



**FUNDAÇÃO
UNIVERSIDADE
FEDERAL DE
MATO GROSSO DO SUL**

**FACULDADE DE ENGENHARIAS,
ARQUITETURA E URBANISMO E
GEOGRAFIA**

ENGENHARIA ELÉTRICA

Análise Comparativa sobre Técnicas para Medição de Energia Elétrica com diferentes perfis de cargas.

ARTUR ALVES DE CARVALHO

Campo Grande, MS

3 de agosto de 2020



**FUNDAÇÃO
UNIVERSIDADE
FEDERAL DE
MATO GROSSO DO SUL**

**FACULDADE DE ENGENHARIAS,
ARQUITETURA E URBANISMO E
GEOGRAFIA**

ENGENHARIA ELÉTRICA

Análise Comparativa sobre Técnicas para Medição de Energia Elétrica com diferentes perfis de cargas.

ARTUR ALVES DE CARVALHO

Orientador: Edson Antonio Batista

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Mato Grosso do Sul na Faculdade de
Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e
Geografia, como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheiro(a)
Eletricista.

Campo Grande, MS

3 de agosto de 2020

Análise Comparativa sobre Técnicas para Medição de Energia Elétrica com diferentes perfis de cargas.

Monografia apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, para obtenção da Graduação em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Edson Antonio Batista

Orientador

Prof. Dr.

Prof. Dr.

Campo Grande, MS

3 de agosto de 2020

DECLARAÇÃO DE AUTORIA E RESPONSABILIDADE

Eu, **ARTUR ALVES DE CARVALHO**, residente e domiciliado na cidade de Campo Grande, Estado do Mato Grosso do Sul, portador do RG de nº 2.049.987 e CPF nº029.060.411-73 declaro que o trabalho de conclusão de curso apresentado, com o título Análise Comparativa sobre Técnicas para Medição de Energia Elétrica com diferentes perfis de cargas é de minha autoria e assumo a total responsabilidade pelo seu conteúdo e pela originalidade do texto. Declaro que identifiquei e referenciei todas as fontes e informações gerais que foram utilizadas para construção do presente texto. Declaro também que este artigo não foi publicado, em parte, na íntegra ou conteúdo similar em outros meios de comunicação, tendo sido enviado com exclusividade para a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS).

Campo Grande, 3 de agosto de 2020.

ARTUR ALVES DE CARVALHO

RESUMO

O cenário de Smart Grid possui como ponto central os medidores de energia (smart meter), pois este dispositivo representa a conexão entre o sistema elétrico e o consumidor final. O sistema de medição de energia deve estar em total consonância entre a energia elétrica demanda (ponto de derivação) e consumida (medidor) para não acarretar prejuízo as partes. Um ponto fundamental para manter esta consonância está na capacidade das técnicas de medição de energia em atender o perfil de carga do consumidor final. Este Trabalho de Conclusão de Curso tem o intuito de comparar em ambiente de simulação as seguintes teorias de medição de energia elétrica: teoria de potência em condições não senoidais, com ênfase na definição de potência do IEEE 1459/2010 e a teoria da potência conservativa (CPT). A análise comparativa foi realizada no software Matlab/Simulink, no qual construiu-se diversos cenários e avaliou-se o desempenho de cada teoria. A fim de obter resultados mais fiéis a realidade, as simulações feitas no Matlab/Simulink utilizaram cargas que remetem à modelos reais. Dois casos foram analisados, o Caso 1 respeita os limites de THDv impostos pelo IEEE 519/2014 e pelo módulo 8 do PRODIST, no Caso 2, esses limites de THDv foram ultrapassados, a fim de observar o desempenho das definições e teorias. Os resultados demonstraram que quanto maior o THDv e o THDi, maior a divergência nos resultados das potências reativas. No caso extremo, a divergência foi de 2,13% a mais para a CPT, em relação a IEEE 1459/2010.

Palavras-Chave: Medição de energia, IEEE 1459, teoria da potência instantânea, teoria da potência conservativa.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	MEDIDORES	8
1.1.1	Eletromecânicos (analógicos).....	8
1.1.2	Eletrônicos	9
1.1.3	Medidores Inteligentes	9
1.2	DEFINIÇÕES DE POTÊNCIA ELÉTRICA EM SISTEMAS NÃO-SENODIAIS	9
1.2.1	Budeanu	11
1.2.2	Fryze	12
1.3	CONCLUSÃO	13
2	DEFINIÇÕES ATUAIS DE POTÊNCIA ELÉTRICA	14
2.1	IEEE 1459/2010.....	14
2.1.1	Circuitos Monofásicos Desbalanceados e Não Senoidais	14
2.1.2	Circuitos Trifásicos Desbalanceados e Não Senoidais.....	18
2.2	TEORIA DA POTÊNCIA INSTANTÂNEA (p-q)	21
2.2.1	Potências Instantâneas	23
2.2.2	Potência Instantânea Real.....	23
2.2.3	Potência Instantânea Imaginária.....	23
2.2.4	Potência de Sequência Zero.....	23
2.3	TEORIA DA POTÊNCIA CONSERVATIVA (CPT).....	24
2.3.1	Definições Matemáticas	24
2.3.2	Potência Instantânea e Energia Reativa instantânea.....	24
2.3.3	Potência Ativa e Energia Reativa	25
2.3.4	Potência Reativa	25
2.3.5	Potência Aparente.....	26

2.3.6	Decomposição da Corrente.....	26
3	SIMULAÇÃO E RESULTADOS	27
3.1	CARGAS.....	28
3.1.1	Residência 1 – Baixo Consumo.....	29
3.1.2	Residência 2 – Médio Consumo.....	31
3.1.3	Residência 3 – Alto consumo	32
3.1.4	Cargas Por Fase	34
3.2	TEORIAS SIMULADAS	36
3.2.1	Budeanu	36
3.2.2	IEEE 1459/2010	37
3.2.3	Teoria p-q	40
3.2.4	Teoria da Potência Conservativa (CPT)	43
3.3	RESULTADOS	45
3.3.1	Caso 1	46
3.3.2	Caso 2	49
3.4	DISCUSSÕES.....	50
4	CONCLUSÃO	52
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

1 INTRODUÇÃO

Mensurar potência elétrica sempre foi alvo de estudos dos pesquisadores da área, com a evolução da tecnologia e a expansão do uso de semicondutores em circuitos chaveados, esse processo tem se tornado cada vez mais complexo. As cargas elétricas drenam correntes mais distorcidas da rede, e caso os medidores não evoluam em tecnologia e custo proporcionalmente, alguém poderá pagar essa conta indevidamente, isto é, a concessionária de energia pode sub ou sobre faturar o cliente devido ao erro de medição.

Existem dois tipos de medidores de energia comerciais, o medidor analógico e o medidor eletrônico. O medidor analógico possui mais de cem anos de existência, e como seu princípio de funcionamento é o de um motor elétrico, pouco pode ser melhorado de modo a aumentar precisão nas cargas não lineares.

Fabricantes de equipamentos elétricos conceituadas como WEG e Landis&Gyr não fabricam mais medidores analógicos. No Mato Grosso do Sul 68,6% dos medidores da Energisa MS são eletrônicos (dados cedidos pela concessionária).

Medidores eletrônicos trazem um ponto a ser explorado: qual teoria para o cálculo de potência será implementada nos equipamentos, e este é o foco deste trabalho.

1.1 MEDIDORES

1.1.1 Eletromecânicos (analógicos)

Os medidores eletromecânicos, também chamados de analógicos ou de tipo indução, possuem seu princípio construtivo baseado no acoplamento de dois campos magnéticos, produzidos por uma bobina de corrente e outra de tensão. O aparelho é construído de tal forma que o ponteiro indica o produto dessas duas grandezas multiplicado, ainda, pelo cosseno da defasagem entre elas (fator de potência) (NEVES, UFPEL).

O princípio construtivo destes medidores os torna ineficiente para seu propósito, com as características das cargas atuais. Segundo um estudo de LISITA et. al. (2012) o erro desses medidores em cargas com baixo fator de potência e com distorções harmônicas chegou a 6,71% em equipamentos trifásicos e 9,92% em equipamentos monofásicos, ainda segundo o autor, a presença da corrente de neutro causa um erro positivo, isto é, a concessionária está subfaturando o cliente. Nos medidores monofásicos, todos os ensaios demonstraram erro positivo.

1.1.2 Eletrônicos

Surgidos na década de 1990, os medidores eletrônicos possuem uma série de funcionalidades, que incluem desde o registro de energia ativa e reativa separadamente até a detecção de fraude, com sensor de abertura de tampa (www.nansen.com.br/medidores).

Transdutores de tensão e corrente coletam amostras dessas grandezas e as inserem em um circuito de condicionamento e microprocessamento. São muito mais eficazes que os medidores eletromecânicos, possuem uma boa taxa de amostragem e conversores AD com alta fidelidade, permitindo uma excelente captura das formas de onda de tensão e corrente (SILVA, 2012).

1.1.3 Medidores Inteligentes

Segundo ABOBOREIRA (2016), os medidores inteligentes devem permitir uma nova estrutura de cobrança e gestão de energia elétrica. Os consumidores e a concessionária terão acesso em tempo real aos dados de consumo, permitindo um controle maior por parte de ambos os lados. Os consumidores poderão gerir os horários de consumo de forma a otimizar a cobrança de energia elétrica, e as concessionárias terão um maior controle sobre as fraudes e faltas.

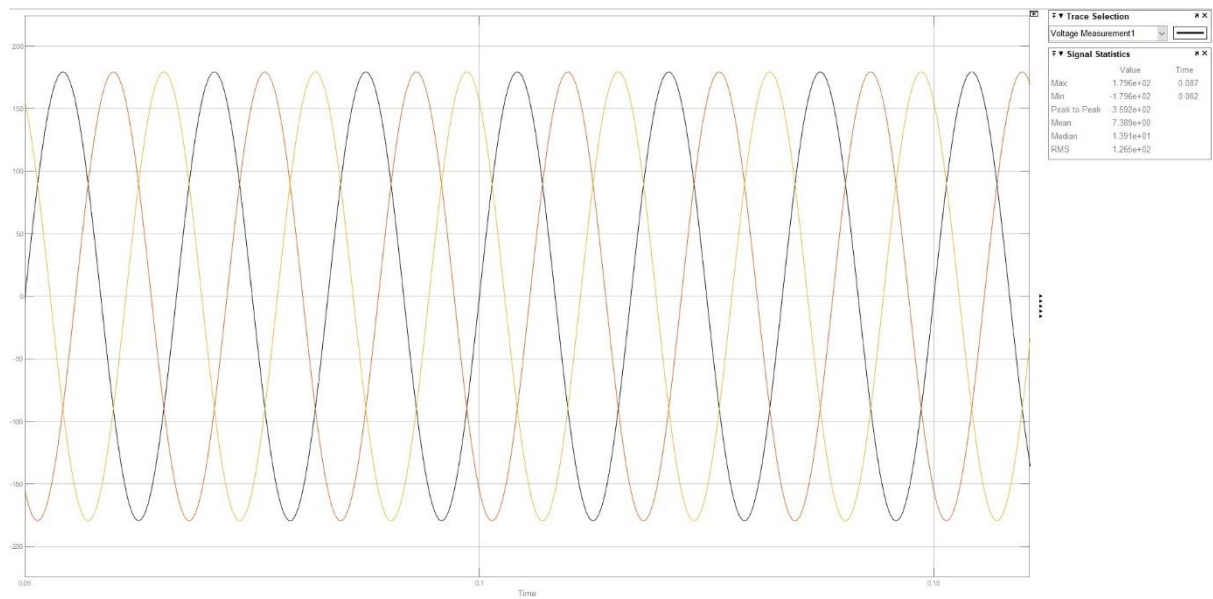
O compartilhamento dessas informações com os outros integrantes do sistema elétrico, como as unidades de geração de energia ou ainda elementos do sistema de transmissão e controle, propiciam, entre outras coisas, maior agilidade na identificação e solução de problemas operacionais e gestão mais eficiente do fluxo de energia, que passa a ser direcionado através de rotas mais confiáveis para os pontos que tem demanda a ser atendida (FORTES, 2017).

1.2 DEFINIÇÕES DE POTÊNCIA ELÉTRICA EM SISTEMAS NÃO-SENOIDAIIS

Um sistema não-senoidal é um sistema que apresenta formas de tensão e/ou corrente com distorções, conforme figuras 1 e 2. Ondas não-senoidais podem ser decompostas em um somatório de ondas senoidais de diferentes frequências, pela análise de Fourier (AKAGI, 2017).

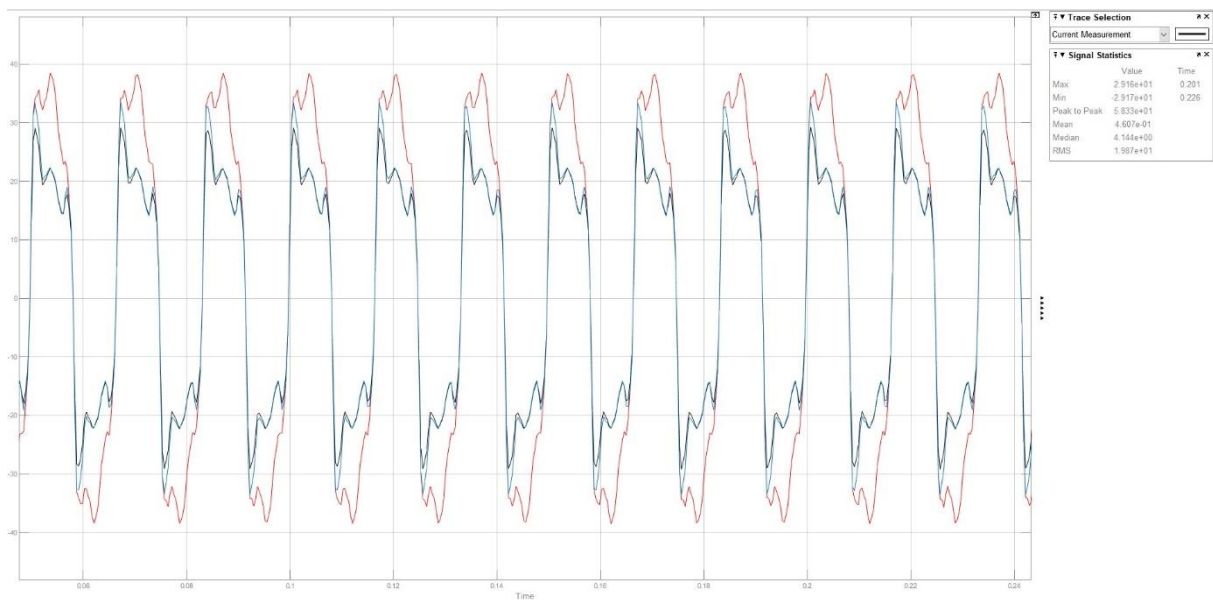
Esta seção apresenta duas das primeiras teorias que abordaram a questão, que são base para o desenvolvimento das teorias modernas.

Figura 1-Tensões trifásicas lineares



Fonte: O autor via Matlab/Simulink.

Figura 2-Correntes trifásicas não-lineares



Fonte: O autor via Matlab/Simulink.

1.2.1 Budeanu

Em 1927, Constantin Budeanu propôs um conjunto de definições para a análise de sistemas não senoidais. Segundo AKAGI (2017), esta abordagem é aplicável em formas de ondas genéricas, mas só tem validade em análises em regime permanente, por ser definida no domínio da frequência.

