

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DAELE

TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

REINALDO LUAN RODRIGUES

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO PARA CÁLCULO DE FATOR DE
POTÊNCIA DE ACORDO COM A RECOMENDAÇÃO IEEE 1459-2010**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA - PR

2014

REINALDO LUAN RODRIGUES

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO PARA CÁLCULO DE FATOR DE
POTÊNCIA DE ACORDO COM A RECOMENDAÇÃO IEEE 1459-2010**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Tecnólogo em Automação Industrial, do DAELE, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. MsC. Marcelo Dias
Pedroso

PONTA GROSSA - PR

2014



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Ponta Grossa
DAELE
Tecnologia em Automação Industrial



TERMO DE APROVAÇÃO

ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE CÁLCULO DE FATOR DE POTÊNCIA DE ACORDO COM A RECOMENDAÇÃO IEEE 1459-2010

por

REINALDO LUAN RODRIGUES

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 20 de fevereiro de 2014 como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo em Automação Industrial. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Marcelo Dias Pedroso, Prof. MsC.
Prof. Orientador

Leonardo Bruno Campanhol, Prof. MsC.
Membro titular

Fábio Junior Batistar, Prof. Esp.
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Dedico este trabalho aos meus pais Gleocéia e Jairo, minha irmã Angélica e noiva Nathalie, pelos momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Com o passar do tempo percebemos que é muito difícil se realizar um grande feito sozinho, e são nas horas de dificuldades que surgem algumas pessoas, é são nelas que encontramos forças para o término com sucesso. Minha gratidão pelo conforto, apoio, direcionamento e incentivo a todos que participaram desse processo.

A Deus, por sempre guiar e iluminar minha caminhada, me protegendo e acalentando.

Aos meus pais Gleocéia Rodrigues e Jairo Rodrigues e irmã Angélica Fabiana Rodrigues, pela paciência, sabedoria, amor e total apoio nos momentos em que eu mais precisava.

A minha amada noiva Nathalie Hamine Panzarini, sem a qual não teria tanta força e vontade de crescer, pelo companheirismo, amizade e motivação.

Ao meu orientador professor Marcelo Dias Pedroso, pela incondicional atenção dedicada, pelos conselhos e por todos os ensinamentos passados.

Aos professores do DAELE, pela valiosa contribuição em sala de aula ampliando minha visão sobre os campos da Tecnologia em Automação Industrial.

Aos meus amigos mais próximos, pelos momentos de diversão e descontração, sem os quais tal caminhada se tornaria muito mais difícil.

"Algo só é impossível até que alguém
duvide e acabe provando o contrário."
(EISNTEIN, Albert)

RESUMO

RODRIGUES, Reinaldo L.. Estudo e implementação de cálculo de fator de potência de acordo com a recomendação IEEE 1459-2010, 2014 57p, Trabalho de Conclusão de Curso de Tecnologia em Automação Industrial pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Em sistemas elétricos de potência, o Fator de Potência (FP) é um indicador que apresenta grande importância para os consumidores, principalmente industriais, que podem ser taxados de multas quando este indicador for menor que 0,92, de acordo com a norma vigente nº 414/2010 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Estudos frequentes para definir corretamente o fator de potência, são objetos de pesquisas nacionais e internacionais voltados para a interpretação adequada. Buscando aprimorar os conhecimentos neste sentido, este trabalho apresenta uma análise comparativa entre os métodos clássicos e os métodos propostos na recomendação IEEE Std. 1459-2010 para calcular o Fator de Potência. São apresentadas as equações, no domínio do tempo, para definição da potência aparente, de acordo com a IEEE Std 1459-2010, onde as formulações para a potência aparente são obtidas em função de tensões e correntes variantes no tempo, utilizando os seus respectivos valores eficazes. Comprovando os equacionamentos, são apresentados exemplos de cálculos para essas grandezas de potência e definição do fator de potência para os sistemas monofásico, trifásico a três fios e trifásico a quatro fios.

Palavras-Chave: Qualidade de Energia Elétrica. IEEE Std 1459-2010. potência aparente. fator de potência. novas definições de potência.

ABSTRACT

RODRIGUES, Reinaldo L. Study and implementation of power factor calculation according to IEEE Std 1459-2010. 57p. Work Completion Course Technology in Industrial Automation. Federal Technology University - Parana. Ponta Grossa, 2014.

In electric power systems, Power Factor (PF) is an indicator has great importance for those consumers especially industrialists who may taxed in fines when this indicator is less than 0.92 according to current regulations 414/2010 of ANEEL (National Electric Energy Agency). Frequent studies to properly set the power factor, is subject to national and international research meant for the proper interpretation. In real situations, for example, voltages and electric currents with harmonic distortions that are a subject of great relevance when has to worry about power quality. Searching for enhance knowledge in this sense, this work presents a comparative analysis between the classical methods and the methods proposed in the IEEE Std 1459-2010 to calculate the Power Factor. The equations are presented in the time domain for determining the apparent power in accordance with IEEE Std 1459-2010, where the formulations on apparent power are obtained on the basis of voltages and current using their respective values effective. For validation, are presented examples of calculations for these quantities of power and definition of power factor for single-phase, three-phase three-wire and three-phase four-wire systems

Keywords: Power Quality, IEEE Std 1459-2010, apparent power, power factor, new definitions of power

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Triângulo de potência.....	20
Figura 2 - Potência aparente vetorial e aritmética	29
Figura 3 - Sistema Monofásico alimentando uma carga RL.....	36
Figura 4 - Tensão e Corrente Monofásico com Carga RL.....	37
Figura 5 - Sistema Monofásico alimentando um Retificador com carga RL.	38
Figura 6 - Tensão da rede (V_a) e Corrente (I_a) do Retificador Monofásico com carga RL.....	39
Figura 7 - Espectro da corrente de entrada do Retificador Monofásico com Carga RL.....	39
Figura 8 - Carga RL trifásica conectada em Delta.....	41
Figura 9 - (a) Tensões de linha, (b) Corrente de fase carga RL.....	42
Figura 10 - Sistema trifásico alimentando um retificador com carga RL.	44
Figura 11 - (a) Tensões de linha, (b) Corrente de fase retificador trifásico.	45
Figura 12 - Espectro harmônico da corrente (I_a) de entrada do Retificador Trifásico com carga RL.....	45
Figura 13 - Sistema trifásico a 4 fios alimentando cargas RL desequilibradas.	48
Figura 14 - (a) Tensões de Fase (b) Correntes de fase - Carga RL desequilibrada 4 fios.....	48
Figura 15 - Sistema trifásico alimentando carga R entre duas fases.	51
Figura 16 - (a) Tensões de Fase (b) Correntes de fase - Carga R entre fases.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grandezas de potências e indicadores em sistemas 3Φ não senoidais e desbalanceados (IEEE Std.1459-2010).	33
Tabela 2 - Grandezas de potências e indicadores em sistemas 1Φ (IEEE Std.1459-2010).....	35

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

QEE	Qualidade de Energia Elétrica
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
AIEE	Instituto Americano de Engenheiros Eletricistas (do inglês American Institute of Electrical Engineers)
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (do inglês Institute of Electrical and Electronics Engineers
FBD	Fryze- Buchholz- Depenbrock
<i>RMS</i>	Valor eficaz ou valor quadrático médio (do inglês Root mean square)
v	Tensão instantânea monofásica
v_a, v_b, v_c	Tensões instantânea de fase trifásica
v_{ab}, v_{bc}, v_{ca}	Tensões instantânea de linha trifásica
i	Corrente instantânea monofásica
i_a, i_b, i_c	Correntes instantâneas trifásicas
V	Tensão eficaz monofásica
V_a, V_b, V_c	Tensões eficazes de fase trifásica
V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}	Tensões eficazes de linha trifásica
I	Corrente eficaz monofásica
I_a, I_b, I_c	Correntes eficazes trifásicas
p	Potência ativa instantânea
P, P_1	Potência ativa total, Potência ativa fundamental
Q, Q_1	Potência reativa total, Potência reativa fundamental
V_e, I_e	Tensão e Corrente efetivos
S, S_A, S_V, S_e	Potência aparente total, aritmética, vetorial e efetiva
FP, FP_e	Fator de Potência, Fator de Potência efetivo
THD	Taxa de distorção Harmônica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA	17
1.2	OBJETIVO GERAL	18
1.2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.3	JUSTIFICATIVA	18
2	GRANDEZAS DE POTÊNCIA	20
2.1	POTÊNCIA ATIVA, REATIVA E APARENTE	20
2.1.1	Potência Elétrica Monofásica (Senoidal)	21
2.1.2	Potência Elétrica Monofásica (Não-senoidal)	22
2.1.3	Potência Elétrica Trifásica (Senoidal)	23
2.1.4	Potência Elétrica Trifásica (Não-senoidal)	24
2.2	FATOR DE POTÊNCIA	25
2.3	PRODIST MODULO 8	27
3	NOVAS DEFINIÇÕES DE POTÊNCIA	29
3.1	IEEE Std 1459-2010	30
3.1.1	Sistemas Trifásicos a Três e Quatro Fios	30
3.1.2	Sistemas Monofásicos	33
4	IMPLEMETAÇÃO DE CÁLCULOS DE POTÊNCIA	36
4.1	SISTEMAS MONOFÁSICOS	36
4.1.1	Carga: RL	36
4.1.2	Retificador Monofásico com carga RL	38
4.2	SISTEMAS A TRÊS FIOS	41
4.2.1	Carga RL Desequilibrada conectada em Delta	41
4.2.2	Retificador trifásico com Carga RL	44
4.3	SISTEMAS A QUATRO FIOS	48

4.3.1	Carga RL Desequilibrado conectadas ao Neutro	48
4.3.2	Carga Resistiva entre duas fases	50
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
5.1	CONCLUSÃO	54
5.2	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	54
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com a Qualidade da Energia (QEE) tem aumentado nos últimos anos. Assim entende-se por QEE o grau no qual tanto a utilização quanto a distribuição de energia elétrica afetam o desempenho dos equipamentos elétricos. Qualquer variação na amplitude, forma de onda ou frequência, em relação aos valores ideais da corrente senoidal, podem ser considerados como distúrbios na Qualidade da Energia (ROGER, 1996) (MOHAN, 1995).

Em países como Estados Unidos e também na Europa já existem normas, que se colocadas em prática, visam melhorar a Qualidade da Energia, estabelecendo limites para o consumo de Energia Reativa e também limitando a Distorção Harmônica que as cargas podem produzir na rede elétrica. Com isso, é possível obter uma série de benefícios, como por exemplo, a diminuição de perdas, redução no stress de transformadores devido ao aquecimento excessivo, redução da interferência nos sistemas de telefonia e comunicação, entre outros (ROGER, 1996).

A energia elétrica é composta de duas partes: energia ativa (trabalho) e energia reativa (magnetizante). A energia ativa realiza o trabalho útil, a energia reativa não, apresentando única função de fornecer campos magnéticos requeridos pelas cargas, geralmente indutivas, caso o sistema seja puramente senoidal alimentado por uma carga RL. Sabe-se que por definição FP é a relação de trabalho (potência ativa) e a potência total consumida (potência aparente). Desta forma, basicamente, fator de potência é a medida de como efetivamente a energia elétrica está sendo drenada pelo consumidor. Quanto maior for o FP (mais próximo da unidade $FP=1$) melhor será o aproveitamento da energia elétrica.

Em conformidade com o estabelecido pelo Decreto nº 62.724, de 17 de maio de 1968 (BRASIL, 1968), com a nova redação dada pelo Decreto nº 75.887, de 20 de junho de 1975 (BRASIL, 1975), as concessionárias de energia elétrica adotaram, desde então, o FP de 0,85 como referência para limitar o fornecimento de energia reativa. O Decreto nº 479, de 20 de março de 1992 (BRASIL, 1992), reiterou a obrigatoriedade de se manter o FP o mais próximo possível da unidade (1,00), tanto pelas concessionárias, quanto pelos consumidores, recomendando, ainda, ao

Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE), o estabelecimento de um novo limite de referência para o fator de potência indutivo e capacitivo, bem como a forma de avaliação e de critério de faturamento da energia reativa excedente a esse novo limite.

