, conseguindo bons resultados.

Com base na equação Eq. 3.11, os autores representaram um sinal de corrente i_p pela TW como sendo:

$$i_p = \sum_{h=1}^H \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{V_p}{V_{p0}} \right) \cos(\omega t - \theta_p) + \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{V_p}{V_{p0}} \right) \cos(\omega t - \theta_p + \phi_p) \right] \quad \text{Eq. 3.15}$$

De maneira análoga, a tensão v_p fica representada da seguinte forma:

$$v_p = \sum_{h=1}^H \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{V_p}{V_{p0}} \right) \cos(\omega t - \theta_p) + \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{V_p}{V_{p0}} \right) \cos(\omega t - \theta_p + \phi_p) \right] \quad \text{Eq. 3.16}$$

Utilizando-se essas equações e a definição de valor eficaz, calcula-se a corrente por²:

$$+L \pm EP,^6 @ P \pm N \sum_{h=1}^H \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{V_p}{V_{p0}} \right) \cos(\omega t - \theta_p) + \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{V_p}{V_{p0}} \right) \cos(\omega t - \theta_p + \phi_p) \right] \quad \text{Eq. 3.16}$$

² A tensão pode ser também obtida de maneira análoga.

$$\tilde{\sigma} + L \int_{\mathbb{P}\mathbb{D}} \tilde{\gamma}_b^{\tilde{A}6} E \int_{\mathbb{R}\tilde{A}\mathbb{P}\mathbb{D}} \tilde{\gamma}_b^{\tilde{A}6} \mathbb{C}^6 \quad \text{Eq. 3.17}$$

Da mesma forma, definem-se os valores da energia e da potência substituindo-se as equações Eq. 3.15 e Eq. 3.16 nas expressões de cálculo da energia e potência (Eq. 2.4 e Eq. 2.5):

$$\begin{aligned} 9 : \tilde{E}_R L \pm EPRP @ P \int_{\mathbb{P}\mathbb{D}} \tilde{\gamma}_b^{\tilde{A}} \tilde{\gamma}_b^{\tilde{A}} E \int_{\mathbb{R}\tilde{A}\mathbb{P}\mathbb{D}} \tilde{\gamma}_b^{\tilde{A}} \mathbb{C} @ \mathbb{C} \\ 2 L \frac{S}{6} \pm EPRP @ P \frac{S}{t} \int_{\mathbb{P}\mathbb{D}} \tilde{\gamma}_b^{\tilde{A}} \tilde{\gamma}_b^{\tilde{A}} E \int_{\mathbb{R}\tilde{A}\mathbb{P}\mathbb{D}} \tilde{\gamma}_b^{\tilde{A}} \mathbb{C} @ \mathbb{C} \\ \tilde{\sigma} 2 L \frac{S}{6} \int_{\mathbb{P}\mathbb{D}} \tilde{\gamma}_b^{\tilde{A}} \tilde{\gamma}_b^{\tilde{A}} E \frac{S}{6} \int_{\mathbb{R}\tilde{A}\mathbb{P}\mathbb{D}} \tilde{\gamma}_b^{\tilde{A}} \mathbb{C} @ \mathbb{C} L \tilde{Z}_A E \int_{\mathbb{R}\tilde{A}\mathbb{P}\mathbb{D}} \tilde{\gamma}_b^{\tilde{A}} \mathbb{C} @ \mathbb{C} \end{aligned} \quad \text{Eq. 3.18}$$

Onde \tilde{Z}_A representa a potência no nível de resolução menos refinado e, conseqüentemente, a faixa que compreende as frequências mais baixas. Em contrapartida, \tilde{Z}_B com H variando do nível de resolução mais baixo $;$, até o nível de resolução mais elevado $:FF s;$, representa a potência em cada faixa de frequência, a partir daquelas contidas em \tilde{Z}_A

A partir dessa metodologia, Yoon e Devaney analisam um sinal de simulação computacional com frequência fundamental (60Hz), quinta harmônica (300Hz) e 11ª harmônica (660Hz), obtendo-se, por meio da TW, valores de potência equivalentes aos verdadeiros.

Em outro experimento, os autores utilizam um sinal proveniente de um sistema de potência no qual se compara o cálculo das potências por meio da TW àqueles obtidos pela aplicação da transformada de Fourier. Nesse caso, os resultados obtidos provaram que o método da TW é bastante consistente, oferecendo respostas semelhantes às obtidas pela transformada de Fourier, de forma mais rápida e com menos esforço computacional.

De maneira semelhante, a potência reativa pode ser calculada por meio da aplicação da TW ao sinal de corrente em fase e ao sinal de tensão em quadratura, conforme segue (WEON-KI e DEVANEY, 2000):

$$\begin{aligned}
 & \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \frac{1}{\Delta t} \left[\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} v(t) i(t) dt \right] dt \\
 & \approx \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} v(t) i(t) dt
 \end{aligned} \tag{Eq. 3.19}$$

Assim, para cada faixa de frequência, há a representação do produto da tensão em quadratura pela corrente em fase, caracterizando a contribuição à potência reativa total naquela faixa de frequência e mantendo algumas informações no domínio do tempo.

Essa teoria de cálculo de potência ativa e reativa usando a TW é referência dos principais artigos na área e tem norteado os estudos de diversos pesquisadores.

Com a crescente demanda pela eficiência energética e o aumento das tarifas de energia elétrica, vários esforços têm sido realizados na tentativa de se medir de maneira mais apropriada a energia efetivamente consumida. Um estudo na China (ZHANG, LIANG e CUI, 2008) mostrou que alguns equipamentos de medição baseados nas componentes fundamentais deixaram de registrar quase 30% da energia consumida, o que representa enormes custos para a sociedade em geral. Dessa forma, a TW tem se mostrado eficiente em algoritmos para cálculo da potência e energia em sistemas com tensão ou corrente não-senoidais, tornando-se uma ferramenta promissora nesse campo.

3.3 IMPLEMENTAÇÃO DE ROTINAS PARA OBTENÇÃO DA POTÊNCIA REATIVA

Para cada um dos cinco métodos de obtenção das potências reativas e do fator de potência (Cf. item 3.2) elaborou-se uma rotina utilizando MatLab®. A escolha desse software se deu em virtude de sua facilidade de implementação, robustez e ampla aceitação no meio acadêmico. Além disso, o MatLab® dispõe de uma biblioteca específica para aplicação da Transformada Wavelet a Wavelet Toolbox Trata-se de uma ferramenta fechada, com

possibilidade de utilização de diferentes wavelets e configurações variadas, fornecendo resultados confiáveis.

3.3.1 Taxa de amostragem

Um dos primeiros desafios foi a escolha da taxa de amostragem dos sinais de tensão e corrente. De acordo com o Edison Electric Institute (2002), taxas de amostragem usuais de medidores eletrônicos de energia elétrica são em torno de algumas centenas ou milhares de Hertz.

Dessa forma, após alguns testes com diferentes amostragens, estabeleceu-se a taxa de 8,4 kHz. Esse valor foi determinado de maneira que a defasagem de 90° equivalente a ¼ do período pudesse ser realizada sem aproximações. Assim, com uma taxa de amostragem de 8.400 Hz, o período de um sinal de 60 Hz tem $\frac{1}{4}$ de ciclo em 4 amostras. Isso implica numa defasagem de ¼ de ciclo correspondente a 4 amostras.

Outro ponto crucial na escolha da taxa de amostragem foi sua correlação com a TW. Assim, com a taxa escolhida e levando-se em consideração o Teorema de Nyquist (EDISON ELECTRIC INSTITUTE, 2002), que prevê que a frequência máxima que pode ser representada é a metade da frequência de amostragem $\frac{f_s}{2}$, a variação de uma decomposição wavelet em cinco níveis levaria à possibilidade de representação dos detalhes dos sinais com as seguintes frequências em cada nível:

- 1° Nível: de 2.100 Hz a 4.200 Hz
- 2° Nível: de 1.050 Hz a 2.100 Hz
- 3° Nível: de 525 Hz a 1.050 Hz
- 4° Nível: de 262,5 Hz a 525 Hz
- 5° Nível: de 131,25 Hz a 262,5 Hz

A aproximação do sinal no 5° Nível teria as componentes com frequência de zero a 131,25 Hz.

No caso da TW, outro parâmetro bastante importante é a escolha da *wavelet*-mãe. Morsi e El-Hawary (2008) demonstram que as melhores *wavelet*-mãe para análise de distorções na tensão ou corrente em regime permanente são as Daubechies (para baixas distorções) e Coiflets (para níveis de distorção mais elevados). Assim, utilizou-se neste trabalho a *wavelet*-mãe Coiflets de ordem 5 (Coif5).

Outra análise interessante é a frequência central em cada nível. Essa frequência define qual componente é mais bem representada por determinado nível, sendo que, quanto mais próximo dos valores das extremidades (aqueles valores de frequência listados acima), menor é a precisão da representação dos sinais com tais frequências no nível.

A seguir, são apresentadas as frequências centrais para cada nível de resolução para a *wavelet*-mãe Coif5:

Tabela 3.1 – Frequência central da *wavelet*-mãe Coif5 em 5 diferentes níveis de decomposição para um sinal com taxa de amostragem de 8,4 kHz

Nível de Decomposição	Frequência Central (Hz)
1º	2.896,6
2º	1.448,3
3º	724,1
4º	362,1
5º	181,0

3.3.2 Sinais de entrada

Visando comparar as técnicas e verificar o quão grande são as discrepâncias na medição de energia reativa em ambientes com distorção harmônica, optou-se por fazer simulações com um sinal de tensão cuja distorção tivesse valores típicos para componentes harmônicas da tensão (GRANDI e CARNEIRO, 2009), limitando-se a análise apenas às harmônicas mais representativas, as de ordem 3, 5 e 7.