Budeanu definiu potência conforme as equações 1.1, 1.2 e 1.3:

A) Potência Aparente (S):

$$S^2 = \sum_n V_n^2 \cdot \sum_n I_n^2 \quad (1.1)$$

B) Potência Ativa (P):

$$P = \sum_n V_n I_n \cos \varphi_n \quad (1.2)$$

C) Potência Reativa (Q):

$$Q = \sum_n V_n I_n \sin \varphi_n \quad (1.3)$$

Sendo V_n , I_n , e $\cos \varphi_n$ são respectivamente a tensão, corrente e defasagem angular entre tensão e corrente da enésima ordem da análise de Fourier.

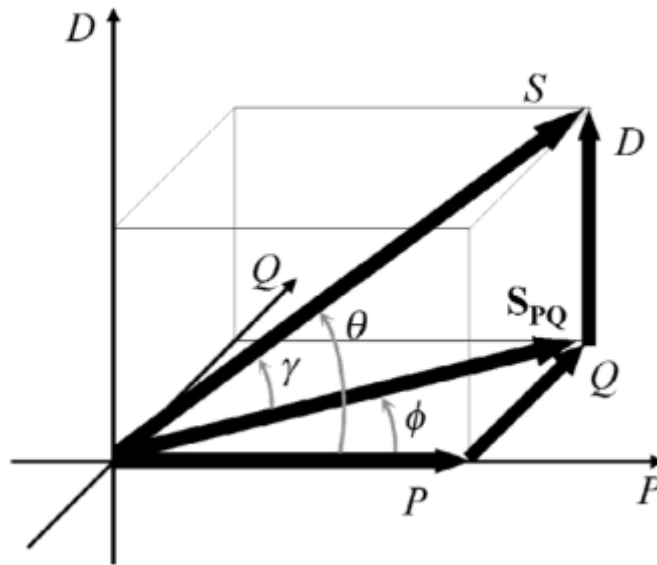
Para complementar as definições de potência, Budeanu introduziu o conceito de potência de distorção (D), conforme a equação 1.4.

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \quad (1.4)$$

De acordo com AKAGI (2017), apenas a potência ativa P possui significado físico: é o valor médio de potência ativa instantânea. A potência reativa e aparente são apenas formulações matemáticas, sem um claro significado físico. Ainda segundo os autores, definições de potência no domínio da frequência não são muito eficazes na mensuração de perda de qualidade de potência em sistemas não-senoidais.

O tetraedro de potência é uma definição gráfica em três dimensões das potências de Budeanu (Figura 3):

Figura 3-Tetraedro de potência



Fonte: AKAGI (2017).

A definição de Budeanu leva a algumas conclusões questionáveis: não é possível separar os efeitos entre cargas não lineares e reatâncias, não é possível obter parâmetros para compensação ativa ou passiva e a potência reativa não pode ser compensada de forma independente da potência de distorção (SUHETT, 2008).

1.2.2 Fryze

Quatro anos após Budeanu publicar sua abordagem para potência em sistemas não-senoidais, foi a vez de Stanislaw Fryze tentar quantificar essas potências.

A grande diferença entre as duas teorias é que as equações de Fryze estão definidas no domínio do tempo, utilizando-se dos valores RMS de tensão e corrente. Além disso, Fryze dividiu a corrente de alimentação em duas: corrente ativa (I_a) e corrente reativa (I_f) (CZARNECKI, 1997), sendo essas correntes são ortogonais entre si.

Fryze propôs sua abordagem, segundo AKAGI (2017), conforme as equações 1.5 a 1.11.

As equações básicas da abordagem de Fryze, segundo AKAGI (2017) são as seguintes:

- 1) Potência ativa (P_w):

$$P_w = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt = V_w I = VI_w \quad (1.5)$$

2) Potência aparente (P_s):

$$P_s = VI \quad (1.6)$$

3) Fator de potência ativa (λ):

$$\lambda = \frac{P_w}{P_s} = \frac{P_w}{VI} \quad (1.7)$$

4) Potência reativa (P_q):

$$P_q = \sqrt{P_s^2 - P_w^2} = V_q I = VI_q \quad (1.8)$$

5) Fator de potência reativa (λ_q):

$$\lambda_q = \sqrt{1 - \lambda^2} \quad (1.9)$$

6) Tensão ativa (V_w) e corrente ativa (I_w):

$$V_w = \lambda \cdot V \quad I_w = \lambda \cdot I \quad (1.10)$$

7) Tensão reativa (V_q) e corrente reativa (I_q):

$$V_q = \lambda_q \cdot V \quad I_q = \lambda_q \cdot I \quad (1.11)$$

É possível demonstrar que não há diferença entre a potência ativa e potência aparente definida por Fryze no domínio do tempo e de Budeanu no domínio da frequência. Porém, a potência reativa dada por Budeanu é diferente da mostrada por Fryze AKAGI (2017).

Fryze observou que o fator de potência ativa máximo é alcançado se, e somente se, a corrente instantânea é proporcional à tensão instantânea. Segundo AKAGI (2017), Fryze definiu potência reativa é toda porção de tensão e corrente que não contribui para a potência ativa, independentemente de ser originada por distorções harmônicas ou reatâncias no sistema.

1.3 CONCLUSÃO

Nota-se que a definição de potência ativa foi sempre um consenso entre autores, isso se dá por esta grandeza ter um significado físico bem definido, o que não acontece com a potência reativa. Mensurar efeitos de reatâncias e distorções sempre foi alvo de discussões.

Segundo CZARNECKI (1997), a teoria de Fryze contribuiu profundamente para o desenvolvimento de teorias mais atuais. Uma das maiores contribuições de Fryze foi a decomposição da corrente em duas componentes ortogonais entre si, essa formulação foi utilizada para o desenvolvimento da Teoria da Potência Instantânea (IPT). A teoria de Fryze, Buchholz e Depenbrock (FBD) foi um primeiro passo para a Teoria da Potência Constante (CPT), que é considerada hoje pela sociedade científica uma das teorias de potência mais avançada em sistemas não senoidais.

O próximo capítulo traz uma abordagem teórica sobre a teoria de potência instantânea, a teoria da potência constante e a definição de potência do IEEE 1459-2010, esta amplamente utilizada em medidores de energia elétrica por todo o mundo.

2 DEFINIÇÕES ATUAIS DE POTÊNCIA ELÉTRICA

2.1 IEEE 1459/2010

O Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos é uma organização profissional sem fins lucrativos, fundada nos Estados Unidos em 1963. O IEEE tem como meta promover o conhecimento no campo da engenharia elétrica, eletrônico e computação.

O IEEE 1459 é uma norma de definições padrões para a medição de potência elétrica sob condições senoidais, não senoidais, balanceadas ou não balanceadas. Esta seção traz as definições de potência elétrica sob condições não senoidais em circuitos monofásicos e trifásicos.

2.1.1 Circuitos Monofásicos Desbalanceados e Não Senoidais

Em regime permanente, tensões e correntes não senoidais e periódicas são divididas em duas componentes: a componente da frequência fundamental do sistema (i_1 e v_1), e a componente das outras frequências (i_H e v_H) (equações 2.1 e 2.2).

2.1.1.1 Tensões e Correntes em Circuitos Não Senoidais

$$v = v_1 + v_h \quad (2.1)$$

$$i = i_1 + i_h \quad (2.2)$$

Sendo v_1 (equação 2.3) a tensão instantânea da fundamental e v_H (equação 2.4) a tensão instantânea das harmônicas, i_1 a corrente instantânea da fundamental (equação 2.5) e i_H a corrente instantânea das harmônicas (equação 2.6) do sistema:

$$v_1 = \sqrt{2}V_1 \text{sen}(\omega t - \alpha_1) \quad (2.3)$$

$$v_H = V_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} V_h \text{sen}(h\omega t - \alpha_h) \quad (2.4)$$

$$i_1 = \sqrt{2}I_1 \text{sen}(\omega t - \beta_1) \quad (2.5)$$

$$i_H = I_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} I_h \text{sen}(h\omega t - \beta_h) \quad (2.6)$$

Os valores RMS ao quadrado de tensão e corrente são dados pelas equações 2.7 e 2.8:

$$V^2 = V_1^2 + V_H^2 \quad (2.7)$$

$$I^2 = I_1^2 + I_H^2 \quad (2.8)$$

Sendo o valor de tensão RMS das harmônicas definido pela equação 2.9 e o valor de corrente RMS das harmônicas definido pela equação 2.10:

$$V_H^2 = V_0^2 + \sum_{h \neq 1} V_h^2 \quad (2.9)$$

$$I_H^2 = I_0^2 + \sum_{h \neq 1} I_h^2 \quad (2.10)$$

2.1.1.2 Distorção Harmônica Total (THD)

É uma forma geral de estimar o desvio de uma onda distorcida de sua fundamental. Onde THD_V é a distorção harmônica total da tensão (equação 2.11), e THD_I é a distorção harmônica total da corrente (equação 2.12).

$$THD_V = \frac{V_H}{V_1} = \sqrt{\left(\frac{V}{V_1}\right)^2 - 1} \quad (2.11)$$

$$THD_I = \frac{I_H}{I_1} = \sqrt{\left(\frac{I}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (2.12)$$

2.1.1.3 Potência Ativa (P)

A potência ativa (equação 2.13) é composta de dois termos: da potência ativa da tensão e corrente da frequência fundamental chamada potência ativa fundamental (P_1) (equação 2.14), e da potência derivada das outras frequências, chamada potência ativa harmônica (P_H) (equação 2.15).

$$P = P_1 + P_H \quad (2.13)$$

Potência Ativa Fundamental (P_1):

$$P_1 = V_1 I_1 \cos(\theta_1) \quad (2.14)$$

Potência Ativa Harmônica (P_H):

$$P_H = V_0 I_0 + \sum_{h \neq 1} V_h I_h \cos(\theta_h) \quad (2.15)$$

2.1.1.4 Potência Reativa Fundamental (Q_1):

A potência reativa depende apenas das parcelas fundamentais, e é definida como na equação 2.16:

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin(\theta_1) \quad (2.16)$$

2.1.1.5 Potência Aparente (S):

Potência aparente é o total de potência ativa que poderia ser fornecida à carga sob condições ideais, isto é, cargas alimentadas com tensões e correntes senoidais, é definida conforme equações 2.17, 2.18 e 2.19.

$$S = VI \quad (2.17)$$

$$S^2 = (VI)^2 = (V_1^2 + V_H^2)(I_1^2 + I_H^2) \quad (2.18)$$

$$S^2 = (V_1 I_1)^2 + (V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_H I_H)^2 = S_1^2 + S_N^2 \quad (2.19)$$

Potência Aparente Fundamental (S_1):

A potência aparente fundamental é a parcela da potência aparente que depende apenas das grandezas fundamentais de tensão e corrente, expressa conforme equações 2.20 e 2.21.

$$S_1 = V_1 I_1 \quad (2.20)$$

$$S_1^2 = P_1^2 + Q_1^2 \quad (2.21)$$

Potência Aparente Não Fundamental (S_N):

A potência aparente não fundamental é composta das combinações das grandezas não unicamente fundamentais de tensão e corrente, conforme equação 2.22.

$$S_N^2 = (V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_H I_H)^2 = D_1^2 + D_V^2 + S_H^2 \quad (2.22)$$

Potência de Distorção da Corrente (D_I):

A potência de distorção da corrente é um termo dependente do valor RMS da tensão fundamental e do valor RMS da corrente harmônica, conforme equação 2.23.

$$D_I = V_1 I_H = S_1 (THD_I) \quad (2.23)$$

Potência de Distorção da Tensão (D_V):

A potência de distorção da tensão é um termo dependente do valor RMS da tensão harmônica e do valor RMS da corrente fundamental, conforme equação 2.24.

$$D_V = V_H I_1 = S_1 (THD_V) \quad (2.24)$$

Potência Aparente Harmônica (S_H):

A potência aparente harmônica é o termo da potência aparente que depende dos valores RMS de tensão e corrente das harmônicas, conforme equações 2.25 e 2.26.

$$S_H = V_H I_H = S_1 (THD_V) (THD_I) \quad (2.25)$$

$$S_H = \sqrt{P_H^2 + D_H^2} \quad (2.26)$$

2.1.1.6 Potência de Distorção Harmônica (D_H):

A contribuição devida à interação das componentes harmônicas da tensão e corrente é calculada através da parcela de potência de distorção (equação 2.27), que não gera perdas de potência ativa no sistema (DE ORO ARENAS, 2019).

$$D_H = \sqrt{S_H^2 - P_H^2} \quad (2.27)$$

2.1.1.7 Potência Não Ativa (N):

Esta potência compila os termos não ativos de das fundamentais e não fundamentais de tensão e corrente (equação 2.28). A potência não ativa é igual a potência reativa apenas quando as formas de onda de tensão e corrente são perfeitamente senoidais (IEEE 1459/2010).

$$N = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.28)$$

2.1.1.8 Fator de Potência (PF):

Segundo De Oros Arenas (2019), é um indicativo da utilização da linha, é definido conforme a equação 2.29.

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2.29)$$

A tabela 1 apresenta um resumo das definições de potência em sistemas monofásicos, com suas respectivas grandezas.

Tabela 1 - Resumo das definições para sistemas monofásicos

Grandeza ou Indicador	Combinado	Potência em 60Hz (Fundamental)	Potência não-60Hz (Não-fundamental)
Aparente	S [VA]	S_I [VA]	S_N e S_H [VA]
Ativa	P [W]	P_I [W]	P_H [W]
Não-ativa	N [var]	Q_I [var]	D_I , D_V e D_H [var]
Utilização da Linha	fp	fp_I	-
Poluição harmônica	-	-	S_N/S_I

Fonte: IEEE 1459/2020

2.1.2 Circuitos Trifásicos Desbalanceados e Não Senoidais

2.1.2.1 Potência Ativa (P):

Existem duas formas de mensurar potência ativa trifásica na IEEE 1459, a primeira é uma soma das potências de cada fase (equação 2.30 e 2.34), utilizando as mesmas equações dos circuitos monofásicos, e a segunda é utilizando de componentes simétricas para os cálculos (equações 2.30 e 2.35). Em alguns casos de circuitos trifásicos a quatro fios, a utilização de componentes simétricas pode ser útil (IEEE Std. 1459–2010).

$$P = P_a + P_b + P_c \quad (2.29)$$

Sendo P_a, P_b e P_c as potências ativas de cada fase, calculadas como em 2.1.1.3.

Potência Ativa em Componentes Simétricas

$$P = P^+ + P^- + P^0 \quad (2.30)$$

Sendo P^+ a potência ativa de sequência positiva (equação 2.31), P^- a potência ativa de sequência negativa (equação 2.32) e P^0 a potência ativa de sequência zero (equação 2.33):

$$P^+ = 3V^+I^+ \cos \theta^+ \quad (2.31)$$

$$P^- = 3V^-I^- \cos \theta^- \quad (2.32)$$

$$P^0 = 3V^0I^0 \cos \theta^0 \quad (2.33)$$

2.1.2.2 Potência Reativa (Q)

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c \quad (2.34)$$

Sendo Q_a, Q_b e Q_c as potências reativas de cada fase, calculadas como em 2.1.1.4.

Potência Reativa em Componentes Simétricas:

$$Q = Q^+ + Q^- + Q^0 \quad (2.35)$$

Sendo Q^+ a potência reativa de sequência positiva (equação 2.36), Q^- a potência reativa de sequência negativa (equação 2.37) e Q^0 a potência reativa de sequência zero (equação 2.38).

$$Q^+ = 3V^+I^+ \sin \theta^+ \quad (2.36)$$

$$Q^- = 3V^-I^- \sin \theta^- \quad (2.37)$$

$$Q^0 = 3V^0I^0 \sin \theta^0 \quad (2.38)$$

2.1.2.3 Potência Aparente Efetiva

Para os cálculos de potência aparente, fator de potência e distorção harmônica total, a norma considera o sistema trifásico como um todo, não um somatório de três sistemas monofásicos. Para isso, é calculada a corrente trifásica efetiva (I_e) (equação 2.39) e a tensão trifásica efetiva (V_e) (equação 2.40).

