

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**DISCUSSÃO SOBRE MÉTODOS DE MEDIÇÃO
DE POTÊNCIA EM SISTEMAS MONOFÁSICOS E TRIFÁSICOS
COM ÊNFASE EM AMBIENTES NÃO-SENOIDAIIS**

Nériton Tolentino de Souza

Brasília, agosto de 2013

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DISCUSSÃO SOBRE MÉTODOS DE MEDIÇÃO
DE POTÊNCIA EM SISTEMAS MONOFÁSICOS E TRIFÁSICOS
COM ÊNFASE EM AMBIENTES NÃO-SENOIDAIIS

Nériton Tolentino de Souza

*Relatório submetido ao Departamento de Engenharia
Elétrica como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Eletricista*

Banca Examinadora

Prof. Anésio de Leles Ferreira Filho (ENE-UnB)
Orientador

Prof. Jorge Andrés Cormane Angarita (FGA-UnB)
Examinador Interno

Daniel Vieira (SRD-Aneel)
Examinador Externo

RESUMO

Grande parte dos medidores convencionais utilizados na medição de energia elétrica são implementados sem que haja preocupação com a existência de harmônicas nos sinais observados. No entanto, a presença desse distúrbio pode conduzir à medição incorreta dos parâmetros de potência. Além disso, não há ainda no Brasil um consenso quanto à metodologia mais adequada a ser aplicada pelo órgão regulador do setor de energia elétrica (ANEEL) nos casos de medição em ambientes não-senoidais. Caso sejam consideradas as componentes harmônicas no cálculo das potências, é possível que ocorram cobranças indevidas de tarifas pelo excedente de energia reativa. Por outro lado, ao considerar apenas a componente fundamental (60 Hz), pode-se comprometer a utilização eficiente das redes de transmissão e distribuição de energia. Considerando-se os aspectos ora mencionados, surgiu a ideia de desenvolvimento deste trabalho, que objetiva identificar as discrepâncias entre os resultados obtidos da aplicação de alguns dos métodos de medição de potência em ambientes não-senoidais e discutir os possíveis impactos da escolha de um ou outro método quando da elaboração da legislação regulatória na área de sistemas elétricos de potência.

Palavras-chave: Medição de Potência, Harmônicas, Distorção, Fator de Potência, Fator de Deslocamento, Potência Aparente Efetiva.

ABSTRACT

Most of the conventional meters used in electricity metering are built without considering the existence of harmonics in the observed signals. However, the presence of this disturbance might take one to measuring the power parameters improperly. Furthermore, there is no consensus about the most suitable methodology to be applied by the Brazilian electricity regulatory agency (ANEEL) in cases of non-sinusoidal metering. If the harmonic components are considered in the power computation, it is possible that the reactive energy excess be charged unduly. On the other hand, to consider only the fundamental component (60 Hz) may endanger the efficient usage of the distribution and transmission power grids. Keeping the mentioned aspects in mind, this work aims to identify the differences among the obtained results from the application of some power metering methods in non-sinusoidal environments and then discuss the possible impacts arisen from the choice of one or other method when debating the establishment of regulation laws in electrical power systems.

Keywords: Power Metering, Harmonics, Distortion, Power Factor, Displacement Factor, Effective Apparent Power.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	ASPECTOS GERAIS	1
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	2
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	4
2.2	DEFINIÇÕES DE POTÊNCIA EM CONDIÇÕES SENOIDAIS	4
2.2.1	CASO MONOFÁSICO	4
2.2.1.1	POTÊNCIA INSTANTÂNEA, POTÊNCIA ATIVA E POTÊNCIA REATIVA	4
2.2.1.2	POTÊNCIA APARENTE E POTÊNCIA COMPLEXA	7
2.2.1.3	FATOR DE POTÊNCIA	7
2.2.2	CASO TRIFÁSICO EQUILIBRADO	7
2.2.2.1	POTÊNCIA INSTANTÂNEA TRIFÁSICA	7
2.2.2.2	POTÊNCIA ATIVA TRIFÁSICA	9
2.2.2.3	POTÊNCIA APARENTE TRIFÁSICA E POTÊNCIA COMPLEXA TRIFÁSICA	9
2.2.2.4	POTÊNCIA REATIVA TRIFÁSICA	10
2.2.2.5	FATOR DE POTÊNCIA TRIFÁSICO	10
2.2.3	CASO TRIFÁSICO Desequilibrado	11
2.2.3.1	POTÊNCIA INSTANTÂNEA TRIFÁSICA	12
2.2.3.2	POTÊNCIA ATIVA TRIFÁSICA	13
2.2.3.3	POTÊNCIA REATIVA TRIFÁSICA	13
2.2.3.4	POTÊNCIA APARENTE ARITMÉTICA	14
2.2.3.5	POTÊNCIA APARENTE VETORIAL	14
2.2.3.6	FATOR DE POTÊNCIA ARITMÉTICO E FATOR DE POTÊNCIA VETORIAL	15
2.2.3.7	POTÊNCIA APARENTE EFETIVA	15
2.2.3.8	FATOR DE POTÊNCIA EFETIVO	21
2.3	DEFINIÇÕES DE POTÊNCIA EM CONDIÇÕES NÃO-SENOIDAIS	22
2.3.1	CASO MONOFÁSICO	22
2.3.1.1	MODELO DE BUDEANU	22
2.3.1.2	MODELO DE FRYZE	25
2.3.1.3	NORMA IEEE 1459-2010	26
2.3.2	CASO TRIFÁSICO	29

2.3.2.1	POTÊNCIA APARENTE VETORIAL TRIFÁSICA	29
2.3.2.2	CORRENTE EFETIVA E TENSÃO EFETIVA.....	31
2.3.2.3	DISTORÇÃO HARMÔNICA EQUIVALENTE TOTAL.....	33
2.3.2.4	POTÊNCIA APARENTE EFETIVA	34
2.3.2.5	POTÊNCIA ATIVA	34
2.3.2.6	FATOR DE POTÊNCIA EFETIVO.....	35
2.3.2.7	POTÊNCIA NÃO-ATIVA.....	35
2.3.2.8	POTÊNCIA EM COMPONENTES SIMÉTRICAS	35
2.4	DEFINIÇÕES DE POTÊNCIA NO BRASIL.....	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	38
3.2	SIMULAÇÃO 1 - CASO MONOFÁSICO NÃO-SENOIDAL	38
3.3	SIMULAÇÃO 2 - CASO TRIFÁSICO NÃO-SENOIDAL EQUILIBRADO.....	45
4	RESULTADOS E ANÁLISE	53
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	53
4.2	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO 1	53
4.2.1	PARTE 1	53
4.2.2	PARTE 2	55
4.3	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO 2	60
4.3.1	PARTE 1	60
4.3.2	PARTE 2	63
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	67
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
	APÊNDICES	72

LISTA DE FIGURAS

2.1	Sinais de tensão $v(t)$ e corrente $i(t)$ genéricos com respectivas potências ativa P , reativa Q e instantânea $p(t)$.	6
2.2	Circuito Trifásico a Quatro Fios.	8
2.3	Circuito Monofásico Equivalente.	10
2.4	Circuito Trifásico a Três Fios.	12
2.5	Circuito Desequilibrado.	16
2.6	Circuito Desequilibrado Com o Compensador.	16
2.7	Circuito Compensado.	17
2.8	Circuito Compensado Perfeitamente Simétrico.	18
2.9	Circuito Real em Delta Com Desequilíbrio de Tensão.	19
2.10	Circuito Real em Estrela Com Desequilíbrio de Tensão.	19
2.11	Circuito Equivalente do Circuito em Delta Sem Desequilíbrio de Tensão.	20
2.12	Circuito Equivalente do Circuito em Estrela Sem Desequilíbrio de Tensão.	20
2.13	Circuito Desequilibrado com Sinais Não-Senoidais.	31
2.14	Circuito Equilibrado Hipotético com Correntes Perfeitamente Senoidais.	31
3.1	Sinais de Tensão Utilizados para o Caso 1.	40
3.2	Sinais de Tensão Utilizados para o Caso 2.	41
3.3	Sinais de Tensão Utilizados para o Caso 3.	42
3.4	Circuito da Primeira Parte da Simulação 1.	43
3.5	Circuito Utilizado na Simulação 2.	47
3.6	Sinais de Tensão Utilizados para o Caso 1.	48
3.7	Sinais de Tensão Utilizados para o Caso 2.	49
3.8	Sinais de Tensão Utilizados para o Caso 3.	50
4.1	Comportamento da Potência Reativa (Q_1 , Q_B e Q_F) frente a Variação da DHT_V .	56
4.2	Comportamento dos Fatores de Potência (FP_B , FP_F , FP e FP_1) e dos Fatores de Deslocamento (Fd_1 e Fd_2) frente a Variação da THD_V de 0 a 30%.	59
4.3	Comportamento das Potências Reativas (Q_1^+ , $Q_B^{3\phi}$) e da Potência Não-Ativa (N) frente a Variação da THD_{eV} de 0 a 30%.	63
4.4	Comportamento dos Fatores de Potência ($FP_V^{3\phi}$, FP_e e FP_1^+) frente a Variação da THD_{eV} de 0 a 30%.	66

LISTA DE TABELAS

2.1	Quantidades e Indicadores Relacionados a Potência para Condições Puramente Senoidais em Sistemas Monofásicos e Trifásicos.....	22
2.2	Potências do Modelo de Budeanu.....	24
2.3	Quantidades Relacionadas a Potência Definidas pela Norma IEEE 1459-2010 para Sistemas Monofásicos.....	29
2.4	Quantidades Relacionadas a Potência Definidas pela Norma IEEE 1459-2010 para Sistemas Trifásicos em Condições Não-Senoidais.....	36
3.1	Casos de Distorção Harmônica para a Simulação 1.....	39
3.2	Parâmetros do Modelo de Budeanu.....	43
3.3	Parâmetros do Modelo de Fryze.....	44
3.4	Parâmetros do Modelo da Norma IEEE 1459-2010.....	44
3.5	Distorção Harmônica para a Simulação 2 - Caso 1.....	45
3.6	Distorção Harmônica para a Simulação 2 - Caso 2.....	46
3.7	Distorção Harmônica para a Simulação 2 - Caso 3.....	46
3.8	Parâmetros do Circuito da Primeira Parte da Simulação 2.....	47
3.9	Potências Ativas - Simulação 2.....	51
3.10	Potências Não-Ativas - Simulação 2.....	51
3.11	Potências Aparentes - Simulação 2.....	52
3.12	Fatores de Potência - Simulação 2.....	52
4.1	Resultados da Primeira Parte da Simulação 1.....	54
4.2	Discrepância Percentual entre as Potências Reativas e a Potência Não-Ativa - Caso 1.....	57
4.3	Discrepância Percentual entre as Potências Reativas e a Potência Não-Ativa - Caso 2.....	57
4.4	Discrepância Percentual entre as Potências Reativas e a Potência Não-Ativa - Caso 3.....	58
4.5	Limites de Erro Percentual para Medidores de Energia Reativa (Medidores Monofásicos e Polifásicos com Cargas Equilibradas).....	58
4.6	Resultados da Primeira Parte da Simulação 1.....	61
4.7	Diferença Percentual dos Indicadores Não-Constantes entre os Valores Obtidos com Sinais Compostos de 5% e 30% de THD_{eV}	62
4.8	Discrepância Percentual entre as Potências Reativas e a Potência Não-Ativa - Caso 1.....	64
4.9	Discrepância Percentual entre as Potências Reativas e a Potência Não-Ativa - Caso 2.....	64
4.10	Discrepância Percentual entre as Potências Reativas e a Potência Não-Ativa - Caso 3.....	65

LISTA DE SÍMBOLOS

Sistemas Monofásicos Senoidais

A	Ampere (unidade de corrente no SI).
e	Algarismo neperiano.
FP	Fator de Potência.
j	Operador matemático de representação de números complexos.
$i(t)$	Sinal de corrente monofásico variante no tempo.
I	Valor eficaz do sinal de corrente.
\bar{I}	Fasor de corrente.
$p(t)$	Potência instantânea monofásica.
P	Potência ativa.
Q	Potência reativa.
rad	Radiano (unidade de ângulo plano no SI).
s	Segundo (unidade de tempo no SI).
S	Potência aparente.
\bar{S}	Potência complexa.
t	Grandeza tempo.
$v(t)$	Sinal de tensão monofásico variante no tempo.
V	Valor eficaz do sinal de tensão.
V	Volt (unidade de tensão no SI).
\bar{V}	Fasor de tensão.
var	Volt-ampere reativo (unidade de potência reativa).
VA	Volt-ampere (unidade de potência aparente).
W	Watt (unidade de potência no SI).
θ_I	Ângulo de corrente.
θ_V	Ângulo de tensão.
ϕ	Ângulo de defasagem entre os sinais de tensão e corrente.
ω	Frequência angular.

Sistemas Trifásicos Senoidais Equilibrados

$FP_{3\phi}$	Fator de potência trifásico.
I	Valor eficaz da corrente de linha.
$i_a(t)$	Corrente de linha variante no tempo da fase a .
$i_b(t)$	Corrente de linha variante no tempo da fase b .
$i_c(t)$	Corrente de linha variante no tempo da fase c .
$I_n(t)$	Corrente no condutor neutro de um sistema trifásico a quatro fios.
$v_a(t)$	Tensão de fase variante no tempo da fase a .
$v_b(t)$	Tensão de fase variante no tempo da fase b .
$v_c(t)$	Tensão de fase variante no tempo da fase c .
V	Valor eficaz da tensão de fase.
$p_{3\phi}$	Potência ativa instantânea trifásica.
$p_a(t)$	Potência instantânea trifásica da fase a .
$p_b(t)$	Potência instantânea trifásica da fase b .
$p_c(t)$	Potência instantânea trifásica da fase c .
$P_{3\phi}$	Potência ativa trifásica.
$Q_{3\phi}$	Potência reativa trifásica.
$S_{3\phi}$	Potência aparente trifásica.
$\overline{S_{3\phi}}$	Potência complexa trifásica.
ϕ	Ângulo de defasagem entre os sinais de tensão e corrente.

Sistemas Trifásicos Senoidais Desequilibrados

FP_A	Fator de potência aritmético.
FP_V	Fator de potência vetorial.
FP_V^{012}	Fator de potência vetorial em componentes simétricas.
FP_{e1}	Fator de potência efetivo calculado conforme a Norma IEEE 1459-2010.
FP_{e2}	Fator de potência efetivo calculado conforme o método FBD.
$i_a(t)$	Corrente de linha variante no tempo da fase a .
$i_b(t)$	Corrente de linha variante no tempo da fase b .
$i_c(t)$	Corrente de linha variante no tempo da fase c .
I_a	Valor eficaz da corrente de linha da fase a .
I_b	Valor eficaz da corrente de linha da fase b .
I_c	Valor eficaz da corrente de linha da fase c .
I_{ao}	Corrente de linha da fase a do sistema compensado.
I_{bo}	Corrente de linha da fase b do sistema compensado.
I_{co}	Corrente de linha da fase c do sistema compensado.
I_{no}	Corrente no condutor neutro do sistema compensado.
I_Σ	Corrente coletiva do método FBD.
I_e	Corrente efetiva.
I^+	Corrente de sequência positiva.
I^-	Corrente de sequência negativa.
I^0	Corrente de sequência zero.
I_e^{012}	Corrente efetiva em componentes simétricas.
$v_a(t)$	Tensão de fase variante no tempo da fase a .
$v_b(t)$	Tensão de fase variante no tempo da fase b .
$v_c(t)$	Tensão de fase variante no tempo da fase c .
v_{ab}	Tensão de linha ab .
v_{bc}	Tensão de linha bc .
v_{ca}	Tensão de linha ca .
V_a	Valor eficaz da tensão de fase da fase a .
V_b	Valor eficaz da tensão de fase da fase b .
V_c	Valor eficaz da tensão de fase da fase c .
V_{ab}	Valor eficaz da tensão de linha entre as fases a e b .
V_{bc}	Valor eficaz da tensão de linha entre as fases b e c .
V_{ca}	Valor eficaz da tensão de linha entre as fases c e a .
V_{ao}	Tensão entre a fase a e o ponto neutro do sistema compensado.
V_{bo}	Tensão entre a fase b e o ponto neutro do sistema compensado.
V_{co}	Tensão entre a fase c e o ponto neutro do sistema compensado.
V_{no}	Tensão entre o condutor neutro e o ponto neutro do sistema compensado.
V_Σ	Tensão coletiva do método FBD.
V_e'	Tensão efetiva do método FBD.
V_e	Tensão efetiva do método da Norma IEEE 1459-2010.
V_e^{012}	Tensão efetiva em componentes simétricas.

V^+	Tensão de sequência positiva.
V^-	Tensão de sequência negativa.
V^0	Tensão de sequência zero.
$p_{abc}(t)$	Potência instantânea trifásica.
P_a	Potência ativa da fase a .
P_b	Potência ativa da fase b .
P_c	Potência ativa da fase c .
P_{abc}	Potência ativa trifásica.
P^0	Potência ativa de sequência zero.
P^+	Potência ativa de sequência positiva.
P^-	Potência ativa de sequência negativa.
P_{012}	Potência ativa trifásica em componentes simétricas.
P_Y	Potência ativa do circuito equilibrado conectado em estrela.
P_Δ	Potência ativa do circuito equilibrado conectado em delta.
P_e	Potência ativa trifásica equivalente.
Q_a	Potência reativa da fase a .
Q_b	Potência reativa da fase b .
Q_c	Potência reativa da fase c .
Q_{abc}	Potência reativa trifásica.
Q^0	Potência reativa de sequência zero.
Q^+	Potência reativa de sequência positiva.
Q^-	Potência reativa de sequência negativa.
Q_{012}	Potência reativa trifásica em componentes simétricas.
R_Σ	Resistência equivalente por fase do circuito compensado.
R_n	Resistência do condutor neutro.
R_s	Resistência dos condutores de linha.
R_Y	Resistência por fase do circuito equilibrado conectado em estrela.
R_Δ	Resistência por fase do circuito equilibrado conectado em delta.
S_a	Potência aparente da fase a .
S_b	Potência aparente da fase b .
S_c	Potência aparente da fase c .
S_A	Potência aparente aritmética.
S_V	Potência aparente vetorial.
S^0	Potência aparente de sequência zero.
S^0	Potência aparente de sequência positiva.
S^0	Potência aparente de sequência negativa.
S_V^{012}	Potência aparente vetorial em componentes simétricas.
S_e	Potência aparente efetiva calculado conforme a Norma IEEE 1459-2010.
S_Σ	Potência aparente efetiva calculada conforme o método FBD.
ξ	Relação entre a resistência do R_Y e R_Δ .
α_a	Ângulo da fase a do sinal de tensão.
α_b	Ângulo da fase b do sinal de tensão.
α_c	Ângulo da fase c do sinal de tensão.

β_a	Ângulo da fase a do sinal de tensão.
β_b	Ângulo da fase b do sinal de tensão.
β_c	Ângulo da fase c do sinal de tensão.
θ_a	Defasagem entre os ângulos de tensão e corrente da fase a .
θ_b	Defasagem entre os ângulos de tensão e corrente da fase b .
θ_c	Defasagem entre os ângulos de tensão e corrente da fase c .

Sistemas Monofásicos Não-Senoidais

A_h	Parâmetro da identidade de Lagrange.
A_m	Parâmetro da identidade de Lagrange.
A_n	Parâmetro da identidade de Lagrange.
B_h	Parâmetro da identidade de Lagrange.
B_m	Parâmetro da identidade de Lagrange.
B_n	Parâmetro da identidade de Lagrange.
D_B	Potência de distorção.
D_I	Potência de distorção de corrente.
D_V	Potência de distorção de tensão.
D_H	Potência de distorção harmônica.
Fd_1	Fator de deslocamento definido por Budeanu.
Fd_2	Fator de deslocamento definido por [1].
FP_B	Fator de potência de Budeanu.
FP_F	Fator de potência de Fryze.
FP	Fator de potência.
FP_1	Fator de potência fundamental.
h	Ordem harmônica.
i_1	Sinal de corrente variante no tempo na componente fundamental.
$i(t)$	Sinal de corrente monofásico variante no tempo.
i	Sinal de corrente variante no tempo.
I	Valor eficaz equivalente do sinal de corrente.
I_0	Corrente DC.
I_1	Valor eficaz da componente fundamental do sinal de corrente.
I_h	Valor eficaz da corrente da h-ésima componente harmônica do sinal.
i_H	Sinal de corrente variante no tempo na H-ésima componente harmônica.
I_m	Valor eficaz da corrente da m-ésima componente harmônica do sinal.
I_n	Valor eficaz da corrente da n-ésima componente harmônica do sinal.
N	Potência não-ativa.
$p(t)$	Potência instantânea monofásica.
P_1	Potência ativa fundamental.
P_B	Potência ativa de Budeanu.
P_F	Potência ativa de Fryze.
P_H	Potência ativa harmônica.
Q_1	Potência ativa fundamental.
Q_B	Potência reativa de Budeanu.
Q_F	Potência reativa de Fryze.
S_1	Potência aparente fundamental.
S	Potência aparente.
S_N	Potência aparente não-fundamental.
$\overline{S_{PQ}}$	Nova potência complexa.
S_H	Potência aparente harmônica.

t	Grandeza tempo.
THD_I	Distorção harmônica total de corrente.
THD_V	Distorção harmônica total de tensão.
v_1	Sinal de tensão variante no tempo na componente fundamental.
$v(t)$	Sinal de tensão monofásico variante no tempo.
v	Sinal de tensão variante no tempo.
V	Valor eficaz equivalente do sinal de tensão.
V_0	Tensão DC.
V_1	Valor eficaz da componente fundamental do sinal de tensão.
V_h	Valor eficaz da tensão da h-ésima componente harmônica do sinal.
v_H	Sinal de tensão variante no tempo na H-ésima componente harmônica.
V_m	Valor eficaz da tensão da m-ésima componente harmônica do sinal.
V_n	Valor eficaz da tensão da n-ésima componente harmônica do sinal.
α_1	Fase do sinal de tensão na componente fundamental.
α_h	Fase do sinal de tensão na h-ésima componente harmônica.
β_1	Fase do sinal de corrente na componente fundamental.
β_h	Fase do sinal de corrente na h-ésima componente harmônica.
θ_h	Ângulo de defasagem entre os sinais de tensão e corrente da h-ésima componente harmônica do sinal.
θ_m	Ângulo de defasagem entre os sinais de tensão e corrente da m-ésima componente harmônica do sinal.
θ_n	Ângulo de defasagem entre os sinais de tensão e corrente da n-ésima componente harmônica do sinal.
ω	Frequência angular.

Sistemas Trifásicos Não-Senoidais

$D_B^{3\phi}$	Potência de distorção trifásica.
D_A	Potência de distorção da fase a .
D_B	Potência de distorção da fase b .
D_C	Potência de distorção da fase c .
D_{eI}	Potência de distorção de corrente.
D_{eV}	Potência de distorção de tensão.
D_{eH}	Potência de distorção de harmônica.
$FP_V^{3\phi}$	Fator de potência vetorial trifásico.
FP_e	Fator de potência efetivo.
FP_1^+	Fator de potência fundamental de sequência positiva.
I_1^+	Corrente fundamental de sequência positiva.
I_h^A	Valor eficaz da corrente da h-ésima componente harmônica da fase a .
V_h^A	Valor eficaz da tensão da h-ésima componente harmônica da fase a .
I_h^B	Valor eficaz da corrente da h-ésima componente harmônica da fase b .
V_h^B	Valor eficaz da tensão da h-ésima componente harmônica da fase b .
I_h^C	Valor eficaz da corrente da h-ésima componente harmônica da fase c .
I_m^A	Valor eficaz da corrente da m-ésima componente harmônica da fase a .
I_n^A	Valor eficaz da corrente da n-ésima componente harmônica da fase a .
I_m^B	Valor eficaz da corrente da m-ésima componente harmônica da fase b .
I_n^B	Valor eficaz da corrente da n-ésima componente harmônica da fase b .
I_m^C	Valor eficaz da corrente da m-ésima componente harmônica da fase c .
I_n^C	Valor eficaz da corrente da n-ésima componente harmônica da fase c .
I_{ah}	Valor eficaz da h-ésima componente harmônica da corrente de linha da fase a .
I_{bh}	Valor eficaz da h-ésima componente harmônica da corrente de linha da fase b .
I_{ch}	Valor eficaz da h-ésima componente harmônica da corrente de linha da fase c .
I_{nh}	Valor eficaz da h-ésima componente harmônica da corrente de linha no condutor neutro.
I_e	Corrente efetiva.
I_{e1}	Corrente efetiva fundamental.
I_{eH}	Corrente efetiva harmônica.
I_{a1}	Valor eficaz na componente fundamental da corrente de linha da fase a .
I_{b1}	Valor eficaz na componente fundamental da corrente de linha da fase b .
I_{c1}	Valor eficaz na componente fundamental da corrente de linha da fase c .
I_{n1}	Valor eficaz na componente fundamental da corrente de linha do condutor neutro.
I_{aH}	Valor eficaz da H-ésima componente harmônica da corrente de linha da fase a .
I_{bH}	Valor eficaz da H-ésima componente harmônica da corrente de linha da fase b .
I_{cH}	Valor eficaz da H-ésima componente harmônica da corrente de linha da fase c .
I_{nH}	Valor eficaz da H-ésima componente harmônica da corrente de linha no condutor neutro.
K_{sh}	Coeficiente combinado dos efeitos pelicular e de proximidade da h-ésima ordem harmônica dos condutores de linha.
K_{snh}	Coeficiente combinado dos efeitos pelicular e de proximidade da h-ésima ordem harmônica do condutor neutro.