A nova legislação pertinente (BRASIL, 1992), transferia para o DNAEE, uma nova forma de abordagem do ajuste, pelo baixo fator de potência, com os seguintes aspectos relevantes: aumento do limite mínimo do fator de potência de 0,85 para 0,92; faturamento de energia reativa capacitiva excedente; redução do período de avaliação do fator de potência, de mensal para horário.

O controle mais apurado do uso de energia reativa é mais uma medida adotada pelo DNAEE, visando estimular o consumidor, através da redução de perdas e a melhora do desempenho de suas instalações, assim como o setor elétrico nacional, incentivando a melhoria das condições operacionais e a liberação do sistema para atendimento a novas cargas com investimentos menores.

Para os sistemas elétricos com tensões e correntes senoidais e equilibradas, os conceitos de potência ativa, potência reativa e potência aparente estão bem definidos. Nesta situação, estes atendem a consumidores e concessionárias de forma satisfatória.

Porém, com o crescimento da utilização de cargas não-lineares, que levam a distorções nas formas de ondas das correntes e das tensões (DUGAN, 2003), tem feito com que o desequilíbrio do FP também aumente, isto devido à presença das componentes harmônicas e a presença de grandes cargas elétricas monofásicas.

Essa nova situação do aumento de cargas não-lineares leva a uma maior ocupação do sistema elétrico, e esta não tem sido refletida nas tarifas de energia elétrica. Em geral, os consumidores são cobrados pela energia ativa consumida e/ou demandada e estão sujeitos às multas por baixo fator de potência. Desta forma há uma tendência de se expandir a tarifação de modo a contemplar o desequilíbrio e a distorção da energia elétrica.

Devido a esses fatos foram necessário estudos inovadores para a introdução de novas definições de potências, definições estas que devem ser válidas para situações clássicas e atender os novos sistemas. Estas definições devem ter uma

base comum para caracterizar a QEE e ajudar na detecção das fontes prejudiciais para consolidar uma nova metodologia de tarifação.

É preocupação das concessionárias, agentes e consumidores chegar a um consenso quanto à definição de potência aparente para se definir uma nova estrutura tarifária que contemple os novos conceitos de potência. As concessionárias têm interesse de cobrar a utilização do sistema elétrico, os agentes devem regular tais relações e os consumidores precisam saber se terão que utilizar métodos de compensação para atenuar os chamados distúrbios da QEE.

Em 1886, o American Institute of Electrical Engineers (AIEE) contava com 400 membros (EMANUEL, 2004). Os melhores engenheiros da época procuravam explicar o significado físico do defasamento angular entre a corrente e a tensão durante aproximadamente 15 anos. O mesmo foi o tempo que os engenheiros daquela época demoraram para entender que os circuitos alternados comportavam-se diferentemente dos circuitos de corrente contínua e a aceitarem os conceitos de potências aparente e reativa. E somente a partir disso surgiu então a ideia do FP que ajudou a quantificar a utilização das redes elétricas.

Os sistemas desequilibrados traziam dúvidas de qual a correta definição para a potência aparente e FP. Em 1927, C. I. Budeanu descreveu o primeiro modelo de potências em sistemas monofásicos com formas de ondas distorcidas (BUNDEANU, 1927). A disseminação da teoria de Budeanu levou a muitas pesquisas e confusões e à necessidade de uma teoria unificada que poderia explicar todas as condições possíveis em um circuito alternado.

Esta resolução para a potência aparente foi incluída na primeira American Standard Definitions of Electrical Terms, em 1941. Tal definição permaneceu praticamente a mesma por anos e é encontrada na última edição do IEEE Std100 (IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms, 1992) em 1992. As definições utilizadas giravam em torno da potência aparente aritmética e a da potência aparente vetorial. Havia discussão sobre qual delas seria a mais adequada. No âmbito do IEEE foi criado um grupo de estudos, que culminou na norma IEEE Std 1459-2000 (IEEE, 2002), encabeçada pelo Prof. A. Emanuel, que foi escrita procurando dar subsídios aos estudiosos e fabricantes de equipamentos de medição..

A aceitação global de uma única definição de potência aparente em sistemas elétricos com tensões e correntes desequilibradas, assimétricas e não senoidais, em detrimento das demais definições, parece estar ainda bastante distante. Trabalhos (ARRILLAGA, 2000) (WILLEMS, 2003) têm sido publicados nas últimas décadas, sendo que dois enfoques têm se mostrado mais pertinentes, o enfoque americano, também denominado abordagem prática (PAJIÉ, 2006), desenvolvido na Norma IEEE Std. 1459-2000, tendo como seu principal defensor o Prof. Alexander Emanuel e o enfoque europeu, chamado de abordagem teórica ou método Fryze-Buchholz-Depenbrock (FBD) (DEPENBROCK, 1993), desenvolvido principalmente pelo Prof. Manfred Depenbrock. Recentemente, tem-se publicado diversos artigos buscando comparar os dois métodos, enfocando suas divergências e convergências (EMANUEL, 2004) (ALMEIDA, 2006).

Nos sistemas elétricos trifásicos a três fios, os cálculos baseados nas definições de potência dos enfoques americano e europeu apresentam os mesmos valores. Apesar de recentemente terem surgido alguns trabalhos que consideram as resistências das fases desiguais entre si (JEON, 2005) considerou-se que as resistências elétricas das três fases são iguais e apenas o neutro apresenta valor diferente de resistência. O desenvolvimento considera o neutro como referencial das tensões sendo o mesmo visto como um condutor auxiliar e não como uma quarta fase do sistema. O método teórico utiliza como referencial de tensão um ponto estrela virtual (virtual star point).

A potência aparente, no enfoque americano, é definida como a máxima potência ativa possível de ser fornecida a determinada carga sob condições ideais (EMMANUEL, 2004). É importante salientar que nesse enfoque prático há a necessidade de uma atuação conjunta entre cliente e concessionária sendo o cliente responsável pela corrente elétrica e a concessionária pela tensão. Assim convencido, o cliente que onera o sistema, desequilibrando ou distorcendo os sinais, entenderá que é justo que ele seja cobrado pela potência aparente que exige da rede e não pela potência ativa que consome.

A recomendação IEEE Std. 1459-2010 apresenta métodos para obtenção das grandezas de potências de circuitos elétricos monofásicos e trifásicos balanceados ou desbalanceados e com alimentação senoidal ou não senoidal. As grandezas

calculadas são baseadas nos conceitos de tensão efetiva (V_e) e corrente efetiva (I_e) definidos a partir dos valores eficazes. Com os valores efetivos são calculadas as grandezas como potência aparente efetiva (S_e), fator de potência efetivo (FP_e), entre outras grandezas apresentadas na recomendação. As novas definições de potências baseiam-se na interpretação física de que a potência aparente é associada à máxima potência útil que pode ser entregue para uma carga (FERREIRA, 2011).

Desta forma este trabalho pretende apresentar os conceitos clássicos para se calcular o FP e as potências ativa, reativa e aparente através dos métodos convencionais. Bem como expor os novos métodos propostos de acordo com a IEEE Std. 1459-2010 com a finalidade de apresentar um comparativo entre os métodos para cálculo do FP para as mais diversas situações de cargas monofásicas e trifásicas a três e quatro fios.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Antigamente a grande maioria das cargas elétricas previa o uso de corrente contínua ou alternada senoidal "pura". Em função disso, os conceitos de potência ativa e reativa eram associados a essas duas formas consideradas "ideais" de tensão e corrente. No entanto, com o uso das técnicas não-lineares de controle eletrônico (retificação, inversão, chaveamento, etc.), começaram a aparecer aplicações em que outras formas de onda são drenadas, onde principalmente as correntes consumidas apresentam grande conteúdo harmônico.

A definição de uma teoria de potência que se aplique tanto em condições ideais (senoidais em tensão e corrente) como não ideais (desequilíbrios, tensões e correntes não senoidais), ainda é um objeto de pesquisa. Desta forma, é importante considerar o estudo das várias propostas de teorias de potência apresentadas ao longo dos últimos anos, e da escolha ou aprimoramento daquela que mais se adequa às várias aplicações.

Sabe-se que instalações elétricas podem apresentar as mais diversas características, desde tensões senoidais e equilibradas, cargas lineares, até casos onde as tensões de fornecimento podem ser assimétricas e as cargas não-lineares.

Desta forma questiona-se se é possível através de métodos mais recentes definir valores mais precisos e eficientes para cálculo de fator de potência em comparação aos conceitos clássicos de potência.

1.2 OBJETIVO GERAL

Realizar uma análise comparativa entre os métodos clássicos e os métodos propostos na recomendação IEEE Std. 1459-2010 para calcular Fator de Potência em sistemas monofásicos e trifásicos, a três e a quatro fios.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar uma pesquisa sobre cálculo de grandezas de potência e fator de potência.
- Apresentar um estudo específico sobre teoria e impacto do fator de potência para as mais diversas situações.
- Compreender os conceitos clássicos de potência.
- Compreender os novos conceitos propostos na recomendação IEEE Std. 1459-2010.
- Apresentar os resultados obtidos de acordo com métodos estudados

1.3 JUSTIFICATIVA

Para melhorar a utilização do consumo de energia elétrica e evitar perdas por causa da presença de corrente reativa, é necessário gerenciar o FP. O controle do nível de FP 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.

Existem diversas formas para controle e redução do fator de potência e essas estratégias geram custos e manutenção ao consumidor. Neste ponto pode-se considerar dois fatores principais, sendo: O consumidor estar tendo custos

excessivos com reativos; não estar cumprindo com as suas obrigações de correções do FP.

Novas metodologias para cálculos das grandezas de potência vêm sendo estudadas, sendo proposta as grandezas de potência efetiva apresentadas na recomendação IEEE Std. 1459-2010 como os valores de referência a serem utilizados, visto que há uma tendência que os fabricantes de equipamentos de medição e análise de qualidade de energia elétrica sigam tais valores. Desta forma busca-se fazer uma análise comparativa dos métodos convencionais com os métodos propostos pela recomendação apresentada.

2 GRANDEZAS DE POTÊNCIA

Antes de iniciar o estudo sobre FP, é necessário consolidar conceitos clássicos fundamentais para a compreensão das causas e efeitos do mesmo. Neste capítulo são apresentados os conceitos clássicos (AKAGI, 1983), apresentados inicialmente em (FORTESCUE, 1918), (LYON, 1920) (FRYZE, 1932), relacionados aos cálculos das grandezas de potências para diversas situações de cargas para sistemas monofásicos e trifásicos, ideais e não ideais. Enfatizando no cálculo do Fator de Potência (ERLICKI, 1968) sendo esse o objetivo principal deste estudo.

2.1 POTÊNCIA ATIVA, REATIVA E APARENTE

Potência Ativa (P): medida em W, é a unidade que representa a energia que está sendo convertida em trabalho no equipamento (POMILIO, 2009). Também conhecida como Potência Real.

Potência Reativa (Q): medida em Var, é a unidade que representa a energia que está sendo utilizada para produzir os campos elétrico e magnético necessários para o funcionamento de alguns tipos de cargas como, por exemplo, motores, transformadores, retificadores industriais etc (POMILIO, 2009).

Potência Aparente (S): medida em VA, que é obtida pela “soma vetorial” das Potências Ativa e Reativa (POMILIO, 2009).

Os valores das grandezas de potência podem ser definidos de acordo com as relações trigonométricas do triângulo de potência como apresentado na Figura 1.

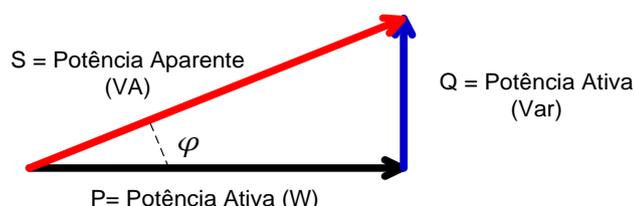


Figura 1 - Triângulo de potência.