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2}{3}} \quad (2.39)$$

$$V_e = \sqrt{\frac{1}{18} [3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2]} \quad (2.40)$$

Sendo I_{e1} a corrente trifásica efetiva da frequência fundamental (equação 2.41 e I_{eH} a corrente trifásica efetiva das demais frequências (equação 2.42).

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2 + I_{n1}^2}{3}} \quad (2.41)$$

$$I_{eH} = \sqrt{\frac{I_{aH}^2 + I_{bH}^2 + I_{cH}^2 + I_{nH}^2}{3}} = \sqrt{I_e^2 - I_{e1}^2} \quad (2.42)$$

E V_{e1} a tensão trifásica efetiva da frequência fundamental (equação 2.43 e V_{eH} a tensão trifásica efetiva das demais frequências (equação 2.44).

$$V_{e1} = \sqrt{\frac{1}{18} [3(V_{a1}^2 + V_{b1}^2 + V_{c1}^2) + V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2]} \quad (2.43)$$

$$V_{eH} = \sqrt{\frac{1}{18} [3(V_{aH}^2 + V_{bH}^2 + V_{cH}^2) + V_{abH}^2 + V_{bcH}^2 + V_{caH}^2]} = \sqrt{V_e^2 - V_{e1}^2} \quad (2.44)$$

Finalmente, a potência aparente efetiva (S_e) pode ser escrita conforme a equação 2.4.:

$$S_e^2 = S_{e1}^2 + S_{eN}^2 \quad (2.45)$$

Sendo S_{e1} é a potência aparente fundamental (equação 2.46) e S_{eN} é a potência aparente não fundamental (equação 2.47).

$$S_{e1} = 3V_{e1}I_{e1} \quad (2.46)$$

$$S_{eN}^2 = D_{e1}^2 + D_{eV}^2 + S_{eH}^2 \quad (2.47)$$

Sendo D_{e1} a potência de distorção da corrente (equação 2.48), D_{eV} a potência de distorção da tensão (equação 2.49) e S_{eH} a potência aparente harmônica (equação 2.50).

$$D_{eI} = 3V_{e1}I_{eH} \quad (2.48)$$

$$D_{eV} = 3V_{eH}I_{e1} \quad (2.49)$$

$$S_{eH} = 3V_{eH}I_{eH} \quad (2.50)$$

2.1.2.4 Fator de Potência

O fator de potência trifásico é expresso pela equação 2.51.

$$PF = \frac{P}{S_e} \quad (2.51)$$

Tabela 2 - Resumo das definições para sistemas trifásicos

Grandeza ou Indicador	Combinado	Potência em 60 Hz (Fundamental)	Potência não fundamental.
Aparente	S_e (VA)	$S_{e1} \quad S_1^+ \quad S_{1U}$ (VA)	$S_{eN} \quad S_{eH}$ (VA)
Ativa	P (W)	P_1^+ (W)	P_H (W)
Não-ativa	N (Var)	Q_1^+ (Var)	$D_{e1} \quad D_{eV} \quad D_{eH}$ (Var)
Utilização de Linha	$PF = P / S_e$	$PF_1^+ = P_1^+ / S_1^+$	
Poluição Harmônica			S_{eN}/S_{e1}

Fonte: IEEE 1459/2020

2.2 TEORIA DA POTÊNCIA INSTANTÂNEA (p-q)

A teoria p-q, ou teoria da potência instantânea, baseia-se num conjunto de potências instantâneas definidas no domínio do tempo que são aplicadas em sistemas trifásicos, com ou sem neutro, com formas de ondas genéricas. Esta teoria também considera os sistemas trifásicos

como um sistema único e não como a superposição de três sistemas monofásicos (SUHETT, 2008).

A teoria p-q primeiro transforma tensões e correntes das coordenadas abc para as coordenadas $\alpha\beta 0$, e então define potências instantâneas nessas coordenadas (AKAGI, 2017). Essa transformação é feita através da Transformada de Clarke (2.52 e 2.53).

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

Existem três potências na teoria p-q, a potência instantânea real (p), a potência instantânea imaginária (q) e a potência instantânea de sequência zero (p_0).

Essas potências são calculadas conforme a multiplicação de matrizes de 2.54.

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

A soma de p_0 e p resulta na tradicional potência instantânea de sistemas trifásicos (equação 2.55).

$$P_{3\varphi} = p + p_0 = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 \quad (2.55)$$

$P_{3\varphi}$ representa o total de energia (trifásica) fluindo pelo sistema.

2.2.1 Potências Instantâneas

A potência instantânea real (p) (equação 2.56), a potência instantânea imaginária (q) (equação 2.57) e a potência de sequência zero (equação 2.58) possuem uma componente constante, e uma componente oscilante:

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (2.56)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (2.57)$$

$$p_0 = \bar{p}_0 + \widetilde{p}_0 \quad (2.58)$$

Sendo $\bar{p}$, $\bar{q}$ e $\bar{p}_0$ são as componentes constante e $\tilde{p}$, $\tilde{q}$ e $\widetilde{p}_0$ as componentes oscilantes.

2.2.2 Potência Instantânea Real

A potência real constante $\bar{p}$, corresponde a quantidade de energia por unidade de tempo que é transferida da fonte para a carga de modo equilibrado por meio das coordenadas abc (AFONSO, 2003), e a componente oscilante $\tilde{p}$, está relacionada à presença de harmônicos e/ou cargas que armazenam e devolvem energia ao sistema.

2.2.3 Potência Instantânea Imaginária

O valor médio da potência $\bar{q}$ corresponde à potência reativa trifásica tradicional em condições senoidais, e não contribuem para a transferência de energia, já $\tilde{q}$ corresponde à potência que está sendo trocada entre as fases do sistema. AKAGI et.al. propuseram uma unidade de medida diferente da potência reativa, essa nova unidade é o volt-ampere imaginário (Vai).

2.2.4 Potência de Sequência Zero

Esta potência só está presente em circuitos a quatro fios, pois representa a potência que flui pelo neutro ou terra. Em termos de qualidade de energia, busca-se compensar esta potência, para compensar o desbalanço de tensão e/ou corrente.

2.3 TEORIA DA POTÊNCIA CONSERVATIVA (CPT)

A teoria da potência conservativa é uma das abordagens mais recentes para potências em situações periódicas e não-senoidais. Definida no domínio do tempo, esta teoria utiliza apenas as grandezas físicas básicas, como a tensão, corrente e suas integrais e derivadas.

Esta abordagem propõe um novo termo chamado energia reativa (W_r), dada em joules, é uma outra forma de mensurar os efeitos das oscilações de potência e fluxos de correntes provocados por elementos armazenadores de energia (PAREDES, 2011), para condições periódicas não senoidais.

2.3.1 Definições Matemáticas

Valor médio de uma grandeza é definido conforme a equação 2.59.

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (2.59)$$

A integral no tempo é definida como na equação 2.60.

$$x_f(t) = \int_0^t x(\tau) d\tau \quad (2.60)$$

A integral imparcial é expressa conforme equação 2.61.

$$\hat{x}(t) = x_f(t) - \bar{x}_f \quad (2.61)$$

2.3.2 Potência Instantânea e Energia Reativa instantânea

A potência instantânea por fase ($p(t)$) é definida como na equação 2.62.

$$p(t) = \underline{v}(t) \underline{i}(t) \quad (2.62)$$

Similarmente, a energia reativa instantânea ($w_r(t)$) é definida como na equação 2.63.

$$w_r(t) = \underline{\hat{v}}(t) \underline{i}(t) \quad (2.63)$$

Sendo $\underline{v}(t)$ e $\underline{i}(t)$ são os vetores da tensão e corrente em um corte genérico da rede, em ambos os casos.

2.3.3 Potência Ativa e Energia Reativa

A potência ativa representa o fluxo permanente de energia por unidade de tempo através do corte da rede (PAREDES, 2011). A potência ativa por fase é definida conforme a equação 2.64.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt \quad (2.64)$$

A energia reativa por fase é definida como na equação 2.65.

$$W_r = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{v}(t)i(t)dt \quad (2.65)$$

Tanto a potência ativa quanto a energia reativa, são os valores médios da potência instantânea e da energia reativa instantânea, respectivamente. As grandezas trifásicas são o somatório da potência ativa ou energia reativa de cada fase.

Seja qual for a origem da energia reativa, incluindo cargas ativas e cargas não lineares, ela sempre pode ser compensada por meio de elementos reativos com capacidade adequada de armazenamento de energia (PAREDES, 2011).

Tanto a potência ativa quanto a energia reativa são grandezas conservativas, isto é, independem de referência de tensão, frequência e não se dissipam.

2.3.4 Potência Reativa

A potência reativa (Q) é uma grandeza que depende tanto da frequência quanto das distorções de tensão, portanto, não é conservativa, e pode ser definida conforme a equação 2.66.

$$Q = \frac{VW_r}{\hat{V}} \quad (2.66)$$

Sendo ω_n é a frequência angular nominal da linha, $\Delta\omega$ é definido como na equação 2.67.

$$\Delta\omega = \omega - \omega_n \quad (2.67)$$

E σ_v é o fator de distorção da tensão (equação 2.68).

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1 + DHT_v^2}{1 + DHT_v^2}} - 1 \quad (2.68)$$

2.3.5 Potência Aparente

Sejam os valores eficazes de tensão e corrente definidos como nas equações 2.69 e 2.70 respectivamente,

$$V = \frac{1}{T} \int_0^T v^2 dt = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} V_k^2} \quad (2.69)$$

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_k^2} \quad (2.70)$$

Sendo k representa a ordem harmônica, a potência aparente é definida como o produto da tensão eficaz (V) pela corrente eficaz (I), como de costume.

É uma grandeza puramente matemática, não conservativa, que representa, segundo MOREIRA 2014, a potência da fonte de alimentação, a potência aparente S também pode ser escrita como na equação 2.71.

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (2.71)$$

Sendo P a potência ativa, Q a potência reativa e D a potência residual ou potência nula, que é gerada por uma componente de corrente que não transporta nem potência ativa e nem energia reativa, a corrente nula.

2.3.6 Decomposição da Corrente

A teoria da potência constante ainda propõe uma decomposição da corrente, demonstrada na equação 2.72.

$$I^2 = I_a^2 + I_n^2 = I_a^2 + I_r^2 + I_v^2 = I_a^2 + I_q^2 + I_s^2 + I_v^2 \quad (2.72)$$

Essa decomposição, bem como as definições, foi retirada de TENTI et.al, autor original da teoria. Cada componente representa o valor eficaz da respectiva corrente, então, uma corrente genérica pode ser decomposta em:

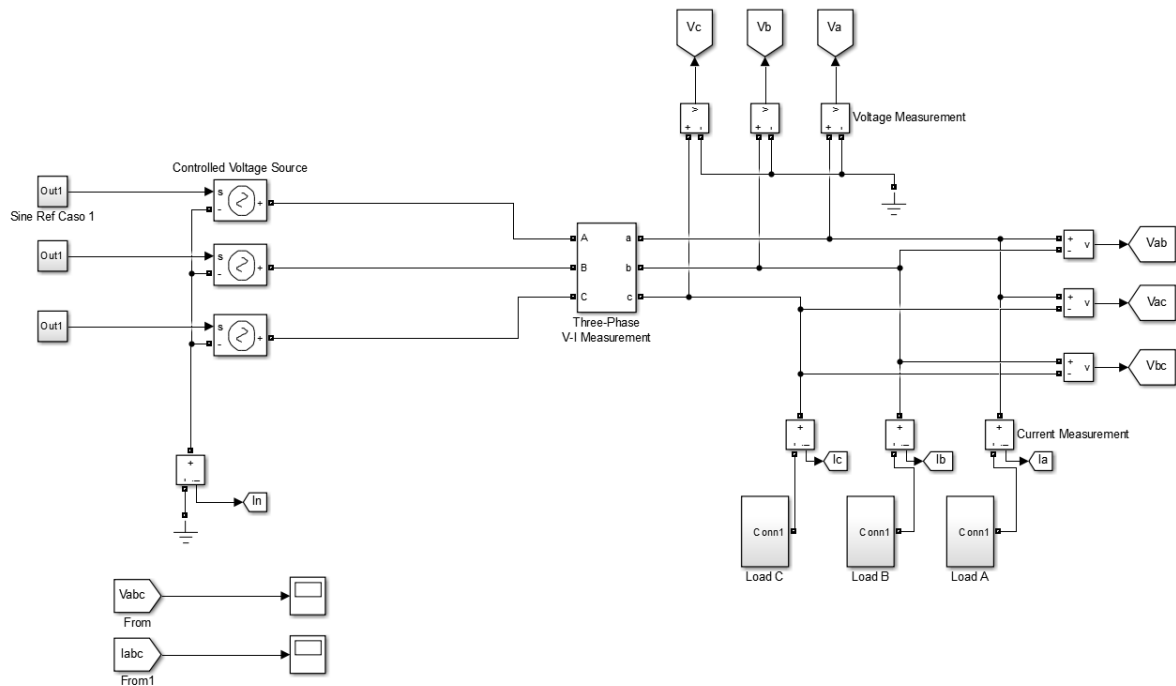
- a) Corrente ativa (I_a): representa a mínima corrente capaz de transmitir a potência média P absorvida pela carga.
- b) Corrente não ativa (I_n): definida como a porção que excede a corrente ativa, e ortogonal à mesma.
- c) Corrente reativa (I_r): não envolve absorção de energia ativa. Está relacionada com a integral e derivada da absorção de potência reativa. Foi dividida em dois termos ortogonais entre si: corrente reativa principal (I_q) e corrente reativa secundária (I_s), que juntos, representam a quantidade total de potência reativa absorvida.
- d) Corrente nula (I_v): está relacionada à distorção da corrente, não representando nenhuma potência.

3 SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentadas as simulações realizadas no Matlab/Simulink, para um comparativo entre as teorias em um sistema drenando correntes distorcidas. Utilizou-se da dissertação de Carvalho (2015) para a modelagem das cargas, de forma que a simulação representasse fidedignamente cargas reais.

Para a fonte de alimentação, dois cenários foram considerados, no primeiro, a fonte de alimentação possui um THDv de 7,346%, respeitando o limite máximo recomendado pela norma IEEE 519/2014 de 8% e pelo módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) que é 10%. No segundo cenário, a fonte de alimentação possui um THDv de 12,2%, um pouco acima dos limites, mas que pode representar uma situação real. A figura 4 mostra o diagrama utilizado na simulação.

Figura 4 - Diagrama do sistema simulado.



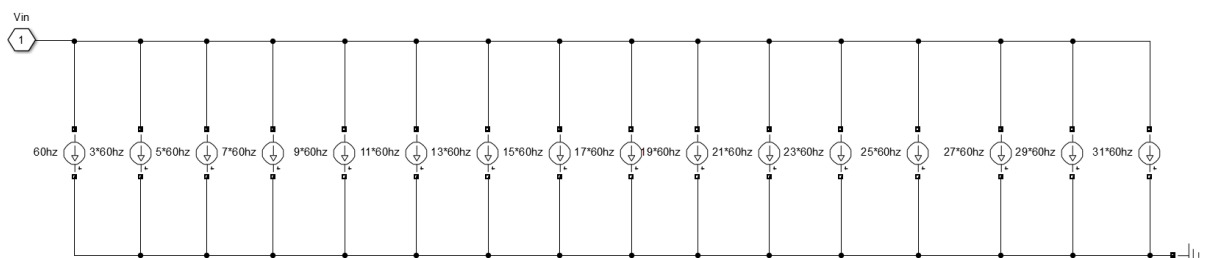
Fonte: O autor via Matlab/Simulink.

3.1 CARGAS

Carvalho (2015) realizou medições do espectro harmônico de três residências, uma de baixo consumo, denominada residência 1; uma de consumo médio, denominada residência 2; e uma de alto consumo, denominada de residência 3.