Mantendo-se esse nível de tensão, analisaram-se quais seriam as medições de energia reativa na fundamental : 5; e considerando-se todas as componentes harmônicas : ; para

correntes de unidades consumidoras residenciais e comerciais. Assim, optou-se por analisar quatro diferentes casos: uma unidade consumidora residencial de consumo médio (296 kWh/mês); outra residencial de consumo alto (690 kWh/mês); um prédio comercial em horário de expediente; o mesmo prédio durante a madrugada. Todos os valores de módulo e ângulo de corrente utilizados são os obtidos de Pires (2006), limitados à 3^a, 5^a e 7^a harmônicas.

Em todos os casos, determinaram-se as potências reativas e os erros em relação à transformada de Fourier para cada uma das outras cinco técnicas de medição apresentadas na seção anterior (wavelet, triângulo de potências, deslocamento, integral e derivada). Esses valores foram obtidos por meio dos algoritmos implementados em MatLab®, considerando-se os sinais de tensão e corrente definidos com uma taxa de amostragem de 8,4kHz em uma janela de cálculos de um segundo.

Como tensão de alimentação, utilizou-se um valor baseado em níveis de distorção típicos para redes de distribuição secundárias no Brasil, conforme determinado por Grandi e Carneiro (2009), para componentes harmônicas ímpares até a 7^a ordem e ângulos determinados com base nos estudos de Pires (2006).

A representação no tempo da tensão utilizada nos cálculos, bem como sua forma de onda (Figura 3.6), são apresentadas abaixo.

$$R = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\omega t) - \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \right];$$

$$E_u = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\omega t) - \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - \frac{1}{\sqrt{2}} \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \right];$$

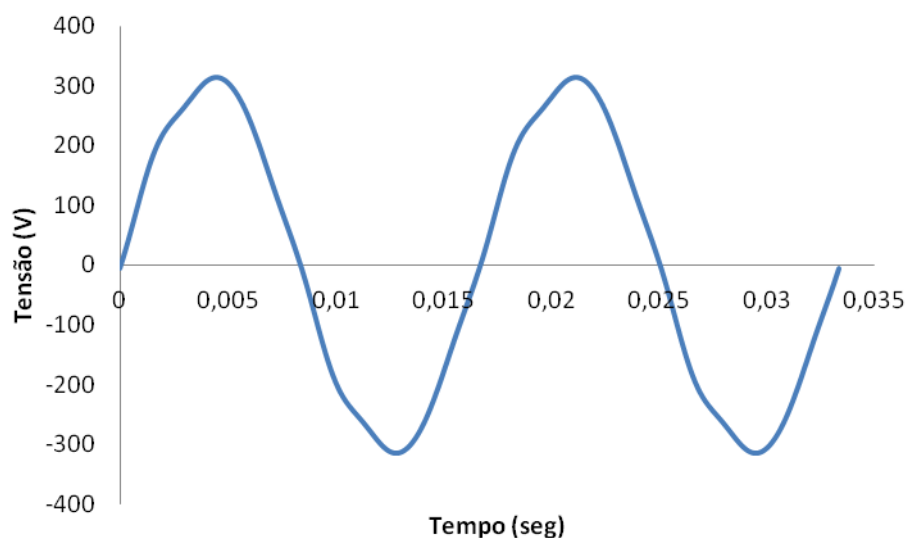


Figura 3.6 - Forma de onda da tensão utilizada nas simulações

Utilizando-se sempre esse sinal de tensão, foram escolhidos quatro perfis diferentes de corrente. Todos os valores de corrente, com as distorções harmônicas e os ângulos de fase foram obtidos de Pires (2006).

x Caso 1:

- o Residência de consumo mensal médio de 296 kWh
- o Corrente às 12h00min de um dia útil
- o Amplitude da componente fundamental da corrente: 2,57 A
- o Perfil de corrente dado pela Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Perfil da corrente utilizada nos cálculos do Caso 1

Componente Harmônica	Módulo	Ângulo
Fundamental	100%	-42,13°
3ª harmônica	10,36%	174,09°
5ª harmônica	9,69%	27,27°
7ª harmônica	5,77%	-149,32°

x Caso 2:

- o Residência de consumo alto (média mensal de 690 kWh)
- o Corrente na fase C às 21h00min de um dia útil
- o Amplitude da componente fundamental da corrente: 3,93 A
- o Perfil de corrente dado pela Tabela 3.3

Tabela 3.3 \pm Perfil da corrente utilizada nos cálculos do Caso 2

Componente Harmônica	Módulo	Ângulo
Fundamental	100%	96,03°
3ª harmônica	39,21%	20,76°
5ª harmônica	20,54%	-99,39°
7ª harmônica	4,73%	93,79°

x **Caso 3:**

- o Prédio comercial
- o Corrente na fase C em horário de expediente
- o Amplitude da componente fundamental da corrente: 259,89 A
- o Perfil de corrente dado pela Tabela 3.4.

Tabela 3.4 \pm Perfil da corrente utilizada nos cálculos do Caso 3

Componente Harmônica	Módulo	Ângulo
Fundamental	100%	108,88°
3ª harmônica	8,28%	-155,31°
5ª harmônica	2,73%	-150,22°
7ª harmônica	1,74%	-138,14°

x **Caso 4:**

- o Prédio comercial
- o Corrente na fase A durante a madrugada
- o Amplitude da componente fundamental da corrente: 9,86 A
- o Perfil de corrente dado pela Tabela 3.5.

Tabela 3.5 \pm Perfil da corrente utilizada nos cálculos do Caso 4

Componente Harmônica	Módulo	Ângulo
Fundamental	100%	17,69°
3ª harmônica	47,39%	-157,09°
5ª harmônica	32,32%	5,58°
7ª harmônica	22,91%	-168,27°

3.3.3 Simulações

Implementaram-se os algoritmos de determinação da potência ativa e reativa com as técnicas de: triângulo de potência, deslocamento de 90° , integração do sinal de tensão, derivação do sinal de tensão, transformada de Fourier e transformada Wavelet (Cf. item 3.2). O Apêndice apresenta os códigos dessa programação em MatLab®.

3.3.4 Procedimentos da análise de sensibilidade

Uma excelente maneira de se comparar os métodos de medição de potência reativa sob condições não-senoidais é por meio de uma análise de sensibilidade (SHAYANI, 2011). Considerando-se os valores de corrente da residência de consumo médio do Caso 1, realizou-se uma análise de sensibilidade dos erros das cinco técnicas de medição com relação à distorção harmônica total. Para tanto, utilizou-se como base o sinal de tensão secundária típico empregado descrito no item 3.3.2, considerando-se fixa a proporção entre os valores das componentes harmônicas no sinal de tensão (3^a , 5^a e 7^a harmônicas) e mantendo-se constantes os ângulos de cada uma dessas componentes.

Com o objetivo de se obter os erros de cada técnica de medição em relação a 3_5 e a 0 , alterou-se a amplitude das componentes harmônicas do sinal de tensão de modo que a Distorção Harmônica Total da Tensão (THDV) variasse de zero a 10%. Assim, os algoritmos implementados foram rodados para cada valor de THDV, variando de 0 a 10% em intervalos de um ponto percentual.

Dessa forma, foi possível obter os erros na medição da energia reativa fundamental (3_5) e não-ativa (0) aportados por cada técnica de medição para os diferentes níveis de distorção harmônica da tensão.

Adicionalmente, o mesmo processo foi utilizado para se obter os erros na medição do fator de potência ($\cos \phi$) e de deslocamento (ϕ) em função da THDV para cada método de medição de potência reativa estudado.

Baseando-se nos procedimentos apresentados ao longo do item 3.3, o Capítulo seguinte apresenta simulações na medição de potência reativa para certos tipos de unidades consumidoras com valores típicos de tensão e corrente não-senoidais. Esse estudo objetiva determinar quais técnicas de medição são mais apropriadas para cálculo da potência reativa em ambientes com distorção harmônica e avaliar os erros de medição atrelados a cada uma das técnicas analisadas. Em seguida, o Capítulo traz uma análise de sensibilidade para que se possa determinar em quais condições de distorção cada técnica se mostra mais adequada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nos procedimentos estabelecidos no Capítulo 3, bem como na teoria apresentada no Capítulo 2, analisam-se a seguir os erros de medição das técnicas descritas no item 3.2. Em seguida é feita uma análise de sensibilidade dos erros de medição da potência reativa e do fator de potência verdadeiro e de deslocamento.

4.1 ANÁLISE DOS ERROS DE MEDIÇÃO

4.1.1 Caso 1 – Residência de consumo médio

No primeiro caso, utilizou-se a corrente às 12h00min de um dia útil numa residência de consumo mensal médio de 296 kWh. A representação no tempo dessa corrente é dada por:

$$\begin{aligned}
 E &= L t \sin(\omega t + \phi) + \sum_{n=2}^{\infty} L_n t \sin(n\omega t + \phi_n); \\
 E &= \sum_{n=1}^{\infty} L_n \sin(n\omega t + \phi_n); \\
 E &= \sum_{n=1}^{\infty} L_n \cos(n\omega t + \phi_n);
 \end{aligned}$$

A Transformada Wavelet, assim como a de Fourier, permite a medição das potências ativa e reativa, tanto a potência reativa fundamental (Q_1) quanto a potência reativa que contém todas as distorções harmônicas (Q_0). Já as demais técnicas de medição apresentadas fornecem como resultado apenas um valor de potência ativa e outro de reativa.

A Tabela 4.1 mostra os valores de potência reativa obtidos pela aplicação do sinal supracitado aos algoritmos das diversas técnicas de medição.