O ângulo φ é o definido pela diferença de fases entre tensão (φ_v) e corrente (φ_i), como apresentado em (1)

$$\varphi = \varphi_v - \varphi_i \quad (1)$$

2.1.1 Potência Elétrica Monofásica (Senoidal)

Em condições senoidais, a tensão e a corrente podem ser representadas pelas expressões (2) e (3) (POMILIO, 2009).

$$v = \sqrt{2}V\text{sen}(\omega t) \quad (2)$$

$$i = \sqrt{2}I\text{sen}(\omega t - \varphi) \quad (3)$$

De tal modo, a potência instantânea pode ser determinada pelo produto das duas grandezas acima (POMILIO, 2009), conforme (4).

$$\begin{aligned} p &= vi = \sqrt{2}V\text{sen}(\omega t) * \sqrt{2}I\text{sen}(\omega t - \varphi) = 2VI\text{sen}(\omega t) * \text{sen}(\omega t - \varphi) \\ &= 2VI\text{sen}(\omega t) * [\cos(\varphi)\text{sen}(\omega t) - \text{sen}(\varphi)\cos(\omega t)] \\ &= 2VI[\cos(\varphi)\text{sen}^2(\omega t) - \text{sen}(\varphi)\text{sen}(\omega t)\cos(\omega t)] \\ &= 2VI \left[\cos(\varphi) \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2} - \text{sen}(\varphi) \frac{\text{sen}(2\omega t)}{2} \right] \\ &= VI\cos(\varphi)[1 - \cos(2\omega t)] - VI\text{sen}(\varphi)\text{sen}(2\omega t) \end{aligned} \quad (4)$$

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 (P - potência ativa) e outra parte que multiplica uma senoíde e, portanto, tem valor médio nulo (Q - potência reativa) (POMILIO, 2009), apresentado respectivamente em (5) e (6).

$$P = VI\cos(\varphi) \quad (5)$$

$$Q = VI\text{sen}(\varphi). \quad (6)$$

A potência ativa, também denominada potência real, que pode ser igualmente calculada pela forma geral (7), ou seja, pela média da potência instantânea (POMILIO, 2009).

$$P = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} p dt = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} v i dt \quad (7)$$

A amplitude da componente que fica oscilando como uma senóide de frequência $2\omega t$ e tem valor médio nulo, é a 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. Em (8) é apresentada a soma dos quadrados das duas componentes (ativa e reativa) (POMILIO, 2009).

$$P^2 + Q^2 = V^2 I^2 [\cos^2(\varphi) + \sin^2(\varphi)] = (VI)^2 \quad (8)$$

Ao produto dos valores eficazes de tensão e corrente (VI) é dado o nome de potência aparente S. Nesse caso, a potência aparente relaciona-se com as demais componentes de acordo com (9) (POMILIO, 2009).

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(VI)^2} = VI \quad (9)$$

2.1.2 Potência Elétrica Monofásica (Não-senoidal)

Em condições não senoidais, a tensão e a corrente podem ser representadas pelas expressões (10) e (11) (POMILIO, 2009).

$$v = \sqrt{2}V \sin(\omega t) + \sum_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{2}V}{n} \sin(n * \omega t) \quad (10)$$

$$i = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \varphi) + \sum_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{2}I}{n} \sin(n * \omega t - \varphi) \quad (11)$$

Simplificando as equações (10) e (11) ainda podem ser representadas como o somatório da parcela fundamental com a parcela harmônica, como em (12) e (13) (POMILIO, 2009).

$$v = v_1 + v_h \quad (12)$$

$$i = i_1 + i_h \quad (13)$$

Os harmônicos de tensão serão desconsiderados neste estudo, visto que a tensão fornecida é responsabilidade da concessionária, que deve fornecer somente

a parcela fundamental. No caso os harmônicos de corrente ocorrem devido as cargas não lineares conectadas a rede elétrica.

De maneira geral, as definições de potência ativa, reativa, aparente e fator de potência para condições senoidais são as mesmas.

O equacionamento para os cálculos neste tipo de situação ainda são objetos de estudo, e serão melhor explicados no próximo capítulo que enfocará a IEEE Std. 1549--2010, cuja qual apresenta definições para cálculos de potência elétrica sob condições senoidais e não senoidais.

2.1.3 Potência Elétrica Trifásica (Senoidal)

No caso de sistemas trifásicos senoidais, pode-se descrever as tensões respectivamente como em (14), (15) e (16) (POMILIO, 2009).

$$v_a = \sqrt{2}V_a \text{sen}(\omega t) \quad (14)$$

$$v_b = \sqrt{2}V_b \text{sen}(\omega t + 120^\circ) \quad (15)$$

$$v_c = \sqrt{2}V_c \text{sen}(\omega t - 120^\circ) \quad (16)$$

E o mesmo para as correntes como em (17), (18) e (19) (POMILIO, 2009).

$$i_a = \sqrt{2}I_a \text{sen}(\omega t - \varphi_a) \quad (17)$$

$$i_b = \sqrt{2}I_b \text{sen}(\omega t + 120^\circ - \varphi_b) \quad (18)$$

$$i_c = \sqrt{2}I_c \text{sen}(\omega t - 120^\circ - \varphi_c) \quad (19)$$

Em caso de um sistema trifásico senoidal e balanceado, a soma das tensões e das correntes sempre será nula, como em (20) e (21) (POMILIO, 2009).

$$v_a + v_b + v_c = 0 \quad (20)$$

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (21)$$

Como já mencionado neste trabalho, em geral os cálculos clássicos de potência foram definidos para os sistemas ideais (senoidais e equilibrados). Desta

forma como não há corrente de retorno, também não há queda de tensão no neutro. Assim o condutor de retorno pode ser eliminado, sem afetar a operação balanceada.

A potência trifásica instantânea (22) pode ser equacionada como a soma das potências instantâneas nas três fases a,b,c (POMILIO, 2009).

$$p = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (22)$$

Ao contrário do sistema monofásico, a potência instantânea transferida para as cargas no sistema trifásico senoidal balanceado não é oscilatória (POMILIO, 2009). Essa tem sido a grande motivação para se buscar manter o sistema trifásico senoidal e balanceado. É importante frisar que as partes oscilatórias, proporcionais a P e Q, somam zero, que vale 3P, como em (23).

$$p = 3P \quad (23)$$

Uma vez que o cálculo da potência instantânea fornece apenas a potência ativa, geralmente é utilizado o cálculo da potência complexa utilizando fasores para definir a potência reativa. Sabendo que o produto do fasor tensão de fase pelo conjugado do fasor corrente da mesma fase dá a potência aparente dessa fase (POMILIO, 2009). Portanto, no caso trifásico balanceado, devemos obter a soma das 3 fases, como apresentado em (24).

$$S_3 = S_a + S_b + S_c = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c \quad (24)$$

Supondo que sistema é equilibrado ($V_a = V_b = V_c$ e $I_a = I_b = I_c$), pode-se reescrever (24) como em (25).

$$S_3 = 3P + j3Q \quad (25)$$

2.1.4 Potência Elétrica Trifásica (Não-senoidal)

Ao longo dos últimos cem anos, mas, sobretudo nas últimas três décadas, diversas contribuições têm sido apresentadas (POMILIO, 2009). Assim como para os sistemas monofásicos, as tensões e correntes podem apresentar harmônicos,

distorções e em casos trifásicos desbalanço. Uma teoria consolidada para estes tipos de grandezas são objetivos de estudos ao longo dos tempos.

Em geral as tensões são formadas por duas parcelas, fundamental e harmônicas, como apresentado em (26), (27) e (28) (POMILIO, 2009).

$$v_a = \sqrt{2}V_{a1}\text{sen}(\omega t) + \sum_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{2}V_{ah}}{n}\text{sen}(n * \omega t) \quad (26)$$

$$v_b = \sqrt{2}V_{b1}\text{sen}(\omega t + 120^\circ) + \sum_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{2}V_{bh}}{n}\text{sen}(n * \omega t + 120^\circ) \quad (27)$$

$$v_c = \sqrt{2}V_{c1}\text{sen}(\omega t - 120^\circ) + \sum_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{2}V_{ch}}{n}\text{sen}(n * \omega t - 120^\circ) \quad (28)$$

E o mesmo para as correntes trifásicas (POMILIO, 2009), como em (29), (30) e (31).

$$i_a = \sqrt{2}I_{a1}\text{sen}(\omega t - \varphi_a) + \sum_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{2}I_{ah}}{n}\text{sen}(n * \omega t - \varphi_a) \quad (29)$$

$$i_b = \sqrt{2}I_{b1}\text{sen}(\omega t + 120^\circ - \varphi_b) + \sum_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{2}I_{bh}}{n}\text{sen}(n * \omega t + 120^\circ - \varphi_b) \quad (30)$$

$$i_c = \sqrt{2}I_{c1}\text{sen}(\omega t - 120^\circ - \varphi_c) + \sum_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{2}I_{ch}}{n}\text{sen}(n * \omega t - 120^\circ - \varphi_c) \quad (31)$$

A potência trifásica instantânea nestes casos e em sistemas a três fios é equacionada como a soma do produto das duas tensões de linhas por correntes de fase, como apresentado em (32) (POMILIO, 2009).

$$p = v_{ab}i_a + v_{cb}i_c = v_{ac}i_a + v_{bc}i_b = v_{ba}i_b + v_{ca}i_c \quad (32)$$

2.2 FATOR DE POTÊNCIA

De acordo com a definição clássica o FP é a relação entre a potência ativa (P) e a potência aparente (S), consumidas por um dispositivo ou equipamento,

independentemente das formas que as ondas de tensão e corrente apresentem (POMILIO, 2009) como mostrado em (33).

$$FP = \frac{P}{S} \quad (33)$$

Através de análises trigonométricas pode-se definir em (34) outras maneiras de se expressar o cálculo do FP em casos que exista a presença da potência reativa (POMILIO, 2009).

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \cos(\varphi) \quad (34)$$

Outra forma de se calcular o ângulo φ para sistemas senoidais é através da relação entre as potências reativa e ativa, como em (35) (POMILIO, 2009).

$$\varphi = \arctan\left(\frac{Q}{P}\right) \quad (35)$$

Estes são os conceitos clássicos geralmente apresentados para estudos em condições ideais (tensão e corrente puramente senoidal) (POMILIO, 2009). A equação geral (36) que define o fator de potência deve contemplar ambos os tipos de circuitos, os lineares e não lineares, ou seja, aqueles que não possuem componentes harmônicos e aqueles que possuem. Será feita a interpretação da equação geral que define o fator de potência para uma rede de tensão senoidal não distorcida, considerando que é a responsabilidade da concessionária fornecer uma tensão ideal.

$$FP = \frac{\cos(\varphi)}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (36)$$

Onde THD_i é a taxa de distorção harmônica da corrente do circuito. Essa taxa representa a relação entre o somatório quadrático das correntes eficazes de ordem n ($n > 1$) com relação à corrente fundamental eficaz, como em (37).

$$TDH_i = \frac{\sqrt{\sum I_n^2}}{I_1} \quad (37)$$

Se a corrente não apresentar harmônicas de ordem n , a parcela TDH_i será nula e, dessa forma, o fator de potência resulta apenas na relação $\cos(\varphi)$ em um típico circuito linear.

2.3 PRODIST MÓDULO 8

Há uma intenção mundial em se definir recomendações de âmbito nacional para se chegar a um consenso internacional. As iniciativas nesse sentido partiram dos órgãos como o IEEE nos Estados Unidos e o CIGRÉ na Europa.