O modelo das cargas no Matlab/Simulink foi feito através de uma associação de fontes de corrente, drenando a corrente na frequência fundamental com uma defasagem de $36,87^\circ$, que representa um fator de potência de 0,8, conforme demonstrado na figura 5. Este valor foi escolhido pois representa, segundo as medições de Carvalho (2015), o valor mais frequente de fator de potência durante 4 dias contínuos de medição. Os valores das harmônicas são encontrados nas seções seguintes.

Figura 5 - Modelo das cargas utilizando fontes de correntes.

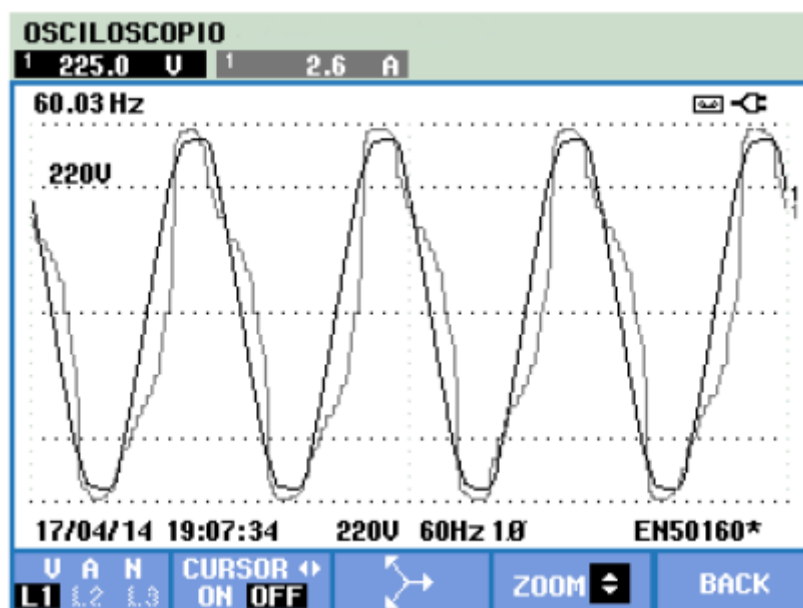


Fonte: O autor via Matlab/Simulink.

3.1.1 Residência 1 – Baixo Consumo

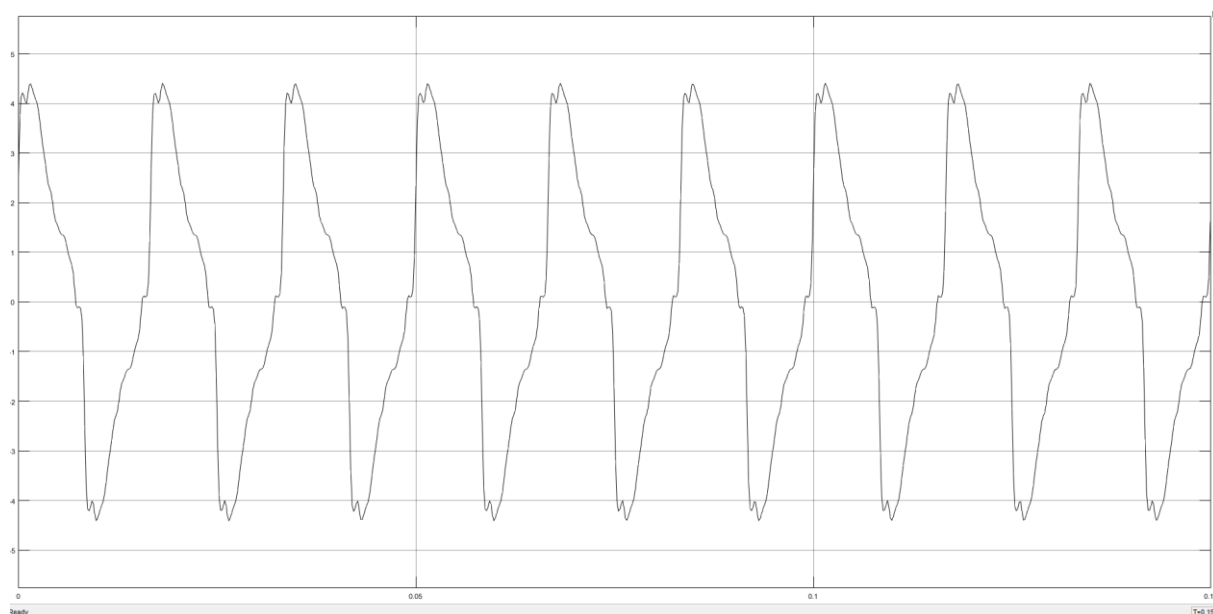
Esta residência possui um consumo médio mensal de 72 kWh/mês. A figura 6 mostra as formas de ondas da tensão e corrente medidos nesta residência. Com a implementação dos valores das correntes harmônicas da tabela 3, a forma de onda obtida em simulação está na figura 7.

Figura 6 - Formas de onda de tensão e corrente medidos.



Fonte: CARVALHO (2015).

Figura 7 - Forma de onda de corrente simulada.



Fonte: O autor via Matlab/Simulink.

Tabela 3 - Valores das harmônicas de corrente.

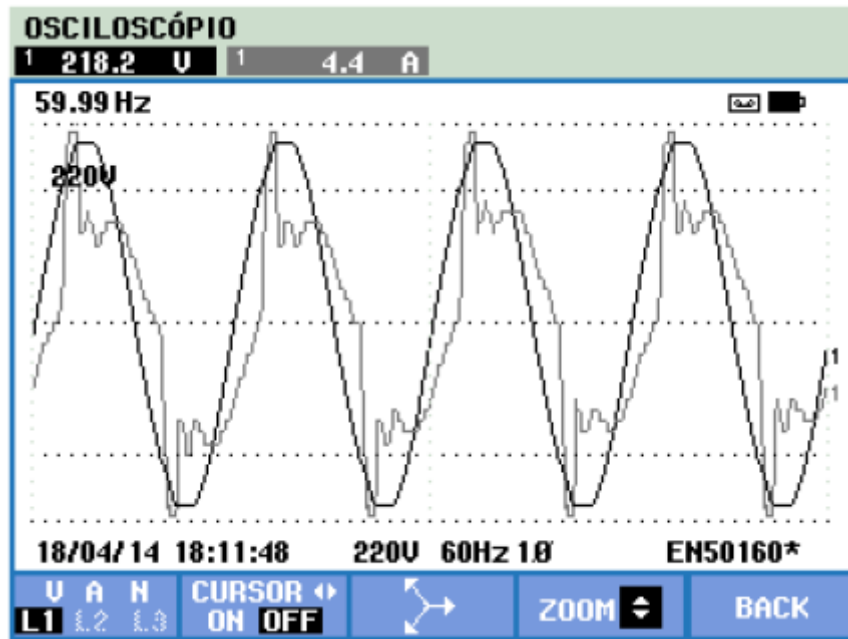
Harmônicos de corrente		
Harmônicos De corrente	7h58min I = 1,4 A	19h07min I = 2,6 A
	THD% f = 20,56	THD% f = 32,19
3 ^a	16,27	28,41
5 ^a	10,05	7,82
7 ^a	2,85	6,49
9 ^a	2,7	6,9
11 ^a	2,48	5,0
13 ^a	2,72	5,22
15 ^a	2,65	3,58
17 ^a	1,84	2,05
19 ^a	0,46	0,13
21 ^a	1,13	0,84
23 ^a	0,59	0,38
25 ^a	0,7	0,77
27 ^a	0,44	0,59
29 ^a	0,56	0,46
31 ^a	0,53	0,19
33 ^a	0	0
35 ^a	0	0
37 ^a	0	0
39 ^a	0	0

Fonte: CARVALHO (2015).

3.1.2 Residência 2 – Médio Consumo

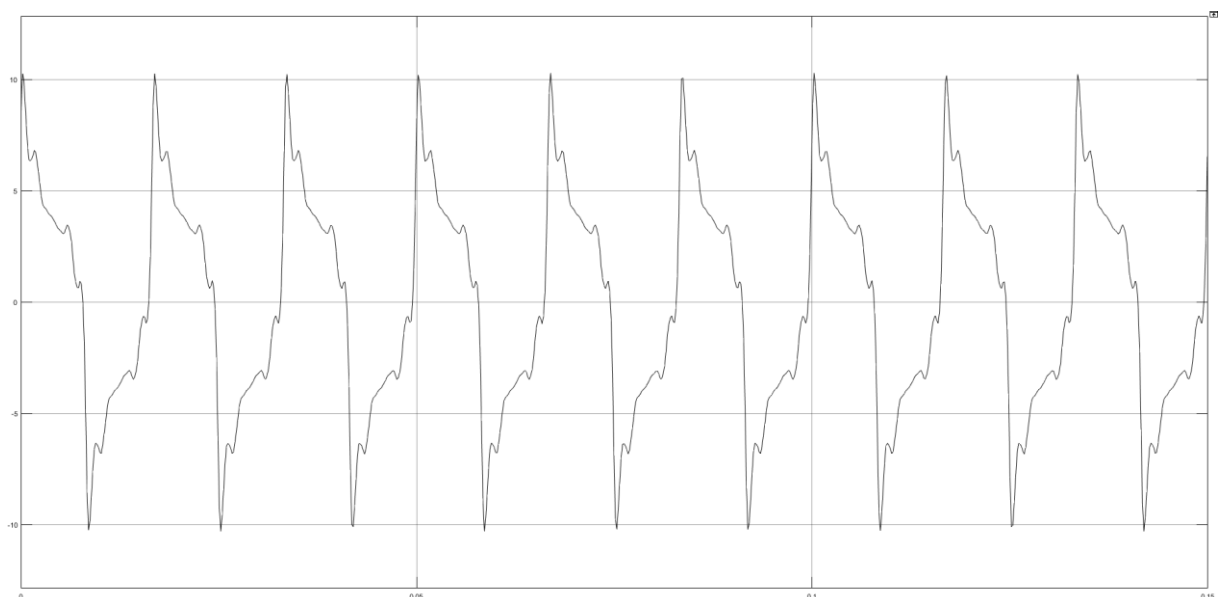
Esta residência possui um consumo médio mensal de 243 kWh/mês. A figura 8 mostra as formas de ondas da tensão e corrente medidos nesta residência. Com a implementação dos valores das correntes harmônicas da tabela 4, a forma de onda obtida em simulação está na figura 9.

Figura 8 - Formas de onda de tensão e corrente medidos.



Fonte: CARVALHO (2015).

Figura 9 - Forma de onda da corrente simulada.



Fonte: O autor via Matlab Simulink.

Tabela 4 - Valores das harmônicas de corrente.

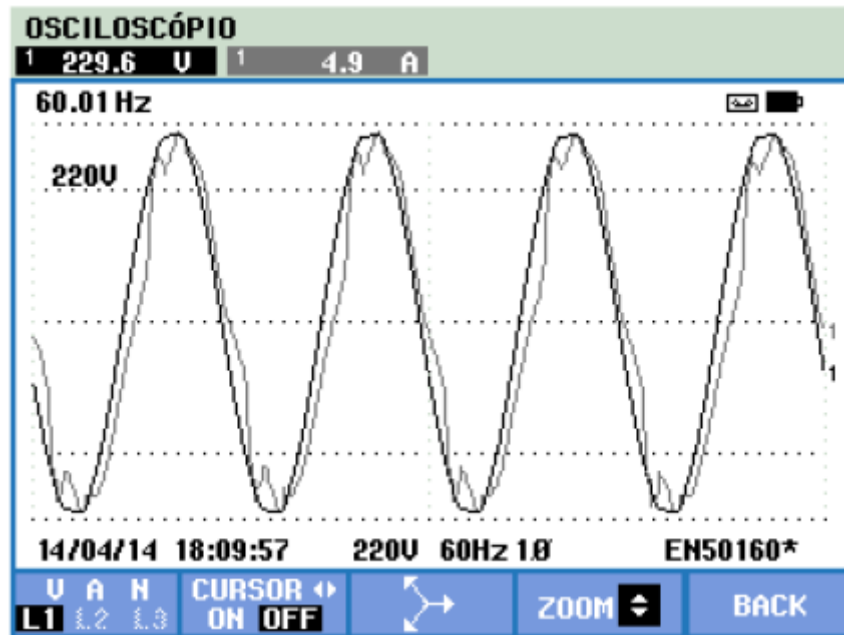
Harmônicos de corrente		
Harmônicos De corrente	8h57min	18h11min
	I = 1,9 A	I = 4,4 A
	THD% _f = 43,02	THD% _f = 48,78
3 ^a	29,36	38,38
5 ^a	26,05	16,09
7 ^a	14,39	12,21
9 ^a	7,78	16,69
11 ^a	3,53	12,53
13 ^a	2,65	5,87
15 ^a	2,49	3,29
17 ^a	2,17	2,66
19 ^a	1,65	1,39
21 ^a	1,22	1,27
23 ^a	0,92	0,87
25 ^a	0,96	0,33
27 ^a	0,92	0,8
29 ^a	0,6	0,84
31 ^a	0,38	0,43
33 ^a	0	0
35 ^a	0	0
37 ^a	0	0
39 ^a	0	0

Fonte: CARVALHO (2015).

3.1.3 Residência 3 – Alto consumo

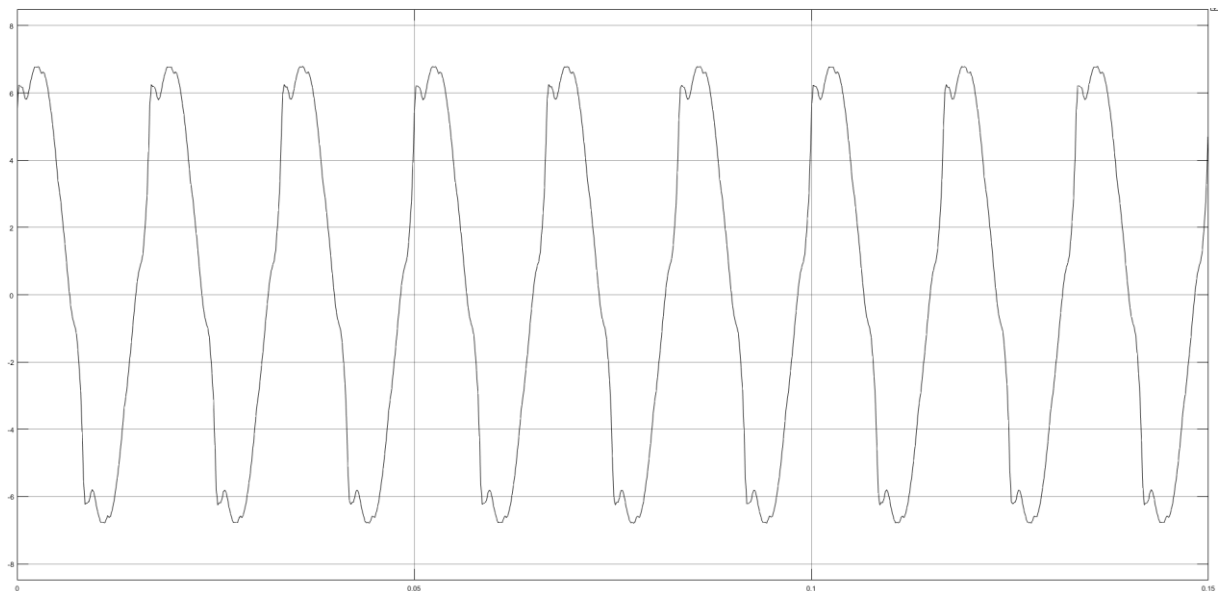
Esta residência possui um consumo médio mensal de 540 kWh/mês. A figura 10 mostra as formas de ondas da tensão e corrente medidos nesta residência. Com a implementação dos valores das correntes harmônicas da tabela 5, a forma de onda obtida em simulação está na figura 11.