Tabela 4.1 – Valores na medição de potência reativa para as seis técnicas de medição analisadas para residência de consumo médio

Técnica de Medição	Potência Reativa (var)
Transformada de Fourier	$Q_1=379,58 \quad Q_0=390,70$
Transformada Wavelet	$Q_1=379,46 \quad Q_0=390,66$
Triângulo de Potências	390,70
Deslocamento de 90°	379,23
Integração da tensão	378,85
Derivação da tensão	368,97

É ainda interessante notar que, para se determinar o estresse térmico, a melhor quantidade seria a energia não-ativa, calculada pelas transformadas ou pelo triângulo de potências ($Q=390,70$ var). Entretanto, esse valor não permite a obtenção da capacitância exata para correção do fator de potência, até porque, nesse caso, a correção total só pode ser feita com a utilização de filtros que permitam diminuir as potências harmônicas constantes no sinal.

Há ainda uma dificuldade adicional em se utilizar o valor de Q para fins de faturamento: essa potência não-ativa pode ser majorada devido ao aumento no nível de distorção da tensão, que pode estar sendo provocado por fatores alheios ao controle do consumidor. Nesse contexto, a atribuição das responsabilidades pela distorção harmônica e, conseqüentemente, pelo alto valor de Q (correspondente a um baixo fator de potência) não é trivial (SANTOS, COSTA e OLIVEIRA, 2009), de modo que, eventualmente, um consumidor poderia ter seu faturamento incrementado devido à distorção no sinal de tensão que alimenta sua unidade consumidora e cuja responsabilidade não lhe seja atribuível.

No exemplo em questão, se fossem dobrados os níveis de distorção harmônica da tensão (admitindo-se que os valores fundamentais de tensão e corrente, bem como as distorções na corrente, permaneceriam todos inalterados) o valor de Q_5 continuaria em 379,58 var, enquanto que a potência não-ativa aumentaria de 390,70 var para 393,21 var.

Ressalta-se que, nesse exemplo, a energia reativa definida conforme Budeanu (Q_F) resulta em 377,00 var, valor esse menor que a energia reativa na fundamental ($Q_5=379,58$ var), tendo em vista que as demais componentes podem ter sinal contrário a Q_5 . Nesse caso, Q_F não oferece uma medida razoável do estresse térmico causado pela circulação de energia reativa e também não serve como parâmetro para determinação de capacitores necessários à compensação reativa.

Por outro lado, o valor de Q_5 pode ser utilizado para instalação de bancos de capacitores que permitam a correção do deslocamento entre as formas de onda da tensão e da corrente na frequência nominal do sistema (60Hz). Vale salientar que, devido à presença de distorções harmônicas na rede, a potência não-ativa (Q) pode não reduzir drasticamente

quando da instalação de capacitores e, mais ainda, esses capacitores podem ser sobrecarregados por causa da distorção.

A Tabela 4.2 apresenta os erros atrelados a cada uma das técnicas de medição analisadas, admitindo-se a energia reativa medida pela transformada de Fourier (ω e ω_0) como sendo os valores de referência.

Tabela 4.2 Erros das técnicas de medição em relação à transformada de Fourier para unidade consumidora residencial de consumo médio

Técnica de Medição	Erros em relação a ω	Erros em relação a ω_0
Transformada de Fourier	-	-
Transformada Wavelet	0,03%	0,01%
Triângulo de Potências	2,93%	0,00%
Deslocamento de 90°	0,09%	2,94%
Integração da tensão	0,19%	3,03%
Derivação da tensão	2,79%	5,56%

Nota-se que a técnica do triângulo de potências gera um erro nulo em relação a ω_0 e um erro de quase 3% em relação à potência reativa fundamental ω . Percebe-se também que acontece exatamente o contrário com as técnicas do deslocamento de 90° e da integração da tensão. Já o método de derivação do sinal de tensão apresenta erros elevados em ambos os casos, enquanto que a Transformada Wavelet gera erros bem próximos de zero.

4.1.2 Caso 2 – Residência de consumo alto

Para o caso da residência de consumo alto (média mensal de 690 kWh), escolheu-se analisar os valores de potência reativa para a fase C no horário de 21h00min. Nesse momento, de acordo com Pires (2006), a corrente medida foi de:

$$\begin{aligned}
 E &= L u_{\text{a}} u_{\text{a}}^* + \dots \\
 E &= L u_{\text{b}} u_{\text{b}}^* + \dots \\
 E &= L u_{\text{c}} u_{\text{c}}^* + \dots
 \end{aligned}$$

Para esse cenário, os erros de cada uma das técnicas de medição são os apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Erros das técnicas de medição em relação à transformada de Fourier para unidade consumidora residencial de consumo alto

Técnica de Medição	Erros em relação a \hat{u}	Erros em relação a z
Transformada de Fourier	-	-
Transformada Wavelet	0,09%	0,04%
Triângulo de Potências	53,01%	0,00%
Deslocamento de 90°	0,91%	34,05%
Integração da tensão	0,32%	34,43%
Derivação da tensão	6,15%	30,62%

Para esse exemplo, as diferenças nos valores fornecidos por cada técnica de medição são bastante elevadas. Isso acontece pelo fato de que a distorção harmônica total da corrente nesse caso é de quase 45%, enquanto que no caso anterior era de aproximadamente 15%. Observa-se porém que o comportamento das técnicas de medição é similar àquele apresentado no caso anterior.

Nesse caso específico, o fator de potência calculado por meio da técnica do triângulo de potências seria 0,82 e, conforme regulamentação vigente, a unidade consumidora estaria sujeita ao pagamento pelo excedente de energia reativa, visto que o limite é de 0,92. No entanto, a medição pelo deslocamento de 90° e pela integração da tensão fornecem valores pouco maiores que 0,91, de maneira que a cobrança do excedente de reativos nesse caso seria mínima. Já o método que utiliza a derivação do sinal de tensão forneceria um valor intermediário, de cerca de 0,9. Nota-se, portanto, que a escolha do método de medição impacta diretamente no faturamento real das unidades consumidoras.

4.1.3 Caso 3 – Prédio comercial em horário de expediente

A referência utilizada para obtenção das correntes (módulo e ângulo) expõe valores de corrente para um prédio comercial em horário de expediente. No caso em tela, optou-se por analisar as possíveis medições de potência reativa para a corrente na fase C, tendo em vista que, nas fases A e B, os ângulos entre corrente e tensão na frequência fundamental eram bastante pequenos, podendo levar a discrepâncias nos erros que poderiam não representar a realidade de modo efetivo.

O perfil dessa corrente em função do tempo é dado por:

$$E = L \frac{dw}{dt} + E_{sr} + E_{az} + E_{z} + E_{kt} + E_{Fsw} + E_{atf} + E_{sv} + E_{u} + E_{y} + E_{z} + E_{v}$$

A Tabela 4.4 mostra os erros obtidos para esse caso.

Tabela 4.4 Erros das técnicas de medição em relação à transformada de Fourier para prédio comercial em horário de expediente

Técnica de Medição	Erros em relação a w	Erros em relação a z
Transformada de Fourier	-	-
Transformada Wavelet	0,02%	0,00%
Triângulo de Potências	10,12%	0,00%
Deslocamento de 90°	0,13%	9,07%
Integração da tensão	0,08%	9,26%
Derivação da tensão	0,12%	9,30%

Novamente, só é possível obter a potência não-ativa (Q) com baixos erros pela utilização da técnica do triângulo de potências ou por meio do uso de transformadas. Já a potência reativa fundamental Q_5 foi obtida com sucesso em todas as técnicas, à exceção da técnica do triângulo de potências.

4.1.4 Caso 4 – Prédio comercial durante a madrugada

Com o intuito de avaliar eventuais modificações nos erros em virtude do horário em uma determinada instalação, analisou-se a medição da potência reativa para o mesmo prédio comercial do item anterior, só que durante a madrugada.

Nesse horário, a corrente medida na fase A e dada pela referência (PIRES, 2006) é:

$$E_{\text{L}} = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{v}(f) \hat{v}^*(f) df; \quad E_{\text{v}} = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{v}(f) \hat{v}^*(f) df;$$

$$E_{\text{u}} = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{u}(f) \hat{u}^*(f) df; \quad E_{\text{w}} = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{w}(f) \hat{w}^*(f) df;$$

$$E_{\text{t}} = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{t}(f) \hat{t}^*(f) df; \quad E_{\text{y}} = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{y}(f) \hat{y}^*(f) df;$$

Para esse nível de distorção, os erros são mostrados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 Erros das técnicas de medição em relação à transformada de Fourier para prédio comercial durante a madrugada

Técnica de Medição	Erros em relação a \hat{v}	Erros em relação a \hat{z}
Transformada de Fourier	-	-
Transformada Wavelet	0,40%	0,06%
Triângulo de Potências	129,39%	0,00%
Deslocamento de 90°	1,19%	144,11%
Integração da tensão	1,33%	144,18%
Derivação da tensão	20,49%	152,53%

Para esse exemplo, assim como no caso 2, os erros aportados por algumas das técnicas são expressivos devido à alta distorção harmônica da corrente. No entanto, percebe-se novamente a maior precisão da Transformada Wavelet frente às demais, bem como a relativa eficiência da técnica do deslocamento de 90° e da integração do sinal de tensão para obtenção de \hat{z}_5 .

4.1.5 Constatações comuns a todos os casos

Constata-se que a Transformada Wavelet apresenta erros bem menores que as demais técnicas de medição (todos os erros menores que 0,5%). É evidente que a transformada de Fourier é a que mais se adere às definições, entretanto, a quantidade de cálculos da técnica que utiliza as wavelets (0,5%) é bem menor que a de Fourier (6%).

Dentre os demais métodos, percebe-se que a técnica da derivação do sinal de tensão exhibe erros extremamente altos com relação a \hat{z}_5 e a $\hat{0}$ e, portanto, não serve para faturamento de reativos excedentes. Caso a regulamentação brasileira para faturamento de reativos abranja todas as distorções (potência não-ativa), a técnica do triângulo de potências poderia ser bem aplicada e, inclusive, seria a mais adequada.