K_{sn1}	Coeficiente combinado dos efeitos pelicular e de proximidade na frequência fundamental do condutor neutro.
K_h	Relação entre os coeficientes K_{sh} e K_{s1} .
N	Potência não-ativa.
$P^{3\phi}$	Potência ativa trifásica.
P_A	Potência ativa da fase a .
P_B	Potência ativa da fase b .
P_C	Potência ativa da fase c .
P_Y	Potência ativa do circuito equilibrado conectado em estrela.
P_{Δ}	Potência ativa do circuito equilibrado conectado em delta.
P_{eH}	Potência ativa efetiva harmônica.
P	Potência ativa.
P_1^+	Potência ativa fundamental de sequência positiva.
$Q_B^{3\phi}$	Potência reativa trifásica.
Q_A	Potência reativa da fase a .
Q_B	Potência reativa da fase b .
Q_C	Potência reativa da fase c .
Q_1^+	Potência reativa fundamental de sequência positiva.
r_e	Resistência Equivalente do circuito hipotético.
r_{dc}	Resistência DC dos condutores de linha.
r_{ndc}	Resistência DC do condutor neutro.
R_Y	Resistência por fase do circuito equilibrado conectado em estrela.
R_{Δ}	Resistência por fase do circuito equilibrado conectado em delta.
S_e	Potência aparente efetiva.
S_{e1}	Potência aparente efetiva fundamental.
S_1^+	Potência aparente fundamental de sequência positiva.
S_{eN}	Potência aparente efetiva não-fundamental.
$S_V^{3\phi}$	Potência aparente vetorial trifásica.
S_{eH}	Potência aparente harmônica.
THD_{eV}	Distorção harmônica equivalente total de tensão.
THD_{eI}	Distorção harmônica equivalente total de corrente.
V_h^C	Valor eficaz da tensão da h-ésima componente harmônica da fase c .
V_m^A	Valor eficaz da tensão da m-ésima componente harmônica da fase a .
V_n^A	Valor eficaz da tensão da n-ésima componente harmônica da fase a .
V_m^B	Valor eficaz da tensão da m-ésima componente harmônica da fase b .
V_n^B	Valor eficaz da tensão da n-ésima componente harmônica da fase b .
V_m^C	Valor eficaz da tensão da m-ésima componente harmônica da fase c .
V_n^C	Valor eficaz da tensão da n-ésima componente harmônica da fase c .
V_{ah}	Valor eficaz da h-ésima componente harmônica da tensão de fase da fase a .
V_{bh}	Valor eficaz da h-ésima componente harmônica da tensão de fase da fase b .
V_{ch}	Valor eficaz da h-ésima componente harmônica da tensão de fase da fase c .
V_{abh}	Valor eficaz da h-ésima componente harmônica da tensão de linha entre as fases a e b .

V_{bch}	Valor eficaz da h-ésima componente harmônica da tensão de linha entre as fases b e c .
V_{cah}	Valor eficaz da h-ésima componente harmônica da tensão de linha entre as fases c e a .
V_{a1}	Valor eficaz da componente fundamental da tensão de fase da fase a .
V_{b1}	Valor eficaz da componente fundamental da tensão de fase da fase b .
V_{c1}	Valor eficaz da componente fundamental da tensão de fase da fase c .
V_{ab1}	Valor eficaz da componente fundamental da tensão de linha entre as fases a e b .
V_{bc1}	Valor eficaz da componente fundamental da tensão de linha entre as fases b e c .
V_{ca1}	Valor eficaz da componente fundamental da tensão de linha entre as fases c e a .
V_e	Tensão efetiva.
V_{e1}	Tensão efetiva fundamental.
V_{eH}	Tensão efetiva harmônica.
V_e	Tensão efetiva.
V_1^+	Tensão fundamental de sequência positiva.
θ_1^+	Ângulo de defasagem entre a tensão fundamental de sequência positiva e a corrente fundamental de sequência positiva.
θ_h^A	Ângulo de defasagem entre os sinais de tensão e corrente da h-ésima componente harmônica da fase a .
θ_h^B	Ângulo de defasagem entre os sinais de tensão e corrente da h-ésima componente harmônica da fase b .
θ_h^C	Ângulo de defasagem entre os sinais de tensão e corrente da h-ésima componente harmônica da fase c .
ξ	Relação entre a resistência do R_Y e R_Δ .
ρ_1	Relação entre a resistência do condutor neutro com a resistência dos condutores de linha na frequência fundamental.
ρ_h	Relação entre a resistência do condutor neutro com a resistência dos condutores de linha da h-ésima ordem harmônica.

GLOSSÁRIO

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
FBD	Método de Fryze-Buchholz-Depenbrock.
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (do inglês, <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>).
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial.
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica.
rms	Valor eficaz (do inglês, <i>root-mean-square</i>).

Capítulo 1

Introdução

1.1 Aspectos Gerais

Desde que a eletrônica de potência foi introduzida no fim dos anos 60, cargas não lineares que consomem correntes não-senoidais têm crescido de forma significativa. Em alguns casos, essas cargas representam uma parcela relevante do total. Hoje, é comum encontrar residências sem cargas lineares, como lâmpadas incandescentes convencionais [1]. Na verdade, estas foram sendo substituídas gradativamente por lâmpadas fluorescentes controladas eletronicamente. Em aplicações industriais, um motor de indução em estado permanente, que pode ser considerado uma carga linear, é agora equipado com retificadores e inversores, com o propósito de alcançar um controle ajustável de velocidade. Este motor, juntamente com estes dispositivos, não se comporta mais como uma carga linear [1]. A consequência da larga utilização de equipamentos eletrônicos, compostos por cargas não-lineares, é o aumento da presença de poluição harmônica nos sistemas de potência contemporâneos [2].

Na área de sistemas elétricos de potência, para circuitos monofásicos e trifásicos equilibrados, os conceitos de potência ativa, reativa e aparente e de fator de potência estão consolidados. Contudo, com o avanço da aplicação dos dispositivos oriundos da eletrônica de potência, e conseqüentemente com o aumento dos níveis de poluição harmônica, algumas tentativas de se empregar os mencionados conceitos com alguns ajustes, tem-se feito presente. Neste caso, é importante ressaltar que estes procedimentos podem conduzir a erros [3].

Por outro lado, para se otimizar a utilização e operação dos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, caracteriza-se como relevante o controle efetivo do fluxo de potência reativa na rede [4]. Portanto, a correta medição dos parâmetros de potência é absolutamente indispensável, sobretudo no estabelecimento de tarifas que incentivem a utilização eficiente das redes de energia elétrica.

Muitas técnicas utilizadas pelos fabricantes de medidores eletrônicos para obtenção de energia ativa e reativa e fator de potência são projetadas para condições em que os sinais são puramente senoidais. Além disso, no caso de sistemas polifásicos, assume-se o equilíbrio entre as fases para fins de medição. No entanto, nem sempre essas condições são atendidas, o que pode levar à medição

incorreta dos parâmetros de potência [5].

No Brasil, não há ainda consenso quanto à metodologia a ser aplicada nas resoluções da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para a medição de potência em ambientes na presença de harmônicas [4]. Para estes locais, existem dois caminhos que podem ser seguidos: considerar na medição apenas a componente fundamental dos sinais de tensão e corrente, ignorando o fenômeno das harmônicas; ou considerar todas as componentes, ou seja, além da fundamental, considerar também aquelas responsáveis por distorcer a forma de onda dos sinais.

Caso seja escolhido o primeiro caminho, a eficiência na utilização das redes de transmissão e distribuição pode ficar comprometida, pois frações de potência ativa e reativa serão desconsideradas, podendo mascarar a real condição de operação do sistema elétrico. Se, por outro lado escolhe-se o segundo caminho, consumidores que, possivelmente, receberem da rede de fornecimento um sinal com harmônicas, podem ser tarifados pelo baixo fator de potência sem, contudo, terem responsabilidade na geração dos sinais distorcidos.

Portanto, um estudo mais aprofundado sobre os diversos métodos de medição de potência caracteriza-se como o primeiro passo na busca pela escolha de uma definição que represente de forma fiel as condições de operação do sistema sem, contudo, tarifando indevidamente o consumidor.

1.2 Objetivos do Trabalho

O objetivo deste trabalho é identificar as discrepâncias entre os resultados obtidos da aplicação de alguns métodos de medição de potência, hoje disponíveis na literatura atinente, em ambientes não-senoidais. Com base nessas análises, objetiva-se discutir os impactos da escolha de um ou outro método para fins de faturamento da energia elétrica no Brasil.

Para tanto, é gerado um conjunto de sinais que, aplicados sobre diversos métodos de medição de potência ativa, reativa e aparente e fator de potência, permite:

1. Analisar o comportamento das mencionadas grandezas em circuitos monofásicos e trifásicos com sinais de tensão compostos por distorções harmônicas em três níveis distintos (5, 15 e 30%). Em cada nível de distorção harmônica, são exploradas as condições onde há apenas componentes harmônicas de ordens pares, ou de ordens ímpares e a condição em que se tem componentes pares e ímpares, simultaneamente.
2. Identificar para sistemas monofásicos e trifásicos, o comportamento das potências reativas e não-ativa e dos fatores de potência e de deslocamento frente a variação da distorção harmônica de 0 a 30%. Esta operação é efetuada para os três tipos de distorções harmônicas mencionadas no item 1.
3. Estimar as discrepâncias percentuais entre as potências reativas e não-ativa, fazendo uma análise comparativa com os limites de erro das classes de precisão de medidores de energia reativa aprovados pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO).

1.3 Estrutura do Trabalho

A fim de se alcançar os objetivos aduzidos na seção 1.2, este trabalho é composto ainda pelos seguintes capítulos.

O Capítulo 2 inicia-se com a apresentação das definições de potência para ambientes puramente senoidais. Abordam-se os casos do circuito monofásico e do circuito trifásico equilibrado. Em seguida, tem-se uma apresentação das definições de potência em sistemas trifásicos desequilibrados e senoidais. Posteriormente, pautam-se as definições relativas a ambientes com sinais onde há presença de harmônicas. São apresentados os principais modelos para o caso monofásico discutidos atualmente, a saber: modelo de Budeanu, modelo de Fryze e modelo da Norma IEEE 1459-2010. Por fim, são apresentadas as definições utilizadas na medição de sistemas trifásicos não-senoidais, baseadas no modelo da potência aparente vetorial e, principalmente, no modelo da Norma IEEE 1459-2010.

No Capítulo 3, são introduzidos os métodos computacionais implementados a fim produzir dados que permitam analisar o comportamento dos parâmetros citados no Capítulo 2.

Os resultados obtidos com base na execução das rotinas computacionais são expostos no Capítulo 4. A partir dos dados apresentados, são feitas análises qualitativas e quantitativas visando alcançar os objetivos propostos pelo trabalho.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões inferidas dos resultados das análises efetuadas, avaliando os impactos gerados pelas decisões na escolha de parâmetros de medição. Por fim, são elencadas propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Considerações Iniciais

Idealmente, os sistemas devem operar sempre na frequência fundamental escolhida para ele. No entanto, em circuitos reais, a ocorrência de distúrbios associados à frequência do sinal não é rara e, portanto, não se deve ignorar os efeitos desses fenômenos. Com isso, a definição de parâmetros para a medição de potência segue uma divisão básica: definições de potência em condições senoidais e em condições não-senoidais.

Este capítulo é dedicado à apresentação das várias teorias que envolvem a definição de parâmetros utilizados em medição de potência, tanto em sistemas monofásicos como em sistemas trifásicos. São utilizados sinais em corrente alternada, assumindo-se como frequência fundamental o valor de 60 Hz.

2.2 Definições de Potência em Condições Senoidais

2.2.1 Caso Monofásico

2.2.1.1 Potência Instantânea, Potência Ativa e Potência Reativa

Considera-se um sistema monofásico alimentado por uma fonte de tensão senoidal, para cujos sinais de tensão e corrente variantes no tempo, tem-se as equações (2.1) e (2.2), respectivamente.

$$v(t) = \sqrt{2}V \text{sen}(\omega t) \quad (2.1)$$

$$i(t) = \sqrt{2}I \text{sen}(\omega t + \phi) \quad (2.2)$$

Onde:

V é o valor eficaz ou rms (*root mean square*) do sinal de tensão, medido em volt (V);

I é o valor eficaz ou rms (*root mean square*) do sinal de corrente, medido em ampere (A);

ω é a frequência angular, medida em radiano por segundo (rad/s); e

ϕ é a diferença do ângulo entre o sinal de tensão e o sinal de corrente, medido em radiano (rad).

Define-se potência instantânea como mostrado na equação (2.3):

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (2.3)$$

Ao se substituir as equações (2.1) e (2.2) na equação (2.3), tem-se a expressão (2.4):

$$p(t) = [\sqrt{2}V \text{sen}(\omega t)][\sqrt{2}I \text{sen}(\omega t + \phi)] \quad (2.4)$$

Desenvolvendo-se matematicamente a equação (2.4), chega-se à equação (2.5).

$$p(t) = VI \cos(\phi) - VI \cos(2\omega t + \phi) \quad (2.5)$$

Nota-se que a potência instantânea em um circuito monofásico não é constante. Da equação (2.5), observa-se que há uma componente que oscila com o dobro da frequência do sinal de tensão adicionada de uma componente constante dada pelo termo $VI \cos(\phi)$. A componente que varia no tempo com o dobro da frequência pode ser decomposta e, rearranjando os termos, tem-se a equação (2.6).

$$p(t) = VI \cos(\phi)[1 - \cos(2\omega t)] + VI \text{sen}(\phi) \text{sen}(2\omega t) \quad (2.6)$$

A equação (2.6) pode ser dividida em duas parcelas, as quais podem ser interpretadas da seguinte maneira:

Parte I) Possui valor médio igual a $VI \cos(\phi)$. Nota-se que esta parte nunca poderá assumir valores negativos (dado que $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$) e, portanto, representa um fluxo de potência unidirecional da fonte para a carga.

Parte II) Esta parte possui valor médio nulo. Trata-se de uma componente que oscila com o dobro da frequência da rede e apresenta valor de pico igual a $VI \text{sen}(\phi)$.

A potência instantânea vista em (2.6) é, convencionalmente, representada por dois tipos de potência:

Potência Ativa P - valor médio do primeiro termo após a igualdade, cuja unidade no Sistema Internacional (SI) é o watt (W), representada em (2.7).

$$P = VI \cos(\phi) \quad (2.7)$$

Potência Reativa Q - valor de pico do segundo termo após o sinal de igualdade, cuja unidade de medida é o volt-ampere reativo (var), representada em (2.8).

$$Q = VI \sin(\phi) \quad (2.8)$$

Em sistemas nos quais apenas cargas lineares estão presentes, como indutores e capacitores, a potência reativa representa, fisicamente, a potência que circula entre fonte e carga ou que está armazenada nesses tipos de componentes. Geralmente, esta potência é referida como a potência que não realiza trabalho ou que possui valor médio nulo.

A Figura 2.1 ilustra sinais genéricos de tensão e corrente e as potências ativa, reativa e instantânea computadas para esses sinais.

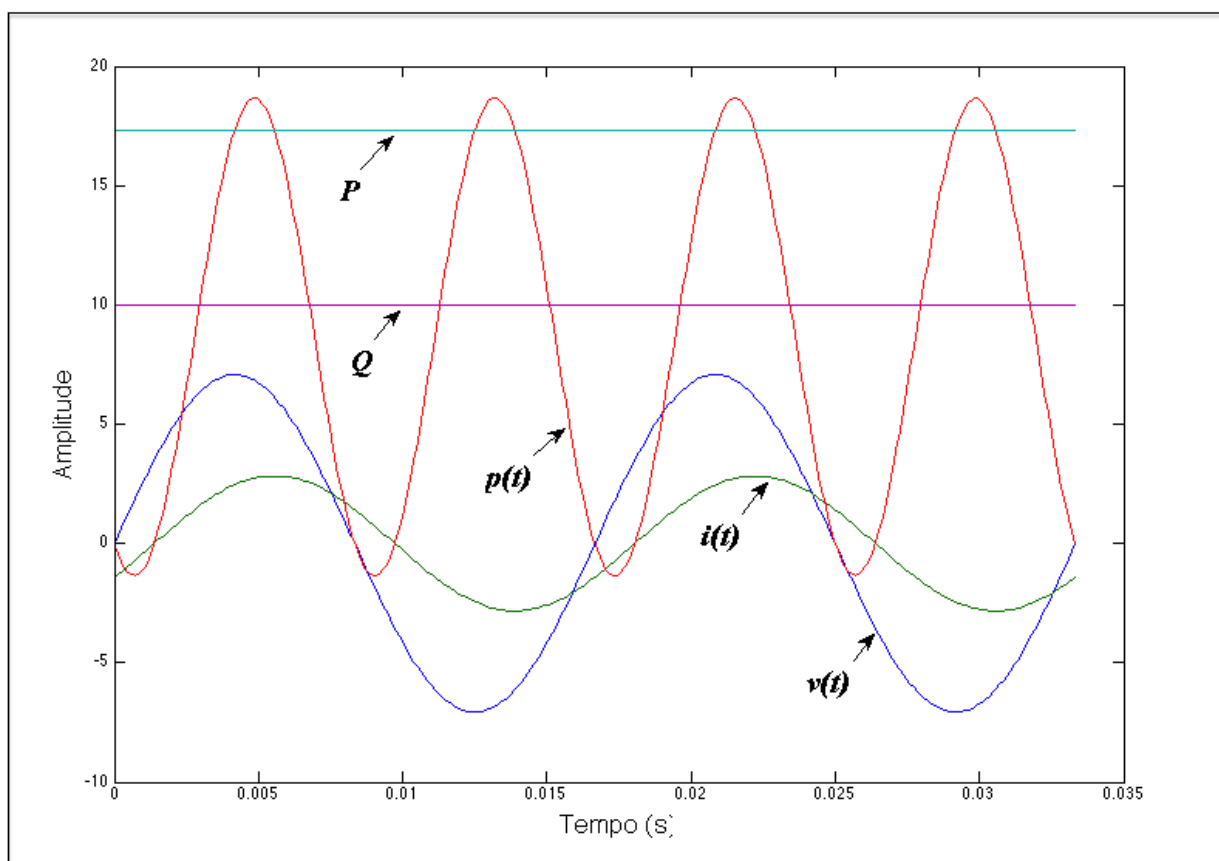


Figura 2.1: Sinais de tensão $v(t)$ e corrente $i(t)$ genéricos com respectivas potências ativa P , reativa Q e instantânea $p(t)$.

Da Figura 2.1 nota-se que a potência instantânea $p(t)$ oscila com o dobro da frequência dos sinais de tensão $v(t)$ e corrente $i(t)$. Além disso, é possível perceber que esta potência assume valores negativos, mesmo que durante curtos intervalos de tempo. Esse efeito ilustra o retorno de potência da carga para a fonte quando da presença de potência reativa no sistema.

2.2.1.2 Potência Aparente e Potência Complexa

Outra definição frequentemente utilizada para quantificar potência em um sistema é a **Potência Aparente** S , equação (2.9).

$$S = VI \quad (2.9)$$

Sua unidade de medida é o volt-ampere (VA).

As equações (2.10) e (2.11) mostram os fasores de tensão e corrente, respectivamente, dos sinais introduzidos pelas equações (2.1) e (2.2).

$$\bar{V} = V \angle \theta_V = V e^{j\theta_V} \quad (2.10)$$

$$\bar{I} = I \angle \theta_I = V e^{j\theta_I} \quad (2.11)$$

Onde V e I representam os valores eficazes e, θ_V e θ_I as fases dos sinais de tensão e corrente, respectivamente.

Fazendo-se uso dos fasores de tensão e corrente, define-se, na equação (2.12), a **Potência Complexa** \bar{S} :

$$\bar{S} = \bar{V} \bar{I}^* = VI e^{j(\theta_V - \theta_I)} \quad (2.12)$$

Utilizando-se a característica de número complexo, pode-se representar a potência complexa como na equação (2.13).

$$\bar{S} = VI \cos(\theta_V - \theta_I) + jVI \sin(\theta_V - \theta_I) \quad (2.13)$$

2.2.1.3 Fator de Potência

Definido como uma relação que mostra qualitativamente como a rede está sendo utilizada em termos de potência, o **Fator de Potência** FP é representado pela equação (2.14).

$$FP = \cos(\phi) = \frac{P}{S} \quad (2.14)$$

2.2.2 Caso Trifásico Equilibrado

2.2.2.1 Potência Instantânea Trifásica

Em sistemas trifásicos equilibrados, as potências ativa, reativa e aparente trifásicas vêm sendo, tradicionalmente, calculadas como três vezes as potências monofásicas definidas na seção 2.2.1 [1].

No entanto, a potência reativa possui diferentes significados em sistemas monofásicos e trifásicos, conforme mencionado em [6] e [7] e, por esse motivo, deve ser analisada de forma distinta.

Adota-se um sistema trifásico, como o mostrado na Figura 2.2, composto por tensões de fase e de correntes de linha equilibradas representadas pelas equações (2.15) a (2.21).

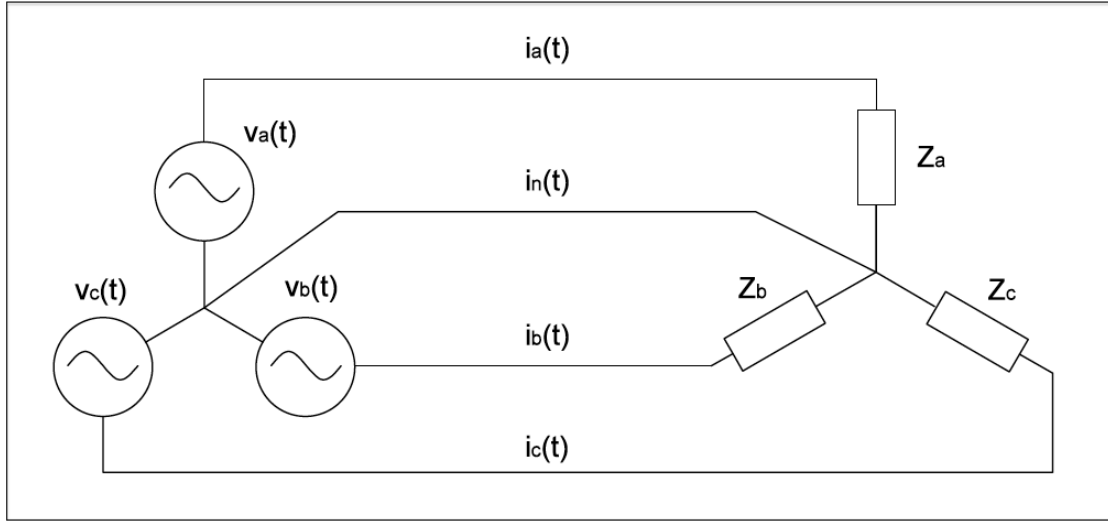


Figura 2.2: Circuito Trifásico a Quatro Fios.

$$v_a(t) = \sqrt{2}V \text{sen}(\omega t) \quad (2.15)$$

$$v_b(t) = \sqrt{2}V \text{sen}(\omega t - 120^\circ) \quad (2.16)$$

$$v_c(t) = \sqrt{2}V \text{sen}(\omega t + 120^\circ) \quad (2.17)$$

$$i_a(t) = \sqrt{2}I \text{sen}(\omega t + \phi) \quad (2.18)$$

$$i_b(t) = \sqrt{2}I \text{sen}(\omega t + \phi - 120^\circ) \quad (2.19)$$

$$i_c(t) = \sqrt{2}I \text{sen}(\omega t + \phi + 120^\circ) \quad (2.20)$$

$$i_n(t) = i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) \quad (2.21)$$

Em [1] define-se, para sistemas trifásicos equilibrados com ou sem condutor neutro, pois $i_n(t) = 0$, a **Potência Ativa Instantânea Trifásica** $p_{3\phi}(t)$, dada pela equação (2.22).

$$p_{3\phi}(t) = p_a(t) + p_b(t) + p_c(t) \quad (2.22)$$

Onde $p_a(t)$, $p_b(t)$ e $p_c(t)$ são as potências instantâneas por fase, representadas pelas equações (2.23), (2.24) e (2.25), respectivamente.

$$p_a(t) = v_a(t)i_a(t) \quad (2.23)$$

$$p_b(t) = v_b(t)i_b(t) \quad (2.24)$$

$$p_c(t) = v_c(t)i_c(t) \quad (2.25)$$

Fazendo a substituição das equações (2.15) a (2.20) em (2.22), tem-se:

$$p_{3\phi}(t) = VI[\cos(\phi) - \cos(2\omega t + \phi)] + VI[\cos(\phi) - \cos(2\omega t + \phi + 120^\circ)] + \\ + VI[\cos(\phi) - \cos(2\omega t + \phi - 120^\circ)] \quad (2.26)$$

Reposicionando os termos da equação (2.26), tem-se:

$$p_{3\phi}(t) = 3VI\cos(\phi) - VI[\cos(2\omega t + \phi) + \cos(2\omega t + \phi + 120^\circ) + \cos(2\omega t + \phi - 120^\circ)] \quad (2.27)$$

A soma dos termos que variam com o dobro da frequência da rede na equação (2.27) é zero e, portanto, tem-se a equação (2.28).

$$p_{3\phi}(t) = 3VI\cos(\phi) = 3P \quad (2.28)$$

Onde P é a potência ativa para o caso monofásico, definida na equação (2.7).