Figura 10 - Formas de onda de tensão e corrente medidos.



Fonte: CARVALHO (2015).

Figura 11 - Forma de onda de corrente simulada.



Fonte: O autor via Matlab Simulink.

Tabela 5 - Valores das harmônicas de corrente.

Harmônicos de corrente		
Harmônicos De corrente	9h04min	18h09min
	I = 1,2 A	I = 4,9 A
	THD% _f = 16,21	THD% _f = 12,10
3 ^a	9,28	2,42
5 ^a	8,03	6,53
7 ^a	6,37	5,06
9 ^a	5,55	5,02
11 ^a	3,02	2,38
13 ^a	1,36	0,97
15 ^a	0,82	0,94
17 ^a	2,29	0,34
19 ^a	1,16	0,72
21 ^a	0,83	0,67
23 ^a	0,41	0,48
25 ^a	0,25	0,7
27 ^a	0,69	0,32
29 ^a	0,67	0,17
31 ^a	0,63	0,43
33 ^a	0	0
35 ^a	0	0

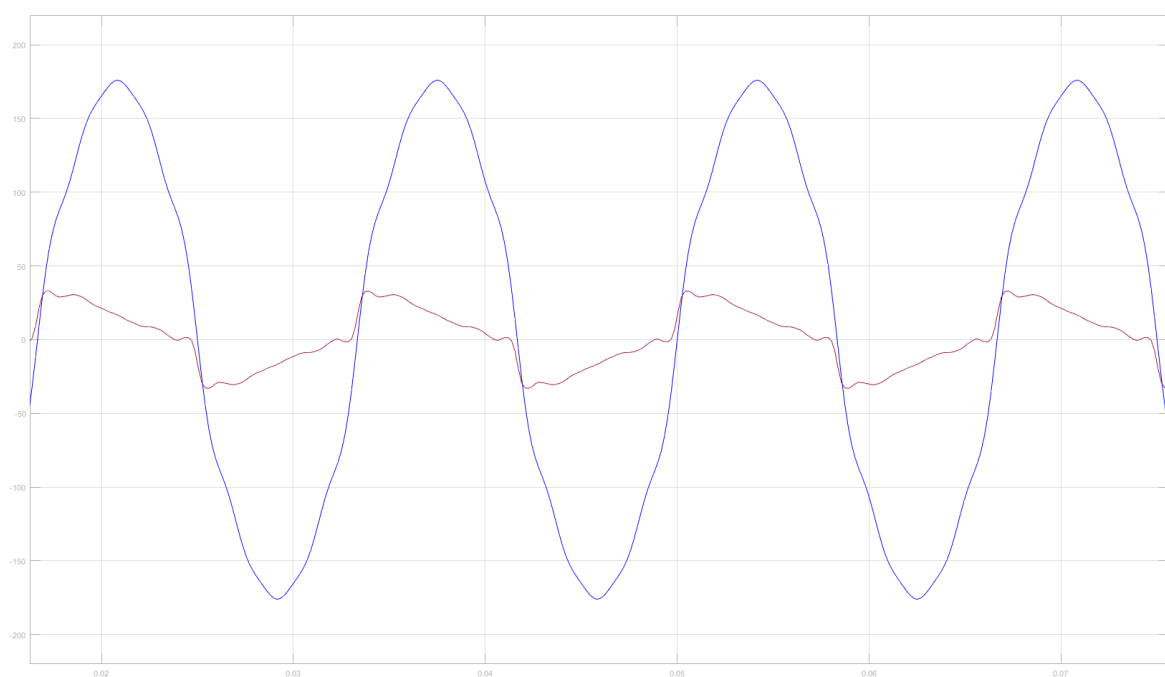
Fonte: CARVALHO (2015).

3.1.4 Cargas Por Fase

Foi utilizado um arranjo em paralelo das três residências em cada fase, de forma a ficarem desbalanceadas e com uma corrente significativa para as análises.

- a) A fase A possui duas residências 1, duas residências 2 e uma residência 3, apresentando formas de ondas de tensão e corrente conforme figura 12.

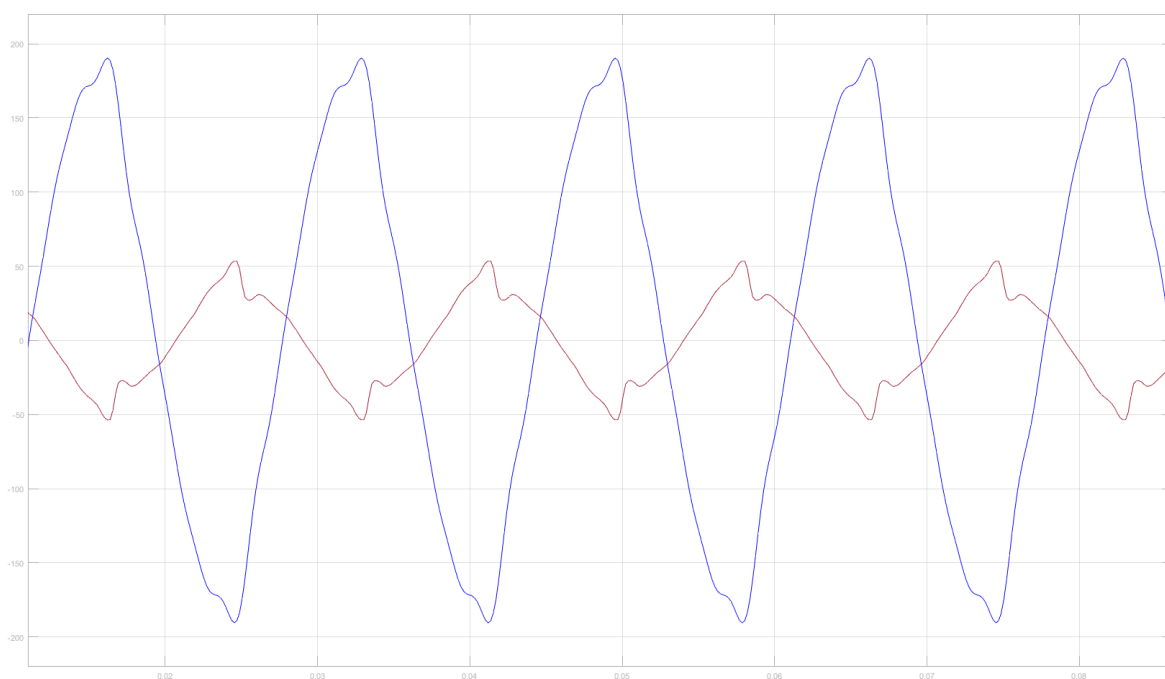
Figura 12 - Formas de onda de tensão (azul) e corrente (marrom) da fase A.



Fonte: O autor via Matlab/Simulink.

- b) A faze B possui quatro residências 1, uma residência 2 e duas residências 3, apresentando formas de ondas de tensão e corrente conforme figura 13.

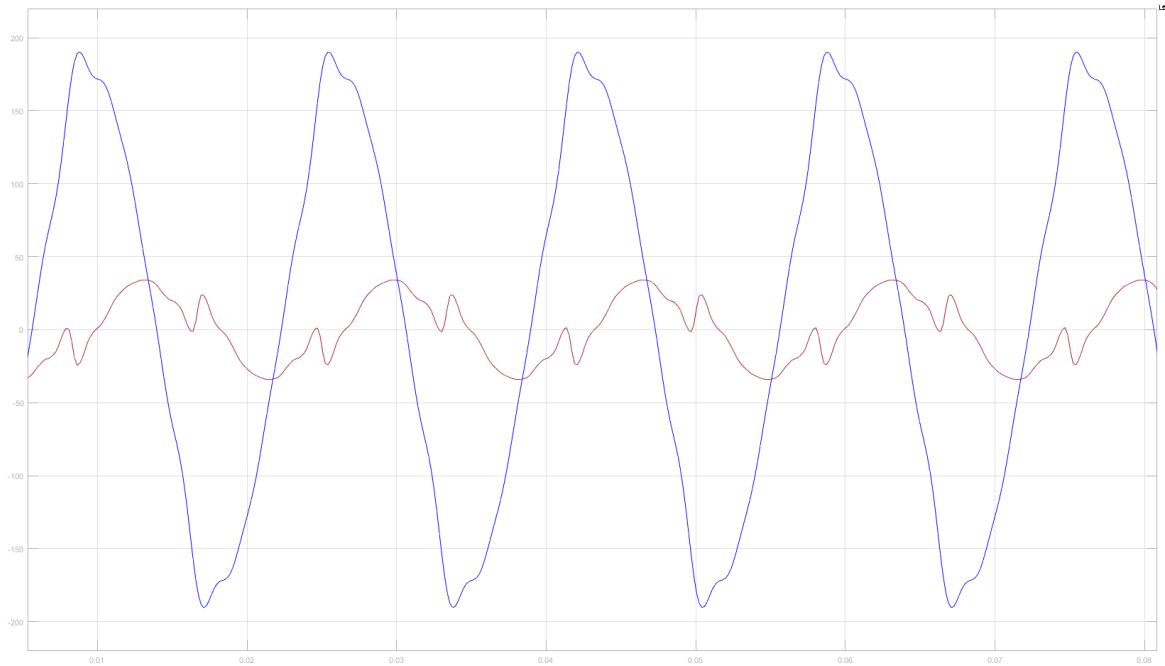
Figura 13 - Formas de onda de tensão (azul) e corrente (marrom) da fase B.



Fonte: O autor via Matlab/Simulink.

- c) A fase C possui uma residência 1, três residências 2 e uma residência 3, apresentando formas de ondas de tensão e corrente conforme figura 14.

Figura 14 - Formas de onda de tensão (azul) e corrente (marrom) da fase C.



Fonte: O autor via Matlab/Simulink.

3.2 TEORIAS SIMULADAS

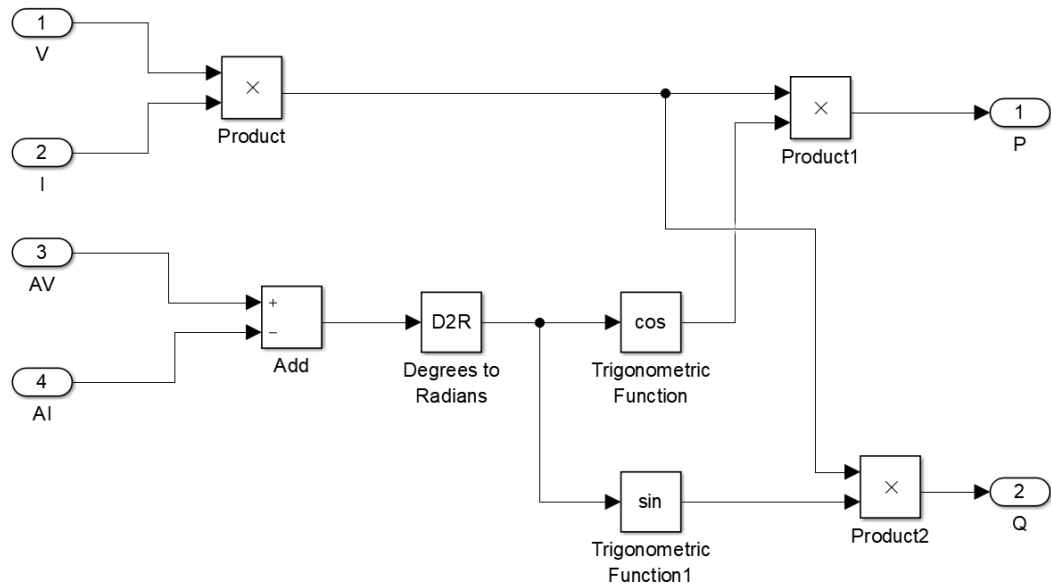
3.2.1 Budeanu

A primeira teoria simulada foi a de Budeanu, por ser bastante simples, seus resultados serviram de base comparativa. A potência ativa (P) e reativa (Q) são descritas respectivamente conforme as equações 1.1 e 1.2. A figura 15 mostra o diagrama de como as equações 1.1 e 1.2 foram implementadas no Matlab/Simulink.

$$P = \sum_n V_n I_n \cos \varphi_n \quad (1.1)$$

$$Q = \sum_n V_n I_n \sin \varphi_n \quad (1.2)$$

Figura 15 - Diagrama da simulação da potência ativa e reativa segundo Budeanu.



Fonte: O autor via Matlab Simulink.

O procedimento da figura 15 foi feito para as harmônicas de ordem ímpar até a de número 31.

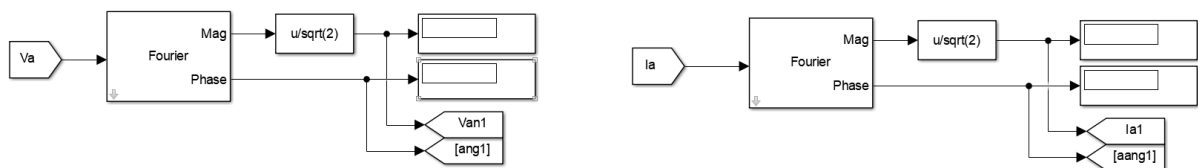
3.2.2 IEEE 1459/2010

A potência ativa e reativa da norma 1459/2010 são bastante semelhantes com a abordagem de Budeanu. O primeiro passo foi calcular o valor eficaz das componentes fundamentais de tensão e corrente, conforme equações 2.3 e 2.5. A figura 16 demonstra como as equações 2.3 e 2.5 foram implementadas no Matlab/Simulink.

$$v_1 = \sqrt{2}V_1 \sin(\omega t - \alpha_1) \quad (2.3)$$

$$i_1 = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t - \beta_1) \quad (2.5)$$

Figura 16 - Diagrama do cálculo do valor eficaz da fundamental de corrente e tensão.



Fonte: O autor via Matlab/Simulink

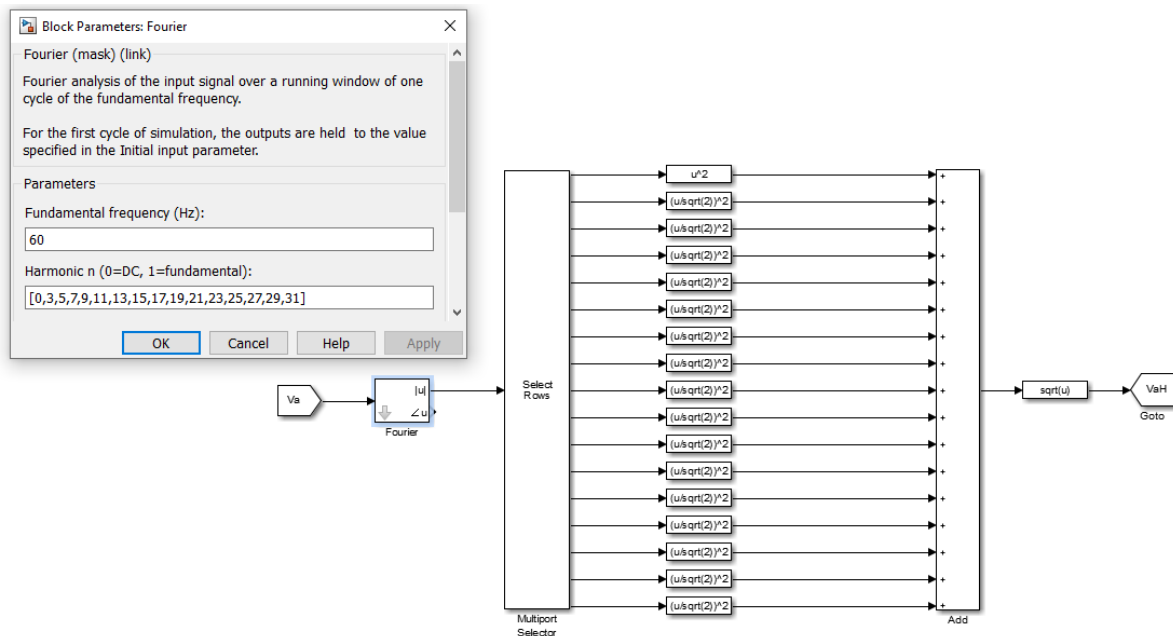
O procedimento da figura 16 foi feito para todas as tensões de fase e de linha e todas as correntes, incluindo corrente de neutro.