A medição por meio do deslocamento de 90° resulta em erros, em geral, pequenos (somente em um dos casos ele é maior que 1%). Entretanto, esses erros são variáveis por estarem atrelados às componentes de frequência maior que a fundamental e dependerem fortemente do ângulo de fase dessas componentes e, portanto, podem não fornecer valor passível de ser faturado com exatidão.

Por fim, nota-se que, dentre as formas de medição mais simples (sem uso de transformada), o método da integração do sinal de tensão no tempo resulta em pequenos erros em relação a \mathcal{I}_5 sendo, portanto, $\mathcal{P}HQR$ quando para fins de faturamento. Contudo, seria necessário um amplo estudo para se determinar se os erros aportados por essa técnica não seriam maiores que os da classe de exatidão dos medidores para as distorções típicas nas redes de baixa tensão no Brasil.

De forma a se ter maior noção dos impactos do nível de distorção harmônica nos valores obtidos, a seguir apresenta-se uma análise de sensibilidade de cada uma das técnicas estudadas para diversos valores de distorção harmônica total.

4.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Considerando-se os valores de corrente da residência de consumo médio (Caso 1) examinada no item 4.1 e descrita no item 3.3.2, realizou-se uma análise de sensibilidade dos erros das cinco técnicas de medição com relação à distorção harmônica total, conforme descrito no item 3.3.4.

4.2.1 Sensibilidade na medição da potência reativa

4.2.1.1 Erros em relação a \mathcal{I}_5

A Figura 4.1 mostra os erros em relação à potência reativa fundamental \mathcal{I}_5 . As retas verticais alaranjadas representam o limite de distorção harmônica na baixa tensão estabelecido pelas normas:

- x IEEE: 5% (IEEE, 1992);
- x IEC: 8% (IEC 61000-2-2, apud (PIRES, 2006));
- x PRODIST: 10% (ANEEL, 2008).

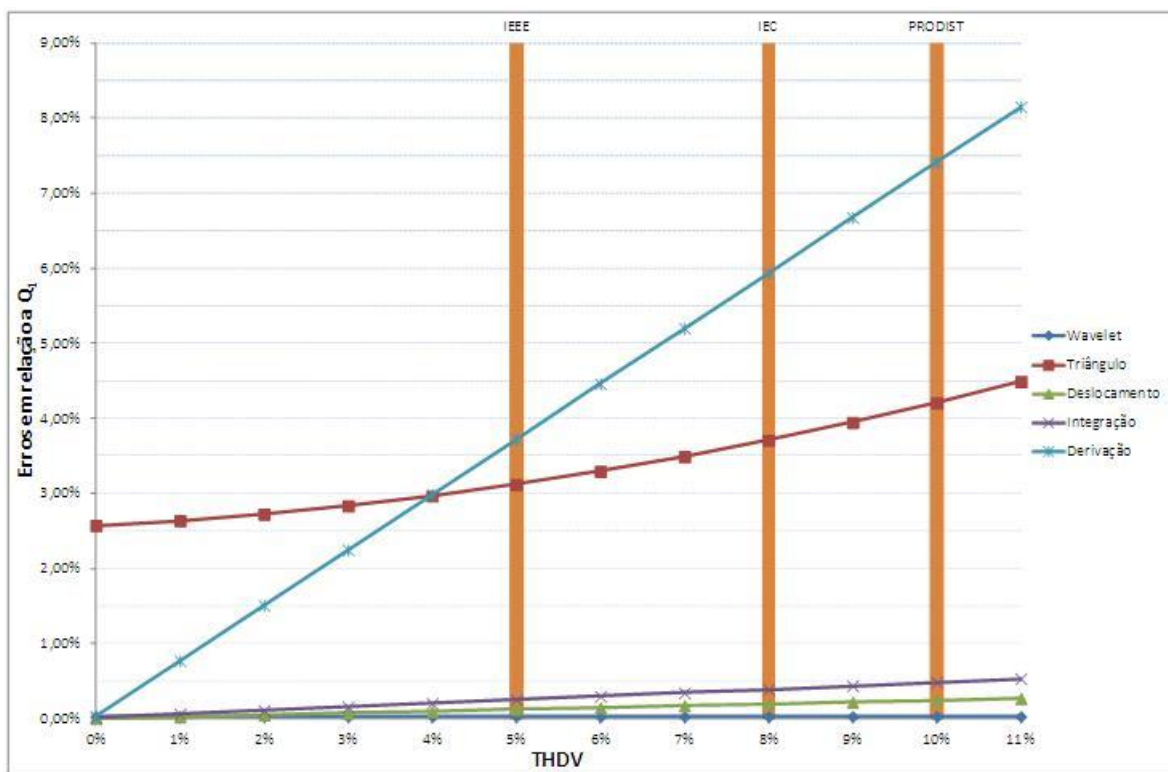


Figura 4.1 Análise de sensibilidade do erro de medição das técnicas analisadas em relação a Q_1 quanto à variação da THD de tensão.

A técnica de medição do triângulo de potências tem erros maiores que 2,5% para qualquer nível de distorção harmônica da tensão. Isso acontece porque a corrente também é distorcida e, como esse método mede a potência não-ativa total Q_1 , o erro em relação a Q_1 só seria nulo caso tanto a tensão quanto a corrente fossem puramente senoidais.

De modo semelhante, a técnica da derivação do sinal de tensão mede valores que crescem substancialmente com o aumento da THD. Assim, para um sinal de tensão com distorções da ordem de 5% (limite permitido pela Norma IEEE Std 519-1992), o erro é de quase 4%. Já no limite disposto no PRODIST (ANEEL, 2008), o erro na medição da energia reativa chega a mais de 7%.

Nas técnicas de deslocamento de 90° e de integração, os erros também aumentam conforme o acréscimo da THD. Contudo, nesses casos, os erros são menores que 1% mesmo para valores de distorção total da tensão acima do limite do PRODIST.

Por fim, constata-se que, efetivamente, a transformada *wavelet* aporta valores de ϵ bem próximos dos reais, mesmo para elevados níveis de distorção harmônica. Tanto é que, para níveis de THD próximos a 11%, o erro é de 0,29%, levemente menor que o erro para o caso da tensão puramente senoidal (0,31%).

4.2.1.2 Erros em relação a θ

A variação no erro das técnicas de medição em relação à potência não-ativa θ está representada na Figura 4.2.

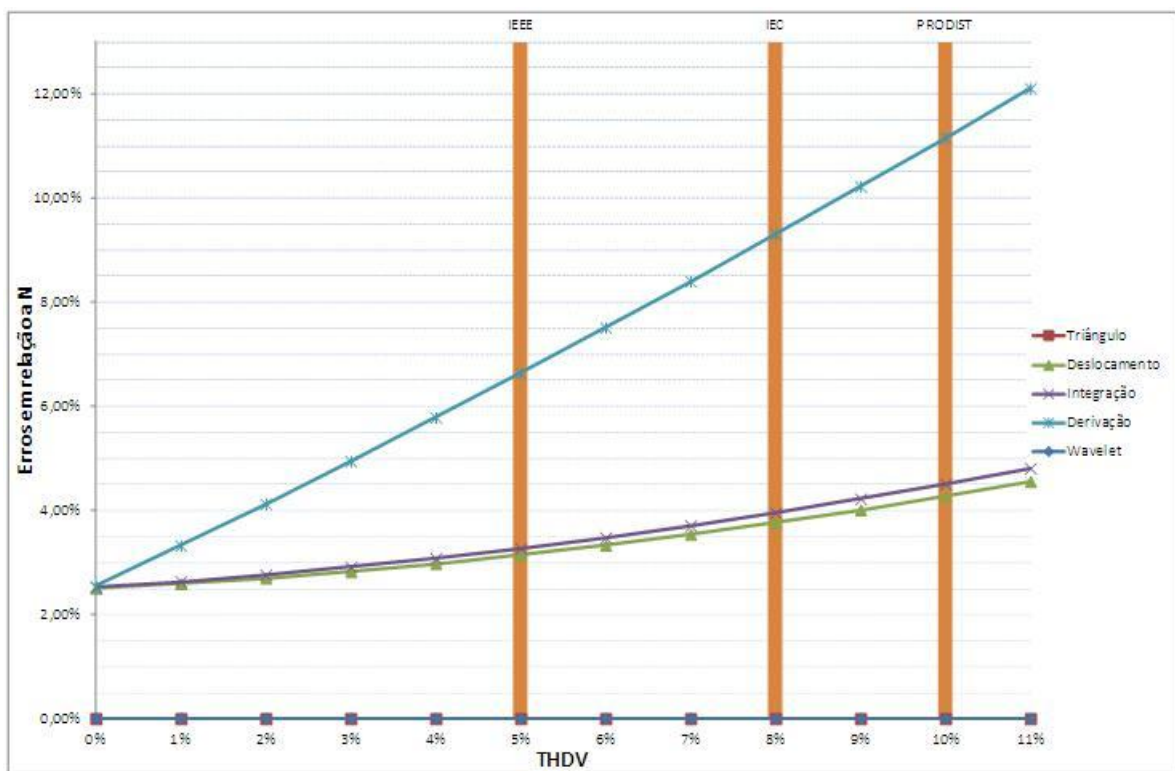


Figura 4.2 ±Análise de sensibilidade do erro de medição das técnicas analisadas em relação a ϵ quanto à variação da THD de tensão.

Nesse caso, os erros da técnica do triângulo de potências são todos nulos e os da transformada *wavelet* menores que 0,01%.

Já os erros das demais técnicas começam em 2.5% devido à distorção na corrente e aumentam à medida que se elevam os níveis de distorção. Entretanto, é importante notar que os erros de medição pela derivada da tensão aumentam consideravelmente com o aumento da THDV, ao contrário do que acontece nas outras duas técnicas.