2.2.2.2 Potência Ativa Trifásica

Diferentemente do estabelecido para a potência instantânea em sistemas monofásicos, nota-se, pela equação (2.28), a existência de uma potência instantânea sem nenhuma componente que varia com o tempo. Da potência instantânea monofásica, dada pela equação (2.6), é possível distinguir dois termos que são interpretados como potência ativa e potência reativa. Porém, para o caso trifásico, essa mesma interpretação torna-se incoerente, visto que existe apenas um termo não variante no tempo. Contudo, para manter certa consistência com as definições feitas para sistemas monofásicos, a **Potência Ativa Trifásica** $P_{3\phi}$ é definida como pode ser visto em (2.29) [1].

$$P_{3\phi} = 3P = 3VI\cos(\phi) \quad (2.29)$$

2.2.2.3 Potência Aparente Trifásica e Potência Complexa Trifásica

O sistema trifásico equilibrado, mostrado na Figura 2.2, pode ter cada uma de suas fases representadas por equivalentes monofásicos, para fins de cálculo, tal como ilustrado, para uma das fases, na Figura 2.3.

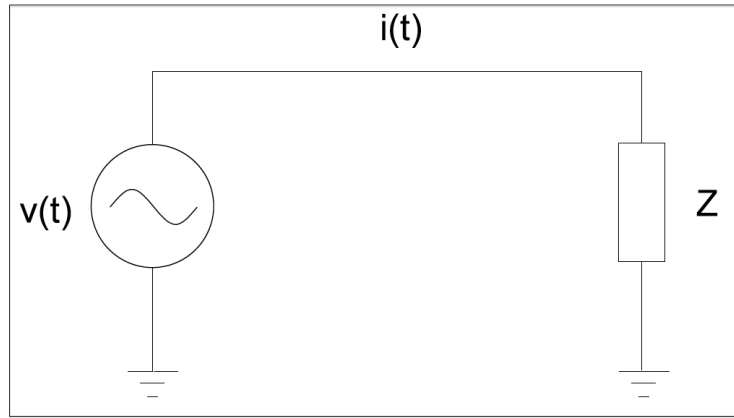


Figura 2.3: Circuito Monofásico Equivalente.

Neste caso, define-se **Potência Aparente Trifásica** $S_{3\phi}$, equação (2.30), como a soma das potências aparentes de cada fase.

$$S_{3\phi} = 3S = 3VI \quad (2.30)$$

Onde S é a potência aparente monofásica definida na equação (2.9).

Define-se, também, a **Potência Complexa Trifásica** $\overline{S}_{3\phi}$ como a soma das potências complexas de cada fase, equação (2.31), através da utilização do conceito de equivalente monofásico, mostrado na Figura 2.3.

$$\overline{S}_{3\phi} = 3\overline{S} = 3VI\cos(\phi) + j3VI\sin(\phi) \quad (2.31)$$

2.2.2.4 Potência Reativa Trifásica

Define-se como **Potência Reativa Trifásica** $Q_{3\phi}$, equação (2.32), a parte imaginária da potência complexa trifásica, definida em (2.31).

$$Q_{3\phi} = 3Q = 3VI\sin(\phi) \quad (2.32)$$

2.2.2.5 Fator de Potência Trifásico

O **Fator de Potência Trifásico** é definido conforme mostrado em (2.33), com base nos resultados de (2.29) e (2.30).

$$FP_{3\phi} = \frac{P_{3\phi}}{S_{3\phi}} \quad (2.33)$$

Após essa discussão sobre definições de potência, deve-se deixar claro que a potência reativa trifásica estabelecida em (2.32), trata-se apenas de uma abstração matemática, não estando vin-

culada a ela um significado físico preciso como a potência reativa monofásica definida em (2.8). Em outras palavras, quando um sistema trifásico é analisado de forma integrada, como aparece na Figura 2.2, e não como três circuitos monofásicos equivalentes, a potência reativa trifásica não representa uma energia oscilando entre a fonte e a carga.

Embora não seja ideal, esta abordagem que considera um sistema trifásico como a soma de três circuitos monofásicos equivalentes é útil na análise de sistemas de potência, dado que há uma simplificação no modelo matemático.

2.2.3 Caso Trifásico Desequilibrado

Os conceitos relacionados à potência citados na seção 2.2.2 tornam-se contraditórios se aplicados a sistemas trifásicos desequilibrados, já que, devido à não semelhança entre as fases, perde-se a coerência ao considerar o sistema como a soma de três circuitos monofásicos idênticos.

Neste caso, os valores eficazes das correntes I_a , I_b e I_c não possuem magnitudes iguais e não estão defasados exatamente de 120° um do outro. Uma carga desequilibrada pode levar a correntes assimétricas e, conseqüentemente, à assimetria de tensão. Existem também casos em que a tensão de alimentação da rede não é simétrica, culminando em correntes assimétricas, mesmo se a carga é perfeitamente equilibrada.

Para tanto, são definidas nesta seção algumas quantidades relacionadas a potência, baseadas na norma IEEE 1459-2010 [8]. A saber: Potência Instantânea Trifásica $p_{abc}(t)$, Potência Ativa Trifásica P_{abc} , Potência Ativa Trifásica em Componentes Simétricas P_{012} , Potência Reativa Trifásica Q_{abc} , Potência Reativa Trifásica em Componentes Simétricas Q_{012} , Potência Aparente Aritmética S_A , Potência Aparente Vetorial S_V , Potência Aparente Vetorial em componentes Simétricas S_V^{012} , Fator de Potência Aritmético FP_A , Fator de Potência Vetorial FP_V , Fator de Potência Vetorial em Componentes Simétricas FP_V^{012} , Potência Aparente Efetiva S_e e Fator de Potência Efetivo FP_{e1} .

Com base no método de Fryze-Buchholz-Depenbrock (FBD) [9] também são apresentadas a Potência Aparente Efetiva S_Σ e o Fator de Potência Efetivo FP_{e2} .

Considerando-se que o circuito trifásico mostrado na Figura 2.2 seja desequilibrado, tem-se as tensões de fase definidas nas equações (2.34), (2.35) e (2.36) e as correntes de linha nas equações (2.37), (2.38) e (2.39).

$$v_a(t) = \sqrt{2}V_a \text{sen}(\omega t + \alpha_a) \quad (2.34)$$

$$v_b(t) = \sqrt{2}V_b \text{sen}(\omega t + \alpha_b) \quad (2.35)$$

$$v_c(t) = \sqrt{2}V_c \text{sen}(\omega t + \alpha_c) \quad (2.36)$$

$$i_a(t) = \sqrt{2}I_a \text{sen}(\omega t + \beta_a) \quad (2.37)$$

$$i_b(t) = \sqrt{2}I_b \text{sen}(\omega t + \beta_b) \quad (2.38)$$

$$i_c(t) = \sqrt{2}I_c \text{sen}(\omega t + \beta_c) \quad (2.39)$$

Onde α_a , α_b e α_c são os ângulos das fases a , b e c do sinal de tensão e; β_a , β_b e β_c são os ângulos das fases a , b e c do sinal de corrente.

Ressalta-se que, ao menos uma das amplitudes possui valor diferente das outras duas e/ou a diferença entre os ângulos de fase não é 120° , o que leva a uma perda de simetria do sistema e, conseqüentemente, de seu equilíbrio. Além disso, a corrente no condutor neutro, dada pela equação (2.21), não é mais nula devido à assimetria do circuito.

2.2.3.1 Potência Instantânea Trifásica

Para um sistema a três fios, como o da Figura 2.4, tem-se que $i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) = 0$.

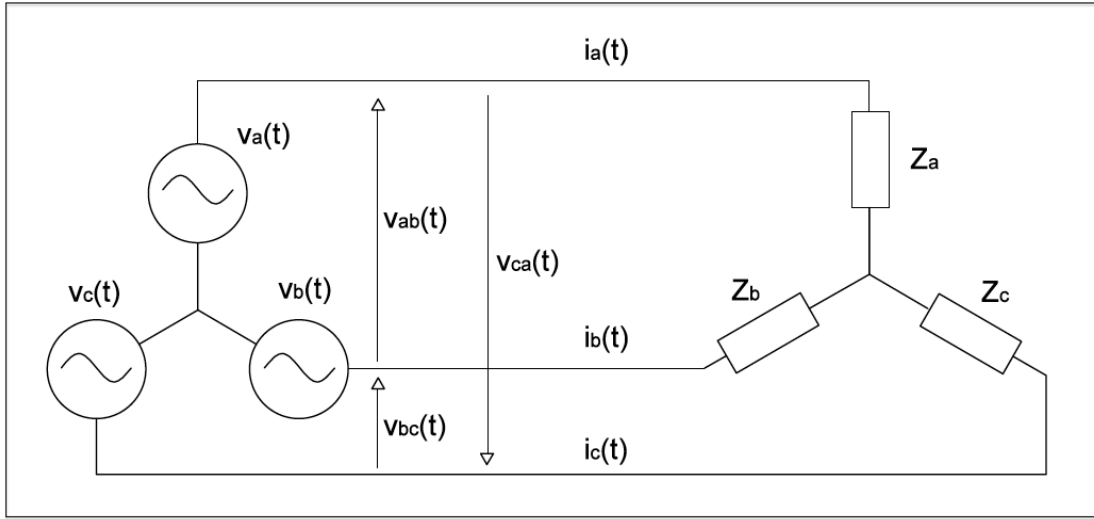


Figura 2.4: Circuito Trifásico a Três Fios.

De acordo com o Teorema de Blondel [10], para o circuito mostrado na Figura 2.4, define-se a **Potência Instantânea Trifásica** $p_{abc}(t)$ como nas equações (2.40) a (2.42).

$$p_{abc}(t) = v_{ab}(t)i_a(t) + v_{cb}(t)i_c(t) \quad (2.40)$$

$$p_{abc}(t) = v_{ba}(t)i_b(t) + v_{ca}(t)i_c(t) \quad (2.41)$$

$$p_{abc}(t) = v_{ac}(t)i_a(t) + v_{bc}(t)i_b(t) \quad (2.42)$$

Onde:

$$v_{ab} = -v_{ba} \quad (2.43)$$

$$v_{bc} = -v_{cb} \quad (2.44)$$

$$v_{ca} = -v_{ac} \quad (2.45)$$

Já para sistemas trifásicos a quatro fios, Figura 2.2, a **Potência Instantânea Trifásica** $p_{abc}(t)$ pode ser definida como em (2.46):

$$p_{abc}(t) = v_a(t)i_a(t) + v_b(t)i_b(t) + v_c(t)i_c(t) \quad (2.46)$$

2.2.3.2 Potência Ativa Trifásica

Nas equações (2.47) a (2.49) define-se a **Potência Ativa** P_k , com $k = a, b, c$, para cada uma das fases do sistema.

$$P_a = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v_a i_a dt = V_a I_a \cos(\theta_a) \quad (2.47)$$

$$P_b = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v_b i_b dt = V_b I_b \cos(\theta_b) \quad (2.48)$$

$$P_c = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v_c i_c dt = V_c I_c \cos(\theta_c) \quad (2.49)$$

Onde $\theta_k = \alpha_k - \beta_k$, com $k = a, b, c$.

Dessa maneira, tem-se a **Potência Ativa Trifásica** P_{abc} definida na equação (2.50).

$$P_{abc} = P_a + P_b + P_c \quad (2.50)$$

Há casos em que a transformação em componentes simétricas pode ser útil na análise dos parâmetros da rede e, por isso, define-se na equação (2.54) a **Potência Ativa Trifásica** P_{012} através das suas componentes de sequência zero, positiva e negativa, equações (2.51), (2.52) e (2.53), respectivamente.

$$P^0 = 3V^0 I^0 \cos(\theta^0) \quad (2.51)$$

$$P^+ = 3V^+ I^+ \cos(\theta^+) \quad (2.52)$$

$$P^- = 3V^- I^- \cos(\theta^-) \quad (2.53)$$

$$P_{012} = P^0 + P^+ + P^- \quad (2.54)$$

2.2.3.3 Potência Reativa Trifásica

Assim como foram definidas as potências ativas por fase nas equações (2.47) a (2.49), aborda-se nas equações (2.55), (2.56) e (2.57), a **Potência Reativa** Q_k , com $k = a, b, c$, por fase. Ressalta-se a integração do sinal de tensão, que no domínio da frequência, pode ser interpretado como um deslocamento de 90° na fase do sinal. Dessa forma, tem-se a **Potência Reativa Trifásica** Q_{abc} , equação (2.58).

$$Q_a = \frac{\omega}{T} i_a \left[\int v_a dt \right] dt = V_a I_a \text{sen}(\theta_a) \quad (2.55)$$

$$Q_b = \frac{\omega}{T} i_b \left[\int v_b dt \right] dt = V_b I_b \text{sen}(\theta_b) \quad (2.56)$$

$$Q_c = \frac{\omega}{T} i_c \left[\int v_c dt \right] dt = V_c I_c \text{sen}(\theta_c) \quad (2.57)$$

$$Q_{abc} = Q_a + Q_b + Q_c \quad (2.58)$$

A partir de suas componentes de sequência zero, positiva e negativa, equações (2.59), (2.60) e (2.61), respectivamente, define-se a **Potência Reativa Trifásica** Q_{012} , equação (2.62).

$$Q^0 = 3V^0 I^0 \text{sen}(\theta^0) \quad (2.59)$$

$$Q^+ = 3V^+ I^+ \text{sen}(\theta^+) \quad (2.60)$$

$$Q^- = 3V^- I^- \text{sen}(\theta^-) \quad (2.61)$$

$$Q_{012} = Q^0 + Q^+ + Q^- \quad (2.62)$$

2.2.3.4 Potência Aparente Aritmética

A **Potência Aparente Aritmética** S_A , definida em (2.66), é calculada com base na **Potência Aparente** S_k , com $k = a, b, c$, por fase, equações (2.63) a (2.65), calculada com base nas potências ativa e reativa, citadas nas subseções 2.2.3.2 e 2.2.3.3, respectivamente.

$$S_a^2 = P_a^2 + Q_a^2 \quad (2.63)$$

$$S_b^2 = P_b^2 + Q_b^2 \quad (2.64)$$

$$S_c^2 = P_c^2 + Q_c^2 \quad (2.65)$$

$$S_A = S_a + S_b + S_c \quad (2.66)$$

2.2.3.5 Potência Aparente Vetorial

A partir das potências ativa e reativa trifásicas, definidas em (2.50) e (2.58), respectivamente, a **Potência Aparente Vetorial** S_V pode ser definida de acordo com a equação (2.67).

$$S_V = \sqrt{P_{abc}^2 + Q_{abc}^2} \quad (2.67)$$

Fazendo-se uso da transformação em componentes simétricas, é possível definir a **Potência Aparente Vetorial** S_V^{012} , equação (2.71), com base nas componentes de sequência zero, positiva e negativa, mostradas nas equações (2.68), (2.69) e (2.70).

$$S^0 = |\overline{S^0}| = |P^0 + jQ^0| \quad (2.68)$$

$$S^+ = |\overline{S^+}| = |P^+ + jQ^+| \quad (2.69)$$

$$S^- = |\overline{S^-}| = |P^- + jQ^-| \quad (2.70)$$

$$S_V^{012} = |\overline{S^+} + \overline{S^-} + \overline{S^0}| = |P_{012} + jQ_{012}| \quad (2.71)$$

2.2.3.6 Fator de Potência Aritmético e Fator de Potência Vetorial

O **Fator de Potência Aritmético** FP_A e o **Fator de Potência Vetorial** FP_V são definidos nas equações (2.72) e (2.73):

$$FP_A = \frac{P_{abc}}{S_A} \quad (2.72)$$

$$FP_V = \frac{P_{abc}}{S_V} \quad (2.73)$$

Onde:

P_{abc} é a potência ativa trifásica, definida em (2.50);

S_A é a potência aparente aritmética, definida em (2.66); e

S_V é a potência aparente vetorial, definida em (2.67).

Com base na transformação em componentes simétricas, define-se o **Fator de Potência Vetorial** FP_V^{012} , equação (2.74).

$$FP_V^{012} = \frac{P_{012}}{S_V^{012}} \quad (2.74)$$

Onde:

P_{012} é potência ativa trifásica em componentes simétricas, definida em (2.54); e

S_V^{012} é a potência aparente vetorial em componentes simétricas, definida em (2.71).

2.2.3.7 Potência Aparente Efetiva

São apresentados neste tópico dois métodos para definir a **Potência Aparente Efetiva**: o método Fryze-Buchholz-Depenbrock (FBD) [9] e o método da norma IEEE 1459-2010 [8].

Pra o desenvolvimento do método FBD, considera-se um circuito trifásico desequilibrado, como mostrado na Figura 2.5. Este circuito é compensado como mostrado na Figura 2.6. O circuito equivalente resultante após compensação corresponde a um sistema de quatro resistências iguais R_Σ conectadas a um ponto neutro virtual O , Figura 2.7.

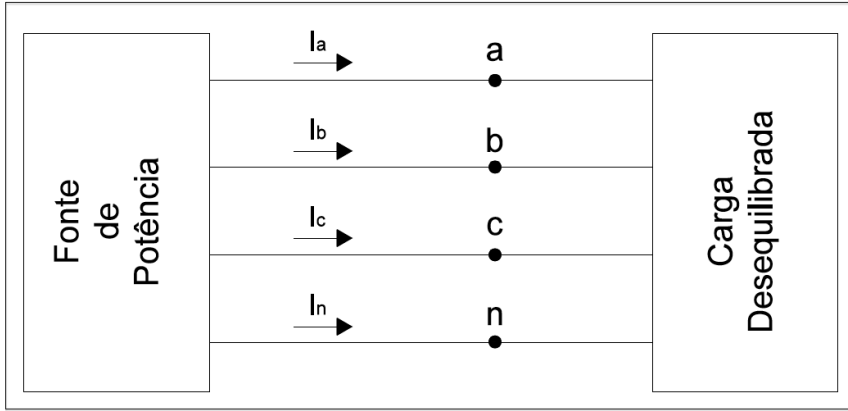


Figura 2.5: Circuito Desequilibrado.

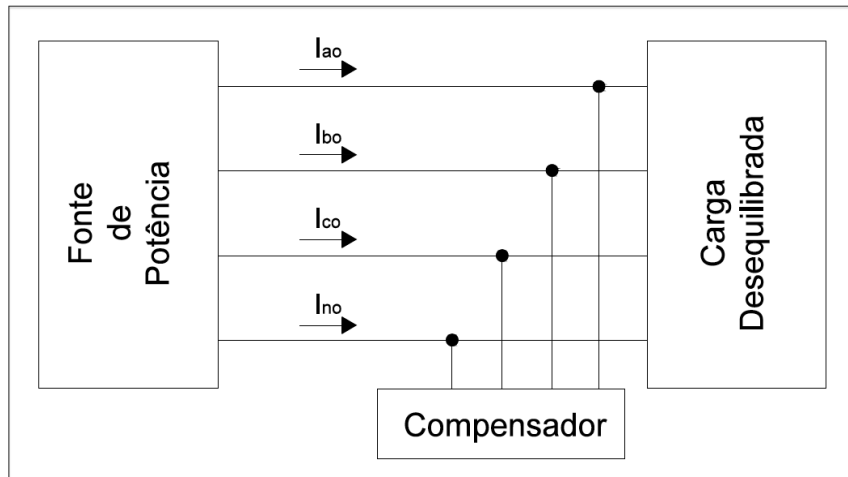


Figura 2.6: Circuito Desequilibrado Com o Compensador.

As resistências mostradas na Figura 2.7 podem ser calculadas como na equação (2.75).

$$R_\Sigma = \frac{V_{ao}}{I_{ao}} = \frac{V_{bo}}{I_{bo}} = \frac{V_{co}}{I_{co}} = \frac{V_{no}}{I_{no}} \quad (2.75)$$

A relação do sistema desequilibrado com o compensado é dada pela equação (2.76).

$$I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2 = I_{ao}^2 + I_{bo}^2 + I_{co}^2 + I_{no}^2 \quad (2.76)$$

A equação (2.76) implica que os quatro condutores têm resistências iguais e o sistema compensado possui a mesma perda de potência que o sistema original, ou seja, a resistência do condutor neutro R_n é igual à resistência dos condutores de linha R_s .

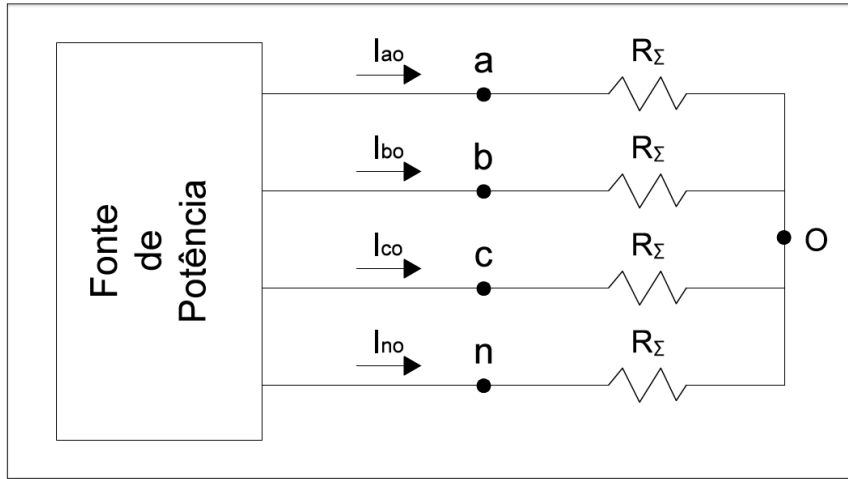


Figura 2.7: Circuito Compensado.

A *tensão e corrente coletivas* introduzidas por Buchholz em [11] são mostradas nas equações (2.77) e (2.78).

$$V_{\Sigma}^2 = V_{ao}^2 + V_{bo}^2 + V_{co}^2 + V_{no}^2 \quad (2.77)$$

$$I_{\Sigma}^2 = I_{ao}^2 + I_{bo}^2 + I_{co}^2 + I_{no}^2 \quad (2.78)$$

Assim, a potência fornecida para o sistema equivalente com quatro resistências R_{Σ} é mostrada na equação (2.79).

$$S_{\Sigma} = V_{ao}I_{ao} + V_{bo}I_{bo} + V_{co}I_{co} + V_{no}I_{no} = R_{\Sigma}I_{\Sigma}^2 = \frac{V_{\Sigma}^2}{R_{\Sigma}} = V_{\Sigma}I_{\Sigma} \quad (2.79)$$

A equação (2.77) pode ser reescrita como em (2.80) [5].

$$V_{\Sigma}^2 = \frac{1}{4}(V_{an}^2 + V_{bn}^2 + V_{cn}^2 + V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2) \quad (2.80)$$

Baseadas na *tensão e corrente coletivas*, tem-se a **Tensão Efetiva** V_e' e a **Corrente Efetiva** I_e , equações (2.81) e (2.82), respectivamente.

$$V_e' = \frac{V_{\Sigma}}{\sqrt{3}} = \sqrt{\frac{1}{12}(V_{an}^2 + V_{bn}^2 + V_{cn}^2 + V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)} \quad (2.81)$$

$$I_e = \frac{I_{\Sigma}}{\sqrt{3}} = \sqrt{\frac{1}{3}(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2)} \quad (2.82)$$

Dessa forma, tem-se a primeira equação para a potência aparente efetiva, equação (2.83).

$$S_{\Sigma} = 3V_e' I_e \quad (2.83)$$

Ambas a tensão e a corrente efetivas podem ser expressas em função de componentes simétricas, como mostrado nas equações (2.84) e (2.85), respectivamente.

$$V_e^{012} = \sqrt{(V^+)^2 + (V^-)^2 + \frac{(V^0)^2}{4}} \quad (2.84)$$

$$I_e^{012} = \sqrt{(I^+)^2 + (I^-)^2 + 4(V^0)^2} \quad (2.85)$$

A diferença entre o método utilizado na norma IEEE 1459-2010 e o método FBD deve-se, principalmente, ao fato de que o sistema compensado, em que há máxima transferência de potência ativa, é perfeitamente simétrico, não existindo, portanto, nenhuma componente de sequência negativa ou zero de potência [5]. Este circuito pode ser visto na Figura 2.8.