No Brasil, algumas dessas recomendações estrangeiras são seguidas integralmente ou adaptadas parcialmente para uso. Muitas vezes a falta de padronização de procedimentos e critérios normativos prejudica os consumidores. No entanto, grupos especialistas, coordenados pela ANEEL têm trabalhado para se chegar a um conjunto de procedimentos e recomendações aplicáveis tanto no nível da rede básica como das redes de distribuição, para viabilizar os contratos de conexão entre os diversos agentes na nova estrutura do setor elétrico.

A ANEEL, em seu documento “Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – Prodíst módulo 8 – qualidade da energia elétrica”, traz o seguinte texto (ANEEL,2010):

“Muitas cargas tradicionais, como é o caso dos motores elétricos, têm um princípio de operação que exige um consumo de potência reativa. Assim, parece adequado que o regulador admita certa tolerância para o fator de potência das unidades consumidoras. O valor desta tolerância é expresso através do chamado fator de potência de referência que está hoje fixado no valor de 0,92, o que equivale a permitir ao cliente um consumo de 0,426 kVArh por kWh de energia que absorve.”

Assim os objetivos dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, são (ANEEL, 2010):

- Estabelecer os procedimentos relativos à QEE, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado.

- Para a qualidade do produto, este módulo define a terminologia, caracterizam os fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão, estabelecendo mecanismos que possibilitem à ANEEL fixar padrões para os indicadores de QEE.

- Para a qualidade dos serviços prestados, este módulo estabelece a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades.

3 NOVAS DEFINIÇÕES DE POTÊNCIA

Durante o decorrer dos anos foram estabelecidas diversas formulações de potência aparente para os sistemas trifásicos, tais como: potência aritmética (S_A), potência vetorial (S_V) e potência aparente efetiva (S_e) são apresentadas na STD IEEE1459-2000. As diversas formas de calcular a potência aparente implicam diretamente no cálculo do Fator de potência, desta forma pode-se então definir FP de acordo com cada potência aparente (IEEE, 2000).

A potência trifásica aparente aritmética representa a soma linear das potências aparentes de cada fase, calculadas individualmente como no método clássico, como apresentado em (38) (IEEE, 2010).

$$S_A = S_a + S_b + S_c = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c \quad (38)$$

Enquanto a potência aparente vetorial, como o próprio nome explica é a obtida através da soma vetorial das potências ativa e reativa, como apresentado em (39) (IEEE, 2010).

$$S_V = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (39)$$

$$P = P_a + P_b + P_c \text{ e } Q = Q_a + Q_b + Q_c$$

Através da Figura 2 apresenta a representação gráfica das potências aparente aritmética e vetorial, onde é possível observar que $S_V \leq S_A$.

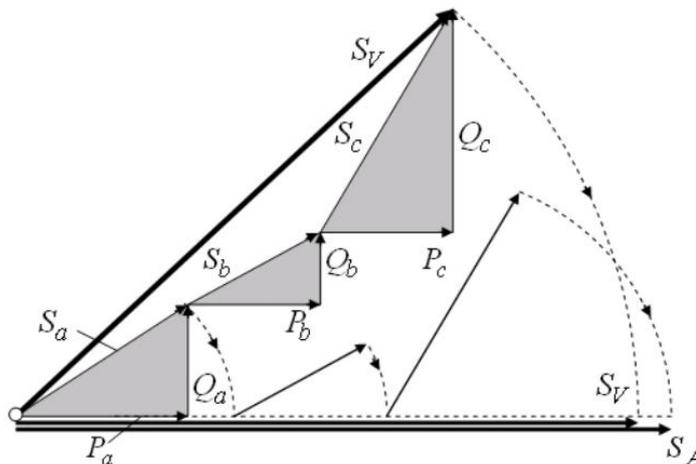


Figura 2 - Potência aparente vetorial e aritmética
Fonte:IEEE Std 1459-2010

3.1 IEEE STD 1459-2010

Os cálculos apresentados na recomendação IEEE Std. 1459-2010 são baseados no conceito de potência aparente efetiva (S_e) obtida a partir de (40). Os valores de tensão efetiva (41) e corrente efetiva (42) para sistemas trifásicos a quatro fios são definidos a partir dos seus valores eficazes. O conceito de potência aparente efetiva apresentado assume um sistema trifásico desbalanceado como um sistema fictício balanceado apresentando as mesmas características de perdas relacionadas à potência.

$$S_e = 3V_e I_e \quad (40)$$

$$V_e = \sqrt{\frac{3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + (V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)}{18}} \quad (41)$$

$$I_e = \sqrt{\frac{(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + \rho I_n^2)}{3}} \quad (42)$$

3.1.1 Sistemas Trifásicos a Três e Quatro Fios

Essas equações definidas de tensão e corrente efetiva são para sistemas trifásicos a quatro fios devido às tensões de fase e a corrente de neutro, considerando $r_n/r = \rho = 1$. Para sistemas trifásicos a três fios a partir de (43) pode-se definir o valor de tensão efetiva do sistema (44) e considerando que não existe corrente de neutro tem-se (45) (IEEE, 2010).

$$V_{fase} = \left(\frac{V_{linha}}{\sqrt{3}}\right)^2 \quad (43)$$

$$V_e = \sqrt{\frac{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)}{9}} \quad (44)$$

$$I_e = \sqrt{\frac{(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2)}{3}} \quad (45)$$

As componentes efetivas de tensão e corrente podem ser divididas em parcelas fundamentais e não fundamentais, como apresentado em (46) e (47) (IEEE, 2010).

$$V_e = \sqrt{V_{e1}^2 + V_{eH}^2} \quad (46)$$

$$I_e = \sqrt{I_{e1}^2 + I_{eH}^2} \quad (47)$$

Para sistemas três fios essas parcelas de tensões podem ser definidas de acordo com (48) e (49), para parcela fundamental e não fundamental respectivamente (IEEE, 2010).

$$V_{e1} = \sqrt{\frac{(V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2)}{9}} \quad (48)$$

$$V_{eH} = \sqrt{\frac{(V_{abH}^2 + V_{bcH}^2 + V_{caH}^2)}{9}} = \sqrt{V_e^2 - V_{e1}^2} \quad (49)$$

No caso de sistemas a quatro fios, a mesma associação pode ser realizada, definindo as parcelas em (50) e (51) (IEEE, 2010).

$$V_{e1} = \sqrt{\frac{3(V_{a1}^2 + V_{b1}^2 + V_{c1}^2) + (V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2)}{18}} \quad (50)$$

$$V_{eH} = \sqrt{\frac{3(V_{aH}^2 + V_{bH}^2 + V_{cH}^2) + (V_{abH}^2 + V_{bcH}^2 + V_{caH}^2)}{18}} = \sqrt{V_e^2 - V_{e1}^2} \quad (51)$$

De maneira semelhante definem-se as parcelas fundamentais e não fundamentais das correntes, respectivamente em (52) e (53) para sistemas a três fios (IEEE, 2010).

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{(I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2)}{9}} \quad (52)$$

$$I_{eH} = \sqrt{\frac{(I_{aH}^2 + I_{bH}^2 + I_{cH}^2)}{9}} = \sqrt{I_e^2 - I_{e1}^2} \quad (53)$$

E para sistemas a quatro fios, apresentados em (54) e (55) (IEEE, 2010).

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{(I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2 + I_{n1}^2)}{9}} \quad (54)$$

$$I_{eH} = \sqrt{\frac{(I_{aH}^2 + I_{bH}^2 + I_{cH}^2 + I_{nH}^2)}{9}} = \sqrt{I_e^2 - I_{e1}^2} \quad (55)$$

Outra definição apresentada na recomendação é a divisão da potência aparente efetiva também em uma parcela fundamental e outra não fundamental, como apresentado em (56) (IEEE, 2010).

$$S_e = \sqrt{S_{e1}^2 + S_{eN}^2} \quad (56)$$

Onde, a parcela fundamental da potência aparente efetiva é definida pelo produto das parcelas fundamentais de tensão e corrente, como em (57) (IEEE, 2010).

$$S_{e1} = 3V_{e1}I_{e1} \quad (57)$$

Enquanto a parcela não-fundamental (58) é definida pela soma de diversas parcelas de distorção de corrente, distorção de tensão e potência aparente harmônica, respectivamente em (59), (60) e (61) (IEEE, 2010).

$$S_{eN} = \sqrt{S_e^2 - S_{e1}^2} = \sqrt{D_{eI}^2 + D_{eV}^2 - S_{eH}^2} \quad (58)$$

$$D_{eI} = 3V_{e1}I_{eH} \quad (59)$$

$$D_{eV} = 3V_{eH}I_{e1} \quad (60)$$

$$S_{eH} = 3V_{eH}I_{eH} \quad (61)$$

A partir destes resultados se é possível definir as taxas de distorção harmônicas efetivas tanto da tensão quanto de corrente, expressas em (62) e (63) (IEEE, 2010).

$$THD_{eV} = \frac{V_{eH}}{V_{e1}} \quad (62)$$

$$THD_{el} = \frac{I_{eH}}{I_{e1}} \quad (63)$$

Finalmente podem-se definir os fatores de potência efetivo (64) e fundamental de sequência positiva (65) (IEEE, 2010).

$$FP_e = \frac{P}{S_e} \quad (64)$$

$$FP_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (65)$$

Onde P_1 é definido pelo produto dos valores eficazes das parcelas fundamentais de tensão e corrente com o cosseno do ângulo de defasagem entre as componentes fundamentais de tensão e corrente.

A IEEE Std 1459 apresenta outras potências como apresentadas na Tabela 1, porém os resultados apresentados serão das grandezas definidas no decorrer do capítulo.

Tabela 1 - Grandezas de potências e indicadores em sistemas 3Φ não senoidais e desbalanceados (IEEE Std.1459-2010).

Grandeza ou Indicador	Combinado	Potências Fundamentais	Potências não Fundamentais
Aparente (VA)	S_e	S_{e1}, S_{u1}	S_{eN}, S_{eH}
Ativa (W)	P	P_1^+	P_H
Não ativa (var)	N	Q_1^+	D_{e1}, D_{eV}, D_{eH}
Utilização da linha	$FP_e = \frac{P}{S_e}$	$FP_1 = \frac{P_1}{S_1}$	—
Poluição Harmônica	—	—	$FP_H = \frac{S_{eN}}{S_{e1}}$

3.1.2 Sistemas Monofásicos

Para sistemas monofásicos a potência aparente S e a potência aparente fundamental S_1 são definidas respectivamente em (66) e (67) (IEEE, 2010).

$$S = VI \quad (66)$$

$$S_1 = V_1 I_1 \quad (67)$$

Essas grandezas são calculadas a partir dos valores eficazes de tensão (V) e corrente (I) de alimentação e valores eficazes das componentes fundamentais de tensão (V_1) e corrente (I_1). As potências ativa e reativa fundamentais são expressas pelas equações (68) e (69) (IEEE, 2010).

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (68)$$

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin \varphi_1 \quad (69)$$

A partir das potências aparente e aparente fundamental pode-se definir a potência não fundamental do sistema em (70). A potência aparente harmônica é definida por (71) (IEEE, 2010).

$$S_N = \sqrt{S^2 - S_1^2} \quad (70)$$

$$S_H = V_H I_H \quad (71)$$

Onde a tensão e corrente eficaz harmônica são calculadas a partir de (72) e (73) (IEEE, 2010).

$$V_H = \sqrt{V^2 - V_1^2} \quad (72)$$

$$I_H = \sqrt{I^2 - I_1^2} \quad (73)$$

Assim como em sistemas trifásicos pode-se definir as taxas de distorção harmônicas de tensão e corrente, apresentados em (74) e (75) (IEEE, 2010).

$$THD_V = \frac{V_H}{V_1} \quad (74)$$

$$THD_I = \frac{I_H}{I_1} \quad (75)$$

E Finalmente podem-se definir os fatores de potência efetivo (76) e fundamental de sequência positiva (77) (IEEE, 2010).

$$FP_e = \frac{P}{S} \quad (76)$$

$$FP_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (77)$$

A Tabela 2 apresenta outras grandezas definidas pela IEEE Std 1459-2010 que não foram objeto de pesquisa neste estudo.