4.2.2 Sensibilidade na medição do fator de potência e de deslocamento

Tendo em vista que o faturamento do excedente de reativos atualmente no Brasil é feito por meio do fator de potência, analisam-se também neste trabalho os erros que cada técnica pode aportar na obtenção do $\cos \phi$ e do ϕ

Inicialmente, porém, é importante verificar o comportamento do fator de potência verdadeiro e de deslocamento com relação à THDV. A Figura 4.3 mostra o $\cos \phi$ e o ϕ obtidos pela Transformada de Fourier para o caso em análise em função da distorção harmônica total da tensão.

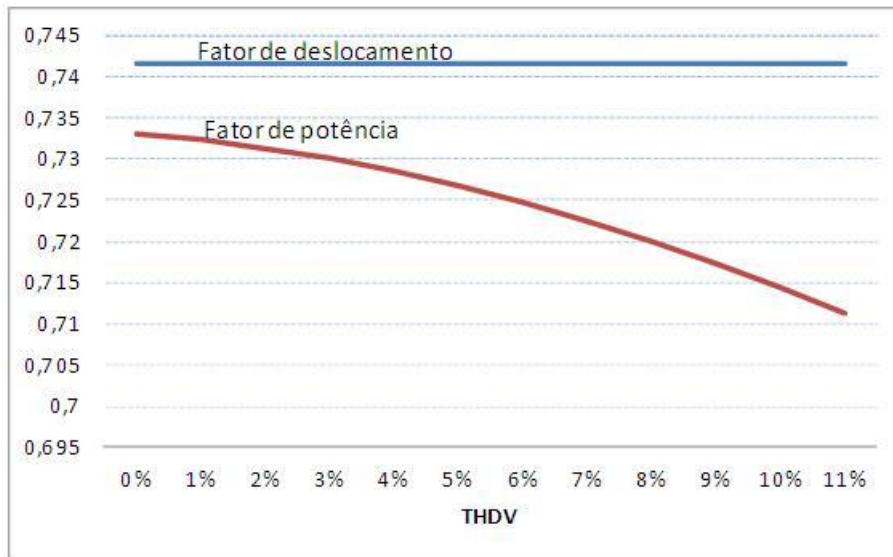


Figura 4.3 Variação do $\cos \phi$ e ϕ com o aumento da distorção harmônica total da tensão.

Como é de se esperar, o fator de deslocamento medido não varia com o aumento da distorção harmônica. Isso porque, pela definição, essa grandeza leva em conta apenas o deslocamento entre os sinais de tensão e corrente elétrica na frequência fundamental.

No entanto, o fator de potência é altamente afetado pela THDV. No exemplo acima, para uma taxa de distorção total da tensão de 11%, o $\cos \phi$ medido é de 0,711 enquanto que o $\cos \phi$ vale 0,742. Nesse caso, a atribuição de responsabilidade pela distorção no sinal de tensão não é trivial (SANTOS, COSTA e DE OLIVEIRA, 2009). Assim, o consumidor atendido por um sinal de tensão não-senoidal tem seu fator de potência diminuído por razões que podem fugir de sua responsabilidade.

De forma complementar, a análise de sensibilidade apresentada nos itens a seguir permite delinear as melhores técnicas para medição do $\cos \phi$ e do $\cos \phi$

4.2.2.1 Erros em relação a $\cos \phi$

A Figura 4.4 mostra o perfil dos erros na medição do fator de deslocamento utilizando as cinco técnicas descritas no item 3.2.

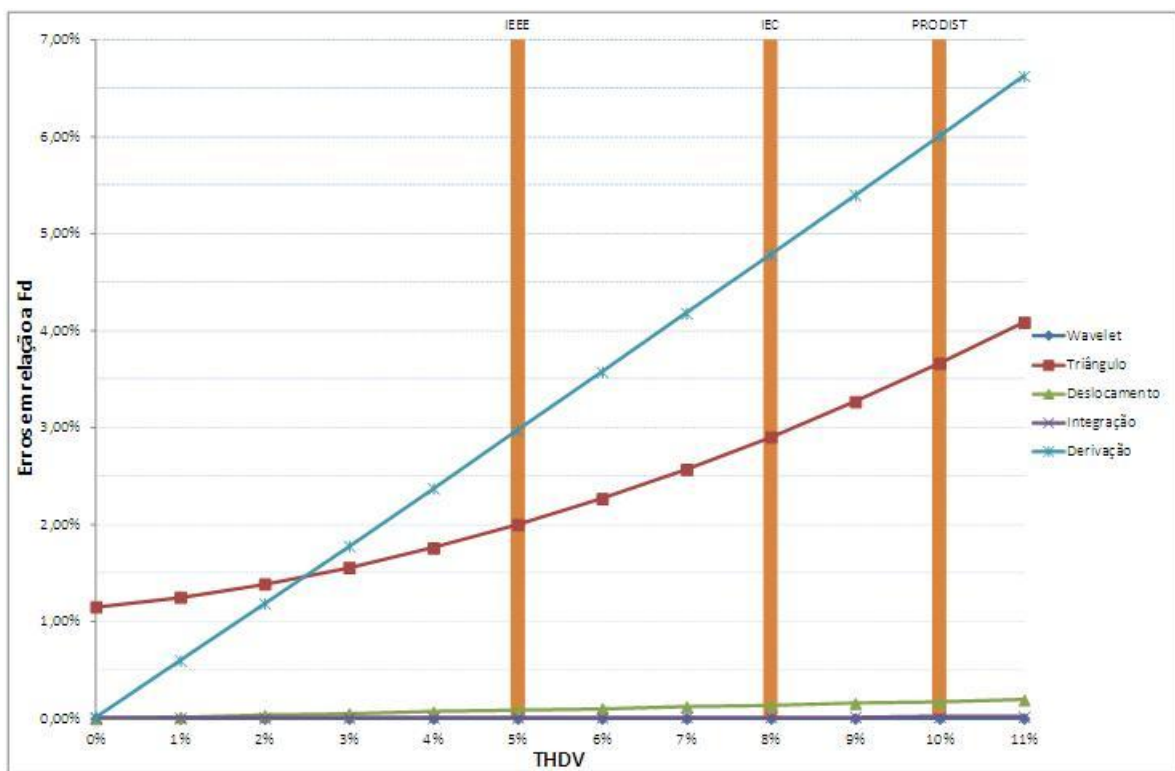


Figura 4.4 Análise de sensibilidade do erro de medição das técnicas analisadas em relação a $\cos \phi$ quanto à variação da THD de tensão

É possível perceber claramente que as Figuras Figura 4.1 e Figura 4.4 são bastante semelhantes. Isso acontece porque os erros na medição da potência ativa são pequenos, de

modo que as discrepâncias na medição da potência reativa fundamental se refletem no cálculo do fator de deslocamento.

Assim, as melhores técnicas para medição dessa grandeza são a do deslocamento de 90°, da integração do sinal de tensão e da Transformada Wavelet. Mesmo com THDV acima de 10%, os erros apresentados por essas técnicas para o cálculo do ϕ foram menores que 0,3%.

4.2.2.2 Erros em relação a ϕ

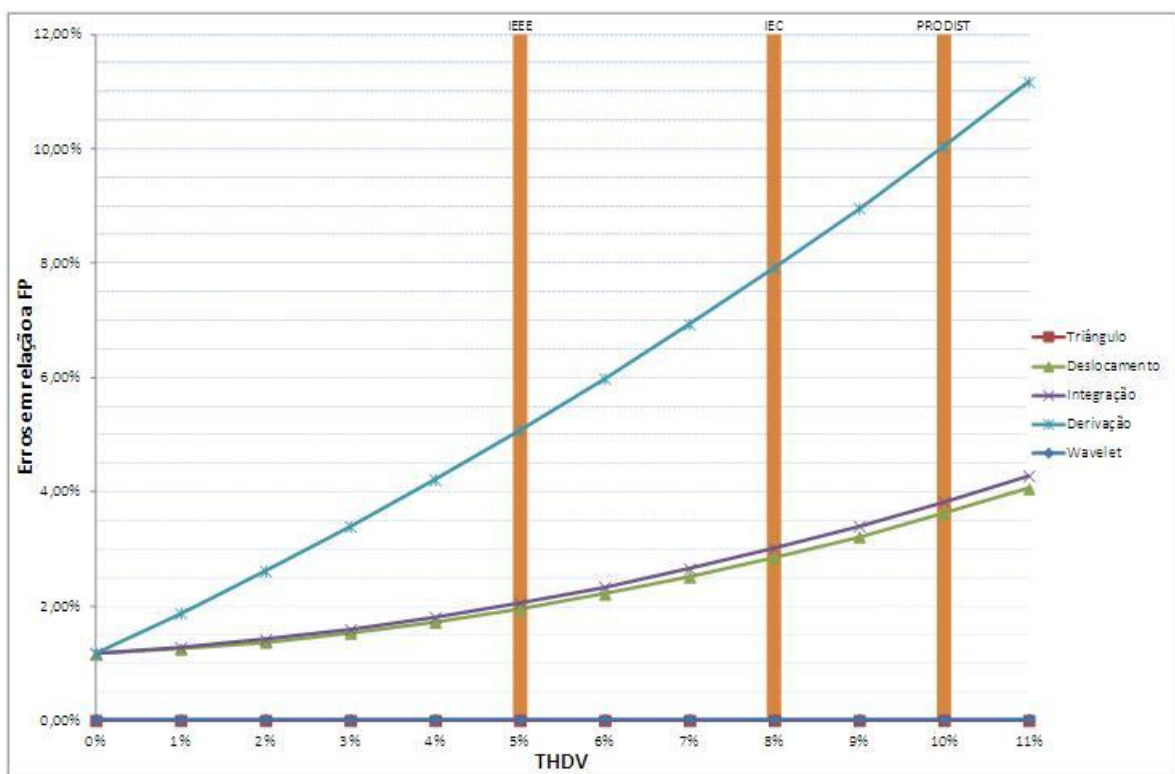


Figura 4.5 Análise de sensibilidade do erro de medição das técnicas analisadas em relação a ϕ quanto à variação da THD de tensão

De modo análogo ao que acontece entre a medição de ϕ e ϕ os erros na medição de ϕ são semelhantes àqueles obtidos quando da análise de sensibilidade da potência não-ativa P_0 , conforme se observa pelas Figuras Figura 4.2 e Figura 4.5.