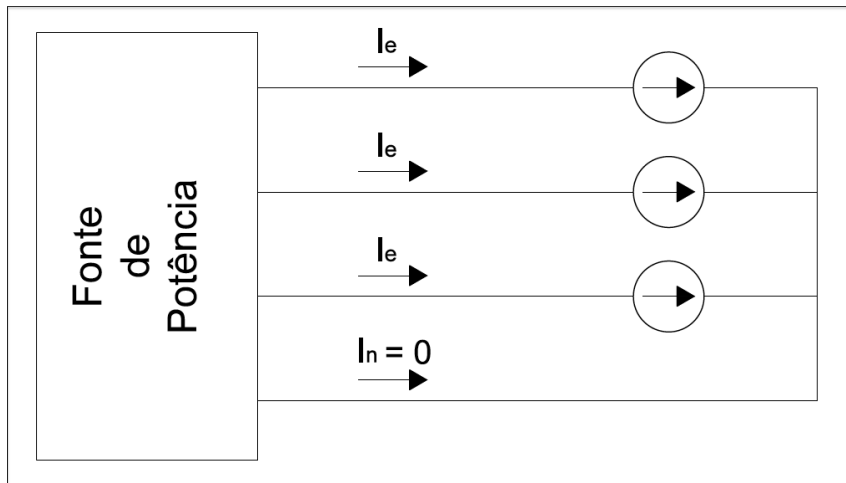


Figura 2.8: Circuito Compensado Perfeitamente Simétrico.

O modelo utilizado para definir o conceito de tensão efetiva, proposto em [12], assume que a potência ativa dissipada pela carga sobre condições de fator de potência unitário é igual à potência ativa quando a carga não está compensada. Se o consumidor medido possui cargas equilibradas R_{Δ} conectadas em delta, com uma potência P_{Δ} , como ilustrado na Figura 2.9, e as cargas equilibradas restantes R_Y conectadas em estrela, a quatro fios, com uma potência P_Y , como na Figura 2.10, então a potência ativa da carga pode ser expressa como na equação (2.86).

$$P_Y + P_{\Delta} = P_e \quad (2.86)$$

Onde P_e é a potência ativa trifásica correspondente ao circuito equivalente da Figura 2.8.

Dessa maneira, pode-se reescrever a equação (2.86) como em (2.87).

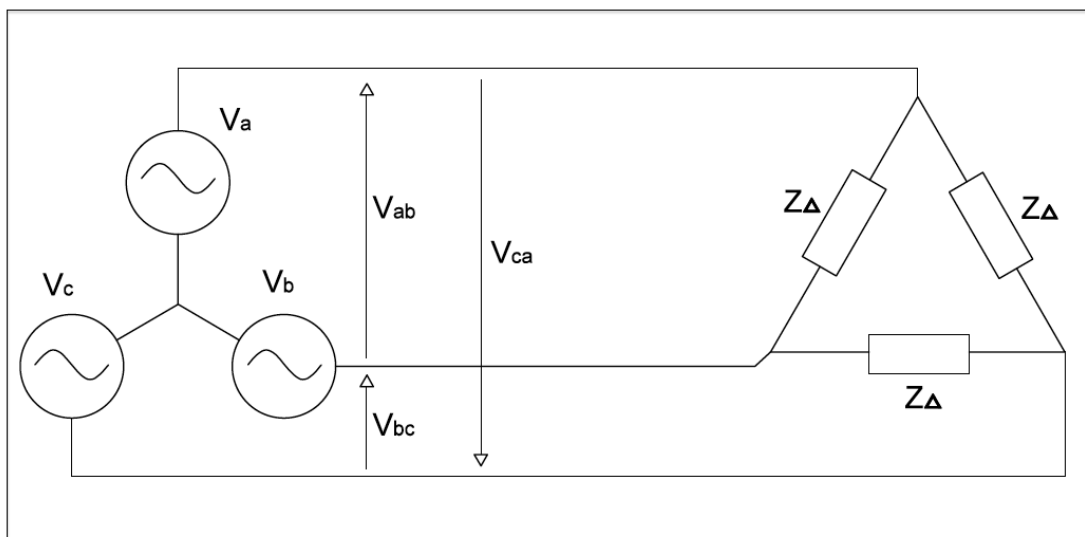


Figura 2.9: Circuito Real em Delta Com Desequilíbrio de Tensão.

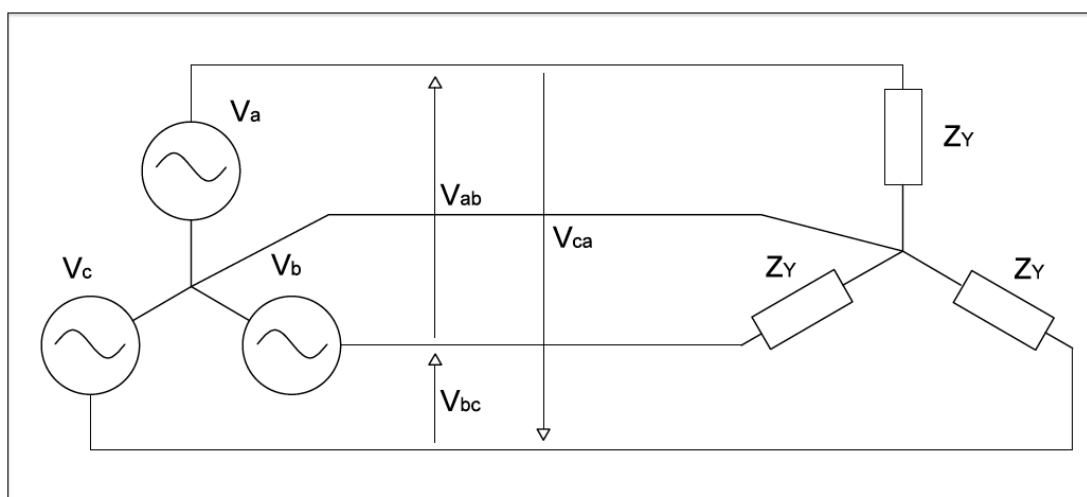


Figura 2.10: Circuito Real em Estrela Com Desequilíbrio de Tensão.

$$\frac{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2}{R_Y} + \frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{R_{\Delta}} = 3 \frac{V_e^2}{R_Y} + 9 \frac{V_e^2}{R_{\Delta}} \quad (2.87)$$

Onde V_e é a **Tensão Efetiva**.

As Figuras 2.11 e 2.12 mostram os circuitos equivalentes equilibrados correspondentes aos circuitos das Figuras (2.9) e (2.10), respectivamente.

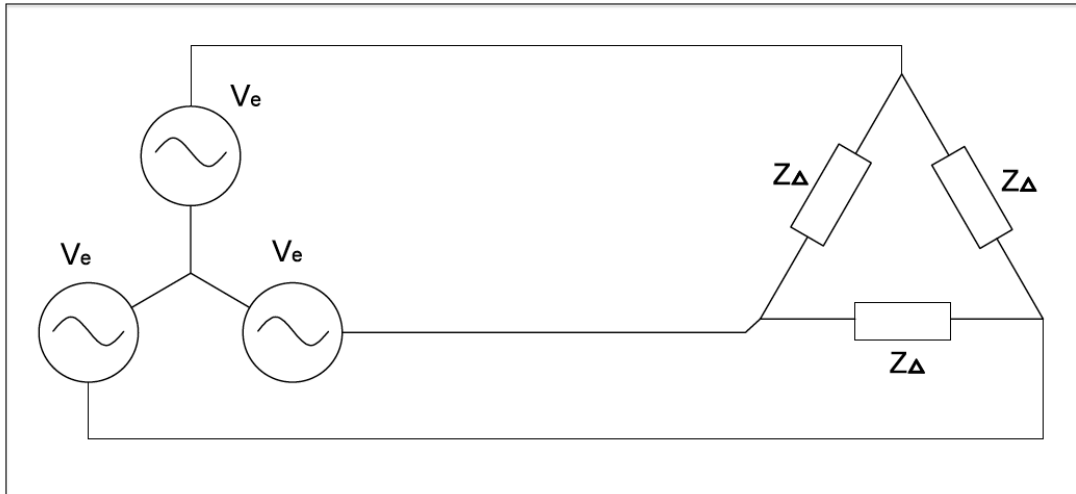


Figura 2.11: Circuito Equivalente do Circuito em Delta Sem Desequilíbrio de Tensão.

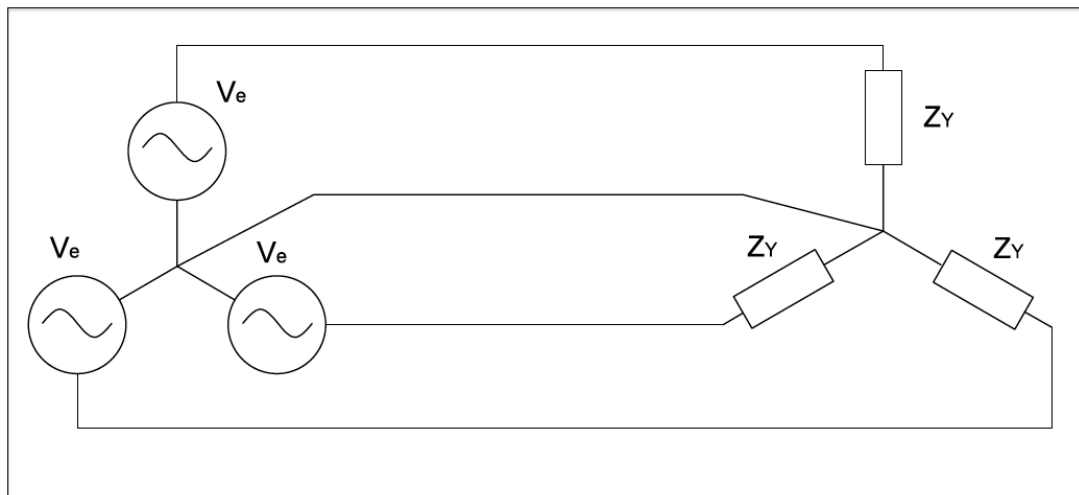


Figura 2.12: Circuito Equivalente do Circuito em Estrela Sem Desequilíbrio de Tensão.

A tensão efetiva pode ser obtida a partir da equação (2.87), como mostrado na expressão (2.88).

$$V_e = \sqrt{\frac{3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + \xi(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)}{9(1 + \xi)}} \quad (2.88)$$

Onde:

$$\xi = \frac{P_\Delta}{P_Y} + \frac{9V_e^2 R_Y}{R_\Delta 3V_e^2} = 3 \frac{R_Y}{R_\Delta} \quad (2.89)$$

Ou, utilizando as componentes simétricas, tem-se a equação (2.90).

$$V_e^{012} = \sqrt{(V^+)^2 + (V^-)^2 + \frac{(V^0)^2}{1 + \xi}} \quad (2.90)$$

A expressão para a corrente efetiva citada pela norma IEEE 1459-2010 é idêntica àquela definida pelo método FBD.

Assim, define-se em (2.91) a segunda expressão para a **Potência Aparente Efetiva** S_e [8], [11] e [13].

$$S_e = 3V_e I_e \quad (2.91)$$

2.2.3.8 Fator de Potência Efetivo

O **Fator de Potência Efetivos** FP_{e1} e FP_{e2} podem ser calculados como nas equações (2.92) e (2.93), com base nos métodos FBD e da norma IEEE 1459-2010, respectivamente.

$$FP_{e1} = \frac{P_{abc}}{S_\Sigma} \quad (2.92)$$

$$FP_{e2} = \frac{P_{abc}}{S_e} \quad (2.93)$$

Onde P_{abc} é a potência ativa trifásica, mostrada em (2.50) e, S_Σ e S_e são as potências aparentes efetivas dos métodos FBD e da norma IEEE 1459-2010, equações (2.83) e (2.91).

Apesar da grande quantidade de definições enunciadas até este ponto, com a intenção de traduzir as características dos sistemas trifásicos desequilibrados em valores que possam ser úteis na análise da rede, há autores que questionam a fidelidade com que esses conceitos refletem o comportamento do sistema.

As potências aparentes aritmética, equação (2.66), e vetorial, equação (2.67), por exemplo, não se mostram métodos eficientes na caracterização das perdas de potência de um sistema trifásico desequilibrado. Em [5] é mencionado que as perdas de potência não são funções lineares do quadrado dessas potências (S_A^2 ou S_V^2), como acontece para a potência aparente em sistemas monofásicos e, portanto, sugere-se optar pelo uso da potência aparente efetiva S_e , cujo o quadrado possui característica aproximadamente linear em relação às perdas de potência. Esta sugestão também é feita em [8].

Na Tabela 2.1 estão agrupadas as quantidades e indicadores relacionados a potência em condições puramente senoidais para sistemas monofásicos e trifásicos.

Tabela 2.1: Quantidades e Indicadores Relacionados a Potência para Condições Puramente Senoidais em Sistemas Monofásicos e Trifásicos.

Quantidade ou Indicador	Monofásico	Trifásico Equilibrado	Trifásico Desequilibrado				
Instantânea	$p(t)$ (2.6)	$p_{3\phi}(t)$ (2.28)	$p_{abc}(t)$ 3 fios - (2.40) a (2.42) 4 fios - (2.46)				
Ativa	P (2.7)	$P_{3\phi}$ (2.29)	P_{abc} (2.50)	P_{012} (2.54)			
Reativa	Q (2.8)	$Q_{3\phi}$ (2.32)	Q_{abc} (2.58)	Q_{012} (2.62)			
Aparente	S (2.9)	$S_{3\phi}$ (2.30)	S_A (2.66)	S_V (2.67)	S_V^{012} (2.71)	S_Σ (2.83)	S_e (2.91)
Complexa	\bar{S} (2.12)	$\bar{S}_{3\phi}$ (2.31)	—				
Utilização da Linha	FP (2.14)	$FP_{3\phi}$ (2.33)	FP_A (2.72)	FP_V (2.73)	FP_V^{012} (2.74)	FP_{e1} (2.92)	FP_{e2} (2.93)

Da Tabela 2.1, nota-se que, com exceção da potência complexa, existem parâmetros análogos para os três casos: monofásico, trifásico equilibrado e trifásico desequilibrado. Isso deve-se, principalmente, ao esforço dos pesquisadores ao longo do tempo em manter uma coerência entre o estabelecimento de uma definição e outra, apesar de nem sempre haver significado físico claro para para todas essas definições.

2.3 Definições de Potência em Condições Não-Senoidais

2.3.1 Caso Monofásico

2.3.1.1 Modelo de Budeanu

Em trabalho desenvolvido em 1927 [14], antes mesmo de haver maiores preocupações com a presença de sinais não-senoidais na rede de energia elétrica, Constantin I. Budeanu apresentou um método de definição de potência para sinais de tensão e corrente formados pela soma da componente na frequência fundamental e das componentes de frequências múltiplas da frequência fundamental, denominadas componentes harmônicas.

De acordo com Budeanu, o quadrado dos valores rms das correntes harmônicas pode ser decomposto em dois termos ortogonais entre si, como na equação (2.94).

$$I_h^2 = [I_h \cos(\theta_h)]^2 + [I_h \sin(\theta_h)]^2 \quad (2.94)$$

Onde θ_h é o ângulo entre os fasores das tensões harmônicas e os fasores das correntes harmônicas. O índice "h" representa cada componente harmônica, em que $h = 1, 2, 3, \dots$

Da equação (2.94), tem-se a expressão para o quadrado da potência aparente em (2.95).

$$S^2 = V^2 I^2 = \sum_{h=1}^{\eta} V_h^2 \sum_{h=1}^{\eta} [I_h \cos(\theta_h)]^2 + \sum_{h=1}^{\eta} V_h^2 \sum_{h=1}^{\eta} [I_h \sin(\theta_h)]^2 \quad (2.95)$$

Tem-se a identidade de Lagrange, mostrada na equação (2.96).

$$\sum_{h=1}^{\eta} A_h^2 \sum_{h=1}^{\eta} B_h^2 = \left(\sum_{h=1}^{\eta} A_h B_h \right)^2 + \sum_{m=1}^{\eta-1} \sum_{n=m+1}^{\eta} (A_m B_n - A_n B_m)^2 \quad (2.96)$$

Resulta, da aplicação da identidade na equação (2.95), a expressão (2.97):

$$\begin{aligned} S^2 = & \left[\sum_{h=1}^{\eta} V_h I_h \cos(\theta_h) \right]^2 + \left[\sum_{h=1}^{\eta} V_h I_h \sin(\theta_h) \right]^2 \\ & + \sum_{m=1}^{\eta-1} \sum_{n=m+1}^{\eta} [V_m I_n \cos(\theta_n) - V_n I_m \cos(\theta_m)]^2 \\ & + \sum_{m=1}^{\eta-1} \sum_{n=m+1}^{\eta} [V_m I_n \sin(\theta_n) - V_n I_m \sin(\theta_m)]^2 \quad (2.97) \end{aligned}$$

A expressão (2.97) pode ser reescrita como em (2.98).

$$\begin{aligned} S^2 = & \left[\sum_{h=1}^{\eta} V_h I_h \cos(\theta_h) \right]^2 + \left[\sum_{h=1}^{\eta} V_h I_h \sin(\theta_h) \right]^2 \\ & + \sum_{m=1}^{\eta-1} \sum_{n=m+1}^{\eta} [(V_m I_n)^2 + (V_n I_m)^2 - 2V_m I_n V_n I_m \cos(\theta_m - \theta_n)] \quad (2.98) \end{aligned}$$

Nota-se que a potência aparente pode ser separada em três partes, como pode ser visualizado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Potências do Modelo de Budeanu.

Potência Ativa	P_B	$\sum_{h=1}^{\eta} V_h I_h \cos(\theta_h)$
Potência Reativa	Q_B	$\sum_{h=1}^{\eta} V_h I_h \sen(\theta_h)$
Potência de Distorção	D_B	$\sqrt{\sum_{m=1}^{\eta-1} \sum_{n=m+1}^{\eta} [(V_m I_n)^2 + (V_n I_m)^2 - 2V_m I_n V_n I_m \cos(\theta_m - \theta_n)]}$

Baseado na nomenclatura apresentada na Tabela 2.2, a potência aparente pode ser apresentada como na equação (2.99).

$$S^2 = P_B^2 + Q_B^2 + D_B^2 \quad (2.99)$$

Para calcular a potência aparente como na equação (2.9) é necessário encontrar os valores rms equivalentes dos sinais de tensão e de corrente para o sinal não-senoidal. Estes valores podem ser calculados como nas equações (2.100) e (2.101), respectivamente.

$$V = \sqrt{\sum_{n=1}^h V_n^2} \quad (2.100)$$

$$I = \sqrt{\sum_{m=1}^h I_m^2} \quad (2.101)$$

Dessa forma, na equação (2.102), tem-se a potência aparente em termos dos valores eficazes de tensão e corrente.

$$S = \sqrt{\sum_{n=1}^h V_n^2 \sum_{m=1}^h I_m^2} \quad (2.102)$$

Ao longo das últimas décadas, muitos trabalhos de respeitados pesquisadores foram publicados apresentando argumentos contrários, [15] e [3], e outros a favor desta teoria [16], [17], [18] e [19].

Budeanu também definiu em seu trabalho dois outros parâmetros que talvez pudessem ser de alguma utilidade no estudo de sistemas elétricos de potência. São eles:

Fator de Potência :

$$FP_B = \cos(\theta) = \frac{P_B}{S} \quad (2.103)$$

Fator de Deslocamento :

$$Fd_1 = \cos(\theta_1) = \frac{P_1}{S_1} \quad (2.104)$$

Onde:

$$S_1 = V_1 I_1 \quad (2.105)$$

Em [1], o fator de deslocamento é apresentado como na equação (2.106).

$$Fd_2 = \frac{P_B}{|S_{PQ}|} \quad (2.106)$$

Onde o termo no denominador da equação (2.106) é chamado de nova potência complexa, cujo cálculo pode ser efetuado como na equação (2.107).

$$\overline{S_{PQ}} = P_B + jQ_B \quad (2.107)$$

É importante notar que:

As equações acima tratam circuitos elétricos sobre condições não-senoidais como a soma de vários circuitos *independentes*, excitados em frequências diferentes. As potências calculadas não fornecem qualquer base consistente para o projeto de filtros passivos ou para controlar condicionadores ativos de potência [1].

2.3.1.2 Modelo de Fryze

No ano de 1932, o engenheiro eletricista polonês Stanislaw Fryze propôs um conjunto de definições de potência. Abaixo, pode-se ver as equações segundo as quais desenvolveu-se a proposição de Fryze:

Potência Ativa :

$$P_F = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} p(t) dt = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v(t)i(t) dt \quad (2.108)$$

Potência Aparente :

$$S = VI \quad (2.109)$$

Onde V e I são os valores rms dos sinais de tensão e corrente, definidos em (2.100) e (2.101), respectivamente.

Fator de Potência Ativa :

$$FP_F = \frac{P_F}{S} = \frac{P_F}{VI} \quad (2.110)$$

Potência Reativa :

$$Q_F = \sqrt{S^2 - P_F^2} \quad (2.111)$$

Em [8], a potência reativa definida em (2.111) é chamada de potência não-ativa (N). Trata-se, portanto, de todos os valores que não estejam incluídos na potência ativa. Ao ser feito um paralelo com as potências citadas na seção 2.3.1.1, nota-se que a potência não-ativa inclui em seu resultado a potência reativa de Budeanu e a potência de distorção, apresentadas pela Tabela 2.2.

Em uma primeira observação, parece não haver diferença entre as potência ativa e potência aparente, equações (2.108) e (2.109), respectivamente, e aquelas do modelo de Budeanu, mostradas na Tabela 2.2. Já a potência reativa Q_F , leva em consideração todas as porções da tensão e corrente que não contribuem para a formação da potência ativa, o que não ocorre no cálculo da potência reativa Q_B .

2.3.1.3 Norma IEEE 1459-2010

Considera-se que os sinais de tensão e corrente, equações (2.112) e (2.113), respectivamente, são formados por duas componentes.

$$v = v_1 + v_H \quad (2.112)$$

$$i = i_1 + i_H \quad (2.113)$$

Onde v_1 , (2.114), e i_1 , (2.115), são as componentes na frequência fundamental do sistema e, v_H , (2.116), e i_H , (2.117), as componentes nas frequências harmônicas.

$$v_1 = \sqrt{2}V_1 \text{sen}(\omega t - \alpha_1) \quad (2.114)$$

$$i_1 = \sqrt{2}I_1 \text{sen}(\omega t - \beta_1) \quad (2.115)$$

$$v_H = V_0 + \sqrt{2} \sum_{h>1} V_h \text{sen}(h\omega t - \alpha_h) \quad (2.116)$$

$$i_H = I_0 + \sqrt{2} \sum_{h>1} I_h \text{sen}(h\omega t - \beta_h) \quad (2.117)$$

Os termos V_0 e I_0 são as componentes DC que, segundo sugere a norma, devem ser incluídos nas componentes de frequências harmônicas.