O segundo passo é calcular o valor eficaz das componentes não fundamentais de tensão e corrente, conforme equações 2.9 e 2.10. A figura 17 mostra como essas equações foram implementadas.

$$V_H^2 = V_0^2 + \sum_{h \neq 1} V_h^2 \quad (2.9)$$

$$I_H^2 = I_0^2 + \sum_{h \neq 1} I_h^2 \quad (2.10)$$

Figura 17 - Diagrama do cálculo do valor eficaz da componente não fundamental de tensão.



Fonte: O autor via Matlab/Simulink.

O procedimento da figura 17 foi feito para todas as tensões e correntes. A potência ativa foi calculada de forma similar à de Budeanu, a única diferença é a utilização das componentes DC no cálculo. A potência reativa apenas considera as componentes fundamentais para seu cálculo.

De posse dos valores eficazes de tensão e corrente, fundamentais e não fundamentais, é possível calcular a potência ativa P (equações 2.13, 2.14 e 2.15) e a potência reativa Q (equação 2.16)

$$P = P_1 + P_H \quad (2.13)$$

$$P_1 = V_1 I_1 \cos(\theta_1) \quad (2.14)$$

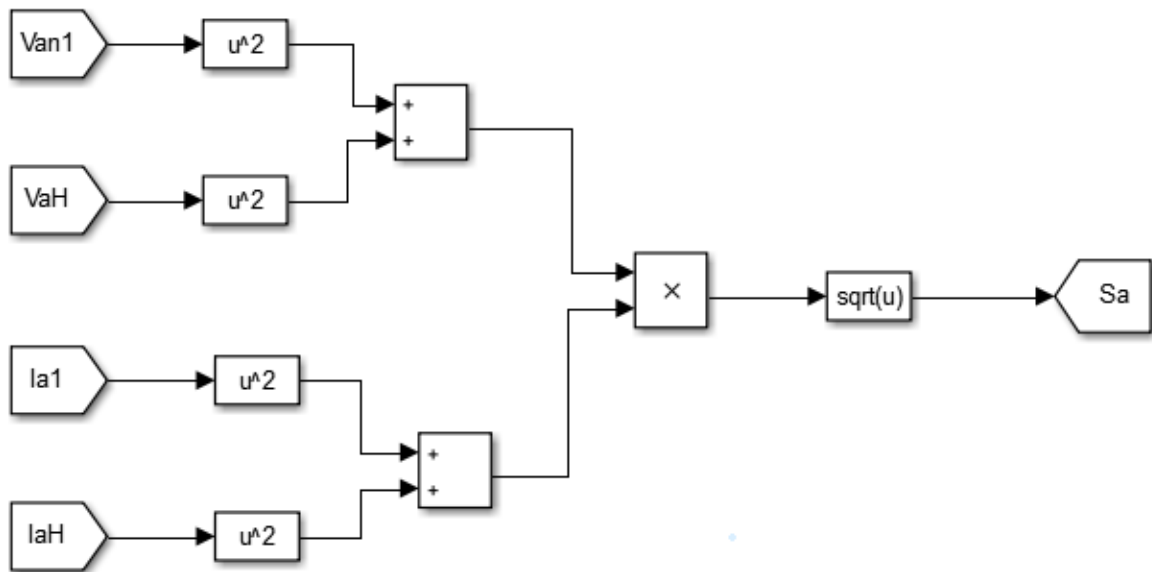
$$P_H = V_0 I_0 + \sum_{h \neq 1} V_h I_h \cos(\theta_h) \quad (2.15)$$

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin(\theta_1) \quad (2.16)$$

Com os valores das componentes fundamentais e não fundamentais de corrente e tensão, calcula-se a potência aparente S conforme equação 2.19. A figura 18 mostra como a equação 2.19 foi implementada no Matlab/Simulink.

$$S^2 = (V_1 I_1)^2 + (V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_H I_H)^2 = S_1^2 + S_N^2 \quad (2.19)$$

Figura 18 - Diagrama do cálculo da potência aparente.

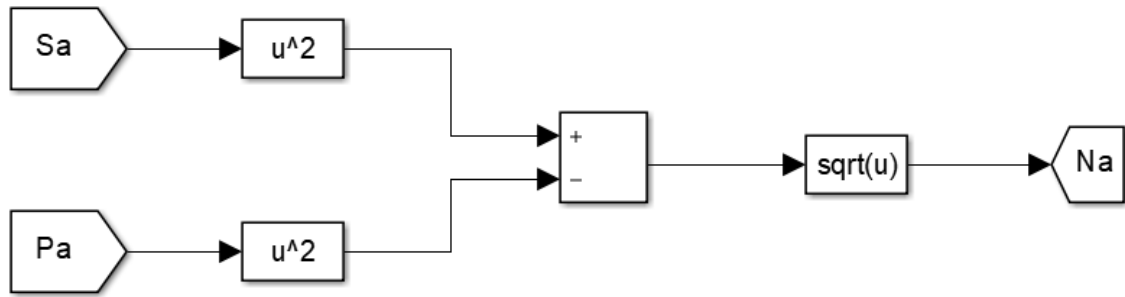


Fonte: O autor via Matlab/Simulink.

Com a potência aparente S e a potência ativa P , calcula-se a potência não-ativa N , como na equação 2.28. A figura 19 mostra como a equação 2.28 foi implementada.

$$N = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.28)$$

Figura 19 - Diagrama do cálculo da potência não-ativa.



Fonte: O autor via Matlab/Simulink.

3.2.3 Teoria p-q

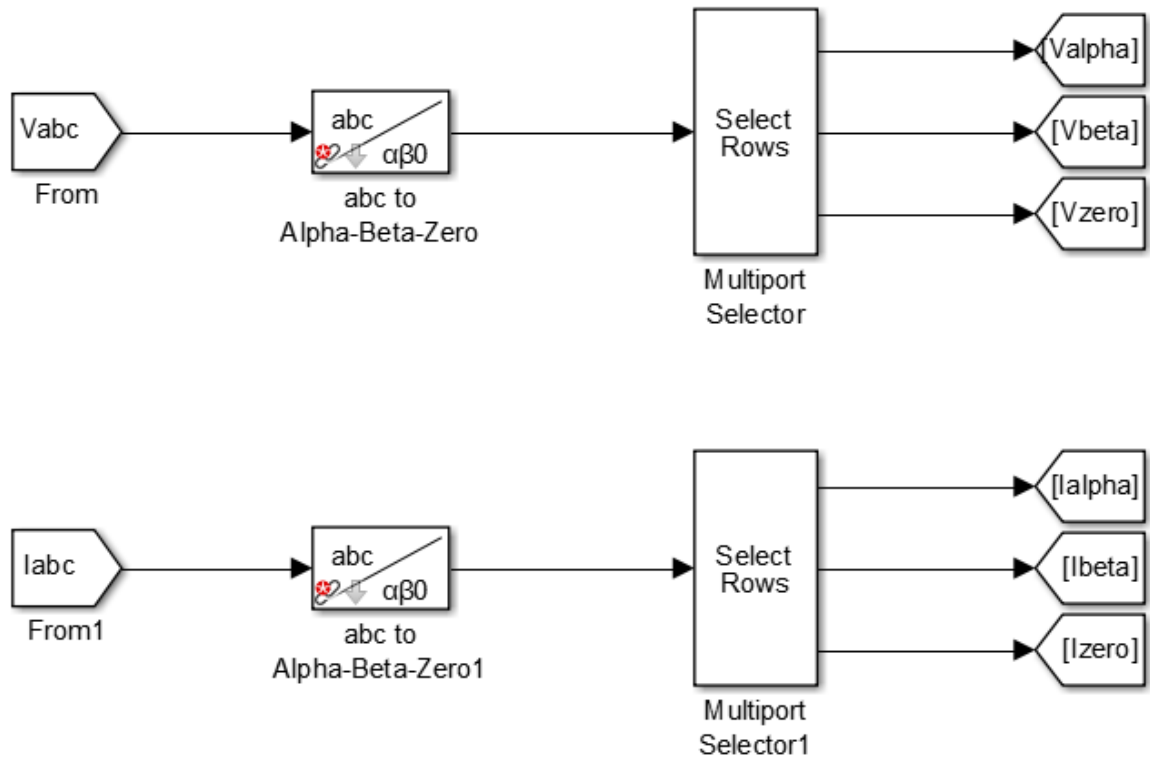
O primeiro passo é utilizar a transformada de Clarke para obter as tensões e correntes nas coordenadas α , β e 0, conforme 2.52 e 2.53.

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

A figura 20 mostra como as matrizes 2.52 e 2.53 foi implementada. Foi utilizado o bloco *abc to Alpha-Beta-Zero* do Matlab/Simulink.

Figura 20 - Transformada de Clarke da tensão e corrente.



Fonte: O autor via Matlab/Simulink.

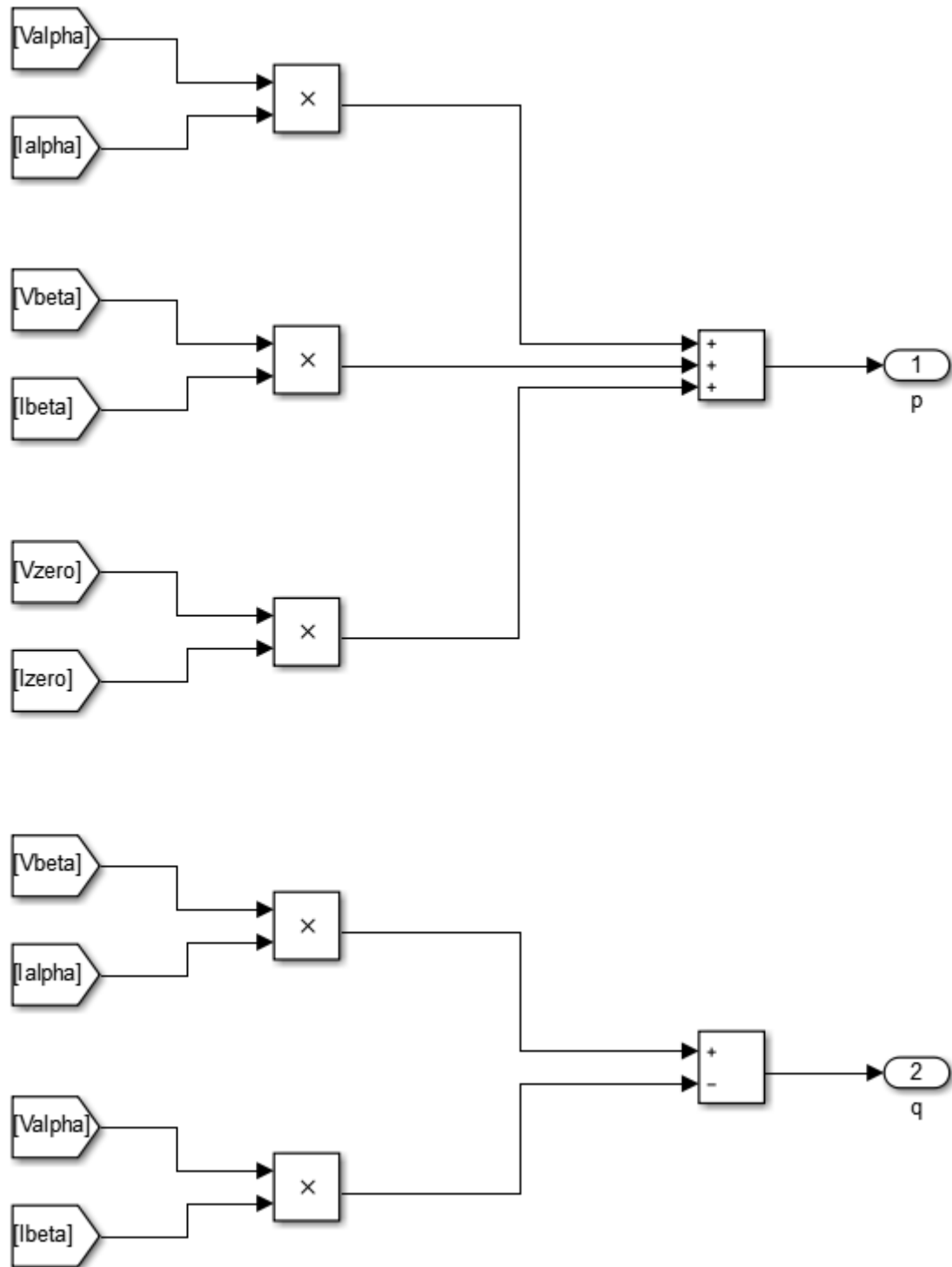
O segundo passo é adquirir a tensão real (p) e a tensão imaginária (q) com os valores de tensão e corrente nas coordenadas α , β e 0 , conforme 2.54 e as equações 2.55 e 3.1. A figura 21 mostra um diagrama desta implementação.

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

$$P_{3\phi} = p + p_0 = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 \quad (2.55)$$

$$q = v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta \quad (3.1)$$

Figura 21 - Diagrama da simulação da potência trifásica e potência imaginária da teoria p-q.



Fonte: O autor via Matlab/Simulink.

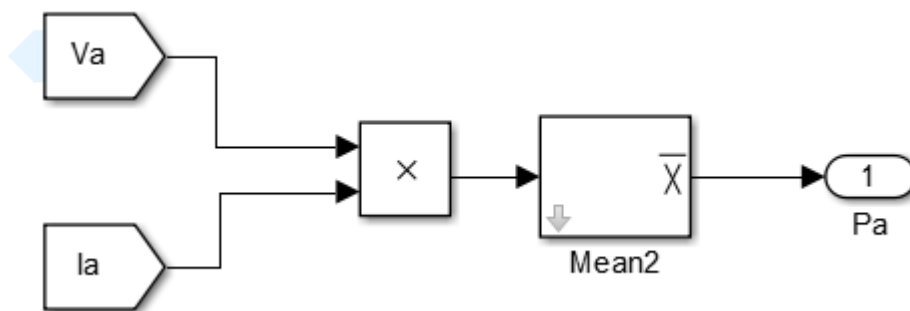
3.2.4 Teoria da Potência Conservativa (CPT)

Como visto, a potência ativa (P) é o valor médio do produto das funções no tempo da tensão pela corrente (equação 2.64).

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt \quad (2.64)$$

A figura 22 mostra como a equação 2.64 foi implementada.

Figura 22 - Diagrama do cálculo da potência ativa.



Fonte: O autor via Matlab Simulink.

A energia reativa (W) é o valor médio do produto da integral imparcial da tensão pela corrente (equação 2.65).