Nesse caso, somente o uso de transformadas ou a técnica do triângulo de potências permitem a obtenção de valores precisos do fator de potência.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Constata-se que a única técnica que permite conseguir erros quase nulos, tanto para a definição de potência reativa contendo apenas a componente fundamental quanto para o caso de toda potência não-ativa, é a transformada **wavelet**

Para a medição de S_5 e de (ϕ) há ainda as técnicas de integração e deslocamento de 90° no sinal de tensão que podem ser utilizadas, dependendo dos valores de distorção e da classe de exatidão requerida dos medidores.

Por outro lado, a medida de todas as componentes harmônicas da potência reativa (Q) ou do fator de potência $(\cos \phi)$ pode ser obtida com precisão somente pela técnica do triângulo de potências, além, é claro, das transformadas **wavelet** e de Fourier.

5 CONCLUSÕES

A medição para faturamento de energia reativa na baixa tensão necessita de aprimoramentos que envolvem desde a sua definição até a forma de cálculo sob condições não-senoidais. Isso porque a presença de distorções harmônicas nas redes de baixa tensão é mais significativa que na alta, devido às menores potências de curto circuito e às cargas altamente não-lineares dos consumidores residenciais e comerciais de baixa demanda.

Nesse sentido, uma vez definida a forma de faturamento, dentre as diversas técnicas utilizadas nos medidores eletrônicos para obtenção da potência reativa, algumas apresentam erros consideráveis quando a rede possui tensões e correntes não senoidais, mesmo quando essas distorções na forma de onda estejam dentro de valores de referência adotados atualmente.

Assim, apresentaram-se algumas técnicas simples utilizadas (triângulo de potências, deslocamento de 90° , integração e derivação do sinal de tensão), além da transformada de Fourier e de **wavelet**. Uma primeira análise foi feita por meio da aplicação de algoritmos computacionais que simulam essas técnicas na obtenção da potência reativa para quatro casos diferentes: consumidor residencial de consumo médio às 12h00min; consumidor residencial de consumo alto às 21h00min; prédio comercial em horário de expediente; prédio comercial durante a madrugada.

Os resultados dados pela transformada de Fourier são utilizados como valores de referência, tendo em vista que essa técnica já é bem estabelecida e apresenta resultados confiáveis. A avaliação dos cálculos permite concluir que, à exceção da transformada **wavelet** que possui erros bem próximos de zero, as demais técnicas de medição podem apresentar valores que não são condizentes com aqueles determinados teoricamente.

Do mesmo modo, realizou-se uma análise de sensibilidade para checar a variação dos erros nos valores de potência reativa obtidos pelas cinco técnicas com a distorção harmônica total da tensão. Essa análise foi feita para se determinar a variação dos erros tanto em relação à potência reativa fundamental, quanto em relação à potência não-ativa total.

Igualmente, realizou-se um estudo da sensibilidade da medição do fator de potência e do fator de deslocamento à variação na distorção harmônica total da tensão.

Conclui-se dessa análise que a transformada *wavelet* permite a obtenção de valores confiáveis de potência reativa, seja na fundamental, seja toda potência não-ativa. Nesse caso, todos os erros verificados são menores que 0,4%, com um custo computacional bem menor que aquele associado à Transformada de Fourier.

No que se refere especificamente à medição da potência reativa fundamental, as técnicas do triângulo de potências e da derivação do sinal de tensão apresentam erros muito elevados. Por exemplo, para níveis de distorção harmônica da tensão em 10% (valor limite estabelecido pelo PRODIST para redes de baixa tensão), o erro apresentado pela técnica do triângulo de potências é de 4,2% e, para a derivação do sinal de tensão, chega a 7,4%.

Já com relação à potência não-ativa, a técnica do deslocamento de 90° e da integração do sinal de tensão apresentaram erros inaceitáveis. Para o caso simulado, os erros provenientes dessas técnicas foram da ordem de 3,5% para THD da tensão em torno de 5%, subindo para cerca de 4,5% quando o THD aumenta para 10%. Novamente nesse caso, o método de derivação do sinal de tensão mostrou-se inadequado, com erros muito acima de todas as demais técnicas de medição.

Assim, uma primeira conclusão é de que a técnica da derivação do sinal de tensão não deve ser usada para obtenção da potência reativa em redes com distorções harmônicas, independentemente da sua definição (± 35 ou 0).

De maneira adicional, os resultados obtidos da análise de sensibilidade do $\cos \phi$ e do $\cos \phi_d$ à variação da THDV permitem concluir que mudanças na distorção da tensão podem levar à diminuição do $\cos \phi$ da unidade consumidora que chegaram a 4%.

Isso implica dizer que, no caso do fator de potência (grandeza que considera todas as distorções harmônicas no seu cálculo), certos consumidores poderiam ser sobrefaturados pelo excedente de reativos devido à má qualidade da tensão de fornecimento a sua unidade consumidora. Assim, esse consumidor hipotético, além de ter uma tensão de fornecimento

de má qualidade por motivos que nem sempre lhe podem ser atribuídos, seria penalizado pela cobrança de reativos excedentes.

Além disso, a forma de faturamento do excedente de reativos deve considerar a facilidade de correção do problema por parte dos consumidores. Nesse caso, a correção do baixo fator de potência verdadeiro é bastante complexa e não se dá somente pela inserção de bancos de capacitores.

Por outro lado, o fator de deslocamento independe das distorções harmônicas na tensão de fornecimento, pode ser prontamente corrigido pelos consumidores e, além disso, é facilmente medido pelo uso de transformadas e também por duas técnicas simples de medição eletrônica: a do deslocamento de 90° e a da integração do sinal de tensão.

Conclui-se portanto que o (2) é mais adequado como grandeza a ser faturada para controle do excedente de reativos, em detrimento do (1). Isso acontece porque o fator de deslocamento é de fácil medição e não depende de eventuais distorções nos sinais de tensão.

A utilização do (2) para faturamento do excedente de reativos não implica dizer que os efeitos das distorções harmônicas possam ser negligenciados pelos agentes do setor elétrico. Pelo contrário, significa somente que o excedente de reativos na rede é controlado de maneira mais eficaz quando adotado de forma independente dos harmônicos e que as distorções harmônicas devem receber atenção específica, sem se misturar com outras grandezas de mensuração do uso eficiente das redes.

Adicionalmente, a análise de sensibilidade identificou que os erros atrelados à transformada *wavelet* são pequenos e não aumentam com o acréscimo dos níveis de distorção harmônica. Assim, a transformada *wavelet* mostrou-se bastante eficiente na obtenção de ambas as definições de potência reativa, com reduzidos erros em todas as simulações e esforço computacional bem menor que o da transformada de Fourier.

O uso de transformadas, principalmente da já consagrada transformada de Fourier, leva a ótimos resultados, contudo o custo computacional é bastante elevado, podendo acrescentar demasiadamente o preço dos medidores e inviabilizando sua aplicação em larga escala na

baixa tensão. Nesse contexto, apresenta-se aqui a transformada **wavelet** como uma possível solução, dado seu bom desempenho nas simulações e seu menor custo computacional se comparada aos métodos de Fourier. Conclui-se também que a adoção do fator de deslocamento como grandeza utilizada para controle do excedente de reativos nas redes elétricas tem vantagens sobre o tradicional fator de potência, dentre as quais se destacam o fato de ser independente em relação à distorção harmônica e sua facilidade de obtenção por meio de diversas técnicas simples de medição eletrônica.

Sugestões de aperfeiçoamento deste trabalho e de trabalhos futuros englobam:

- x Realização de simulações para identificar a influência dos ângulos de fase das componentes harmônicas no desempenho das técnicas de medição estudadas;
- x Simulação em laboratório, com medidores reais e sinais de tensão e corrente típicos de unidades consumidoras em baixa tensão;
- x Constatações em campo, com instalação de medidores que empreguem as diferentes técnicas em uma mesma unidade consumidora, a fim de avaliar eventuais discrepâncias nos valores medidos em casos reais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-RAWI, A.; DEVANEY, M. **Wavelets and power system transient analysis.** Instrumentation and Measurement Technology Conference. [S.l.]: IEEE. 1998. p. 1331-1334.
- ANEEL. **Resolução Normativa nº. 456, de 29 de novembro de 2000.** Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília. 2000.
- ANEEL. **Procedimentos de Distribuição - PRODIST.** Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília. 2008.
- ANEEL. **Dados de consumo de energia elétrica em 2010.** Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília - DF. 2010.
- ANEEL. **Resolução Normativa nº. 414, de 09 de setembro de 2010.** Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília. 2010.
- ANEEL. Entenda o que é pago na conta de energia. **Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2011. Disponível em:
<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=4238&id_area=90>. Acesso em: 22 setembro 2011.
- ARSENEAU, R. et al. Practical Definitions for Power in Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads: A Discussion. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 11, n. 1, p. 79-101, Janeiro 1996.
- BRASIL. **Decreto nº. 59.414, de 25 de outubro de 1966.** Congresso Nacional. Brasília. 1966.
- BRASIL. **Decreto nº. 61.317, de 11 de setembro de 1967.** Congresso Nacional. Brasília. 1967.
- BRASIL. **Decreto nº. 62.724, de 17 de maio de 1968.** Congresso Nacional. Brasília. 1968.
- BRASIL. **Decreto nº. 75.887, de 20 de junho de 1975.** Congresso Nacional. Brasília. 1975.
- BRASIL. **Decreto nº. 86.463, de 13 de outubro de 1981.** Congresso Nacional. Brasília. 1981.
- BRASIL. **Decreto nº. 479, de 20 de março de 1992.** Congresso Nacional. Brasília. 1992.
- CASTILHO, J. E. **Aplicação do conceito da análise de multirressolução biortogonal na solução numérica de equações diferenciais.** Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Campinas. 2001.