Tabela 2 - Grandezas de potências e indicadores em sistemas 1 Φ (IEEE Std.1459-2010)

Grandeza ou Indicador	Combinado	Potências Fundamentais	Potências não Fundamentais
Aparente (VA)	S	S_1	S_N, S_H
Ativa (W)	P	P_1	P_H
Não ativa (var)	N	Q_1	D_I, D_V, D_H
Utilização da linha	$FP = \frac{P}{S}$	$FP_1 = \frac{P_1}{S_1}$	—
Poluição Harmônica	—	—	$FP_H = \frac{S_N}{S_1}$

4 IMPLIMENTAÇÃO DE CÁLCULOS DE POTÊNCIA

Para validação dos métodos expostos serão apresentados neste capítulo exemplos de cálculos para as diversas situações entre: monofásico e trifásico a três e quatro fios. Como comentado no decorrer deste trabalho, as tensões de alimentação apresentaram somente a parcela fundamental, visto que fornecer esta parcela é responsabilidade da concessionária de energia elétrica. Desta forma define-se a tensão de fase de entrada para as simulações de acordo com (78) para sistemas monofásicos e (79) para trifásicos.

$$v = 180 \text{ sen}(\omega t) \quad (78)$$

$$v_a = 180 \text{ sen}(\omega t) \quad v_b = 180 \text{ sen}(\omega t + 120^\circ) \quad v_c = 180 \text{ sen}(\omega t - 120^\circ) \quad (79)$$

Para os cálculos e simulações foi utilizada a ferramenta Simulink do software MATLAB pois esta apresenta blocos dedicados tanto para simulações em Eletrônica de Potência (SimPowerSystem) como também para cálculos matemáticos como serie de *Fourier*, valor eficaz (RMS), valor médio, entre outras operações.

4.1 SISTEMAS MONOFÁSICOS

4.1.1 Carga: RL

Considerando um sistema monofásico alimentando uma carga RL de resistência de 5Ω e indutância de 10mH , como apresentado na Figura 3.

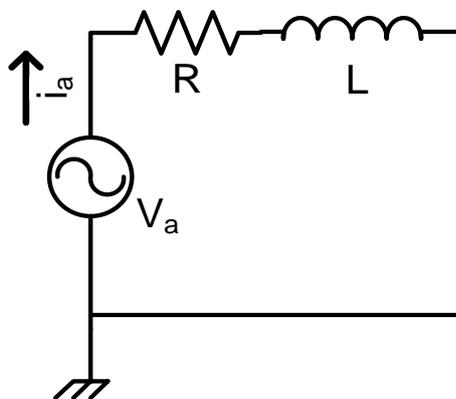


Figura 3 - Sistema Monofásico alimentando uma carga RL

As formas de onda do sistema podem ser observadas na Figura 4.

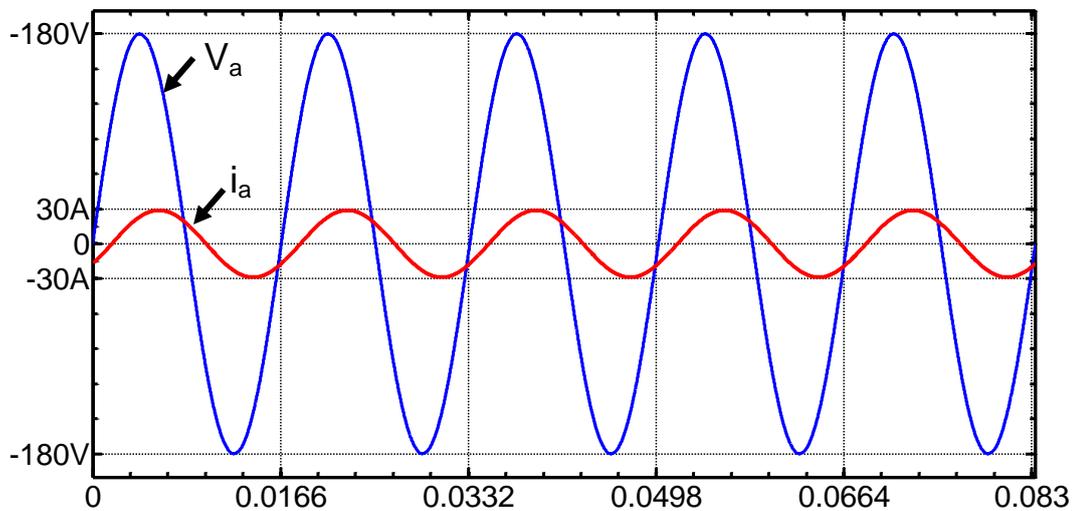


Figura 4 - Tensão e Corrente Monofásico com Carga RL.

Através da análise por série de *Fourier* pode-se comprovar que a corrente para este tipo de carga apresenta somente a parcela fundamental, porém existe defasagem entre a tensão e a corrente que deverá gerar potência reativa. Os valores eficazes de tensão e corrente são apresentados em (80) e (81).

$$V = 127V \quad (80)$$

$$I = 20.33A \quad (81)$$

Utilizando na simulação o bloco "*Fourier*" pode-se definir dois parâmetros: o pico da parcela fundamental e o ângulo de defasagem para cada sinal, desta forma o ângulo φ é o definido pela diferença de fases entre tensão (φ_v) e corrente (φ_i), como apresentado em (1). Neste caso o valor de φ encontrado foi de aproximadamente 37° . Desta forma é possível calcular as potências ativa, reativa e aparente do sistema, apresentadas respectivamente em (82), (83) e (84).

$$P = VI \cos(\varphi) = 2066W \quad (82)$$

$$Q = VI \sin(\varphi) = 1557Var \quad (83)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 2587Va \quad (84)$$

Então, o fator de potência aritmético total do sistema calculado pelo método clássico é definido em (85).

$$FP = \frac{P}{S} = 0,7985 \quad (85)$$

Sabe-se que as potências são compostas por uma parcela fundamental e por outra parcela não fundamental, neste caso como foi constatado que tanto tensão quanto corrente apresentam somente a parcela fundamental, pode-se dizer que $P = P_1$, $Q = Q_1$, $S = S_1$ e $P_H = Q_H = S_H = 0$. Da mesma maneira que então o $FP = FP_1 = 0,7985$.

4.1.2 Retificador Monofásico com carga RL

Considerando conectada a rede monofásica um retificador a diodo conectado na saída CC uma carga RL de resistência de 2Ω e indutância de 50mH , como na Figura 5

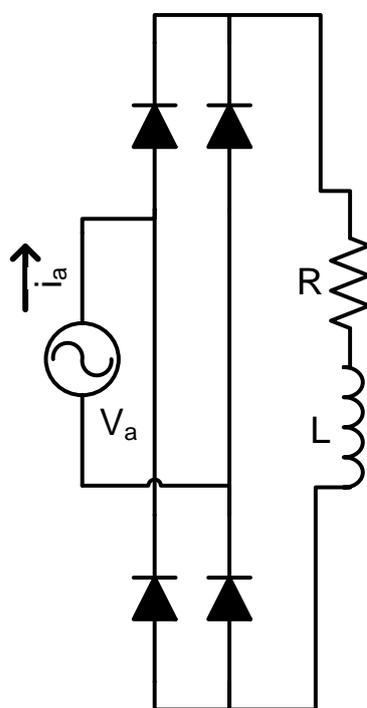


Figura 5 - Sistema Monofásico alimentando um Retificador com carga RL.

As formas de onda do sistema podem ser observadas na Figura 6.

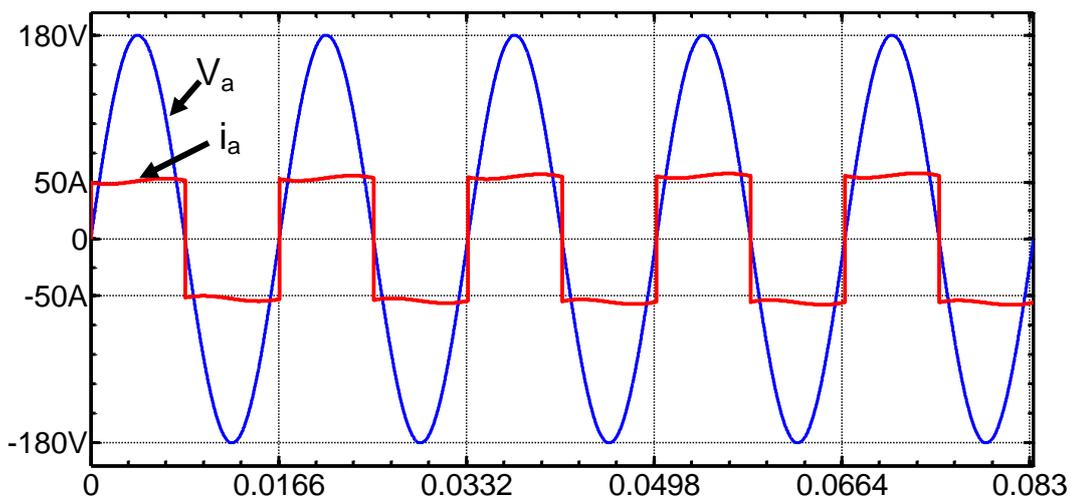


Figura 6 - Tensão da rede (V_a) e Corrente (i_a) do Retificador Monofásico com carga RL.

Através da análise por série de *Fourier* pode-se comprovar que a corrente para este tipo de carga (não linear) apresenta parcela fundamental (Com pico de aproximadamente 71,44A) e outras componentes harmônicas, apresentado na Figura 7. Porém para este tipo de carga o ângulo φ é praticamente nulo, em torno de 1° devido ao tempo de recuperação reversa dos semicondutores do Retificador.

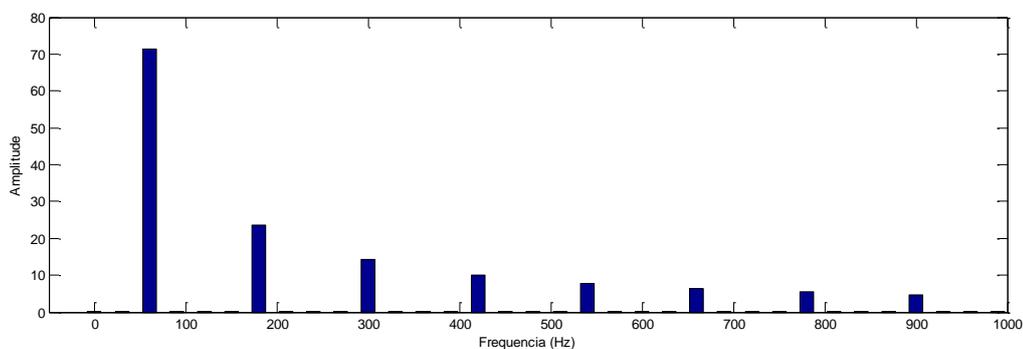


Figura 7 - Espectro da corrente de entrada do Retificador Monofásico com Carga RL.