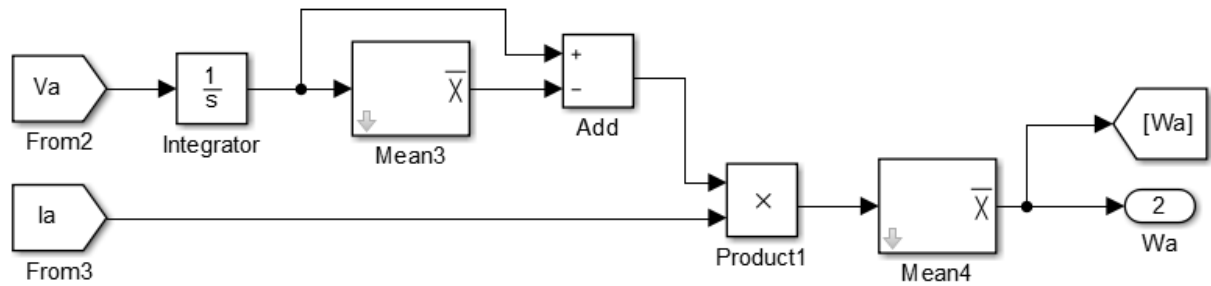
$$W_r = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{v}(t)i(t)dt \quad (2.65)$$

Sendo $\hat{v}(t)$ a integral imparcial definida como na equação 2.61.

$$\hat{x}(t) = x_f(t) - \bar{x}_f \quad (2.61)$$

Sendo $\bar{x}_f$ o valor médio. A figura 23 mostra como a equação 2.65 foi implementada.

Figura 23 - Diagrama do cálculo de energia reativa.



Fonte: O autor via Matlab/Simulink.

A potência reativa depende da energia reativa, do valor eficaz da tensão e o valor eficaz da integral imparcial da tensão, conforme a equação 2.66.

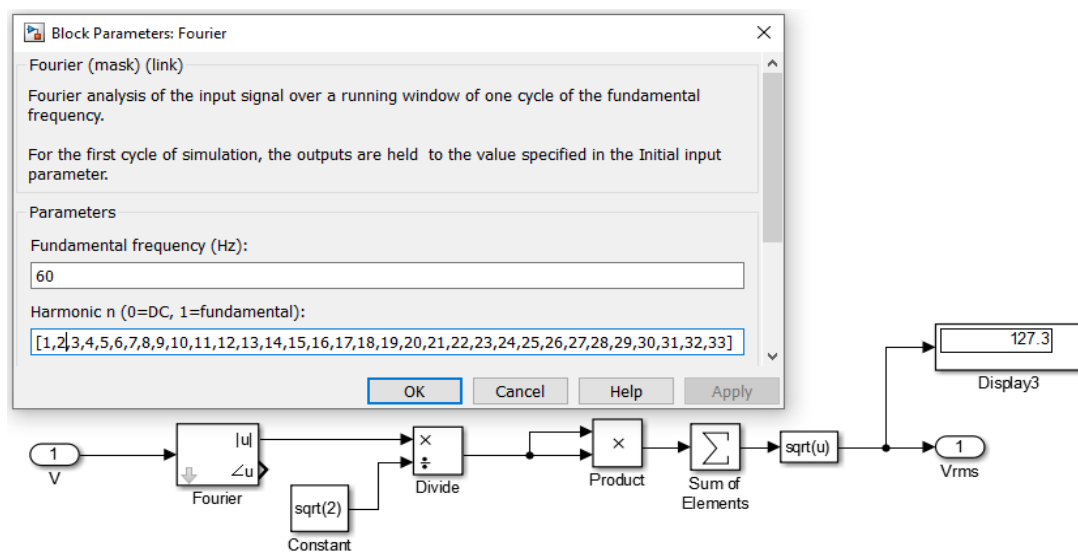
$$Q = \frac{VW_r}{\hat{V}} \quad (2.66)$$

O valor eficaz da tensão é dado pela equação 2.69.

$$V = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} V_k^2} \quad (2.69)$$

A figura 24 mostra como o cálculo do valor eficaz da tensão (equação 2.69) foi implementado.

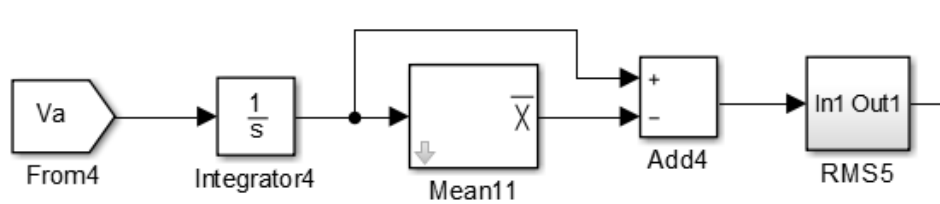
Figura 24 - Diagrama do cálculo do valor eficaz.



Fonte: O autor via Matlab Simulink.

O valor eficaz da integral imparcial da tensão foi implementado conforme figura 25:

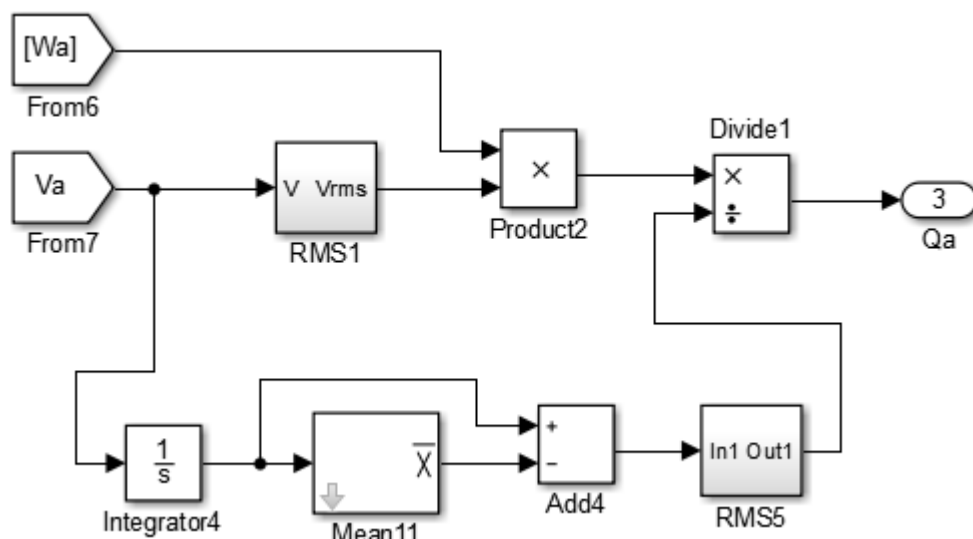
Figura 25 - Diagrama do cálculo do valor eficaz da integral imparcial da tensão.



Fonte: O autor via Matlab/Simulink.

O bloco RMS5 contém o diagrama da figura 24. Desta forma, a potência reativa foi implementada conforme o diagrama da figura 26.

Figura 26 - Diagrama do cálculo da potência reativa.

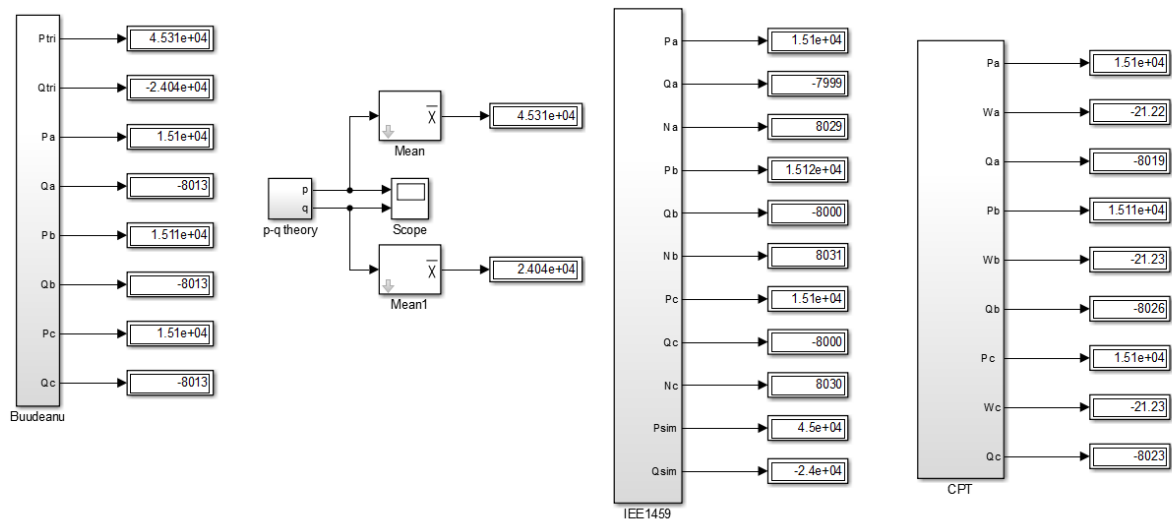


Fonte: O autor via Matlab/Simulink.

3.3 RESULTADOS

Para validar as teorias, o sistema foi simulado com uma carga de 15000W e -8000VAr. Espera-se que os resultados de potência ativa e reativa sejam os mesmos nas teorias, com exceção da teoria p-q, onde a potência imaginária (q) possui um significado físico distinto. A figura 27 e a tabela 6 mostram os resultados obtidos da simulação do circuito teste.

Figura 27 - Resultados da simulação do circuito de teste.



Fonte: O autor via Matlab/Simulink.

Tabela 6 - Resultados da simulação do circuito de teste.

RESULTADOS				
	Budeanu	p-q	IEEE 1459	CPT
P fase A (W)	15100		15100	15100
Q fase A (VAr)	-8013		-7999	-8019
P fase B (W)	15110		15120	15110
Q fase B (VAr)	-8013		-8000	-8026
P fase C (W)	15100		15100	15100
Q fase C (VAr)	-8013		-8000	-8023
P trifásica (W)	45310	45310	45000	
Q trifásica (VAr)	-24040	24040 *	-24000	

* indica que a potência imaginária q possui um significado diferente da potência trifásica Q.

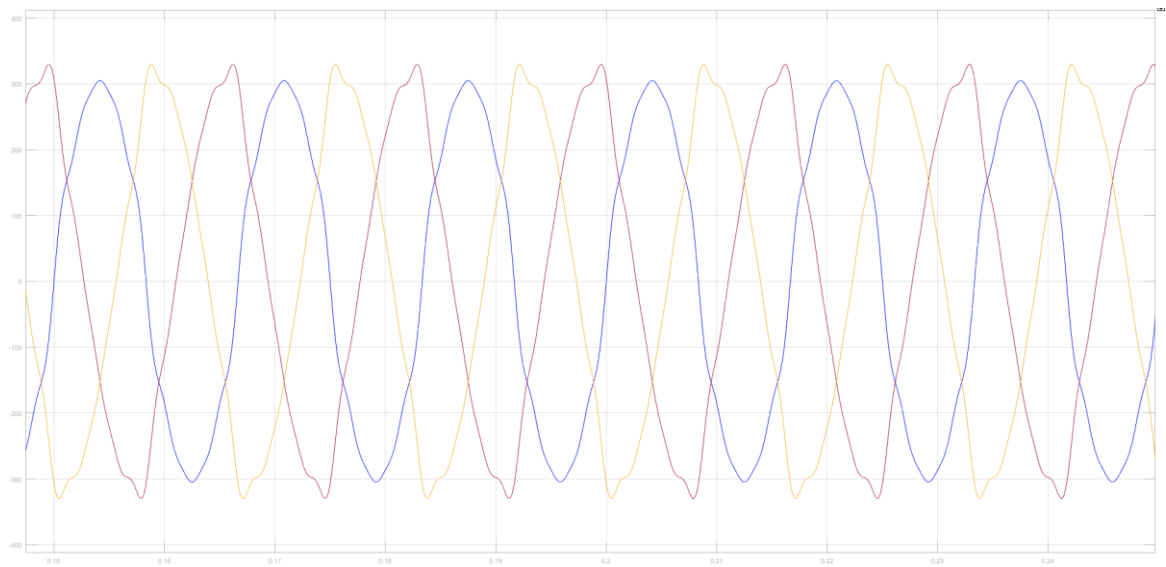
3.3.1 Caso 1

O caso 1 possui fonte de alimentação com THD_v de 7,346%, este valor foi obtido com a configuração de tensão da tabela 7, apresentando as formas de onda de tensão trifásica da figura 28. A figura 29 mostra as formas de onda das correntes trifásicas drenadas.

Tabela 7 - Harmônicas da tensão de alimentação do caso 1.

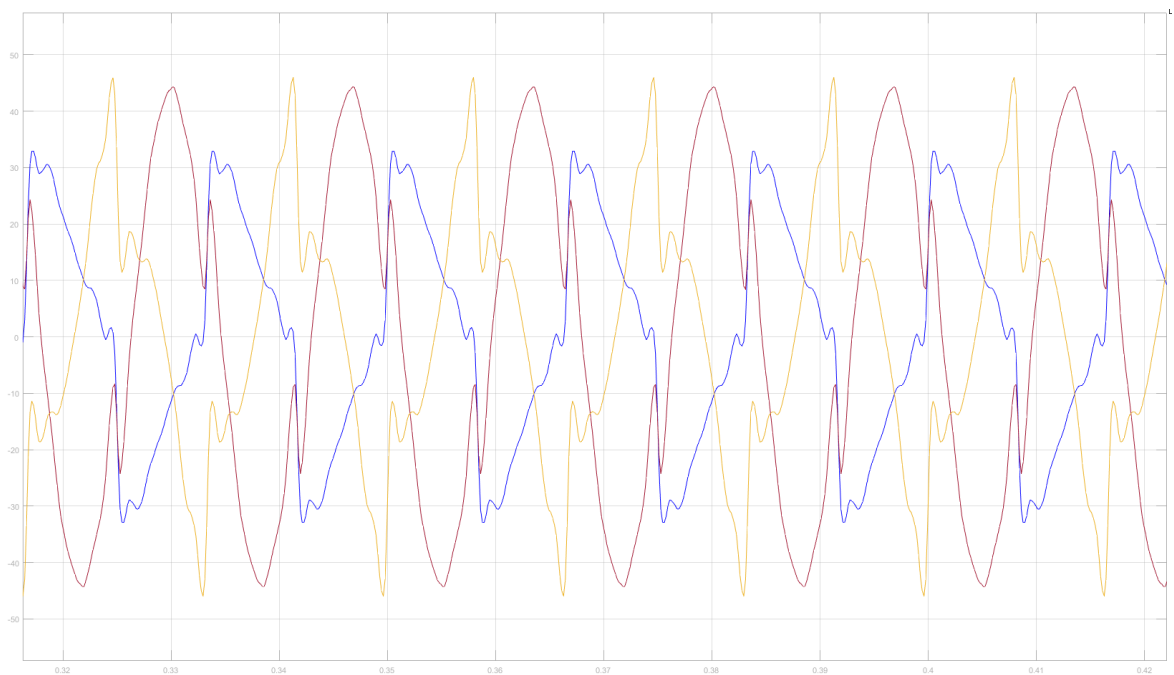
Tensão (V)	Ordem Harmônica
220	60 hz
5%	3*60 hz
4%	5*60 hz
3%	7*60 hz
2%	9*60 hz

Figura 28 - Formas de onda das tensões do caso 1.



Fonte: O autor via Matlab/Simulink.

Figura 29 - Formas de onda das correntes drenadas pela carga.



Fonte: O autor via Matlab/Simulink.