CATALIOTTI, A.; COSENTINO, V.; NUCCIO, S. The Measurement of Reactive Energy in Polluted Distribution Power Systems: An Analysis of the Performance of Commercial Static Meters. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 23, n. 3, p. 1296 - 1301 , julho 2008.

CIGRÉ. **Joint Working Group Cigré C4.07 / Cired - Power Quality Indices and Objectives**. Cigré. [S.l.]. 2004.

CPUC. **Sheet number 2700-E**. California Public Utilities Commission. [S.l.]. 2007.

CPUC. **Sheet Number 3327-E**. California Public Utilities Commission. [S.l.]. 2010.

CRE. **Proposition de la Commission de régulation de l'énergie du 26 février 2009 relative aux tarifs d'utilisation des réseaux publics de transport et de distribution d'électricité**. Commission de Régulation de l'Énergie. Paris. 2009.

DAUBECHIES, I. **Ten Lectures on Wavelets**. Philadelphia, PA: SIAM, 1992.

DE OLIVEIRA, H. M. **Análise de sinais para engenheiros: Uma abordagem via Wavelets**. [S.l.]: Brasport, 2007.

DNAEE. **Portaria nº. 095, de 17 de novembro de 1981**. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. Brasília. 1981.

DNAEE. **Portaria nº. 126, de 02 de setembro de 1986**. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. Brasília. 1986.

DNAEE. **Portaria nº. 33, de 11 de fevereiro de 1988**. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. Brasília. 1988.

DNAEE. **Portaria nº. 085, de 25 de março de 1992**. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. Brasília. 1992.

DNAEE. **Portaria nº. 1.569, de 23 de dezembro de 1993**. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. Brasília. 1993.

DNAEE. **Portaria nº. 613, de 09 de junho de 1993**. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. Brasília. 1993.

DNAEE. **Portaria nº. 466, de 12 de novembro de 1997**. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. Brasília. 1997.

DRIESEN, J. **Analysing time-varying power system harmonics using wavelet transform. Instrumentation and Measurement**. IEEE Proceedings on Technology Conference. [S.l.]: IEEE. 1996. p. 474-479.

DTE. **Electricity Metering Code. Holanda**. Office of Energy Regulation (DTe). [S.l.]. 2007.

DTE. **Network Code. Holanda**. Office of Energy Regulation (DTe). [S.l.]. 2007.

EDISON ELECTRIC INSTITUTE. **Handbook for Electricity Metering**. 10th edition. ed. Washington: [s.n.], 2002. 584 p.

ELETROBRAS. **Relatório GCPS/SE/CTST/GTFC/005.87**. ELETROBRAS. [S.l.]. 1987.

ELETROBRAS. **Evolução do Fator de Potencia e Estimativa de Redução das Perdas nos Sistemas Interligados Sul/Sudeste e Norte/Nordeste. Relatório GCOL.SCEL.GTPM.GTAS**. ELETROBRAS. [S.l.]. 1991.

ELETROBRAS. **Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso - Ano Base 2005**. ELETROBRAS - PROCEL. Rio de Janeiro, p. 85. 2008.

ERC. **Philippine Distribution Code**. Energy Regulatory Commission. [S.l.]. 2001.

ESC. **Electricity Distribution Code**. Essential Services Comission - Australia. Melbourne. 2008.

FILIPSKI, P. S.; LABAJ, P. W. Evaluation of Reactive Power Meters in the Presence of High Harmonic Distortion. **EEE Transactions on Power Delivery**, Ottawa, 7, n. 4, Oct 1992. 1793 - 1799.

FRANÇA. **Décision du 5 juin 2009**. Journal officiel de la République française. Paris. 2009.

GRANDI, A. L. Z. D. G.; CARNEIRO, J. R. V. **Caracterização das Distorções Harmônicas de Tensão em Circuitos Secundários de Baixa Tensão**. Anais do VIII CBQEE. Blumenau - SC: [s.n.]. 2009. p. 1-6.

HOLANDA. **Electricity Act 1998**. Parlamento Holandês. Haia, Holanda. 1998.

IEEE. **IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**. IEEE. New York, p. 100. 1992. (IEEE Std 519-1992).

IEEE. **IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions**. IEEE Power and Energy Society. New York, p. 52. 2010. (IEEE Std 1459-2010).

KIM, C. H.; AGGARWAL, R. Wavelet transforms in power systems. I. General introduction to the wavelet transforms. **Power Engineering Journal**, v. 14, n. 2, p. 81-87, abril 2000.

KIM, C. H.; AGGARWAL, R. Wavelet transforms in power systems. II. Examples of application to actual power system transients. **Power Engineering Journal**, v. 15, n. 4, p. 193-202, agosto 2001.

LOPES, A. D. M. **Contribuição para a determinação do fator de potência e compensação de reativos em sistemas elétricos de potência contendo distorções harmônicas**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 1995.

- MALLAT, S. **Wavelet Tour of Signal Processing**. San Diego, CA: Academic Press, 1999.
- MANGILI JÚNIOR, J. F. **Comportamento da Potência Elétrica Instantânea sob Condições Senoidais e Distorcidas**. Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Campinas, p. 63. 1995.
- MORSI, W. G.; EL-HAWARY, M. E. **The most suitable mother wavelet for steady-state power system distorted waveforms**. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering CCECE 2008. [S.l.]: [s.n.]. 2008. p. 17-22.
- MOULIN, E. Measuring Reactive Power in Energy Meters. **METERING INTERNATIONAL**, v. 1, p. 52-54, 2002.
- PACIFIC POWER COMPANY. Tariff Sheets. **Pacific Power Company**, 2010. Disponível em: <<http://www.pacificpower.net>>. Acesso em: 17 maio 2010.
- PIRES, I. A. **Caracterização de harmônicos causados por equipamentos eletroeletrônicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de energia elétrica**. Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica - UFMG. Belo Horizonte, p. 157. 2006.
- ROBERTSON, D. C. Wavelets and electromagnetic power system transients. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 11, n. 2, p. 1050-1058, 1996.
- ROCKY MOUNTAIN POWER. **Original Sheet No. R2-1 - P.S.C. Wyoming No. 11**. [S.l.]. 2009.
- ROCKY MOUNTAIN POWER. Understanding Your Electricity Charges. **What is a power factor charge?**, 2010. Disponível em: <<http://www.rockymountainpower.net/bus/ayu/uyec.html>>. Acesso em: 12 maio 2010.
- RODRIGUES, J. E. **Interferência de Harmônicas em Equipamentos de Medição de Energia Elétrica**. Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 138. 2009.
- SANTOS, I. N.; COSTA, F. H.; DE OLIVEIRA, J. C. **Avaliação do Desempenho das Metodologias para a Representação de Consumidores Visando o Compartilhamento das Distorções Harmônicas**. VIII CQBEE - Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica. Blumenau - SC: [s.n.]. 2009.
- SANTOS, I. N.; COSTA, F. H.; OLIVEIRA, J. C. D. **Avaliação do Desempenho das Metodologias para a Representação de Consumidores Visando o Compartilhamento das Distorções Harmônicas**. VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica - CBQEE. Blumenau - SC: [s.n.]. 2009.

SANTOSO, S.; POWERS, E. J.; GRADY, W. M. **Electric Power Quality Disturbance Detection Using Wavelet Transform Analysis**. Proceedings of the IEEE International Symposium on Signal Processing. [S.l.]: IEEE. 1994. p. 166-169.

SHAYANI, R. A. **Comunicação Pessoal (e-mail)**. [S.l.]. 2011.

SODRÉ, U. **Séries de Fourier: Notas de aulas compiladas no dia 6 de Maio de 2003**. Computação, Engenharia Elétrica e Engenharia Civil. [S.l.], p. 41. 2003.

SUHETT, M. R. **Análise de Técnicas de Medição de Potência Reativa em Medidores Eletrônicos**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, p. 106. 2008.

SVENSSON, S. **Power measurement techniques for non-sinusoidal conditions: The significance of harmonics for the measurement of power and other AC quantities**. Department of Electric Power Engineering - Chalmers University of Technology. Göteborg - Sweden, p. 159. 1999.

VELASCO, L. N. **Análise Experimental de Erros de Medição de Energia Elétrica Ativa em Medidores Eletromagnéticos tipo Indução, Sujeitos a Distorções Harmônicas de Correntes e Tensões, em Sistemas Equilibrados e Desequilibrados**. Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, p. 187. 2007.

WEON-KI, Y.; DEVANEY, M. J. Reactive power measurement using the wavelet transform. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 49, n. 2, p. 246-252, 2000.

YOON, W.-K.; DEVANEY, M. J. Power Measurement Using the Wavelet Transform. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 47, n. 5, p. 1205-1210, 1998.

YOON, W.-K.; DEVANEY, M. J. Reactive power measurement using the wavelet transform. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 49, n. 2, p. 246-252, 2000.

ZHANG, X.-B.; LIANG, Y.-H.; CUI, J.-R. **A novel active power measuring method for power systems with distorted signals**. International Conference on Information and Automation. [S.l.]: [s.n.]. 2008. p. 5-9.