Os valores eficazes de tensão e corrente obtidos na simulação são apresentados em (86) e (87).

$$V = 127V \quad (86)$$

$$I = 56,94A \quad (87)$$

Neste caso o valor de φ encontrado foi de aproximadamente 1° . Desta forma é possível calcular as potências totais ativa, reativa e aparente do sistema, apresentadas respectivamente em (88), (89) e (90).

$$P = VI \cos(\varphi) = 7245W \quad (88)$$

$$Q = VI \sin(\varphi) = 153Var \quad (89)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 7247Va \quad (90)$$

A partir do pico da fundamental da corrente é possível definir o valor eficaz da parcela fundamental de corrente, em (91) e extrair o valor eficaz da parcela harmônica como em (92).

$$I_1 = 50,45A \quad (91)$$

$$I_H = 26,16A \quad (92)$$

A taxa de distorção harmônica da corrente obtida é apresentada em (93).

$$THD_I = \frac{I_H}{I_1} = 52\% \quad (93)$$

Por (36), que define de forma geral o fator de potência, utilizando o ângulo de defasagem e taxa de distorção harmônica, pode-se apresentar em (94) o fator de potência do sistema.

$$FP = \frac{\cos(\varphi)}{\sqrt{1 + TDH_i^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,52^2}} = 0,88 \quad (94)$$

As mesmas analogias podem ser feitas para as parcelas fundamentais, considerando $\varphi = \varphi_1$, em (95), (96) e (97). O fator de potência fundamental do sistema então é definido em (98).

$$P_1 = V_1 I_1 \cos(\varphi_1) = 6420W \quad (95)$$

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin(\varphi_1) = 157Var \quad (96)$$

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} = 6422Va \quad (97)$$

$$FP_1 = \frac{P_1}{S_1} = 0,9998 \quad (98)$$

A partir das potências aparente e aparente fundamental pode-se definir a potência não fundamental do sistema em (99). A potência aparente harmônica é definida por (100).

$$S_N = \sqrt{S^2 - S_1^2} = \sqrt{7247^2 - 6422^2} = 3358Va \quad (99)$$

$$S_H = V_H I_H = \sqrt{V^2 - V_1^2} \sqrt{I^2 - I_1^2} = 3352Va \quad (100)$$

4.2 SISTEMAS A TRÊS FIOS

4.2.1 Carga RL Desquilibrada conectada em Delta

Considerando conectada a rede trifásica uma carga RL ligada em Delta como apresentado na Figura 8. Os valores de resistência são $R_{ab} = 50\Omega$, $R_{bc} = 100\Omega$ e $R_{ca} = 150\Omega$ e para as indutâncias ($L_{ab} = L_{bc} = L_{ca}$) de 50mH.

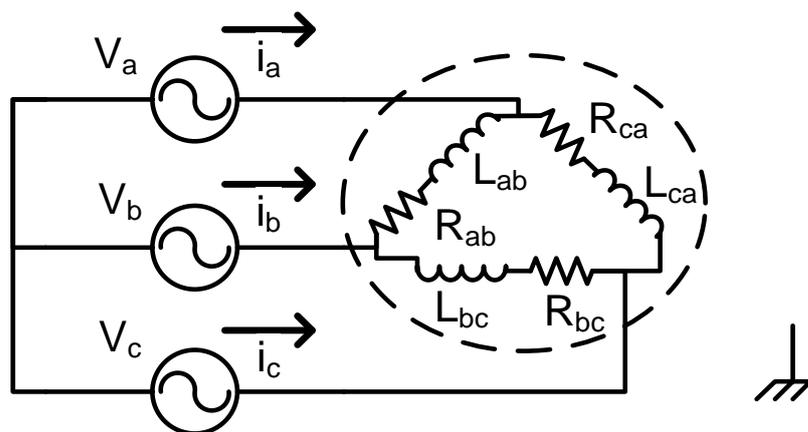


Figura 8 – Carga RL trifásica conectada em Delta.

As formas de onda do sistema podem ser observadas na Figura 9.

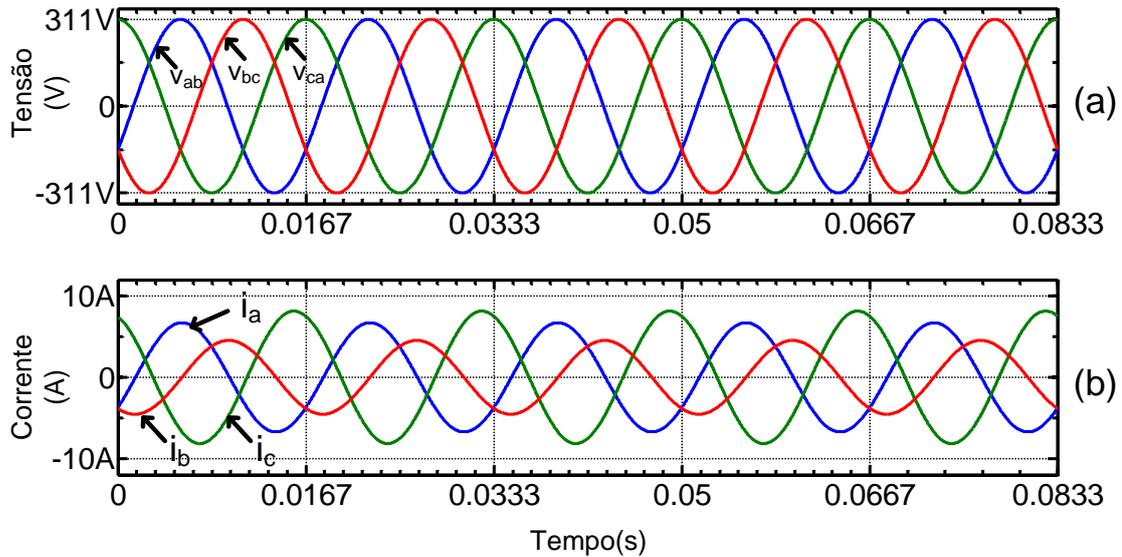


Figura 9 - (a) Tensões de linha, (b) Corrente de fase carga RL

Através da análise por série de *Fourier* pode-se comprovar que as correntes assim como as tensões (ideais) apresentam somente a parcela fundamental. Os valores eficazes de tensões e correntes são apresentados em (101) e (102).

$$V_{ab} = V_{bc} = V_{ca} = 220V \quad (101)$$

$$I_a = 4,75A ; I_b = 5,76A ; I_c = 3,21A \quad (102)$$

Para cálculo das potências ativas e reativas por fase, se é necessário a obtenção das tensões de fase. Através destas tensões é possível então definir os ângulos de defasagem de cada corrente em relação à tensão. Utilizando na simulação o bloco "*Fourier*" os ângulos φ_a , φ_b e φ_c , respectivamente apontados em (103). Sendo o sistema equilibrado os valores eficazes de tensão de fase são apresentados em (104).

$$\varphi_a = 33,23^\circ ; \varphi_b = 7,45^\circ ; \varphi_c = 2,86^\circ \quad (103)$$

$$V_a = V_b = V_c = 127V \quad (104)$$

Assim os valores de potências ativas e reativas por fase são apresentados em (105), (106) e (107).

$$P_a = V_a I_a \cos(\varphi_a) = 504W ; Q_a = V_a I_a \sin(\varphi_a) = 334,1Var \quad (105)$$

$$P_b = V_b I_b \cos(\varphi_b) = 727,3W ; Q_b = V_b I_b \sin(\varphi_b) = 94,46Var \quad (106)$$

$$P_c = V_c I_c \cos(\varphi_c) = 408,1W ; Q_c = V_c I_c \sin(\varphi_c) = 20,87Var \quad (107)$$

Sendo as potências ativa e reativa totais do sistema definidas em (108) e (109) respectivamente.

$$P = P_a + P_b + P_c = 1639W \quad (108)$$

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c = 449,4Var \quad (109)$$

Segundo as recomendações da IEEE Std 1459-2010, a potência aparente aritmética e potência aparente vetorial podem ser calculadas conforme as equações (38) e (39). Os valores encontrados neste exemplo são apresentados em (110).

$$S_A = 1747Va ; S_V = 1700Va \quad (110)$$

Podendo então apresentar os fatores de potência aritmético e vetorial em (111), onde é comprovado que o $FP_A < FP_V$ como apresentado na IEEE Std 1459.

$$FP_A = \frac{P}{S_A} = 0,93 ; FP_V = \frac{P}{S_V} = 0,96 \quad (111)$$

Sabe-se que é apresentado na IEEE Std 1459 o fator de potência efetivo do sistema obtido pela razão da potência ativa pela aparente efetiva. A partir das equações (44) e (45), com os valores eficazes das tensões de linha e correntes de fase é possível definir os valores de tensão e corrente efetivos do sistema, como apresentados em (112) e (113).

$$V_e = \sqrt{\frac{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)}{9}} = \sqrt{\frac{(220^2 + 220^2 + 220^2)}{9}} = 127V \quad (112)$$

$$I_e = \sqrt{\frac{(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2)}{3}} = \sqrt{\frac{(4,75^2 + 5,76^2 + 3,21^2)}{3}} = 4,69A \quad (113)$$

Assim é possível definir a potência aparente efetiva em (114).

$$S_e = 3V_e I_e = 3 * 127 * 4,69 = 1786Va \quad (114)$$

Podendo então apresentar o fator de potência efetivo em (115), onde é comprovado que o $FP_e \leq FP_A \leq FP_V$ como apresentado na IEEE Std 1459.

$$FP_e = \frac{P}{S_e} = 0,91 \quad (115)$$

Os cálculos para potências fundamentais e não fundamentais são explorados no próximo exemplo utilizando carga não linear, pois neste primeiro exemplo o sistema é puramente senoidal, desta forma pode-se dizer que não existe potência não fundamental.

4.2.2 Retificador trifásico com Carga RL

Considerando conectada a rede trifásica um retificador a diodo com uma carga RL de resistência de 10Ω e indutância de $50mH$, como na Figura 10.

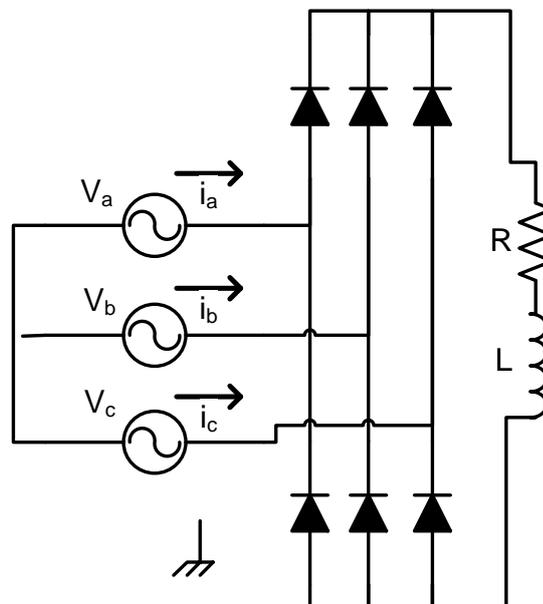


Figura 10 – Sistema trifásico alimentando um retificador com carga RL.

As formas de onda do sistema podem ser observadas na Figura 11.

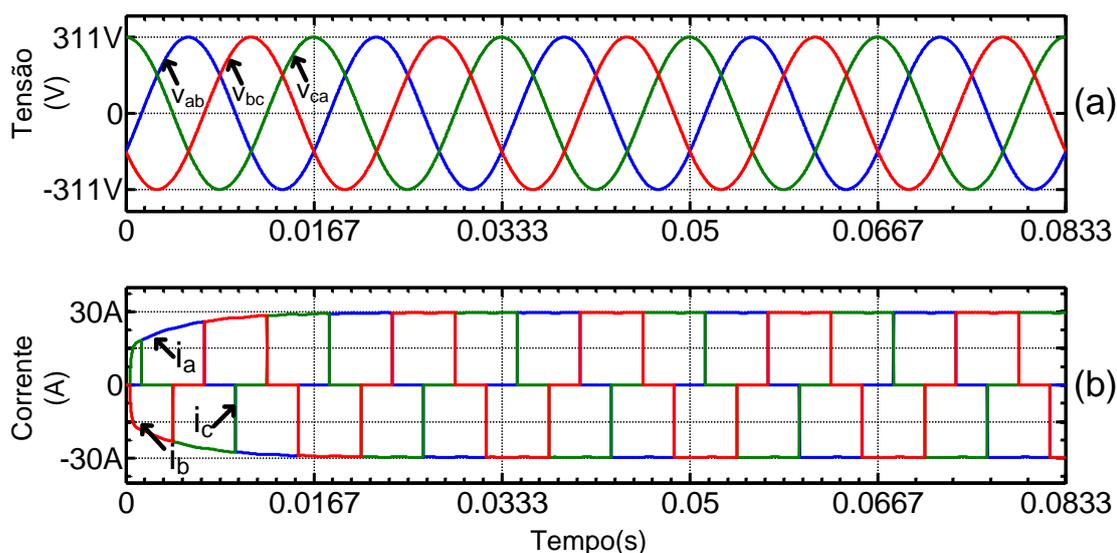


Figura 11 - (a) Tensões de linha, (b) Corrente de fase retificador trifásico

Através da análise por série de *Fourier* pode-se comprovar que as correntes apesar de equilibradas são compostas por uma parcela fundamental (com pico de aproximadamente 32,66A) e outras componentes harmônicas, apresentado na Figura 12.