Os valores rms quadráticos correspondentes são representados pelas equações (2.118) e (2.119).

$$V^2 = V_1^2 + V_H^2 \quad (2.118)$$

$$I^2 = I_1^2 + I_H^2 \quad (2.119)$$

A Distorção Harmônica Total THD (do inglês *Total Harmonic Distortion*) de Tensão e de Corrente podem ser calculados com base nas equações (2.120) e (2.121).

$$THD_V = \frac{V_H}{V_1} \quad (2.120)$$

$$THD_I = \frac{I_H}{I_1} \quad (2.121)$$

Onde V_H e I_H são calculados como em (2.122) e (2.123).

$$V_H^2 = V_0^2 + \sum_{h \neq 1} V_h^2 \quad (2.122)$$

$$I_H^2 = I_0^2 + \sum_{h \neq 1} I_h^2 \quad (2.123)$$

A **Potência Ativa** é dividida em duas componentes, equação (2.124). Baseando-se na potência ativa de Budeanu, mostrada na Tabela 2.2, define-se a **Potência Ativa Fundamental** e a **Potência Ativa Harmônica**, equações (2.125) e (2.126).

$$P = P_1 + P_H \quad (2.124)$$

$$P_1 = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v_1 i_1 dt = V_1 I_1 \cos(\theta_1) \quad (2.125)$$

$$P_H = V_0 I_0 + \sum_{h \neq 1} V_h I_h \cos(\theta_h) \quad (2.126)$$

A **Potência Reativa Fundamental** é definida como em (2.127).

$$Q_1 = \frac{\omega}{T} \int_t^{t+T} i_1 \left[\int v_1 dt \right] dt = V_1 I_1 \sin(\theta_1) \quad (2.127)$$

A **Potência Aparente** é representada por (2.128).

$$S = VI \quad (2.128)$$

Na norma IEEE 1459-2010, a potência aparente apresenta-se dividida em duas componentes, como mostrado em (2.129).

$$S^2 = S_1^2 + S_N^2 \quad (2.129)$$

Onde S_1 é a sua componente fundamental e S_N é a sua componente não-fundamental. A componente fundamental pode ser representada com base nos valores rms de tensão e corrente, (2.130), ou nos valores de potência ativa e reativa fundamentais, (2.131).

$$S_1 = V_1 I_1 \quad (2.130)$$

$$S_1^2 = P_1^2 + Q_1^2 \quad (2.131)$$

A potência aparente não-fundamental pode ser expressada pela equação (2.132).

$$S_N^2 = D_I^2 + D_V^2 + S_H^2 \quad (2.132)$$

Onde D_I é a **Potência de Distorção de Corrente**, D_V é a **Potência de Distorção de Tensão** e S_H é a **Potência Aparente Harmônica**. As expressões para estes parâmetros são (2.133), (2.134) e (2.135), respectivamente.

$$D_I = V_1 I_H = S_1 (THD_I) \quad (2.133)$$

$$D_V = V_H I_1 = S_1 (THD_V) \quad (2.134)$$

$$S_H = V_H I_H = S_1 (THD_I) (THD_V) = \sqrt{P_H^2 + D_H^2} \quad (2.135)$$

Onde D_H é a **Potência de Distorção Harmônica**, (2.136).

$$D_H = \sqrt{S_H^2 - P_H^2} \quad (2.136)$$

Define-se como **Potência Não-Ativa** a expressão (2.137).

$$N = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.137)$$

Percebe-se que se trata do mesmo valor computado pela potência reativa de Fryze, como na equação (2.111).

Dessa maneira, pode-se definir como **Fator de Potência** e **Fator de Potência Fundamental** as equações (2.138) e (2.139), respectivamente.

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2.138)$$

$$FP_1 = \cos(\theta_1) = \frac{P_1}{S_1} \quad (2.139)$$

Na Tabela 2.3 é feito um apanhado das quantidades e indicadores comentados nesta seção.

Tabela 2.3: Quantidades Relacionadas a Potência Definidas pela Norma IEEE 1459-2010 para Sistemas Monofásicos.

Quantidade ou Indicador	Combinado	Potências Fundamentais	Potências Não-Fundamentais		
Aparente	S (2.128)	S_1 (2.130)	S_N (2.132)	S_H (2.135)	
Ativa	P (2.124)	P_1 (2.125)	P_H (2.126)		
Não-Ativa	N (2.137)	Q_1 (2.127)	D_I (2.133)	D_V (2.134)	D_H (2.136)
Utilização da Linha	FP (2.138)	FP_1 (2.139)	—		

2.3.2 Caso Trifásico

Neste trecho, encontra-se o caso mais geral das ferramentas discutidas neste trabalho que podem ser utilizadas na medição de potência de sistemas elétricos trifásicos. São mostradas as abordagens da potência aparente vetorial e a potência aparente efetiva apresentada pela Norma IEEE 1459-2010.

2.3.2.1 Potência Aparente Vetorial Trifásica

A **Potência Aparente Vetorial Trifásica** $S_V^{3\phi}$ foi desenvolvida por [20] baseada na abordagem feita por Budeanu para o caso monofásico. Para tanto, a **Potência Ativa** $P^{3\phi}$ pode ser representada pela equação (2.140).

$$P^{3\phi} = P^A + P^B + P^C \quad (2.140)$$

Onde as potências ativas por fase, P^A, P^B e P^C são dadas pelas equações (2.141), (2.142) e (2.143), respectivamente.

$$P^A = \sum_h^{\eta} V_h^A I_h^A \cos(\theta_h^A) \quad (2.141)$$

$$P^B = \sum_h^{\eta} V_h^B I_h^B \cos(\theta_h^B) \quad (2.142)$$

$$P^C = \sum_h^{\eta} V_h^C I_h^C \cos(\theta_h^C) \quad (2.143)$$

De forma semelhante, tem-se a **Potência Reativa** $Q_B^{3\phi}$, equação (2.144).

$$Q_B^{3\phi} = Q_B^A + Q_B^B + Q_B^C \quad (2.144)$$

Onde as potências ativas por fase, Q_B^A, Q_B^B e Q_B^C são dadas pelas equações (2.145), (2.146) e (2.147), respectivamente.

$$Q_B^A = \sum_h^\eta V_h^A I_h^A \text{sen}(\theta_h^A) \quad (2.145)$$

$$Q_B^B = \sum_h^\eta V_h^B I_h^B \text{sen}(\theta_h^B) \quad (2.146)$$

$$Q_B^C = \sum_h^\eta V_h^C I_h^C \text{sen}(\theta_h^C) \quad (2.147)$$

A **Potência de Distorção** $D_B^{3\phi}$ é mostrada na equação (2.148).

$$D_B^{3\phi} = D_B^A + D_B^B + D_B^C \quad (2.148)$$

Onde as potências de distorção por fase, D_B^A, D_B^B e D_B^C são dadas pelas equações (2.149), (2.150) e (2.151), respectivamente.

$$D_B^A = \sqrt{\sum_{m=1}^{\eta-1} \sum_{n=m+1}^{\eta} [(V_m^A I_n^A)^2 + (V_n^A I_m^A)^2 - 2V_m^A I_n^A V_n^A I_m^A \cos(\theta_m^A - \theta_n^A)]} \quad (2.149)$$

$$D_B^B = \sqrt{\sum_{m=1}^{\eta-1} \sum_{n=m+1}^{\eta} [(V_m^B I_n^B)^2 + (V_n^B I_m^B)^2 - 2V_m^B I_n^B V_n^B I_m^B \cos(\theta_m^B - \theta_n^B)]} \quad (2.150)$$

$$D_B^C = \sqrt{\sum_{m=1}^{\eta-1} \sum_{n=m+1}^{\eta} [(V_m^C I_n^C)^2 + (V_n^C I_m^C)^2 - 2V_m^C I_n^C V_n^C I_m^C \cos(\theta_m^C - \theta_n^C)]} \quad (2.151)$$

Assim, tem-se a **Potência Aparente Vetorial Trifásica** $S_V^{3\phi}$, equação (2.152).

$$S_V^{3\phi} = \sqrt{(P^{3\phi})^2 + (Q_B^{3\phi})^2 + (D_B^{3\phi})^2} \quad (2.152)$$

O **Fator de Potência Vetorial Trifásico**, (2.153) utiliza em seu cálculo as potências ativa, equação (2.140), e aparente vetorial, (2.152).

$$FP_V^{3\phi} = \frac{P^{3\phi}}{S_V^{3\phi}} \quad (2.153)$$

Apesar do fato de ser uma técnica rejeitada por muitos engenheiros, grande parte dos instrumentos de medição das últimas duas décadas são baseados na potência aparente vetorial [5].

2.3.2.2 Corrente Efetiva e Tensão Efetiva

Adota-se um sistema desequilibrado com sinais não-senoidais, como o da Figura 2.13. Esse circuito é compensado e o circuito resultante da compensação é o mostrado na Figura 2.14, o qual possui correntes de sequência positiva perfeitamente senoidais I_e e uma corrente nula no condutor neutro. Admite-se que a perda de potência no sistema hipotético da Figura 2.14 é igual à perda do circuito real da Figura 2.13.

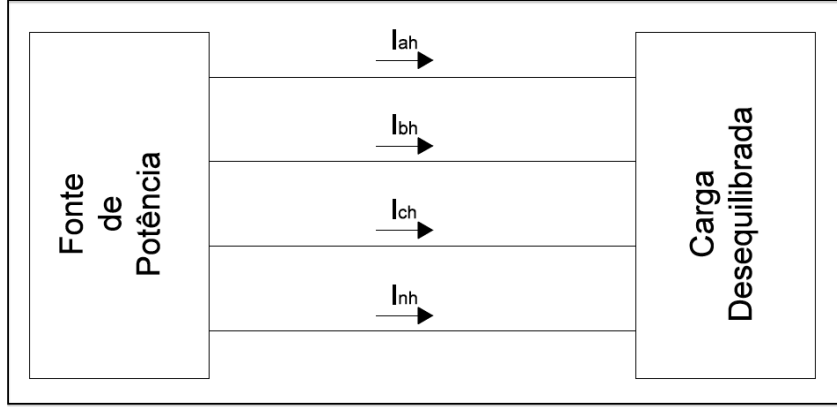


Figura 2.13: Circuito Desequilibrado com Sinais Não-Senoidais.

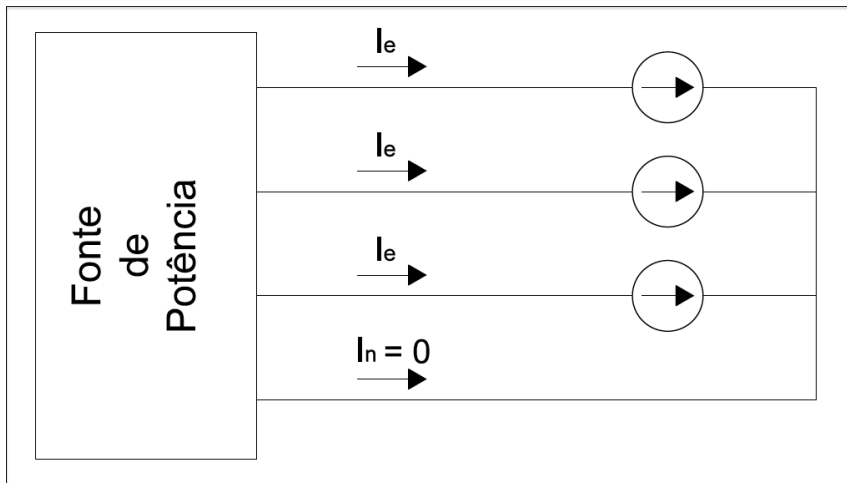


Figura 2.14: Circuito Equilibrado Hipotético com Correntes Perfeitamente Senoidais.

Matematicamente, tem-se a relação (2.154) entre os dois circuitos.

$$3r_e I_e^2 = r_{dc} \sum_h K_{sh} (I_{ah}^2 + I_{bh}^2 + I_{ch}^2) + r_{ndc} \sum_h K_{snh} I_{nh}^2 \quad (2.154)$$

Onde:

K_{sh} e K_{snh} são os coeficientes combinados dos efeitos pelicular e de proximidade da h-ésima ordem harmônica para os condutores de linha e para o condutor neutro, respectivamente;

r_{dc} e r_{ndc} são as resistências DC dos condutores de linha e do condutor neutro, respectivamente;

K_{s1} é o coeficiente combinado do efeito pelicular e de proximidade na frequência fundamental; e

$r_e = K_{s1}r_{dc}$ é a resistência equivalente do circuito hipotético.

A partir da equação (2.154) pode-se obter a **Corrente Efetiva** I_e , equação (2.155).

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_h \left[\frac{K_{sh}}{K_{s1}} (I_{ah}^2 + I_{bh}^2 + I_{ch}^2) + \frac{K_{snh}}{K_{s1}} \frac{r_{ndc}}{r_{dc}} I_{nh}^2 \right]} \quad (2.155)$$

A corrente efetiva possui duas componentes ortogonais, como apresentado na equação (2.156).

$$I_e = \sqrt{I_{e1}^2 + I_{eH}^2} \quad (2.156)$$

A contribuição das correntes fundamentais pode ser representada pela equação (2.157).

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{1}{3} [(I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2) + \rho_1 I_{n1}^2]}; \quad \rho_1 = \frac{K_{sn1}}{K_{s1}} \frac{r_{ndc}}{r_{dc}} \quad (2.157)$$

A contribuição das correntes harmônicas pode ser representada pela equação (2.158).

$$I_{eH} = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{k \neq 1} [K_h (I_{ah}^2 + I_{bh}^2 + I_{ch}^2) + \rho_h I_{nh}^2]}; \quad K_h = \frac{K_{sh}}{K_{s1}} \quad e \quad \rho_h = \frac{K_{snh}}{K_{s1}} \frac{r_{ndc}}{r_{dc}} \quad (2.158)$$

A norma IEEE 1459-2010 recomenda a utilização dos valores $\rho_1 = \rho_h = K_h = 1$. Esses valores implicam na simplificação das expressões para a corrente efetiva mostradas em (2.155), (2.157) e (2.158), levando às equações (2.159), (2.160) e (2.161), respectivamente.

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{3} (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2)} \quad (2.159)$$

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{1}{3} (I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2 + I_{n1}^2)} \quad (2.160)$$

$$I_{eH} = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{H \neq 1} (I_{aH}^2 + I_{bH}^2 + I_{cH}^2 + I_{nH}^2)} \quad (2.161)$$

Utiliza-se o mesmo procedimento comentado na seção 2.2.3.7 para a definição da tensão efetiva, com base nas Figuras 2.9, 2.10, 2.11 e 2.12. Dessa forma, a potência ativa da carga, dada por (2.86), pode ser reescrita como em (2.162).

$$\frac{\sum_h (V_{ah}^2 + V_{bh}^2 + V_{ch}^2)}{R_Y} + \frac{\sum_h (V_{abh}^2 + V_{bch}^2 + V_{cah}^2)}{R_{\Delta}} = 3 \frac{V_e^2}{R_Y} + 9 \frac{V_e^2}{R_{\Delta}} \quad (2.162)$$

A partir da expressão (2.159) é possível obter a **Tensão Efetiva** V_e , equação (2.163).

$$V_e = \sqrt{\frac{3 \sum_h (V_{ah}^2 + V_{bh}^2 + V_{ch}^2) + \xi \sum_h (V_{abh}^2 + V_{bch}^2 + V_{cah}^2)}{9(1 + \xi)}} \quad (2.163)$$

Onde:

$$\xi = \frac{P_\Delta}{P_Y} = \frac{9V_e^2}{R_\Delta} \frac{R_Y}{3V_e^2} = 3 \frac{R_Y}{R_\Delta} \quad (2.164)$$

A separação da tensão efetiva em componentes fundamental, equação (2.166), e harmônicas, (2.167), pode ser representada por (2.165).

$$V_e^2 = V_{e1}^2 + V_{eH}^2 \quad (2.165)$$

Onde:

$$V_{e1} = \sqrt{\frac{3(V_{a1}^2 + V_{b1}^2 + V_{c1}^2) + \xi(V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2)}{9(1 + \xi)}} \quad (2.166)$$

$$V_{eH} = \sqrt{\frac{3 \sum_{h \neq 1} (V_{ah}^2 + V_{bh}^2 + V_{ch}^2) + \xi_h \sum_{h \neq 1} (V_{abh}^2 + V_{bch}^2 + V_{cah}^2)}{9(1 + \xi_h)}} \quad (2.167)$$

Utilizando-se a recomendação da Norma IEEE 1459-2010 de considerar que a potência dissipada devido às cargas conectadas em delta é igual à potência dissipada devido às cargas conectadas em estrela, ou seja, $\xi = 1$, tem-se a simplificação de V_{e1} e V_{eH} como mostrado pelas equações (2.168) e (2.169).

$$V_{e1} = \sqrt{\frac{3(V_{a1}^2 + V_{b1}^2 + V_{c1}^2) + (V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2)}{18}} \quad (2.168)$$

$$V_{eH} = \sqrt{\frac{3 \sum_{h \neq 1} (V_{ah}^2 + V_{bh}^2 + V_{ch}^2) + \sum_{h \neq 1} (V_{abh}^2 + V_{bch}^2 + V_{cah}^2)}{18}} \quad (2.169)$$

2.3.2.3 Distorção Harmônica Equivalente Total

Define-se, em (2.170) e (2.171), as distorções harmônicas equivalentes totais, para tensão e corrente, respectivamente.

$$THD_{eV} = \frac{V_{eH}}{V_{e1}} \quad (2.170)$$

$$THD_{eI} = \frac{I_{eH}}{I_{e1}} \quad (2.171)$$

2.3.2.4 Potência Aparente Efetiva

A **Potência Aparente Efetiva** S_e é apresentada pela equação (2.172).

$$S_e^2 = S_{e1}^2 + S_{eN}^2 \quad (2.172)$$

Onde S_{e1} é sua componente fundamental, equação (2.173), S_{eN} é sua componente não-fundamental, equação (2.174).

$$S_{e1} = 3V_{e1}I_{e1} \quad (2.173)$$

$$S_{eN} = \sqrt{D_{eI}^2 + D_{eV}^2 + S_{eH}^2} \quad (2.174)$$

Onde D_{eI} é a potência de distorção de corrente, D_{eV} a potência de distorção de tensão e, S_{eH} a potência aparente harmônica, representadas pelas equações (2.175), (2.176) e (2.177), respectivamente.

$$D_{eI} = S_{e1}(THD_{eI}) = 3V_{e1}I_{eH} \quad (2.175)$$

$$D_{eV} = S_{e1}(THD_{eV}) = 3V_{eH}I_{e1} \quad (2.176)$$

$$S_{eH} = S_{e1}(THD_{eV})(THD_{eI}) = 3V_{eH}I_{eH} = \sqrt{D_{eH}^2 + P_{eH}^2} \quad (2.177)$$

Onde D_{eH} é a **Potência de Distorção Harmônica**, (2.178).

$$D_{eH} = \sqrt{S_{eH}^2 - P_{eH}^2} \quad (2.178)$$

Onde P_{eH} , (2.179), é a **Potência Ativa Efetiva Harmônica**, cujo cálculo tem como base as potências ativas por fase citadas na seção 2.3.2.1.

$$P_{eH} = \sum_{\substack{h=0 \\ h \neq 1}}^{\eta} V_h^A I_h^A \cos(\theta_h) + \sum_{\substack{h=0 \\ h \neq 1}}^{\eta} V_h^B I_h^B \cos(\theta_h) + \sum_{\substack{h=0 \\ h \neq 1}}^{\eta} V_h^C I_h^C \cos(\theta_h) \quad (2.179)$$

2.3.2.5 Potência Ativa

A **Potência Ativa** é dada pela equação (2.180), cujo cálculo é feito com base nas potências ativas por fase citadas na seção 2.3.2.1.

$$P = \sum_{h=0}^{\eta} V_h^A I_h^A \cos(\theta_h) + \sum_{h=0}^{\eta} V_h^B I_h^B \cos(\theta_h) + \sum_{h=0}^{\eta} V_h^C I_h^C \cos(\theta_h) \quad (2.180)$$

2.3.2.6 Fator de Potência Efetivo

O **Fator de Potência Efetivo** FP_e para o caso de sistemas trifásicos desequilibrados e não-senoidais, pode ser representado pela equação (2.181).

$$FP_e = \frac{P}{S_e} \quad (2.181)$$

2.3.2.7 Potência Não-Ativa

A **Potência Não-Ativa** N para o caso trifásico em condições não-senoidais é representada pela equação (2.182), com base no valor da potência ativa dado por (2.180) e da potência aparente efetiva dada por (2.185).

$$N = \sqrt{S_e^2 - P^2} \quad (2.182)$$

2.3.2.8 Potência em Componentes Simétricas

Se o sistema trifásico está desequilibrado e, além disso, possui componentes harmônicas em seus sinais, pode ser útil a utilização da transformação em componentes simétricas e utilização da sequência positiva na frequência fundamental da rede. Dessa forma, tem-se as potências ativa, reativa e aparente fundamentais expressas em (2.183), (2.184) e (2.185), respectivamente.

$$P_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \cos(\theta_1^+) \quad (2.183)$$

$$Q_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \sen(\theta_1^+) \quad (2.184)$$

$$S_1^+ = \sqrt{(P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2} \quad (2.185)$$

E, por conseguinte, o fator de potência fundamental de sequência positiva, como na equação (2.186).

$$FP_1^+ = \frac{P_1^+}{S_1^+} \quad (2.186)$$

Na Tabela 2.4 é apresentado um resumo das quantidades e indicadores comentados nesta seção.

Tabela 2.4: Quantidades Relacionadas a Potência Definidas pela Norma IEEE 1459-2010 para Sistemas Trifásicos em Condições Não-Senoidais.

Quantidade ou Indicador	Combinado	Potências Fundamentais		Potências Não-Fundamentais		
Aparente	S_e (2.172)	S_{e1} (2.173)	S_1^+ (2.185)	S_{eN} (2.174)	S_{eH} (2.177)	
Ativa	P (2.180)	P_1^+ (2.183)		P_{eH} (2.179)		
Não-Ativa	N (2.182)	Q_1^+ (2.184)		D_{eI} (2.175)	D_{eV} (2.176)	D_{eH} (2.178)
Utilização da Linha	FP_e (2.181)	FP_1^+ (2.186)		—		

2.4 Definições de Potência no Brasil

No Brasil, a legislação pertinente ao faturamento do excedente de energia reativa é disposta pela Resolução Normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) n° 414 de setembro de 2010 [21]. Nesta resolução, são definidos o fator de potência e as energias ativa e reativa:

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

Além disso, são estipulados os limites mínimos permitidos para o fator de potência como sendo 0,92 capacitivo no período compreendido entre 23 h e 30 min e 6 h e 30 min; e 0,92 indutivo durante o período diário complementar.

Em 2008, os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (PRODIST) [22], em seu Módulo 8, definiram que o fator de potência poderia, além do que ficou estabelecido na Resolução n° 414, também ser calculado através das potências ativa e reativa. Dessa forma, as expressões (2.187) e (2.188) podem ser utilizadas para a determinação do fator de potência.

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (2.187)$$

$$fp = \frac{E_{ativa}}{\sqrt{E_{ativa}^2 + E_{reativa}^2}} \quad (2.188)$$

Além disso, o PRODIST define os conceitos de potência aparente, ativa e reativa, cujo texto é transcrito abaixo:

- **Potência aparente:** *correspondente ao produto entre tensão eficaz e corrente eficaz em um dipolo elétrico. Para sistemas bifásicos ou trifásicos utiliza-se a composição entre as fases. Representa a "utilização" do sistema elétrico, equivalente à potência média que seria transmitida para tensões e correntes senoidais e em fase - carga resistiva equivalente, simplificada levanto às mesmas perdas joule no sistema.*
- **Potência ativa:** *Energia total consumida/fornecida durante determinado intervalo de tempo - que produz trabalho, dividida pelo próprio tempo, expressa em watts (W) e seus múltiplos.*
- **Potência reativa:** *Definida como a raiz quadrada da diferença dos quadrados da potência aparente e da potência ativa, expressa em volt-ampères reativos (var) e seus múltiplos.*

Capítulo 3

Materiais e Métodos

3.1 Considerações Iniciais

O propósito deste capítulo é apresentar as simulações computacionais necessárias para analisar o comportamento de cada quantidade e indicador citados no capítulo 2, quando da presença de distúrbios nos sinais avaliados.

As rotinas computacionais são divididas em duas etapas: na Simulação 1, tem-se o estudo do caso monofásico na presença de distorções harmônicas; enquanto que, na Simulação 2, aborda-se o caso trifásico não-senoidal.

Para tanto, utiliza-se o software MATLAB® para a elaboração dos métodos computacionais que fornecem os valores a serem comparados. Os códigos para estes métodos podem ser encontrados no Apêndice deste trabalho.

3.2 Simulação 1 - Caso Monofásico Não-Senoidal

A Simulação 1 consiste no cálculo dos parâmetros definidos na seção 2.3.1, para sinais monofásicos onde tem-se a presença de harmônicas. Esta simulação é dividida em duas partes:

Na primeira parte, pretende-se observar o nível de variação dos valores apresentados pelos parâmetros definidos por Budeanu, seção 2.3.1.1; por Fryze, seção 2.3.1.2; e pela Norma IEEE 1459-2010, seção 2.3.1.3. São selecionados três níveis de distorção harmônica total de tensão, a saber: 5, 15 e 30%. Para cada nível, são abordados três casos diferentes de distorção harmônica, em que são variadas as amplitudes de cada componente harmônica do sinal de tensão. Os casos são mostrados detalhadamente na Tabela 3.1. O valor eficaz da componente fundamental do sinal de tensão aplicado é $220 V_{rms}$ e todas as componentes harmônicas estão em fase com a componente fundamental.