**APÊNDICE - ALGORITMOS IMPLEMENTADOS PARA OBTENÇÃO
DOS VALORES DE POTÊNCIA REATIVA**

TRANSFORMADA DE FOURIER

function [P,Q,Qb,Q1,S1,P1,S,FP,Fd]=pot_fourier(V,I)
% Cálculo dos valores de Potência Ativa (P), Reativa (Q), Reativa de Budeanu (Qb),
Aparente (S), Fator de Potência (FP) e Fator de Deslocamento (Fd) utilizando a série de
Fourier. Nessa função, V é o sinal de tensão, I é o sinal de corrente.

```
[r,L]=size(V);  
fV=fft(V,L)/L;  
fI=fft(I,L)/L;  
NL=L/2+1;  
yV=sqrt(2)*abs(fV(1:NL));  
yI=sqrt(2)*abs(fI(1:NL));  
f = L/2*linspace(0,1,NL);  
rmsV=sqrt(sum(yV.^2));  
rmsI=sqrt(sum(yI.^2));  
aV=angle(fV(1:NL));  
aI=angle(fI(1:NL));  
%CÁLCULO DE P  
P=0;  
for i=[1:7]  
    P=P+yV(i*60+1)*yI(i*60+1)*cos(aV(i*60+1)-aI(i*60+1));  
end  
%CÁLCULO DE Qb  
Qb=0;  
for i=[1:7]  
    Qb=Qb+yV(i*60+1)*yI(i*60+1)*sin(aV(i*60+1)-aI(i*60+1));  
end  
%CÁLCULO DE S1, P1 e Q1  
Q1=yV(60+1)*yI(60+1)*sin(aV(60+1)-aI(60+1));  
P1=yV(60+1)*yI(60+1)*cos(aV(60+1)-aI(60+1));  
S1=yV(60+1)*yI(60+1);  
%CÁLCULO DE S
```


$$S = \text{rms}V * \text{rms}I;$$

%CÁLCULO DE Q (energia não-ativa N)

$$Q = \text{sqrt}(S^2 - P^2);$$

%CÁLCULO DE FP

$$FP = P / (\text{rms}V * \text{rms}I);$$

%CÁLCULO DE Fd

$$Fd = \cos(aV(60+1) - aI(60+1));$$

TRANSFORMADA WAVELET

```
function [P,Q,Qb,S,FP,Sa,Pa,Qa,Fd]=pot_wavelet(V,I,famW,N)
% Cálculo dos valores de Potência Ativa (P), Reativa (Q), Aparente (S), Fator de Potência
(FP) e Fator de Deslocamento (Fd) utilizando a Transformada Wavelet no cálculo de P e
dos valores RMS de V e I que dão origem a S e cálculo do Q indiretamente, por meio do
triângulo de potências. Nessa função, V é o sinal de tensão, I é o sinal de corrente, famW é
a família Wavelet (ex. 'coif5') e N é o número de decomposições (ex. 5)
```

%CÁLCULO DA DWT DE V E DE I

```
[C,L]=wavedec(V,N,famW);
for i=1:N
    dwtV(i,:)=wrcoef('d',C,L,famW,i);
end
dwtV(N+1,:)=wrcoef('a',C,L,famW,N);
[C,L]=wavedec(I,N,famW);
for i=1:N
    dwtI(i,:)=wrcoef('d',C,L,famW,i);
end
dwtI(N+1,:)=wrcoef('a',C,L,famW,N);
```

%CÁLCULO DE P

```
Pa_i=dwtV(N+1,:).*dwtI(N+1,:);
Pa=mean(Pa_i);
for j=1:N
    Pd_i(j,:)=dwtV(j,:).*dwtI(j,:);
    Pd_ii(j)=mean(Pd_i(j,:));
end
Pd=sum(Pd_ii);
P=Pa+Pd;
```

%CÁLCULO DOS VALORES RMS DE V E DE I UTILIZANDO A DWT

```
dwtV(N+1,:)=dwtV(N+1,:).^2;
RMS_V_A_2=mean(dwtV(N+1,:));
for j=1:N
```

```

    dwtV(j,:)=dwtV(j,:).^2;
    RMS_V_D_2_i(j)=mean(dwtV(j,:));
end
RMS_V_D_2=sum(RMS_V_D_2_i);
RMS_V=sqrt(RMS_V_A_2+RMS_V_D_2);
dwtI(N+1,:)=dwtI(N+1,:).^2;
RMS_I_A_2=mean(dwtI(N+1,:));
for j=1:N
    dwtI(j,:)=dwtI(j,:).^2;
    RMS_I_D_2_i(j)=mean(dwtI(j,:));
end
RMS_I_D_2=sum(RMS_I_D_2_i);
RMS_I=sqrt(RMS_I_A_2+RMS_I_D_2);
%CÁLCULO DE Qb
Sa_2=RMS_V_A_2*RMS_I_A_2;
Qa_2=Sa_2-Pa^2;
for j=1:N
    Sd_2(j)=RMS_V_D_2_i(j)*RMS_I_D_2_i(j);
    Qd_ii_2(j)=Sd_2(j)-Pd_ii(j)^2;
end
Qd_2=sum(Qd_ii_2);
Qb=sqrt(Qa_2+Qd_2);
Sa=sqrt(Sa_2);
Qa=sqrt(Qa_2);
%CÁLCULO DE S
S=RMS_V*RMS_I;
%CÁLCULO DE Q (energia não-ativa N)
Q=sqrt(abs(S^2-P^2));
%CÁLCULO DE FP
FP=P/S;
%CÁLCULO DE Fd (Fator de Deslocamento)
Fd=Pa/sqrt(RMS_V_A_2*RMS_I_A_2);

```

TRIÂNGULO DE POTÊNCIAS

```
function [P,Q,S,FP,Fd]=pot_triangulo(V,I,amost)
% Cálculo dos valores de Potência Ativa (P), Reativa (Q), Aparente (S), Fator de Potência
(FP) e Fator de Deslocamento (Fd) utilizando a técnica do triângulo de potência. Nessa
função, V é o sinal de tensão, I é o sinal de corrente, amost é a quantidade de dados em um
segundo (ex. 8.400).

[r,L]=size(V);
somaP=0;
somaQ=0;
for i=1:L
    auxP=V(i)*I(i);
    somaP=somaP+auxP;
end
%CÁLCULO DE P
P=somaP/L;
%CÁLCULO DOS VALORES RMS DE V E I
V=V.^2;
RMS_V=sqrt(mean(V));
I=I.^2;
RMS_I=sqrt(mean(I));
%CÁLCULO DE S
S=RMS_V*RMS_I;
%CÁLCULO DE Q
Q=sqrt(S^2-P^2);
%CÁLCULO DE FP
FP=P/S;
Fd='não existe';
```

DESLOCAMENTO DE 90° DO SINAL DE ENTRADA

```
function [P,Q,S,FP,Fd]=pot_desloc90(V,I,amost)
```

% Cálculo dos valores de Potência Ativa (P), Reativa (Q), Aparente (S), Fator de Potência (FP) e Fator de Deslocamento (Fd) utilizando a técnica do deslocamento de 90 graus. Nessa função, V é o sinal de tensão, I é o sinal de corrente e amost é a quantidade de dados em um segundo (ex. 8.400).

```
[r,L]=size(V);
```

```
desloc=round(amost/(60*4));
```

```
somaP=0;
```

```
somaQ=0;
```

```
for i=(1+desloc):(L-3*desloc)
```

```
    auxP=V(i)*I(i);
```

```
    somaP=somaP+auxP;
```

```
    auxQ=V(i)*I(i-desloc);
```

```
    somaQ=somaQ+auxQ;
```

```
end
```

```
%CÁLCULO DE P
```

```
P=somaP/(L-4*desloc);
```

```
%CÁLCULO DE Q
```

```
Q=-somaQ/(L-4*desloc);
```

```
%CÁLCULO DE S E FP
```

```
S=sqrt(P^2+Q^2);
```

```
FP=P/S;
```

```
Fd='não existe';
```

INTEGRAÇÃO DO SINAL DE TENSÃO

function [P,Q,S,FP,Fd]=pot_integral(V,I,amost)
% Cálculo dos valores de Potência Ativa (P), Reativa (Q), Aparente (S), Fator de Potência (FP) e Fator de Deslocamento (Fd) utilizando a técnica da integração do sinal de V (V_int), obtido por meio da função "cumtrapz". Nessa função, V é o sinal de tensão, I é o sinal de corrente e amost é a quantidade de dados em um segundo (ex. 8.400).

```
[r,L]=size(V);  
somaP=0;  
somaQ=0;  
for i=1:L  
    auxP=V(i)*I(i);  
    somaP=somaP+auxP;  
end  
%CÁLCULO DE P  
P=somaP/L;  
for j=[1:amost]  
    t(j)=j/amost;  
end  
V_int=cumtrapz(t,V);  
V_int=V_int.*(2*pi*60);  
for i=1:L  
    auxQ=V_int(i)*I(i);  
    somaQ=somaQ+auxQ;  
end  
%CÁLCULO DE Q  
Q=somaQ/L;  
%CÁLCULO DE S  
S=sqrt(P^2+Q^2);  
%CÁLCULO DE FP  
FP=P/S;  
Fd='não existe';
```

DERIVAÇÃO DO SINAL DE TENSÃO

```
function [P,Q,S,FP,Fd]=pot_derivada(V,I,amost)
```

% Cálculo dos valores de Potência Ativa (P), Reativa (Q), Aparente (S), Fator de Potência (FP) e Fator de Deslocamento (Fd) utilizando a técnica da derivação do sinal de V (V_der), obtida por meio da função "gradient". Nessa função, V é o sinal de tensão, I é o sinal de corrente e amost é a quantidade de dados em um segundo (ex. 8.400).

```
[r,L]=size(V);
```

```
somaP=0;
```

```
somaQ=0;
```

```
for i=1:L
```

```
    auxP=V(i)*I(i);
```

```
    somaP=somaP+auxP;
```

```
end
```

```
%CÁLCULO DE P
```

```
P=somaP/L;
```

```
V_der=gradient(V);
```

```
V_der=V_der.*amost/(2*pi*60);
```

```
for i=1:L
```

```
    auxQ=V_der(i)*I(i);
```

```
    somaQ=somaQ+auxQ;
```

```
end
```

```
%CÁLCULO DE Q
```

```
Q=-somaQ/L;
```

```
%CÁLCULO DE S
```

```
S=sqrt(P^2+Q^2);
```