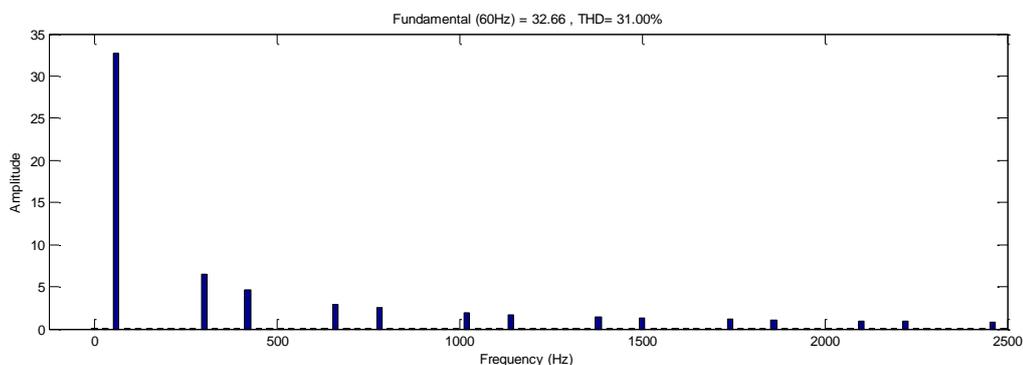


Figura 12 - Espectro harmônico da corrente (I_a) de entrada do Retificador Trifásico com carga RL.

Através da análise por série de *Fourier* pode-se comprovar que as correntes assim como as tensões (ideais) apresentam somente a parcela fundamental. Os valores eficazes de tensões e correntes são apresentados em (116) e (117).

$$V_{ab} = V_{bc} = V_{ca} = 220V \quad (116)$$

$$I_a = I_b = I_c = 24,18A \quad (117)$$

Sendo o sistema equilibrado os valores eficazes de tensão de fase são apresentados em (118).

$$V_a = V_b = V_c = 127V \quad (118)$$

Utilizando na simulação o bloco “*Fourier*” foram encontrados os ângulos φ_a , φ_b e φ_c com valores iguais a zero, visto que foi desconsiderada a impedância da rede. Desta forma este tipo de carga não apresenta potência reativa, somente parcela ativa.

De acordo com (7) obtendo o valor médio da potência instantânea em (119) pode-se definir a potência ativa total do sistema.

$$P = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} p dt_c = 8815W \quad (119)$$

Devido ao fato da corrente apresentar não somente a parcela fundamental, utilizando das equações (48) a (53), pode-se definir as parcelas efetivas fundamentais e não fundamentais, de tensões e correntes. Apresentadas em (120) e (121).

$$V_{e1} = 127V ; V_{eH} = 0V \quad (120)$$

$$I_{e1} = 23,06A ; I_{eH} = 7,19A \quad (121)$$

Para calcular a potência aparente efetiva neste caso é usada a definição apresentada em (56), que pode ser desenvolvida e reescrita como em (122).

$$S_e = \sqrt{S_{e1}^2 + S_{eN}^2} = \sqrt{(3V_{e1}I_{e1})^2 + (D_{e1}^2 + D_{eV}^2 - S_{eH}^2)^2}$$

$$S_e = \sqrt{(3V_{e1}I_{e1})^2 + ((3V_{e1}I_{eH})^2 + (3V_{eH}I_{e1})^2 - (3V_{eH}I_{eH})^2)^2} \quad (122)$$

Substituindo (120) e (121) em (122) pode-se definir a potência aparente efetiva em função das potências aparentes efetivas fundamentais e não fundamentais em (123).

$$S_e = \sqrt{(8806)^2 + (2760)^2} = 9231 \quad (123)$$

A THD de corrente pode ser expressa como em (124)

$$THD_I = \frac{I_{eH}}{I_{e1}} = \frac{7,19}{23,06} = 0,31 = 31\% \quad (124)$$

Por (36), que define de forma geral o fator de potência, utilizando o ângulo de defasagem e taxa de distorção harmônica, pode-se apresentar em (125) o fator de potência do sistema.

$$FP = \frac{\cos(\varphi)}{\sqrt{1 + TDH_i^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,31^2}} = 0,95 \quad (125)$$

Enquanto o fator de potência efetivo pode ser definido em (126).

$$FP_e = \frac{P}{S_e} = \frac{8815}{9231} = 0,95 \quad (126)$$

Os valores de potências ativas e reativas fundamentais por fase são apresentados em (127), (128) e (129).

$$P_{a1} = V_{a1}I_{a1} \cos(\varphi_a) = 2928W ; Q_{a1} = V_{a1}I_{a1} \sin(\varphi_a) \cong 0Var \quad (127)$$

$$P_{b1} = V_{b1}I_{b1} \cos(\varphi_b) = 2928W ; Q_{b1} = V_{b1}I_{b1} \sin(\varphi_b) \cong 0Var \quad (128)$$

$$P_{c1} = V_{c1}I_{c1} \cos(\varphi_c) = 2928W ; Q_{c1} = V_{c1}I_{c1} \sin(\varphi_c) \cong 0Var \quad (129)$$

De acordo com a IEEE Std 1459-2010 o fator de potência fundamental do sistema é apresentado em (130).

$$FP_1 = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}} = 1 \quad (130)$$

4.3 SISTEMAS A QUATRO FIOS

4.3.1 Carga RL Desequilibrado conectadas ao Neutro

Considerando conectada a rede trifásica uma carga RL por fase, onde $R_a = R_b = 10\Omega$ e $R_c = 20\Omega$ e $L_a = L_b = L_c = 50\text{mH}$, como na Figura 13.

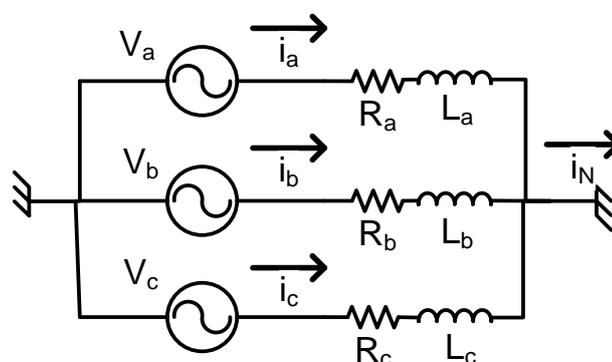


Figura 13 – Sistema trifásico a 4 fios alimentando cargas RL desequilibradas.

As formas de onda de tensões e correntes de fase são apresentadas na Figura 14.

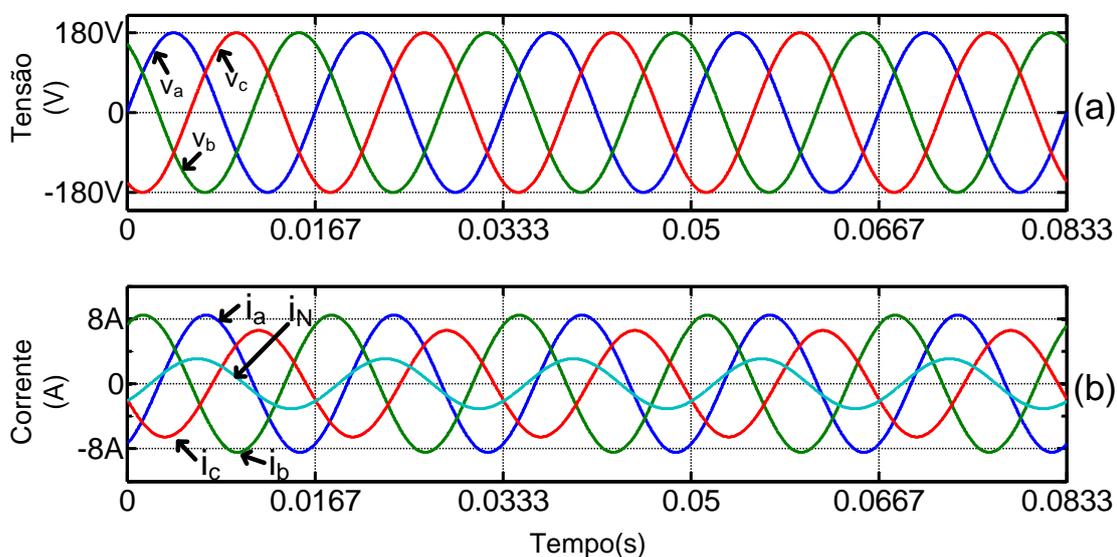


Figura 14 – (a) Tensões de Fase (b) Correntes de fase - Carga RL desequilibrada 4 fios

Os valores eficazes das tensões e correntes são apresentados respectivamente em (131) e (132).

$$V_a = V_b = V_c = 127V \quad (131)$$

$$I_a = I_b = 5,96A ; I_c = 4,61A ; I_N = 2,17A \quad (132)$$

Utilizando na simulação o bloco “*Fourier*” pode-se encontrar o ângulo de defasagem φ por fases. Os valores são apresentados em (133).

$$\varphi_a = \varphi_b = 62^\circ ; \varphi_c = 43^\circ \quad (133)$$

Os valores de potências ativas e reativas por fase são apresentados respectivamente em (134), (135) e (136).

$$P_a = V_a I_a \cos(\varphi_a) = 355,8W ; Q_a = V_a I_a \sin(\varphi_a) = 670,7Var \quad (134)$$

$$P_b = V_b I_b \cos(\varphi_b) = 355,8W ; Q_b = V_b I_b \sin(\varphi_b) = 670,7Var \quad (135)$$

$$P_c = V_c I_c \cos(\varphi_c) = 428,98W ; Q_c = V_c I_c \sin(\varphi_c) = 404,30Var \quad (136)$$

A potência ativa total do sistema é representada pela soma das potências ativas por fase, como em (137).

$$P = P_a + P_b + P_c = 1141W \quad (137)$$

Segundo as recomendações da IEEE Std 1459-2010, a potência aparente aritmética e potência aparente vetorial podem ser calculadas conforme as equações (38) e (39). Os valores encontrados neste exemplo são apresentados em (138) e (139).

$$S_A = S_a + S_b + S_c = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c = 2108 Va \quad (138)$$

$$S_V = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(P_a + P_b + P_c)^2 + (Q_a + Q_b + Q_c)^2} = 2085 Va \quad (139)$$

Podendo então apresentar os fatores de potência aritmético e vetorial em (140), onde é comprovado que o $FP_A < FP_V$ como apresentado na IEEE Std 1459.

$$FP_A = \frac{P}{S_A} = 0,541 ; FP_V = \frac{P}{S_V} = 0,547 \quad (140)$$

Os valores de tensão efetiva (41) e corrente efetiva (42) são definidos a partir dos seus valores eficazes. E podem ser expressos em (141) e (142).

$$V_e = \sqrt{\frac{3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + (V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)}{18}} = 127V \quad (141)$$

$$I_e = \sqrt{\frac{(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + \rho I_n^2)}{3}} = 5,56A \quad (142)$$

Como o sistema apresenta carga linear pode ser feita as seguintes afirmações, apresentadas em (143).

$$V_e = V_{e1} ; I_e = I_{e1} ; V_{eh} = I_{eh} = 0 \quad (143)$$

A tensão aparente efetiva é definida em (144).

$$S_e = 3V_e I_e = 2122 \quad (144)$$

Assim como o fator de potência efetivo em (145) onde é comprovado que o $FP_e \leq FP_A \leq FP_V$ como apresentado na IEEE Std 1459.

$$FP_e = \frac{P}{S_e} = 0,53 \quad (145)$$

As taxas de distorções harmônicas são unitárias já que o sistema apresenta carga linear.