Para alcançar os valores apresentados na Tabela 3.1, foi feita uma distribuição ponderada para cada componente, tal que, para o Caso 1, a segunda harmônica tem peso 3, a terceira tem peso 6, a quarta tem peso 2, a quinta tem peso 5, a sexta tem peso 1 e a sétima tem peso 4. Para o

Caso 2, a segunda harmônica tem peso 3, a quarta tem peso 2 e a sexta tem peso 1. No Caso 3, a terceira harmônica tem peso 3, a quinta tem peso 2 e a sétima tem peso 1.

Tabela 3.1: Casos de Distorção Harmônica para a Simulação 1.

(a) 5% de THD_V .

Caso	Tensão (V_{rms})					
	2°	3°	4°	5°	6°	7°
1	4,16	5,88	3,39	5,37	2,40	4,80
2	7,78	0	6,35	0	4,49	0
3	0	7,78	0	6,35	0	4,49

(b) 15% de THD_V .

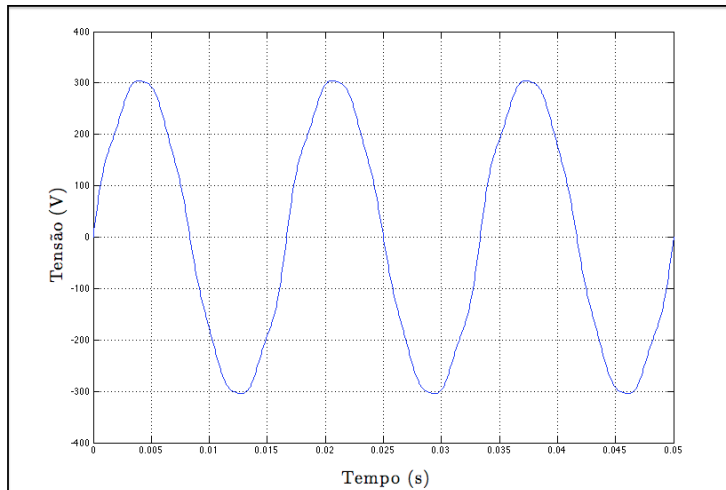
Caso	Tensão (V_{rms})					
	2°	3°	4°	5°	6°	7°
1	12,47	17,64	10,18	16,10	7,20	14,40
2	23,33	0	19,05	0	13,47	0
3	0	23,33	0	19,05	0	13,47

(c) 30% de THD_V .

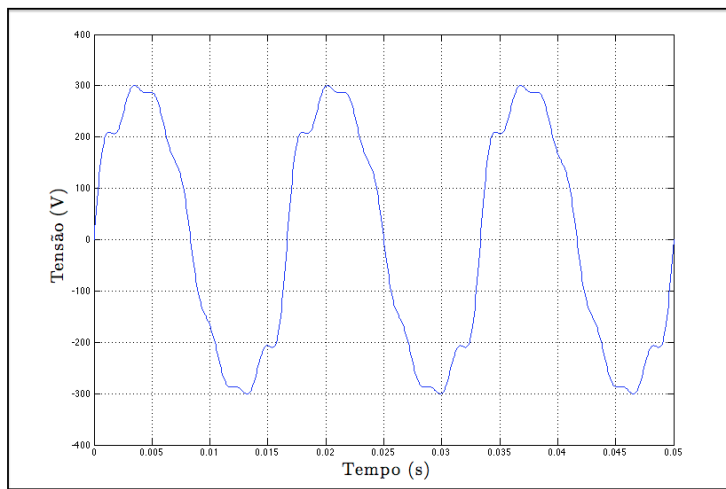
Caso	Tensão (V_{rms})					
	2°	3°	4°	5°	6°	7°
1	24,95	35,28	20,36	32,21	14,40	28,81
2	46,67	0	38,10	0	26,95	0
3	0	46,67	0	38,10	0	26,95

Da Tabela 3.1, pode ser visto que no Caso 1 a distorção harmônica total da tensão é distribuída em todas as componentes da segunda à sétima ordens. Para o Caso 2, tem-se apenas componentes de ordem par compondo a THD_V . E, para o Caso 3, há apenas componentes harmônicas de ordem ímpar. O cálculo da distorção harmônica total de tensão pode ser efetuado como na equação (2.120).

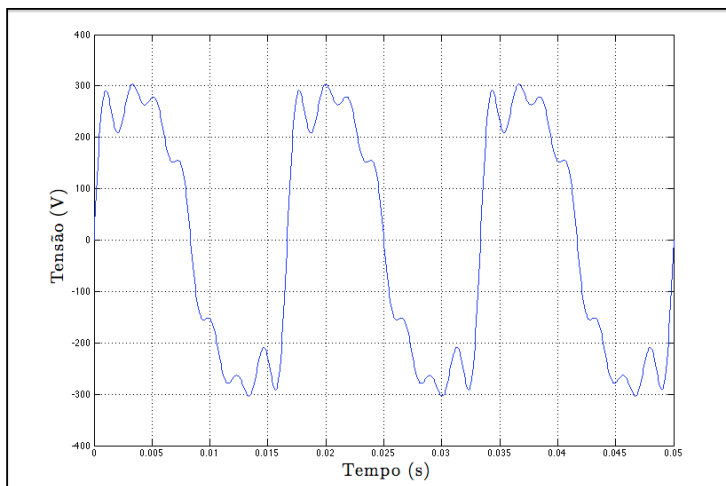
As Figuras 3.1, 3.2 e 3.3, mostram os sinais de tensão com 5, 15 e 30% de THD_V , respectivamente, para cada um dos casos citados na Tabela 3.1



(a) 5% de THD_V .

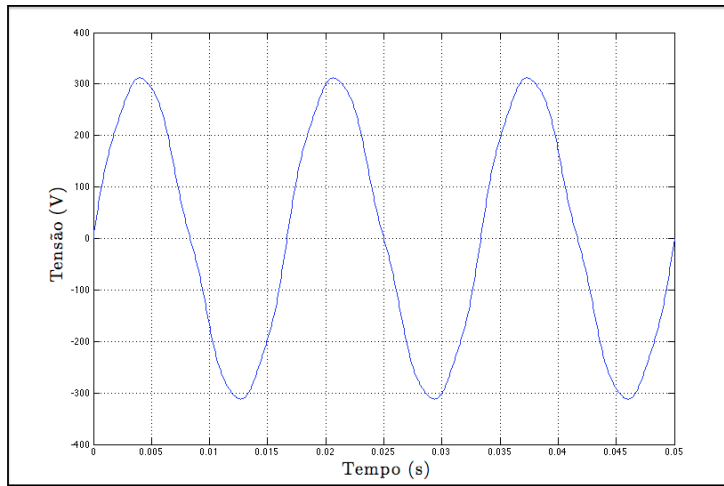


(b) 15% de THD_V .

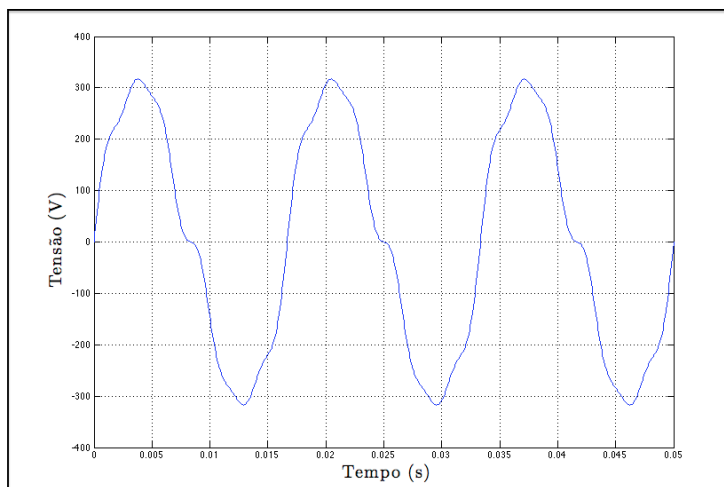


(c) 30% de THD_V .

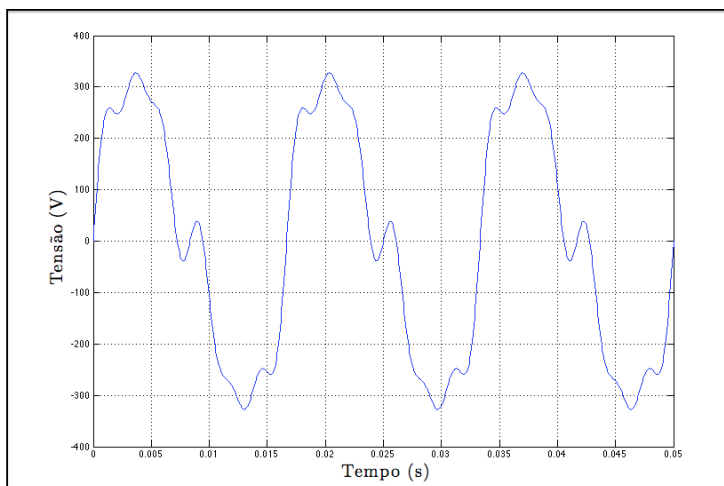
Figura 3.1: Sinais de Tensão Utilizados para o Caso 1.



(a) 5% de THD_V .

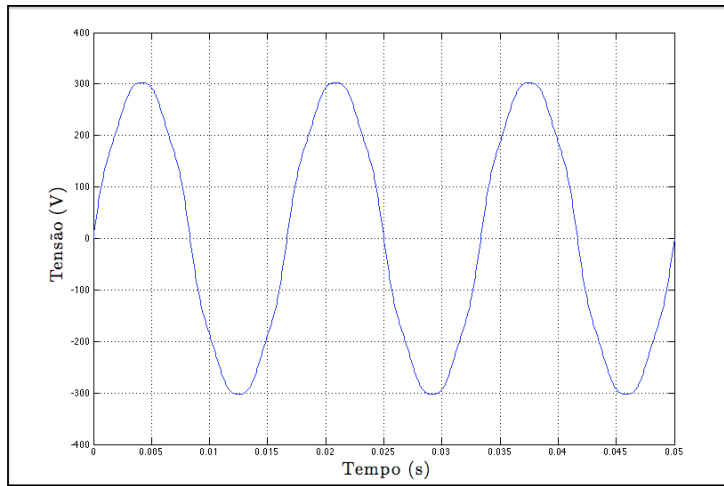


(b) 15% de THD_V .

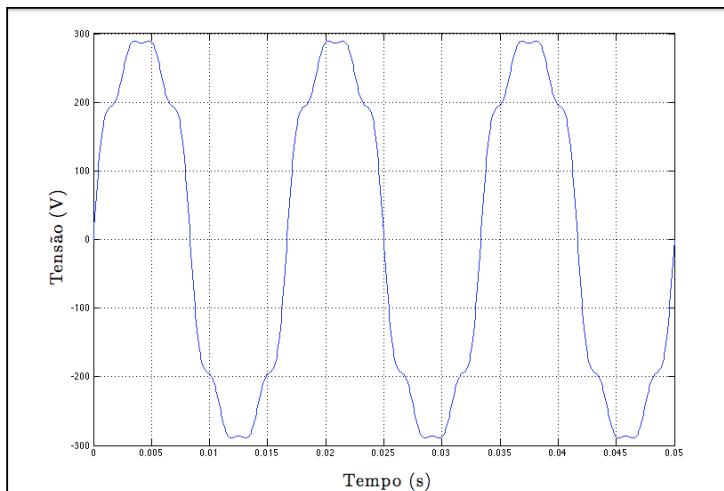


(c) 30% de THD_V .

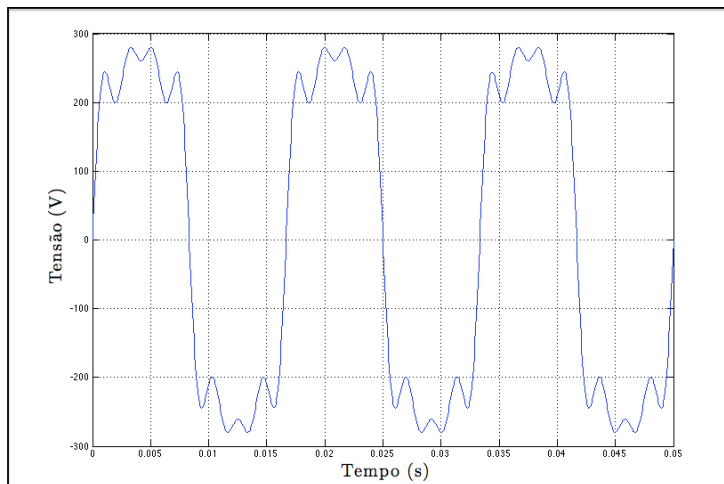
Figura 3.2: Sinais de Tensão Utilizados para o Caso 2.



(a) 5% de THD_V .



(b) 15% de THD_V .



(c) 30% de THD_V .

Figura 3.3: Sinais de Tensão Utilizados para o Caso 3.

O circuito, ao qual são aplicados os sinais de tensão apresentados, encontra-se na Figura 3.4.

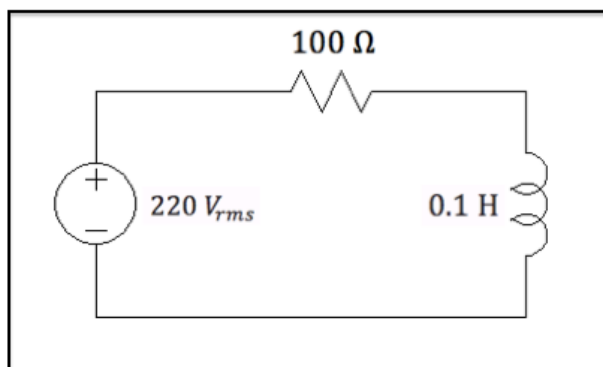


Figura 3.4: Circuito da Primeira Parte da Simulação 1.

Na segunda parte, é observado o comportamento das potências reativas e não-ativa e dos fatores de potência e de deslocamento para cada condição de distorção harmônica descrita anteriormente na Tabela 3.1. Também é feita uma análise das discrepâncias percentuais apresentadas pelas potências reativas e não-ativa.

O circuito utilizado nesta etapa é também o exibido na Figura 3.4. O valor eficaz da componente fundamental do sinal de tensão aplicado é $220 V_{rms}$.

As Tabelas 3.2, 3.3 e 3.4 mostram os parâmetros utilizados nos cálculos desta simulação, pelos modelos de Budeanu, Fryze e da Norma IEEE 1459-2010, respectivamente.

Tabela 3.2: Parâmetros do Modelo de Budeanu.

Potência Ativa	P_B	$\sum_{h=1}^{\eta} V_h I_h \cos(\theta_h)$
Potência Reativa	Q_B	$\sum_{h=1}^{\eta} V_h I_h \sin(\theta_h)$
Potência de Distorção	D_B	$\sqrt{\sum_{m=1}^{\eta-1} \sum_{n=m+1}^{\eta} [(V_m I_n)^2 + (V_n I_m)^2 - 2V_m I_n V_n I_m \cos(\theta_m - \theta_n)]}$
Potência Aparente	S	$\sqrt{P_B^2 + Q_B^2 + D_B^2}$
Fator de Potência de Budeanu	FP_B	$\frac{P_B}{S}$
Fator de Deslocamento 1	Fd_1	$\frac{P_1}{S_1}$
Fator de Deslocamento 2	Fd_2	$\frac{P_B}{\sqrt{P_B^2 + Q_B^2}}$

Tabela 3.3: Parâmetros do Modelo de Fryze.

Potência Ativa	P_F	$\frac{1}{T} \int_t^{t+T} v(t)i(t)dt$
Potência Reativa	Q_F	$\sqrt{S^2 - P_F^2}$
Potência Aparente	S	VI
Fator de Potência de Fryze	FP_F	$\frac{P_F}{S}$

Tabela 3.4: Parâmetros do Modelo da Norma IEEE 1459-2010.

Potência Ativa Fundamental	P_1	$V_1 I_1 \cos(\theta_1)$
Potência Ativa Harmônica	P_H	$V_0 I_0 + \sum_{h \neq 1} V_h I_h \cos(\theta_h)$
Potência Ativa	P	$P_1 + P_H$
Potência Reativa Fundamental	Q_1	$V_1 I_1 \sin(\theta_1)$
Potência Não-Ativa	N	$\sqrt{S^2 - P^2}$
Potência de Distorção de Corrente	D_I	$S_1(DHT_I)$
Potência de Distorção de Tensão	D_V	$S_1(DHT_V)$
Potência de Distorção Harmônica	D_H	$\sqrt{S_H^2 - P_H^2}$
Potência Aparente Fundamental	S_1	$V_1 I_1$
Potência Aparente	S	VI
Potência Aparente Não-Fundamental	S_N	$\sqrt{D_I^2 + D_V^2 + S_H^2}$
Potência Aparente Harmônica	S_H	$S_1(DHT_I)(DHT_V)$
Fator de Potência	FP	$\frac{P}{S}$
Fator de Potência Fundamental	FP_1	$\frac{P_1}{S_1}$

3.3 Simulação 2 - Caso Trifásico Não-Senoidal Equilibrado

O objetivo da Simulação 2 é possibilitar um melhor entendimento das definições apresentadas na seção 2.3.2. Para isso, são simuladas rotinas semelhantes às da seção 3.2 com o intuito de compreender o comportamento das quantidades e indicadores mencionados para o caso trifásico com sinais não senoidais. Esta simulação divide-se em três partes:

Na primeira parte, são escolhidos três níveis de distorção harmônica total equivalente do sinal de tensão (THD_{eV}): 5, 15 e 30%. Para o cálculo dessa distorção são consideradas as três fases simultaneamente e, portanto, adota-se uma distribuição proporcional das amplitudes de cada componente harmônica entre as fases para compor a THD_{eV} . Com esta simulação, objetiva-se disponibilizar dados para uma discussão sobre a relevância dessas variações no que concerne à medição de potência em sistemas trifásicos. Nas Tabelas 3.5, 3.6 e 3.7, são apresentados os casos para a primeira parte da simulação. Ressalta-se que todas as componentes harmônicas estão em fase com a componente fundamental.

Para alcançar os valores apresentados nas Tabelas 3.5, 3.6 e 3.7, foi feita uma distribuição ponderada para cada componente, tal que, para o Caso 1, a segunda harmônica tem peso 3, a terceira tem peso 6, a quarta tem peso 2, a quinta tem peso 5, a sexta tem peso 1 e a sétima tem peso 4. Para o Caso 2, a segunda harmônica tem peso 3, a quarta tem peso 2 e a sexta tem peso 1. No Caso 3, a terceira harmônica tem peso 3, a quinta tem peso 2 e a sétima tem peso 1.

Tabela 3.5: Distorção Harmônica para a Simulação 2 - Caso 1.

Fase	Tensão (V_{rms})					
	2°	3°	4°	5°	6°	7°
5% THD_{eV}						
a	2,94	4,16	2,40	3,79	1,70	3,39
b	2,94	4,16	2,40	3,79	1,70	3,39
c	2,94	4,16	2,40	3,79	1,70	3,39
15% THD_{eV}						
a	8,82	12,48	7,20	11,39	5,05	10,19
b	8,82	12,48	7,20	11,39	5,05	10,19
c	8,82	12,48	7,20	11,39	5,05	10,19
30% THD_{eV}						
a	17,64	24,94	14,40	22,77	10,18	20,37
b	17,64	24,94	14,40	22,77	10,18	20,37
c	17,64	24,94	14,40	22,77	10,18	20,37

Tabela 3.6: Distorção Harmônica para a Simulação 2 - Caso 2.

Fase	Tensão (V_{rms})					
	2°	3°	4°	5°	6°	7°
5% THD_{eV}						
a	5,50	0	4,49	0	3,18	0
b	5,50	0	4,49	0	3,18	0
c	5,50	0	4,49	0	3,18	0
15% THD_{eV}						
a	16,51	0	13,48	0	9,53	0
b	16,51	0	13,48	0	9,53	0
c	16,51	0	13,48	0	9,53	0
30% THD_{eV}						
a	33,00	0	26,94	0	19,05	0
b	33,00	0	26,94	0	19,05	0
c	33,00	0	26,94	0	19,05	0

Tabela 3.7: Distorção Harmônica para a Simulação 2 - Caso 3.

Fase	Tensão (V_{rms})					
	2°	3°	4°	5°	6°	7°
5% THD_{eV}						
a	0	5,50	0	4,49	0	3,18
b	0	5,50	0	4,49	0	3,18
c	0	5,50	0	4,49	0	3,18
15% THD_{eV}						
a	0	16,51	0	13,48	0	9,53
b	0	16,51	0	13,48	0	9,53
c	0	16,51	0	13,48	0	9,53
30% THD_{eV}						
a	0	33,00	0	26,94	0	19,05
b	0	33,00	0	26,94	0	19,05
c	0	33,00	0	26,94	0	19,05

No Caso 1, mostrado na Tabela 3.5, a distorção harmônica do sinal de tensão aparece dispersa em componentes pares e ímpares, em cada uma das fases. No Caso 2, Tabela 3.6, a distorção harmônica é composta apenas pelas componentes *pares* mais relevantes, coincidentes nas três fases,

ou seja, as mesmas componentes harmônicas aparecem igualmente distribuídas nas fases a , b e c . Da Tabela 3.7, vê-se que, no Caso 3, o distúrbio é semelhante ao do Caso 2, porém, contendo apenas componentes harmônicas *ímpares*.

O circuito utilizado na primeira parte desta simulação pode ser visto na Figura 3.5 e, os respectivos valores de seus componentes, na frequência fundamental (60 Hz), são apresentados na Tabela 3.8.

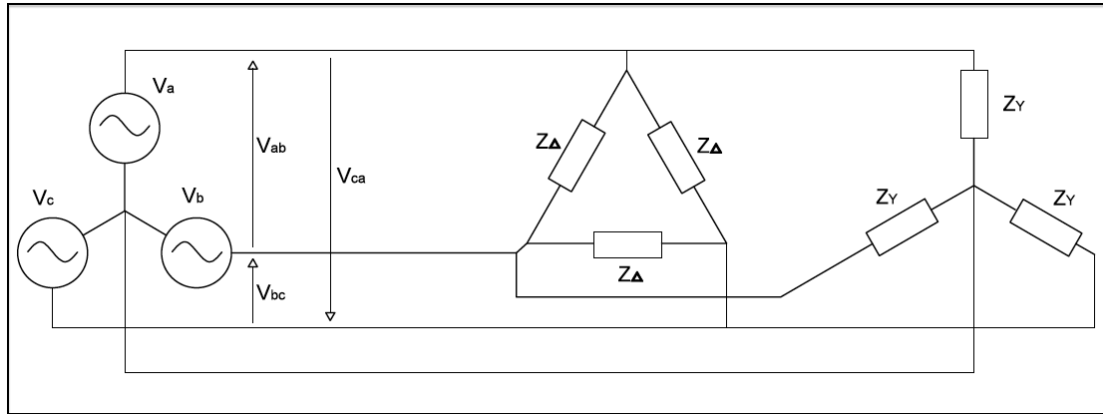
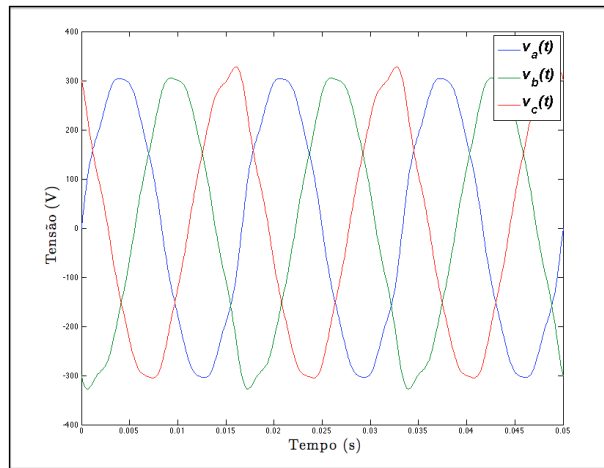


Figura 3.5: Circuito Utilizado na Simulação 2.

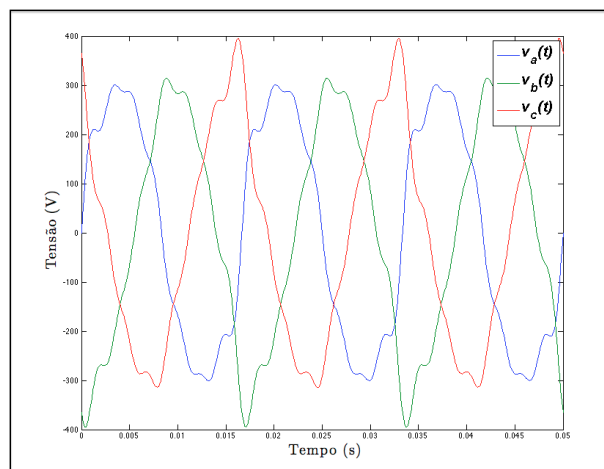
Tabela 3.8: Parâmetros do Circuito da Primeira Parte da Simulação 2.