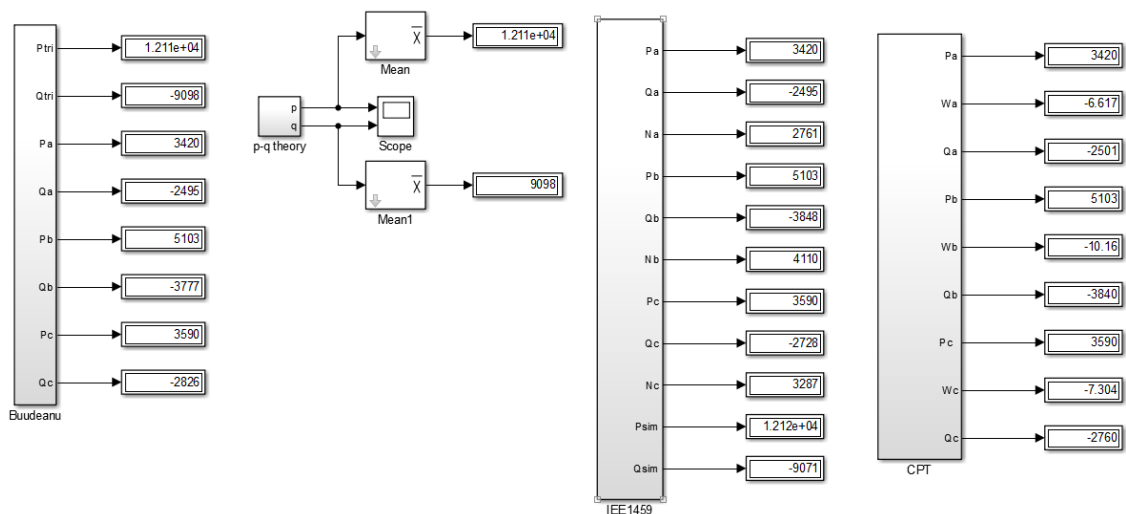
As taxas de distorções harmônicas totais (THDi) das formas de ondas da figura 29 são conforme tabela 8.

Tabela 8 - Taxa de distorção harmônica total das correntes.

Fase	THDi
A	33,37%
B	18,59%
C	36,89%

A figura 30 e a tabela 9 mostram os resultados da simulação do caso 1.

Figura 30 - Resultados das simulações para o caso 1.



Fonte: O autor via Matlab/Simulink.

Tabela 9 - Resultados das simulações do caso 1.

RESULTADOS CASO 1				
	Budeanu	p-q	IEEE 1459	CPT
P fase A (W)	3420		3420	3420
Q fase A (VAr)	-2495		-2495	-2501
P fase B (W)	5103		5103	5103
Q fase B (VAr)	-3777		-3848	-3840
P fase C (W)	3590		3590	3590
Q fase C (VAr)	-2826		-2728	-2760
P trifásica (W)	12110	121100	12120	
Q trifásica (VAr)	-9098	9098*	-9071	
P Não-Ativa fase A			2761	
P Não-Ativa fase B			4110	
P Não-Ativa fase C			3287	
Energia Reativa fase A				-6,617
Energia Reativa fase B				-10,16
Energia Reativa fase C				-7,304

3.3.2 Caso 2

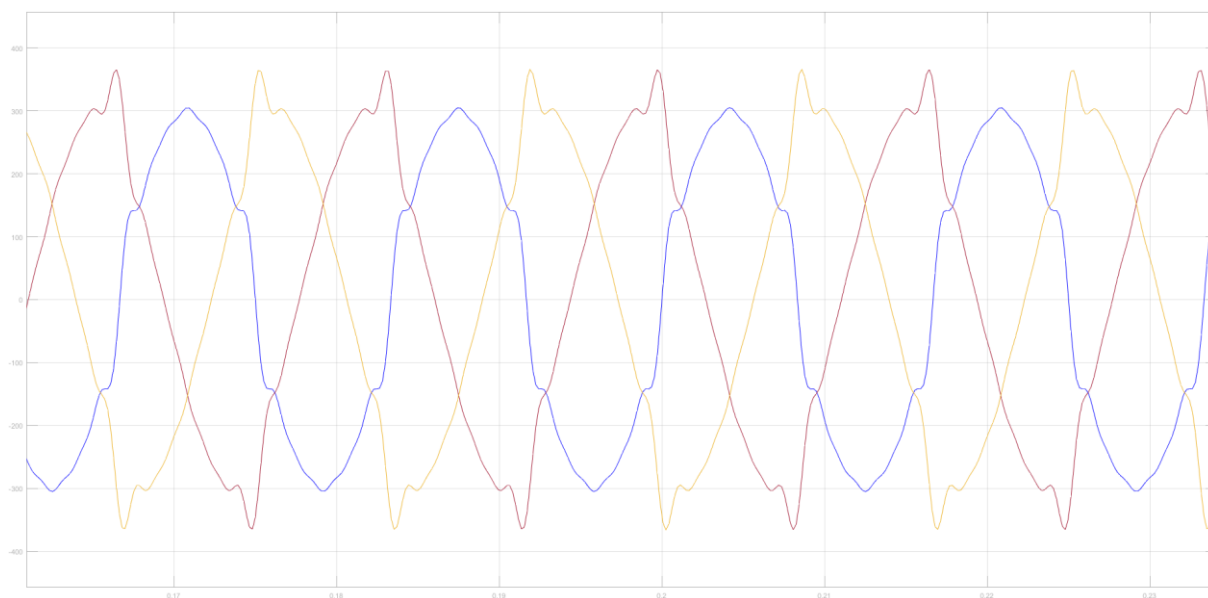
No caso 2, a fonte de alimentação possui um THDv de 12,2%, este valor foi obtido com a configuração de tensão da tabela 10.

Tabela 10 - Harmônicas da tensão de alimentação do caso 1.

Tensão (V)	Ordem Harmônica
220	60 hz
7%	3*60 hz
6%	5*60 hz
5%	7*60 hz
5%	9*60 hz
3%	11*60 hz
2%	13*60 hz

A fonte de alimentação possui as formas de ondas da figura 31, e as cargas drenam as mesmas correntes da figura 29.

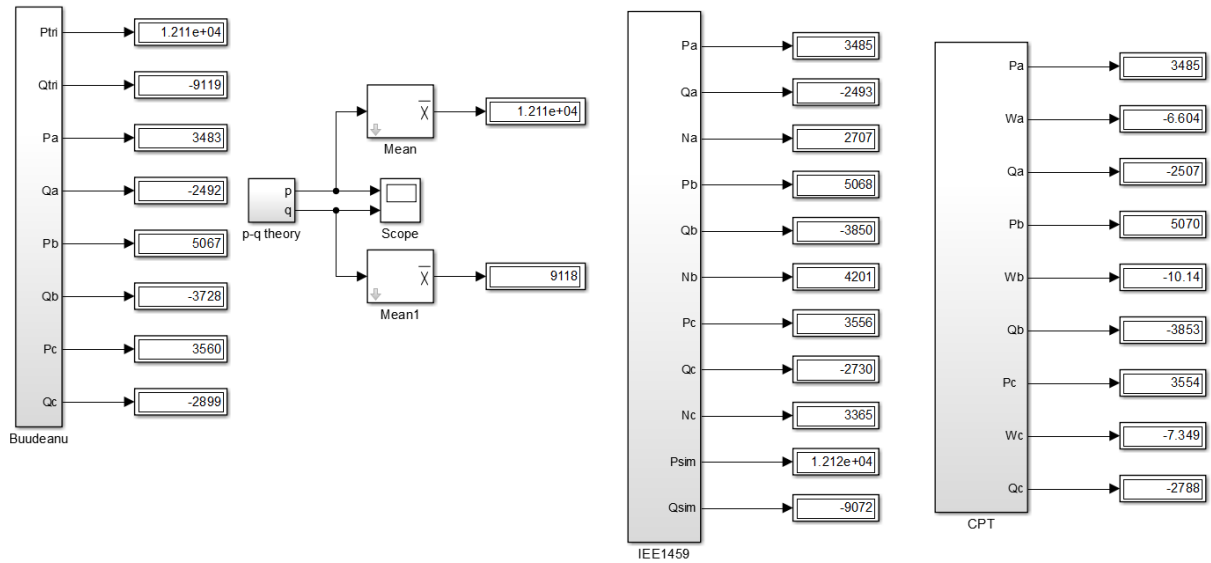
Figura 31 - Formas de onda da tensão de alimentação do caso 2.



Fonte: O autor via Matlab/Simulink.

A figura 32 e a tabela 10 possuem os resultados das simulações para o caso 2.

Figura 32 - Resultado das simulações para o caso 2.



Fonte: O autor via Matlab/Simulink.

Tabela 11 - Resultados das simulações para o caso 2.

RESULTADOS CASO 2				
	Budeanu	p-q	IEEE 1459	CPT
P fase A (W)	3483		3485	3485
Q fase A (VAr)	-2492		-2493	-2507
P fase B (W)	5067		5068	5070
Q fase B (VAr)	-3728		-3850	-3853
P fase C (W)	3560		3556	3554
Q fase C (VAr)	2899		-2730	-2788
P trifásica (W)	12110	12110	12120	
Q trifásica (VAr)	-9119	9118*	-9072	
P Não-Ativa fase A			2707	
P Não-Ativa fase B			4201	
P Não-Ativa fase C			3365	
Energia Reativa fase A				-6,604
Energia Reativa fase B				-10,14
Energia Reativa fase C				-7,349

3.4 DISCUSSÕES

O primeiro fato a se observar é que a mesma carga em situações de alimentação diferente, isto é, em redes com diferentes THDv, apresentam consumos diferentes. Espera-se que em horários

de pico de consumo ou em redes com volumes relevantes de geração distribuída, o THDv desses sistemas seja maior.

O segundo é que a teoria da potência instantânea (teoria p-q) não apresentou resultados satisfatórios, como era esperado. A potência imaginária q não possui um significado físico, apenas matemático. Além disso, apenas potências trifásicas podem ser adquiridas com ela. É uma teoria de grande valia para estudos de compensação e qualidade de energia, por apresentar valores instantâneos de potências, mas a título de medição ela não é adequada.

Outro ponto para se mencionar é que a potência ativa é igual em todas as teorias abordadas. Isto se dá por esta grandeza possuir um claro significado físico, já conhecido e aceito. A potência reativa por sua vez apresenta algumas divergências. As abordagens mais relevantes dessa análise são a da IEEE 1459, por ser amplamente utilizada nos medidores do mundo todo, e a CPT, por ser uma das abordagens mais recentes e que vem ganhando bastante espaço entre os estudiosos. Tendo isso em mente, a maior divergência de potência reativa entre essas duas técnicas aconteceu na fase C do caso 2, neste caso, a divergência foi de 2,13% a mais para a energia reativa calculada pela CPT. Já no caso 1, onde os limites de tensão estavam dentro de recomendações, a maior divergência entre as abordagens foi de 1,17% também na fase C por apresentar a maior THDi.

Em 2019 o Brasil teve um consumo de 215.663.603,85 MWh (Dados ANEEL/2019) de energia ativa nos setores residencial e comercial. O modelo deste trabalho apresenta cargas reais residenciais, que são muito semelhantes às cargas comerciais. Considerando o caso 1, onde as tensões estão dentro dos limites recomendados, a potência reativa total representa 75,13% da potência ativa consumida. Seguindo esta lógica, em 2019 o Brasil teve um consumo de energia reativa de 162.028.065,57 MVarh, um erro de 1% neste cenário representa 1.620.280,65 MVarh de consumo subfaturado de energia reativa.

4 CONCLUSÃO

A proposta do trabalho foi realizar um comparativo, em ambiente de simulação, de teorias de potência elétrica. Foram apresentadas a definição de potência do IEEE 1459, a teoria da potência instantânea, teoria p-q, e a teoria da potência conservativa.

Com os resultados obtidos das simulações, verifica-se que quanto maior as distorções harmônicas de tensão e corrente, maior a diferença dos resultados de cada abordagem teórica. Sendo que o pior caso estudado, a divergência na potência reativa chegou a 2,13% a mais para a potência calculada pela CPT em relação a potência da IEEE 1459.

A busca por uma descrição matemática do efeito de armazenamento de energia e interação entre harmônicas de tensão e corrente continua. As correntes drenadas pelas cargas não lineares não devem ficar muito mais distorcidas do que são hoje, já as harmônicas na tensão precisam de uma atenção especial. Com a difusão de sistemas de geração distribuída, um controle rigoroso sobre a qualidade da energia injetada precisa ser feito, para que aqueles que consomem dessa geração local não sofram com altas distorções harmônicas e acabem sendo faturados por um consumo maior que o que deveriam.

Tão importante quanto a correta mensuração das energias consumidas, é preciso atribuir corretamente a responsabilidade daquele consumo. Foi visto que distorções harmônicas nas tensões de alimentação aumentam o consumo medido tanto quanto as distorções na corrente, sendo que essas duas distorções possuem fontes diferentes.

O maior desafio está em medir com precisão situações reais de distorção de tensões e correntes. A teoria da potência instantânea oferece também através da decomposição das correntes, uma visão geral sobre as responsabilidades dos geradores e consumidores. Este fato justifica a implementação mesmo com a dificuldade não só com os equipamentos de medição, mas também com a teoria em si, que é complexa de se implementar na prática.

Como continuidade do trabalho, propõe-se construir um medidor e implementar tanto a IEEE 1459, quanto a teoria da potência conservativa, e realizar medições principalmente em sistemas onde há geração distribuída.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOBOREIRA, F. L., & Cruz, A. F. D. S. A importância do Smart Grid na rede elétrica de distribuição do Brasil. Seminário Estudantil de Produção Acadêmica, 15, 2016.
- AFONSO, João L., MJ Sepúlveda Freitas, and MARTINS, Júlio S. pq Theory power components calculations. International Symposium on Industrial. IEEE, 2003.
- AKAGI, Hirofumi; WATANABE, Edson Hirokazu; AREDES, Mauricio. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. John Wiley & Sons, 2017.
- CARVALHO, F. G. D. Caracterização do conteúdo harmônico em ambientes residenciais: estudo de caso. 2015
- CZARNECKI, L. S. Budeanu and Fryze: Two frameworks for interpreting power properties of circuits with nonsinusoidal voltages and currents. Electrical Engineering 80.6 (1997): 359-367.
- DE ORO AREAS, L. Medidor inteligente de energia elétrica embarcado em FPGA. UNESP, Ilha Solteira, 2019.
- DOS REIS, PAULO HF, et al. Aplicação da teoria de potência conservativa para atribuição de responsabilidades de circuitos monofásicos em baixa tensão. Congresso Brasileiro de Automática, 2014.
- ERICKSON, Robert W., DRAGAN Maksimovic. Fundamentals of power electronics. Springer Science & Business Media, 2007.
- Fortes, M. Z., Ribeiro, A. T., Gonçalves, D. A. V., Schaefer, M. A. R., & Flores, M. M. Análise da adoção de medidores inteligentes como instrumento da política pública de eficiência energética. Engevista, 19(2), 316-327, 2017.
- IEEE Standards Association. IEEE Standard Definition for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. IEEE Std. 1459–2010, 2010.
- LANGELLA, ROBERTO, and Alfredo Testa. IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions, 2010.
- LISITA, et. al. Efeitos da Distorção Harmônica em Medidores de Energia Elétrica do Tipo Indução. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2012.

NEVES, E. G. C; MÜNCHOW, R. Caderno Didático – Eletrotécnica –Capítulo 06 - Medidas Elétricas. Vol. 1. Universidade Federal de Pelotas (UFPEL).

PAREDES, Helmo KM, Fernando P. Marafão, and Luiz CP Da Silva. A comparative analysis of FBD, PQ and CPT current decompositions—Part I: Three-phase, three-wire systems. Bucharest PowerTech. IEEE, 2009.

PAREDES, Helmo Kelis Morales. Teoria de potência conservativa: uma nova abordagem para o controle cooperativo de condicionadores de energia e considerações sobre atribuição de responsabilidades. UNICAMP, 2011.

SILVA, P. T. P. D. R. C., & Medeiros, T. Utilização de medidores eletrônicos de energia na supervisão e controle do fator de potência. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012.

SUHETT, Marcos Riva. Análise de técnicas de medição de potência reativa em medidores eletrônicos. Rio De Janeiro, 2008.

TENTI, P., & MATTAVELLI, P. A time-domain approach to power term definitions under non-sinusoidal conditions. Sixth international workshop on power definitions and measurements under non-sinusoidal conditions, 2003.

www.nansen.com.br/medidores, acessado em 10 de julho de 2020.