4.3.2 Carga Resistiva entre duas fases

Considerando uma rede trifásica onde é conectada uma carga resistiva entre as fases a e b, onde $R_{ab} = 10\Omega$ apresentado na Figura 15. Devido à ausência de

corrente na fase c e no neutro, este exemplo é considerado como trifásico desbalanceado.

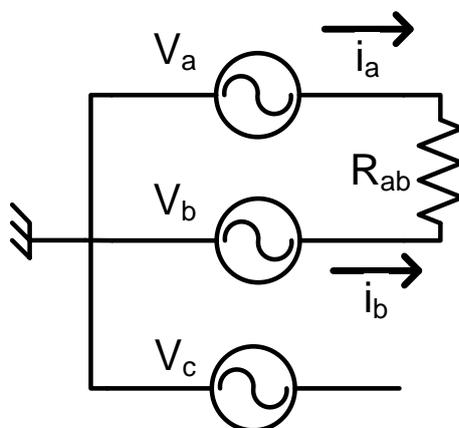


Figura 15 – Sistema trifásico alimentando carga R entre duas fases.

Na Figura 16 são apresentadas as formas de onda de tensões e correntes instantâneas do circuito apresentado.

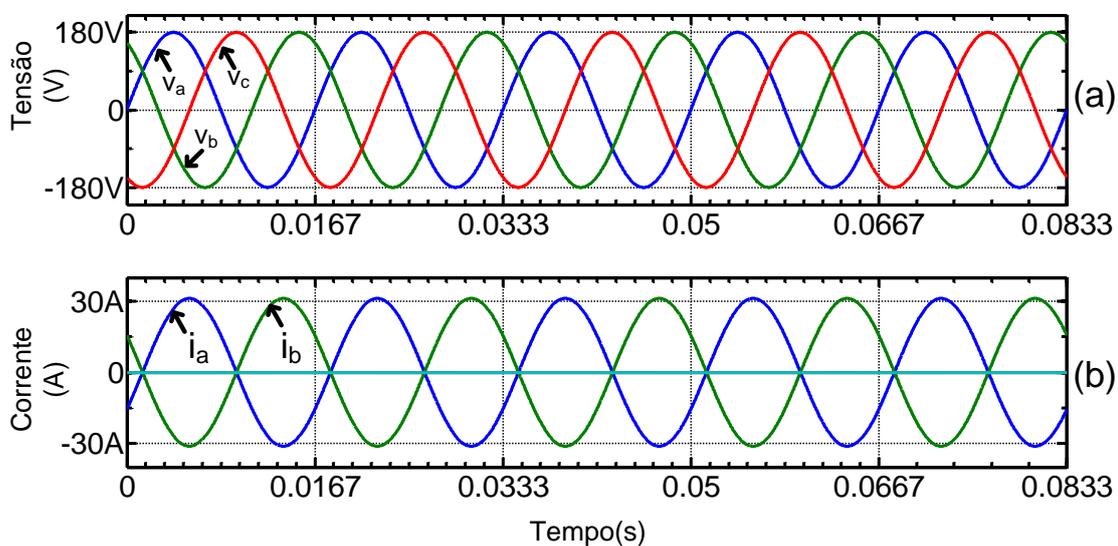


Figura 16 - (a) Tensões de Fase (b) Correntes de fase - Carga R entre fases

Os valores eficazes das tensões e correntes são apresentados respectivamente em (146) e (147).

$$V_a = V_b = V_c = 127V \quad (146)$$

$$I_a = I_b = 22,05A ; I_c = I_N = 0A \quad (147)$$

Utilizando na simulação o bloco “*Fourier*” pode-se definir os ângulos de defasagem φ por fase. Os valores são apresentados em (148).

$$\varphi_a = 30^\circ ; \quad \varphi_b = -30^\circ \quad (148)$$

Os valores de potências ativas e reativas por fase são apresentados respectivamente em (149), (150) e (151).

$$P_a = V_a I_a \cos(\varphi_a) = 2420W ; Q_a = V_a I_a \sin(\varphi_a) = 1397Var \quad (149)$$

$$P_b = V_b I_b \cos(\varphi_b) = 2420W ; Q_b = V_b I_b \sin(\varphi_b) = -1397Var \quad (150)$$

$$P_c = V_c I_c \cos(\varphi_c) = 0W ; Q_c = V_c I_c \sin(\varphi_c) = 0Var \quad (151)$$

A potência ativa total do sistema é representada pela soma das potências ativas por fase, como em (152).

$$P = P_a + P_b + P_c = 4840W \quad (152)$$

Segundo as recomendações da IEEE Std 1459-2010, a potência aparente aritmética e potência aparente vetorial podem ser calculadas conforme as equações (38) e (39). Os valores encontrados neste exemplo são apresentados em (153) e (154).

$$S_A = S_a + S_b + S_c = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c = 5715 Va \quad (153)$$

$$S_V = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(P_a + P_b + P_c)^2 + (Q_a + Q_b + Q_c)^2} = 4840 Va \quad (154)$$

Os fatores de potência aritmético e vetorial em (155), onde é comprovado que o $FP_A < FP_V$ como apresentado na IEEE Std 1459.

$$FP_A = \frac{P}{S_A} = 0,84 ; \quad FP_V = \frac{P}{S_V} = 1 \quad (155)$$

Os valores de tensão efetiva (41) e corrente efetiva (42) são definidos a partir dos seus valores eficazes. E podem ser expressos em (156) e (157).

$$V_e = \sqrt{\frac{3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + (V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)}{18}} = 127V \quad (156)$$

$$I_e = \sqrt{\frac{(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + \rho I_n^2)}{3}} = 18A \quad (157)$$

Como o sistema apresenta carga linear podem ser feitas as seguintes afirmações, apresentadas em (158).

$$V_e = V_{e1} ; I_e = I_{e1} ; V_{eh} = I_{eh} = 0 \quad (158)$$

A potência aparente efetiva é definida em (159).

$$S_e = 3V_e I_e = 6858Va \quad (159)$$

Assim como o fator de potência efetivo em (160) onde é comprovado que o $FP_e \leq FP_A \leq FP_V$ como apresentado na IEEE Std 1459.

$$FP_e = \frac{P}{S_e} = 0,707 \quad (160)$$

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÃO

Após o desenvolvimento deste trabalho foram consolidados os conceitos clássicos para obtenção das principais grandezas de potência elétrica para os mais diversos casos, entre sistemas monofásicos e trifásicos. Também foram desenvolvidos estudos baseados em novos métodos, seguindo os padrões de acordo com a recomendação IEEE 1459-2010.

Verificou-se através da comparação dos resultados obtidos que a medição de potência para o caso de carga linear e balanceada resulta em valores iguais para todos os tipos de exemplos estudados. Em compensação em situações onde se ocorre presença de harmônicos ou desequilíbrios a maneira de se calcular a potência aparente apresenta distinções, o que conseqüentemente altera o valor do fator de potência. Nestes casos de acordo com a IEEE Std 1459-2010 é o fator de potência efetivo que representa de maneira mais precisa uma situação real. Comparando as simulações e cálculos pode-se comprovar que $FP_e \leq FP_A \leq FP_V$ em todas as situações.

Desta forma pode-se afirmar que a definição de Potência Aparente Efetiva é mais rigorosa e útil do que as definições convencionais, pois considera parcelas distintas dos métodos clássicos, como fatores não fundamentais, parcelas harmônicas e de distorções de tensão/corrente.

5.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

- Estudar componentes simétricas (teoria, obtenção e impacto) para poder desenvolver todos os métodos propostos na IEEE Std 1459.

- Desenvolver um algoritmo prático para implementação e validação completa dos cálculos em experimentos reais

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica – **ANEEL**, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, Revisão 1, vigente a partir de 01/01/2010.

AKAGI, H.; KANAZAWA Y.; XABAE A.. **Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-phase Circuits**; IPEC'83 Int. Power Electronics Conference; Tokyo; Japão; 1983; pp.: 1375-1386.

ALMEIDA, J. E. SILVEIRA, P. M., J.P.G. and H. ARANGO. **A Comparative Analysis of Different Apparent Power Definitions**, in *proc.* 2006 12 th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP 2006), Porto, Portugal.

ARRILLAGA, J. N. R. WATSON, S. Chen, **Power System Quality Assessment**. Second ed., John Willey & Sons, New York, N. Y., 2000.

BRASIL. **Decreto nº. 479, de 20 de março de 1992**. Congresso Nacional. Brasília. 1992.

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.

BUCHHOLZ , F. **Apparent power in unbalanced three-phase systems**, Licht and Kraft, nº 2, pp.9 – 11, 1920.

BUDEANU, C. I. **Reactive and Fictitious power**. Instituto Romeno de Energia, (no. 2), 1927.

DEPENBROCK, M. **The FBD-Method, A Generally Applicable Tool for Analyzing Power Relations**, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, nº 2, pp.381-387, May 1993.

DUGAN, R. C., MCGRANAGHAN M. F., SANTOSO, S., BEATY J. **Electrical Power Systems Quality**, 2nd. Ed., McGraw-Hill, 2003.

EMANUEL, A. E. **Summary of IEEE 1459: Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions**, IEEE Transactions on Industry Applications, vol.40, nº3, May/June, 2004.

ERLICKI, M. S. and EMANUEL, E.A. **New Aspects of Power Factor Improvements Part I - Theoretical Basis**, IEEE Trans. on Industry and General Applications, vol. IGA-4, July/August, pp. 441-446, 1968.

FERREIRA S.C., GONZATI R.B., SILVA, C.H. da, PEREIRA R.R., SILVA, L.E.B. da, LAMBER-TORRES, G. **Adaptive algorithm for real-time power quality measurement according to IEEE std. 1459-2000**, IEEE/COBEP, Natal, 2011.

FORTESCUE, C. L. **Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks**. AIEE Transaction, 37, 1027-1140, June 1918.

FRYZE, S. **Active, reactive and apparent power in circuits with nonsinusoidal voltage and current**, Przegl.Elektrotech, 1932.

IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions, **IEEE PES**, Power System Instrumentation and Measurements Committee, Upgraded to Full-use, August 2002. Available: IEEE Std, 1459-2000.

IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, March. 2010. **IEEE Std. 1459-2010**.

IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, Sep. 2002. **IEEE Std. 1459-2000**.

IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms. ANSI/IEEE Std. 100-1992 (5th Edition). **The Inst. Of Electrical and Electronics Engineers**, Inc. New York, 1992, pp. 373, 758 and 1996.

JEON S. **Definitions of Apparent Power and Power Factor in a Power System Having Transmission Lines with Unequal Resistances**, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 20, n^o 3, July 2005.

LYON, W.V. **Reactive power and unbalanced circuits**, Electrical World, Vol. 75 (no. 25), 1417-1420, 1920.

MOHAN, N. et all, **Power Electronics – Converters, Applications and Design** John Wiley & Sons, Inc. Second ed., 1995;

PAJIÉ S. and EMANUEL, A. E. **Modern Apparent Power Definitions: Theoretical Versus Practical Approach – The General Case**, IEEE

Transactions on Power Delivery, Vol. 21, nº 4, October 2006.

POMILIO, J.A.; DECKMAN, S.M. Condicionamento de Energia Elétrica e Dispositivos FACTS, LCEE – DSCE – FEEC – UNICAMP FILTROS PASSIVOS E ATIVOS, 2009.

Acesso em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/it741/cap6.pdf>

ROGER, D.C., MARK M.F., WAYNE B. H. **Electrical Power Systems Quality**, McGraw-Hill, Inc, 1996.

WILLEMS , J. L., GHIJSELEN J.A. **Apparent Power and Power Factor Concepts in Unbalanced and Nonsinusoidal Situations**, in proc. 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference, Vol. 3, 7 pp, Italy, June 23-26.