Parâmetro	Valor
V_a	$220 V_r.ms$
V_b	$220 V_r.ms$
V_c	$220 V_r.ms$
ϕ_a	0°
ϕ_b	-120°
ϕ_c	120°
Z_Δ	$300 + j147,03 \Omega$
Z_Y	$100 + j49,01 \Omega$

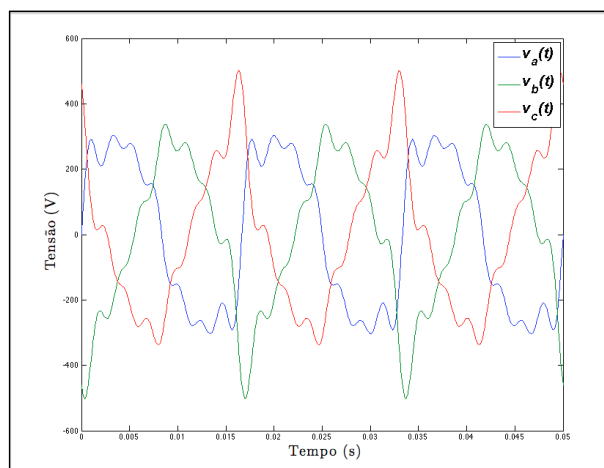
Os sinais de tensão formados pelos dados apresentados nas Tabelas 3.5, 3.6 e 3.7 são mostrados nas Figuras 3.6, 3.7 e 3.8, respectivamente.



(a) 5% de THD_{eV} .

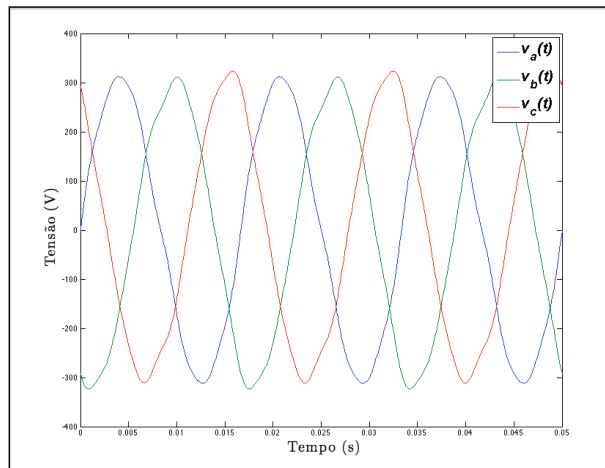


(b) 15% de THD_{eV} .

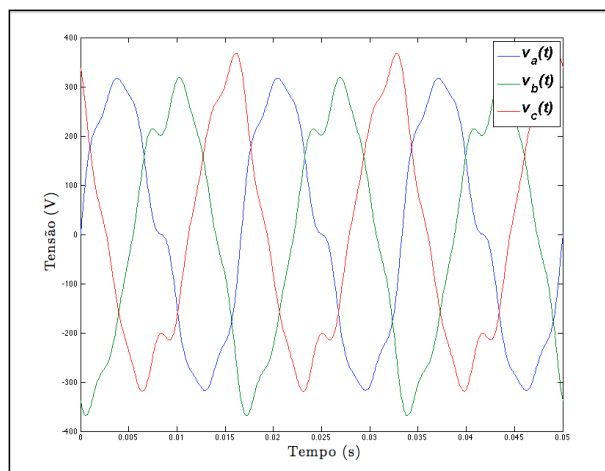


(c) 30% de THD_{eV} .

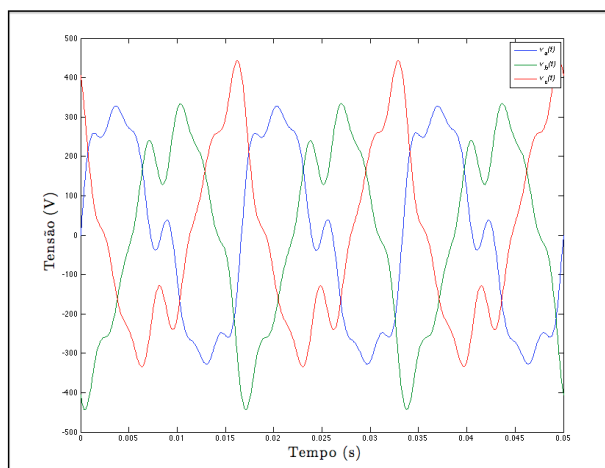
Figura 3.6: Sinais de Tensão Utilizados para o Caso 1.



(a) 5% de THD_{eV} .

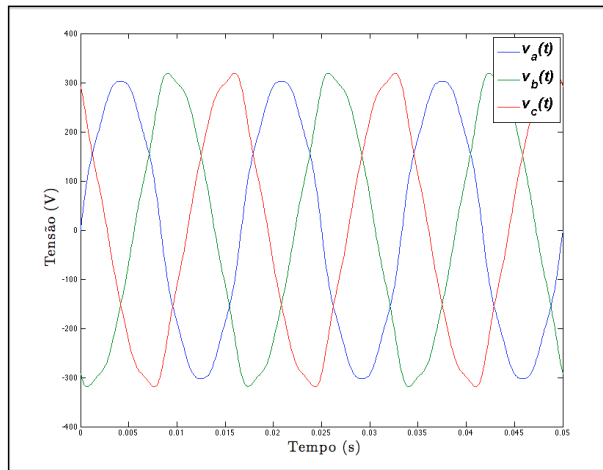


(b) 15% de THD_{eV} .

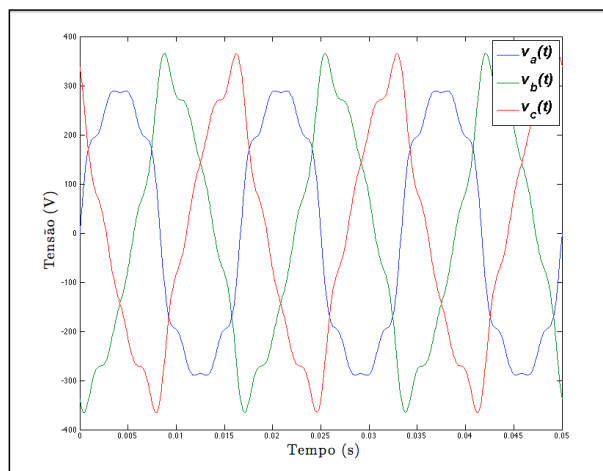


(c) 30% de THD_{eV} .

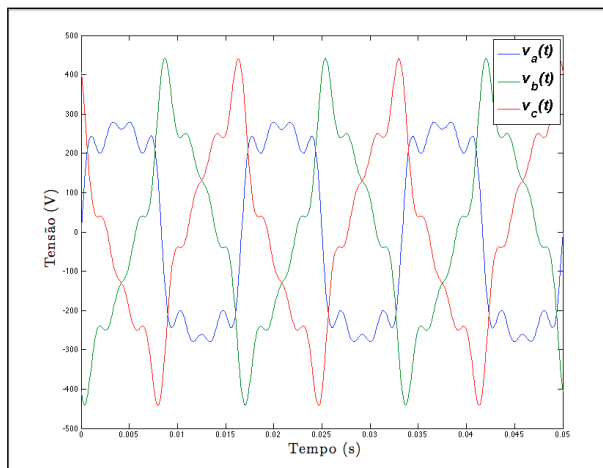
Figura 3.7: Sinais de Tensão Utilizados para o Caso 2.



(a) 5% de THD_{eV} .



(b) 15% de THD_{eV} .



(c) 30% de THD_{eV} .

Figura 3.8: Sinais de Tensão Utilizados para o Caso 3.

Na segunda parte, utilizando os mesmos sinais de tensão discutidos na seção 4.3.1, é observado o comportamento das potências reativas e não-ativa e dos fatores de potência mencionados para o caso trifásico não-senoidal, seção 2.3.2. Além disso, é feita uma análise das discrepâncias percentuais observadas entre as potências reativas e a não-ativa.

O circuito utilizado nesta etapa da simulação é aquele da Figura 3.5, cujos parâmetros encontram-se na Tabela 3.8.

As Tabelas 3.9, 3.10, 3.11 e 3.12 mostram as quantidades e os indicadores utilizados nas rotinas computacionais da Simulação 2.

Tabela 3.9: Potências Ativas - Simulação 2.

Potência Ativa (Curtis e Silsbee)	$P^{3\phi}$	$P^A + P^B + P^C$
Potência Ativa (IEEE)	P	$\sum_{h=0}^{\eta} V_h^A I_h^A \cos(\theta_h) + \sum_{h=0}^{\eta} V_h^B I_h^B \cos(\theta_h) + \sum_{h=0}^{\eta} V_h^C I_h^C \cos(\theta_h)$
Potência Ativa Fundamental (Componentes Simétricas)	P_1^+	$3V_1^+ I_1^+ \cos(\theta_1^+)$
Potência Ativa Efetiva Harmônica	P_{eH}	$\sum_{\substack{h=0 \\ h \neq 1}}^{\eta} V_h^A I_h^A \cos(\theta_h) + \sum_{\substack{h=0 \\ h \neq 1}}^{\eta} V_h^B I_h^B \cos(\theta_h) + \sum_{\substack{h=0 \\ h \neq 1}}^{\eta} V_h^C I_h^C \cos(\theta_h)$

Tabela 3.10: Potências Não-Ativas - Simulação 2.

Potência Não-Ativa	N	$\sqrt{S_e^2 - P^2}$
Potência Reativa (Curtis e Silsbee)	$Q_B^{3\phi}$	$Q_B^A + Q_B^B + Q_B^C$
Potência Reativa Fundamental (Componentes Simétricas)	Q_1^+	$3V_1^+ I_1^+ \text{sen}(\theta_1^+)$
Potência de Distorção (Curtis e Silsbee)	$D_B^{3\phi}$	$D_B^A + D_B^B + D_B^C$
Potência de Distorção de Corrente	D_{eI}	$S_{e1}(DHT_{eI}) = 3V_{e1} I_{eH}$
Potência de Distorção de Tensão	D_{eV}	$S_{e1}(DHT_{eV}) = 3V_{eH} I_{e1}$
Potência de Distorção Harmônica	D_{eH}	$\sqrt{S_{eH}^2 - P_{eH}^2}$

Tabela 3.11: Potências Aparentes - Simulação 2.

Potência Aparente Vetorial Trifásica	$S_V^{3\phi}$	$\sqrt{(P^{3\phi})^2 + (Q_B^{3\phi})^2 + (D_B^{3\phi})^2}$
Potência Aparente Efetiva	S_e	$\sqrt{S_{e1}^2 + S_{eN}^2}$
Potência Aparente Efetiva Fundamental	S_{e1}	$3V_{e1}I_{e1}$
Potência Aparente Efetiva Não-Fundamental	S_{eN}	$\sqrt{D_{eI}^2 + D_{eV}^2 + S_{eH}^2}$
Potência Aparente Harmônica	S_{eH}	$3V_{eH}I_{eH}$
Potência Aparente Fundamental (Componentes Simétricas)	S_1^+	$\sqrt{(P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2}$

Tabela 3.12: Fatores de Potência - Simulação 2.

Fator de Potência Vetorial	$FP_V^{3\phi}$	$P^{3\phi}/S_V^{3\phi}$
Fator de Potência Efetiva	FP_e	P/S_e
Fator de Potência Fundamental	FP_1^+	P_1^+/S_1^+

Capítulo 4

Resultados e Análise

4.1 Considerações Iniciais

No presente capítulo, são apresentados os resultados obtidos através das simulações computacionais descritas no capítulo 3, e são feitas análises críticas dos dados para, então, elaborar uma base para futuros estudos acerca de medição de potência em sistemas monofásicos e trifásicos na presença de desequilíbrios e de distorções harmônicas na rede de alimentação.

4.2 Avaliação dos Resultados da Simulação 1

4.2.1 Parte 1

Para cada caso citado na Tabela 3.1, são exibidos na Tabela 4.1 os resultados dos parâmetros do modelo de Budeanu, do modelo de Fryze e do modelo da Norma IEEE 1459-2010. Com isso, apresentam-se os valores relativos às distorções de 5, 15 e 30%. Da segunda à quarta coluna, faz-se referência aos resultados do Caso 1, em que são consideradas no sinal de tensão as componentes harmônicas da segunda à sétima ordens; da quinta à sétima coluna são mostrados os resultados do Caso 2, em que há apenas componentes harmônicas pares (2° , 4° e 6°) no sinal de tensão; e da oitava à décima coluna tem-se os resultados do Caso 3, em que apenas componentes harmônicas ímpares (3° , 5° e 7°) são incluídas ao sinal de tensão.

Da Tabela 4.1, pode-se identificar alguns indicadores que não variam com a distorção do sinal, como o fator de deslocamento 1 (Fd_1), a potência ativa fundamental (P_1), a potência reativa fundamental (Q_1), a potência aparente fundamental (S_1) e o fator de potência fundamental (FP_1). Esses valores eram esperados, já que, para estas quantidades, é considerada apenas a componente fundamental do sinal (60 Hz), constante e igual a $220 V_{rms}$. Todos os outros indicadores apresentam variação em relação à THD_V , sendo alguns mais e outros menos sensíveis à distorção.

Quanto aos indicadores que variam, é possível perceber que há diferença na sensibilidade destes em relação ao tipo de distorção harmônica que está sendo considerada. Por exemplo, todos os fato-

Tabela 4.1: Resultados da Primeira Parte da Simulação 1.

Medida	Caso 1 THD_V			Caso 2 THD_V			Caso 3 THD_V		
	5%	15%	30%	5%	15%	30%	5%	15%	30%
Modelo de Budeanu									
$P_B (W)$	424,171	427,361	438,127	424,314	428,649	443,280	424,152	427,187	437,429
$Q_B (var)$	160,283	164,481	178,647	160,310	164,719	179,601	160,293	164,565	178,983
$D_B (var)$	2,577	7,749	15,609	4,820	14,460	28,919	0	0	0
$S (VA)$	453,665	459,888	480,769	453,742	460,580	483,588	453,655	459,794	480,386
FP_B	0,935	0,929	0,911	0,935	0,931	0,917	0,935	0,929	0,911
Fd_1	0,936	0,936	0,936	0,936	0,936	0,936	0,936	0,936	0,936
Fd_2	0,935	0,933	0,926	0,936	0,934	0,927	0,935	0,933	0,926
Modelo de Fryze									
$P_F (W)$	424,171	427,361	438,127	424,314	428,649	443,280	424,152	427,187	437,429
$Q_F (var)$	160,907	169,880	197,947	160,745	168,505	193,286	160,928	170,065	198,559
$S (VA)$	453,665	459,8878	480,769	453,742	460,580	483,588	453,655	459,794	480,386
FP_F	0,935	0,929	0,911	0,935	0,931	0,917	0,935	0,929	0,911
Modelo da Norma IEEE 1459-2010									
$P_1 (W)$	423,773	423,773	423,773	423,773	423,773	423,773	423,773	423,773	423,773
$P_H (W)$	0,399	3,589	14,355	0,542	4,877	19,508	0,379	3,414	13,657
$P (W)$	424,171	427,361	438,127	424,314	428,649	443,280	424,152	427,187	437,429
$Q_1 (var)$	159,759	159,759	159,759	159,759	159,759	159,759	159,759	159,759	159,759
$N (var)$	160,907	169,880	197,947	160,745	168,505	193,286	160,928	170,065	198,559
$D_I (var)$	13,892	41,676	83,353	16,195	48,584	97,169	13,550	40,651	81,302
$D_V (var)$	22,644	67,933	135,866	22,644	67,933	135,866	22,644	67,933	135,866
$D_H (var)$	0,569	5,119	20,475	0,602	5,415	21,661	0,561	5,052	20,209
$S_1 (VA)$	452,886	452,886	452,886	452,886	452,886	452,886	452,886	452,886	452,886
$S (VA)$	453,665	459,888	480,769	453,742	460,580	483,588	453,655	459,794	480,386
$S_N (VA)$	26,575	79,943	161,346	27,851	83,836	169,561	26,398	79,401	160,201
$S_H (VA)$	0,695	6,252	25,006	0,810	7,288	29,151	0,678	6,098	24,391
FP	0,935	0,929	0,911	0,935	0,931	0,917	0,935	0,929	0,911
FP_1	0,936	0,936	0,936	0,936	0,936	0,936	0,936	0,936	0,936

res de potência (FP_B , FP_F e FP) e o fator de deslocamento 2 (Fd_2) apresentam valores menores quando a distorção envolve apenas componentes de ordem ímpar ou quando há componentes de ordem par e ímpar simultaneamente.

A potência de distorção (D_B) é nula quando há apenas componentes de ordem ímpar, como

no Caso 3. Isso pode ser explicado pelo fato de que, no cálculo de D_B , Tabela 3.2, há uma multiplicação entre os valores eficazes de tensão e corrente de componentes de ordens adjacentes ($V_1 \cdot I_2, V_4 \cdot I_3, \dots$). Neste caso, especificamente, todos os produtos resultam em valores nulos, levando a $D_B = 0$. No Caso 2 (componentes de ordem par), a potência de distorção não é nula, pois o produto entre as componentes fundamental e de segunda ordem é diferente de zero.

Neste caso específico, como a THD_V independe de quais ordens harmônicas compõem o sinal, ou seja, independe de qual caso está sendo analisado, a potência de distorção de tensão (D_V) é a mesma para um mesmo valor de distorção harmônica total de tensão, como pode ser visto na Tabela 4.1. Por outro lado, nota-se que o mesmo não ocorre com a potência de distorção de corrente (D_I), já que a distorção harmônica total de corrente (THD_I) muda conforme o caso em análise.

Dos indicadores da Tabela 4.1 ainda não comentados, com exceção da potência reativa de Fryze (Q_F) e da potência não-ativa (N) que apresentaram um valor maior no Caso 3 (componentes ímpares), todos os outros valores mostram-se mais sensíveis quando há apenas componentes harmônicas de ordem par no sinal, ou seja, no Caso 2.

Além disso, nota-se que, apesar da nomenclatura diferente, certos parâmetros possuem valores iguais, como:

$$P_B = P_F = P \quad (4.1)$$

$$Q_F = N \quad (4.2)$$

$$FP_B = FP_F = FP \quad (4.3)$$

$$Fd_1 = FP_1 \quad (4.4)$$

4.2.2 Parte 2

Na Figura 4.1, pode ser visto o comportamento da potência reativa fundamental Q_1 , da potência reativa de Budeanu Q_B , da potência reativa de Fryze e da potência não-ativa N frente as variações na distorção harmônica do sinal de tensão de 0 a 30%. Os Casos 1, 2 e 3 são identificados pelas cores azul, magenta e amarela, respectivamente. A curva Q_1 aparece na cor preta, mostrando a existência de uma única curva para os três casos.

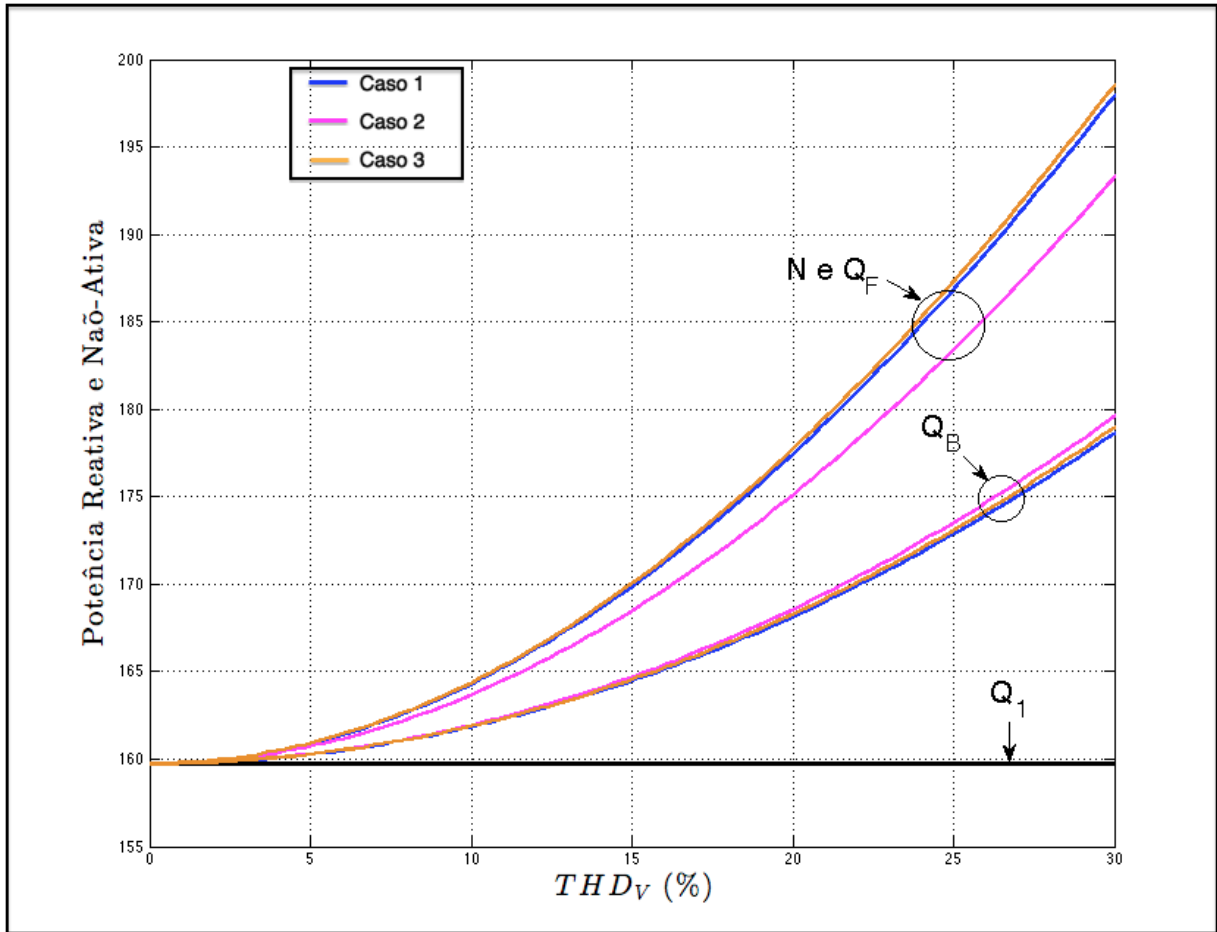


Figura 4.1: Comportamento da Potência Reativa (Q_1 , Q_B e Q_F) frente a Variação da DHT_V .

Da Figura 4.1, nota-se que N e Q_F estão sobrepostas, o que corrobora a equação (4.2). Além disso, observa-se que as potências reativas seguem uma regra de acordo com o aumento da THD_V , tal que:

$$N = Q_F > Q_B > Q_1 \quad (4.5)$$

Também, é possível perceber que quando há no sinal de tensão apenas componentes harmônicas de ordens pares (Caso 2), a distância entre as curvas N (ou Q_F) e Q_B é menor do que nos Casos 1 e 3.

É importante ressaltar que a discrepância entre essas potências torna-se cada vez maior com o aumento da THD_V . As Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4 mostram as discrepâncias percentuais entre as potências reativas e potência não-ativa para os Casos 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 4.2: Discrepância Percentual entre as Potências Reativas e a Potência Não-Ativa - Caso 1.

(a) 5% de THD_V .				(b) 15% de THD_V .			
	Q_1	Q_B	Q_F ou N		Q_1	Q_B	Q_F ou N
Q_1	—	0,33%	0,72%	Q_1	—	2,96%	6,34%
Q_B	0,33%	—	0,39%	Q_B	2,96%	—	3,28%
Q_F ou N	0,72%	0,39%	—	Q_F ou N	6,34%	3,28%	—

(c) 30% de THD_V .			
	Q_1	Q_B	Q_F ou N
Q_1	0%	11,82%	23,90%
Q_B	11,82%	0%	10,80%
Q_F ou N	23,90%	10,80%	0%

Tabela 4.3: Discrepância Percentual entre as Potências Reativas e a Potência Não-Ativa - Caso 2.

(a) 5% de THD_V .				(b) 15% de THD_V .			
	Q_1	Q_B	Q_F ou N		Q_1	Q_B	Q_F ou N
Q_1	—	0,34%	0,62%	Q_1	—	3,10%	5,47%
Q_B	0,34%	—	0,27%	Q_B	3,10%	—	2,30%
Q_F ou N	0,62%	0,27%	—	Q_F ou N	5,47%	2,30%	—

(c) 30% de THD_V .			
	Q_1	Q_B	Q_F ou N
Q_1	—	12,42%	20,99%
Q_B	12,42%	—	7,62%
Q_F ou N	20,99%	7,62%	—

Tabela 4.4: Discrepância Percentual entre as Potências Reativas e a Potência Não-Ativa - Caso 3.

	Q_1	Q_B	Q_F ou N
Q_1	—	0,33%	0,73%
Q_B	0,33%	—	0,40%
Q_F ou N	0,73%	0,40%	—

	Q_1	Q_B	Q_F ou N
Q_1	—	3,01%	6,45%
Q_B	3,01%	—	3,34%
Q_F ou N	6,45%	3,34%	—

	Q_1	Q_B	Q_F ou N
Q_1	—	12,03%	24,29%
Q_B	12,03%	—	10,94%
Q_F ou N	24,29%	10,94%	—

Das Tabelas 4.2(a), 4.3(a) e 4.4(a) pode-se ver que, com 5% de THD_V , a menor diferença encontrada é de 0,27%, entre Q_F ou N e Q_B , para o Caso 2; enquanto que a maior diferença é de 0,73%, entre Q_F ou N e Q_1 , no Caso 3.

Das Tabelas 4.2(b), 4.3(b) e 4.4(b) pode-se ver que, com 15% de THD_V , a menor diferença encontrada é de 2,30%, entre Q_F ou N e Q_B , para o Caso 2; enquanto que a maior diferença é de 6,45%, entre Q_F ou N e Q_1 , no Caso 3.

Das Tabelas 4.2(c), 4.3(c) e 4.4(c) pode-se ver que, com 30% de THD_V , a menor diferença encontrada é de 7,62%, entre Q_F ou N e Q_B , para o Caso 2; enquanto que a maior diferença é de 24,29%, entre Q_F ou N e Q_1 , no Caso 3.

Na Portaria 431/2007 do INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial) [23], são definidas as classes de exatidão dos medidores comerciais como mostrado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Limites de Erro Percentual para Medidores de Energia Reativa (Medidores Monofásicos e Polifásicos com Cargas Equilibradas).

Fator de Potência	Classes			
	A	B	C	D
1	± 4,0%	± 2,0%	± 1,0%	± 0,4%
0,5 ind	± 4,0%	± 2,0%	± 1,2%	± 0,6%
0,8 cap	± 4,0%	± 2,0%	± 1,2%	± 0,6%

Os valores na Tabela 4.5 referem-se a medições feitas em cargas com fatores de potência unitário, até 0,5 capacitivo e até 0,8 capacitivo. Portanto, com base nos valores das Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4,

nota-se que a diferença entre algumas potências excede o erro associado ao medidor.

Ressalta-se que as tolerâncias apresentadas na Tabela 4.5 referem-se a níveis de tensão entre 120 e 240 V. Essas tolerâncias variam com a tensão e também com a potência ativa consumida pela carga, mostrando-se importante a observação desses parâmetros na classificação dos medidores.

A Figura 4.2 mostra como se comportam o fator de potência de Budeanu (FP_B), o fator de potência de Fryze (FP_F), o fator de potência da Norma IEEE 1459-2010, o fator de potência fundamental da Norma IEEE 1459-2010, o fator de deslocamento 1 (Fd_1) e o fator de deslocamento 2 (Fd_2), quando da variação da distorção harmônica total do sinal de tensão. Os Casos 1, 2 e 3 são identificados pelas cores azul, magenta e amarela, respectivamente. As curvas de FP_1 e Fd_1 são identificadas pela cor preta, mostrando que foi gerada a mesma curva para os três casos simulados.

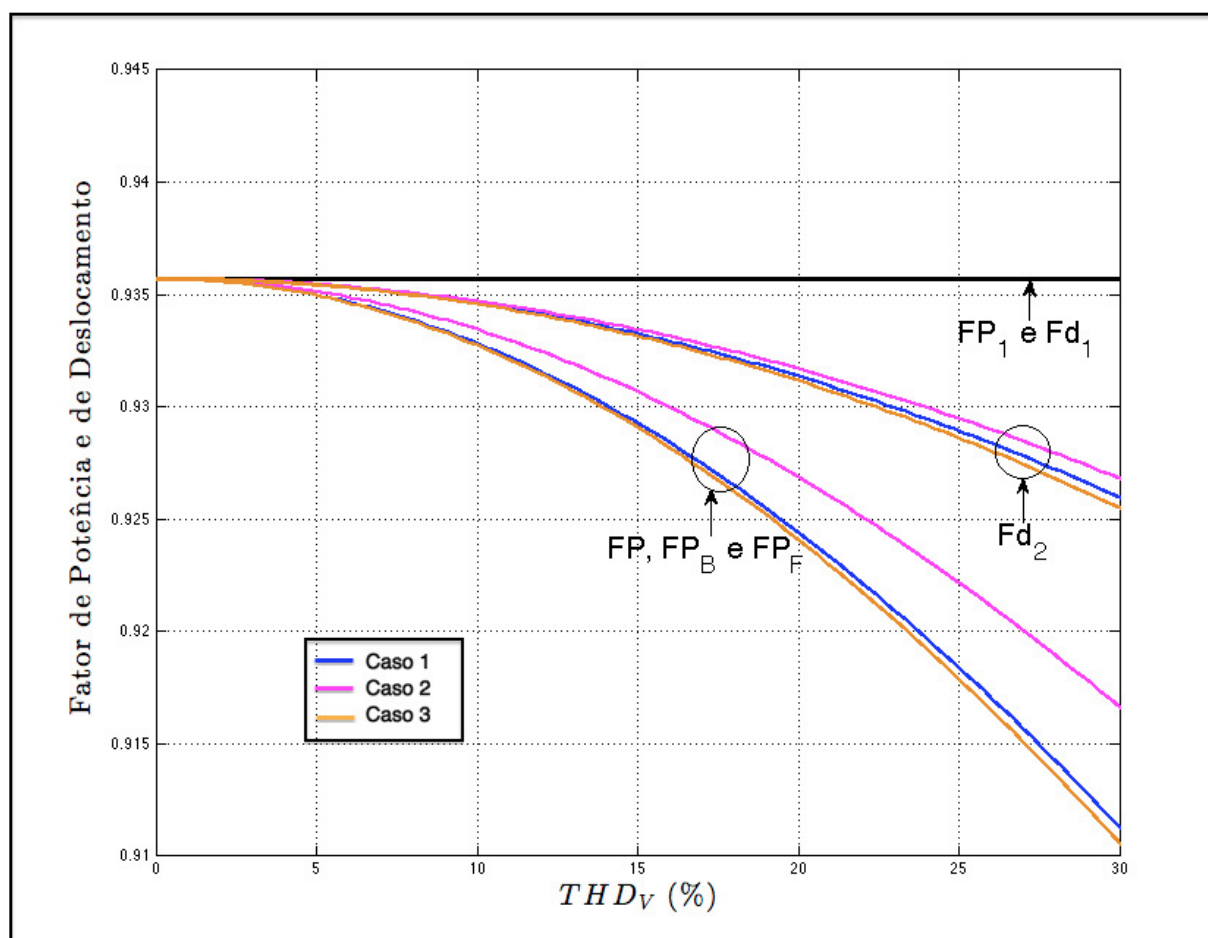


Figura 4.2: Comportamento dos Fatores de Potência (FP_B , FP_F , FP e FP_1) e dos Fatores de Deslocamento (Fd_1 e Fd_2) frente a Variação da THD_V de 0 a 30%.

Da Figura 4.2, nota-se que o fator de deslocamento 1 (Fd_1) e o fator de potência fundamental (FP_1) estão sobrepostos em uma mesma reta. Este comportamento é previsível, já que, da equação (4.4) e da Tabela 4.1, tem-se que esses indicadores são iguais e não variam com a distorção harmônica da rede, por considerarem em seu cálculo apenas a componente fundamental do sinal de tensão. Além disso, os fatores de potência de Budeanu (FP_B), de Fryze (FP_F) e da Norma

IEEE 1459-2010 (FP) também aparecem sobrepostos em uma mesma curva em cada caso.

A curva com inclinação mais acentuada, mostra que FP , FP_B e FP_F apresentam maior sensibilidade frente a variação da THD_V , com relação aos outros indicadores. Ainda para esta curva, nota-se um distanciamento crescente do Caso 2 para os Casos 1 e 3, conforme aumenta a THD_V .

Também é possível inferir que há uma ordem na magnitude dos valores fornecidos por esses indicadores, como pode ser visto em (4.6).

$$FP_1 = Fd_1 > Fd_2 > FP = FP_B = FP_F \quad (4.6)$$

4.3 Avaliação dos Resultados da Simulação 2

4.3.1 Parte 1

Na Tabela 4.6 são apresentados os resultados da primeira parte da Simulação 2. Estes dados são resultantes da execução de uma rotina computacional envolvendo os parâmetros introduzidos pelas Tabelas 3.5, 3.6 e 3.7, na seção 4.2.

Da Tabela 4.6 nota-se que, todas as medidas que consideram em seu cálculo apenas a componente fundamental dos sinais (P_1^+ , Q_1^+ , S_1^+ , S_{e1} e FP_1^+), são constantes com a variação da distorção harmônica. Assim como na seção 4.2, na análise dos resultados do circuito monofásico, já se esperava que estes valores fossem constantes, porque a tensão eficaz da componente fundamental foi considerada fixa e igual a $220 V_{rms}$.

Atentando para a potência de distorção ($D_B^{3\phi}$), no Caso 3, em que são consideradas apenas componentes harmônicas de ordem ímpar, percebe-se que o resultado é nulo. A resposta para este fenômeno é a mesma comentada para circuito monofásico, ou seja, em seu cômputo são multiplicados os valores eficazes de tensão e corrente de componentes de ordens adjacentes ($V_1 \cdot I_2$, $V_4 \cdot I_3$, etc.) que, neste caso especificamente resulta em valores nulos, já que todas as componentes pares são admitidas iguais a zero. Vê-se que, no Caso 2, isso não ocorre, já que existe um par de componentes adjacentes cuja multiplicação é diferente de zero ($V_1 \cdot I_2$).

As potências ativas do método de Curtis e Silsbee e do método da Norma IEEE 1459-2010 são calculadas de forma semelhante, resultando, portanto, em valores iguais, como pode ser visto na Tabela 4.6. Já a potência ativa efetiva harmônica (P_{eH}) indica quanto da potência ativa fornecida à carga é proveniente de sinais em frequência distinta da frequência da rede (60 Hz). Observa-se, também, que as potências ativas, exceto P_1^+ , são mais sensíveis a sinais formados apenas por componentes de ordem par (Caso 2), projetando sempre um resultado maior que nos outros dois casos.

A potência de distorção de tensão (D_{eV}) é sempre a mesma para o mesmo grau de distorção harmônica (THD_{eV}), não tendo relação com o modo com que se divide a distorção entre as componentes do sinal. Por outro lado, como pode ser visto na Tabela 4.6, a potência de distorção de corrente (D_{eI}) não possui o mesmo comportamento, mostrando-se sensível não somente ao nível

Tabela 4.6: Resultados da Primeira Parte da Simulação 1.

Medida	Caso 1 THD_{eV}			Caso 2 THD_{eV}			Caso 3 THD_{eV}		
	5%	15%	30%	5%	15%	30%	5%	15%	30%
Potências Ativas									
$P^{3\phi}$ (W)	655,486	657,366	663,711	655,633	658,691	669,010	655,451	657,055	662,468
P (W)	655,486	657,366	663,711	655,633	658,691	669,010	655,451	657,055	662,468
P_1^+ (W)	655,222	655,222	655,222	655,222	655,222	655,222	655,222	655,222	655,222
P_{eH} (W)	0,235	2,115	8,460	0,382	3,440	13,759	0,200	1,804	7,218
Potências Não-Ativas									
N (var)	724,212	737,456	780,980	724,227	737,608	781,828	724,209	737,420	780,776
$Q_B^{3\phi}$ (var)	723,367	729,945	752,146	723,577	731,841	759,730	723,337	729,675	751,066
Q_1^+ (var)	722,513	722,513	722,513	722,513	722,513	722,513	722,513	722,513	722,513
$D_B^{3\phi}$ (var)	13,146	39,729	81,362	24,567	73,701	147,401	0	0	0
D_{eI} (var)	18,472	55,415	110,831	23,557	70,672	141,343	17,062	51,186	102,371
D_{eV} (var)	48,770	146,311	292,623	48,770	146,311	292,623	48,770	146,311	292,623
D_{eH} (var)	0,893	8,039	32,155	1,114	10,027	40,109	0,829	7,463	29,851
Potências Aparentes									
$S_V^{3\phi}$ (VA)	976,265	983,121	1006,407	976,741	987,368	1022,982	976,131	981,910	1001,481
S_e (VA)	976,803	987,913	1024,910	976,913	988,908	1028,994	976,778	981,910	1023,951
S_{e1} (VA)	975,410	975,410	975,410	975,410	975,410	975,410	975,410	975,410	975,410
S_{eN} (VA)	52,160	156,675	314,670	54,175	162,831	327,726	51,676	155,197	311,530
S_{eH} (VA)	0,924	8,312	33,249	1,178	10,601	42,403	0,853	7,678	30,711
S_1^+ (VA)	975,367	975,367	975,367	975,367	975,367	975,367	975,367	975,367	975,367
Fatores de Potência									
$FP_V^{3\phi}$	0,671	0,669	0,659	0,671	0,667	0,654	0,671	0,669	0,661
FP_e	0,671	0,665	0,648	0,671	0,666	0,650	0,671	0,665	0,647
FP_1^+	0,672	0,672	0,672	0,672	0,672	0,672	0,672	0,672	0,672

de distorção como também à forma de onda do sinal.

As potências aparentes vetorial ($S_V^{3\phi}$) e efetiva (S_e) apresentaram valores distintos para todos os casos. Esta diferença se acentua com o aumento da distorção harmônica, chegando a 22,5 VA no Caso 3 com $THD_{eV} = 30\%$.

Para uma distorção de 5%, os fatores de potência mostraram uma pequena variação de 0,001 entre FP_e ou $FP_V^{3\phi}$ e FP_1^+ , nos Casos 1, 2 e 3. Para valores mais altos de distorção observa-se variações de 0,007 entre FP_e e FP_1^+ , nos Casos 1 e 3, e de 0,025 entre FP_e e FP_1^+ , no Caso 3.

Na Tabela 4.7 são mostradas, para os Casos 1, 2 e 3, as diferenças percentuais de todos os indicadores, com exceção daqueles que são constantes, entre os valores obtidos com os sinais compostos por 5% e por 30% de THD_{eV} .

Tabela 4.7: Diferença Percentual dos Indicadores Não-Constantes entre os Valores Obtidos com Sinais Compostos de 5% e 30% de THD_{eV} .

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
$P^{3\phi}$ (W)	1%	2%	1%
P (W)	1%	2%	1%
P_{eH} (W)	3500%	3500%	3500%
N (var)	8%	8%	8%
$Q_B^{3\phi}$ (var)	4%	5%	4%
$D_B^{3\phi}$ (var)	519%	500%	0%
D_{eI} (var)	500%	500%	500%
D_{eV} (var)	500%	500%	500%
D_{eH} (var)	3500%	3500%	3500%
$S_V^{3\phi}$ (VA)	3%	5%	3%
S_e (VA)	5%	5%	5%
S_{eN} (VA)	503%	505%	503%
S_{eH} (VA)	3500%	3500%	3500%
$FP_V^{3\phi}$	-2%	-3%	-1%
FP_e	-3%	-3%	-4%

Da Tabela 4.7 nota-se que alguns indicadores possuem maior sensibilidade à distorção harmônica do sinal de tensão que outros. Destaca-se a discrepância no Caso 3 para os fatores de potência, em que $FP_V^{3\phi}$ apresenta 1% de diferença entre os valores obtidos com sinais compostos de 5% e 30% de THD_{eV} , enquanto que FP_e apresenta 4%.

É possível perceber que, as quantidades comumente utilizadas para fins de tarifação em sistemas de distribuição de energia elétrica, como as potências ativas $P^{3\phi}$ e P , a potência não-ativa N e a potência reativa $Q_B^{3\phi}$, apresentam sensibilidades diferentes com relação à distorção harmônica do sinal. Por exemplo, N mostra variação de 8% entre os dois valores considerados nos cálculos da Tabela 4.7, enquanto que $Q_B^{3\phi}$ apresenta um máximo de 5% e as potências ativas $P^{3\phi}$ e P apresentam um máximo 2% de diferença.

Ainda com base na Tabela 4.7, pode-se inferir que a maioria dos indicadores sofre maior influência do sinal formado apenas por componentes de ordem par. Porém, alguns parâmetros mostram-se indiferentes quanto à forma de onda do sinal de tensão como, por exemplo, a potência não-ativa N .

4.3.2 Parte 2

A Figura 4.3 mostra o comportamento das potências reativas Q_1^+ e $Q_B^{3\phi}$ e da potência não-ativa N frente a variação da distorção harmônica de total de tensão de 0 a 30%. Os Casos 1, 2 e 3 são identificados pelas cores azul, magenta e amarela, respectivamente. A curva Q_1^+ aparece na cor preta, mostrando a existência de uma única curva para os três casos simulados.

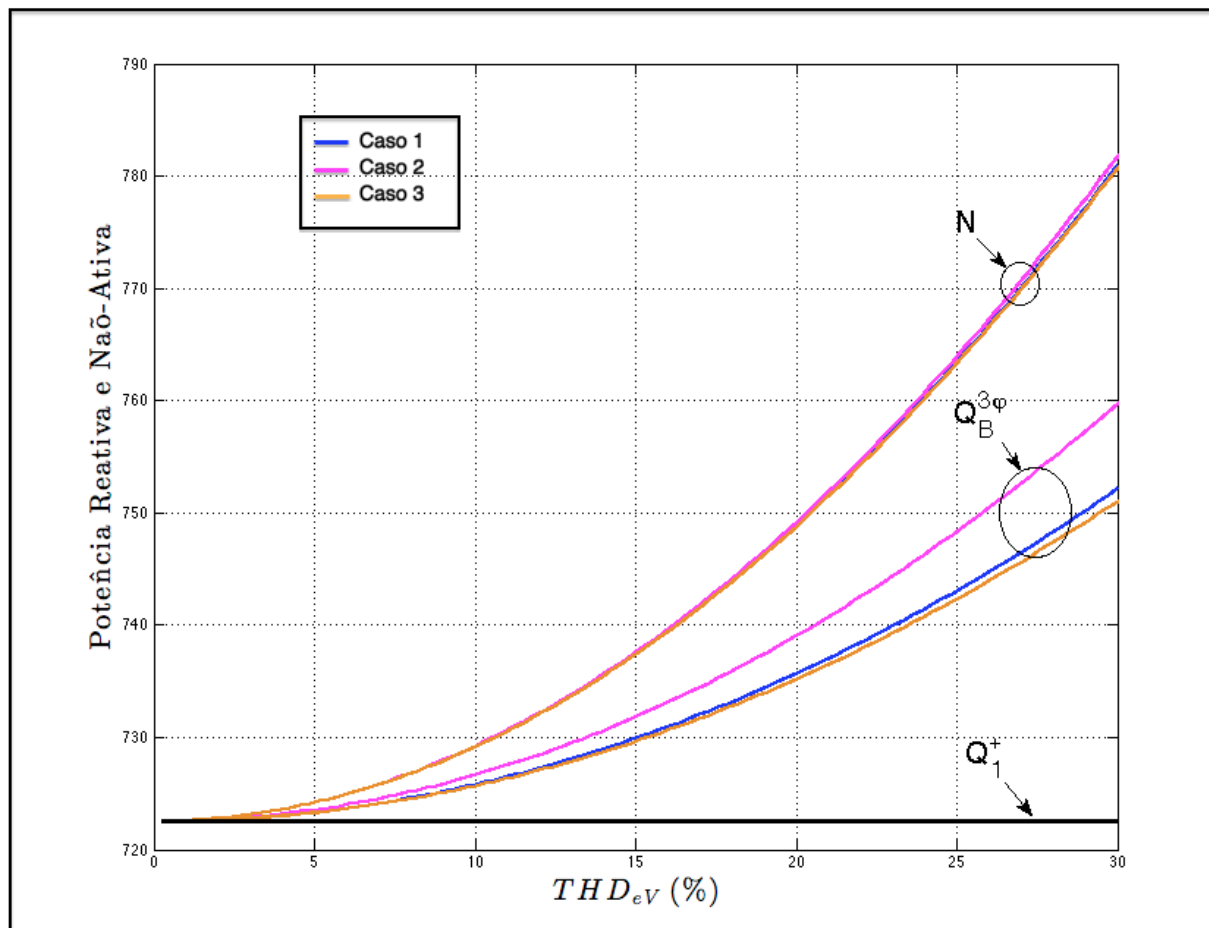


Figura 4.3: Comportamento das Potências Reativas (Q_1^+ , $Q_B^{3\phi}$) e da Potência Não-Ativa (N) frente a Variação da THD_{eV} de 0 a 30%.

Da Figura 4.3, nota-se que as potências reativas seguem uma regra, de acordo com o aumento da distorção harmônica total do sinal de tensão, tal que:

$$N > Q_B^{3\phi} > Q_1^+ \quad (4.7)$$

A potência não-ativa N , mostra uma pequena variação entre os Casos 1, 2 e 3, quando comparada à potência reativa $Q_B^{3\phi}$.

É importante ressaltar que a diferença entre essas potências torna-se cada vez maior com o aumento da THD_{eV} . As Tabelas 4.8, 4.9 e 4.10 mostram as discrepâncias percentuais entre as potências reativas e potência não-ativa para cada um dos casos simulados.

Tabela 4.8: Discrepância Percentual entre as Potências Reativas e a Potência Não-Ativa - Caso 1.

(a) 5% de THD_{eV} .				(b) 15% de THD_{eV} .			
	Q_1^+	$Q_B^{3\phi}$	N		Q_1^+	$Q_B^{3\phi}$	N
Q_1^+	—	0,12%	0,24%	Q_1^+	—	1,03%	2,07%
$Q_B^{3\phi}$	0,12%	—	0,12%	$Q_B^{3\phi}$	1,03%	—	1,03%
N	0,24%	0,12%	—	N	2,07%	1,03%	—

(c) 30% de THD_{eV} .			
	Q_1^+	$Q_B^{3\phi}$	N
Q_1^+	—	4,10%	8,09%
$Q_B^{3\phi}$	4,10%	—	3,83%
N	8,09%	3,83%	—

Tabela 4.9: Discrepância Percentual entre as Potências Reativas e a Potência Não-Ativa - Caso 2.

(a) 5% de THD_{eV} .				(b) 15% de THD_{eV} .			
	Q_1^+	$Q_B^{3\phi}$	N		Q_1^+	$Q_B^{3\phi}$	N
Q_1^+	—	0,15%	0,24%	Q_1^+	—	1,29%	2,09%
$Q_B^{3\phi}$	0,15%	—	0,09%	$Q_B^{3\phi}$	1,29%	—	0,79%
N	0,24%	0,09%	—	N	2,09%	0,79%	—

(c) 30% de THD_{eV} .			
	Q_1^+	$Q_B^{3\phi}$	N
Q_1^+	—	5,15%	8,21%
$Q_B^{3\phi}$	5,15%	—	2,91%
N	8,21%	2,91%	—

Tabela 4.10: Discrepância Percentual entre as Potências Reativas e a Potência Não-Ativa - Caso 3.

	Q_1^+	$Q_B^{3\phi}$	N
Q_1^+	—	0,11%	0,23%
$Q_B^{3\phi}$	0,11%	—	0,12%
N	0,23%	0,12%	—

	Q_1^+	$Q_B^{3\phi}$	N
Q_1^+	—	0,99%	2,06%
$Q_B^{3\phi}$	0,99%	—	1,06%
N	2,06%	1,06%	—

	Q_1^+	$Q_B^{3\phi}$	N
Q_1^+	—	2,95%	8,06%
$Q_B^{3\phi}$	3,95%	—	3,96%
N	8,06%	3,96%	—

Das Tabelas 4.8(a), 4.9(a) e 4.10(a) pode-se ver que, com 5% de THD_V , a menor diferença encontrada é de 0,09%, entre $Q_B^{3\phi}$ e N , para o Caso 2; enquanto que a maior diferença é de 0,24%, entre Q_1^+ e N , nos Casos 1 e 2.

Das Tabelas 4.8(b), 4.9(b) e 4.10(b) pode-se ver que, com 15% de THD_V , a menor diferença encontrada é de 0,79%, entre $Q_B^{3\phi}$ e N , para o Caso 2; enquanto que a maior diferença é de 2,09%, entre Q_1^+ e N , no Caso 2.

Das Tabelas 4.8(c), 4.9(c) e 4.10(c) pode-se ver que, com 30% de THD_V , a menor diferença encontrada é de 2,91%, entre $Q_B^{3\phi}$ e N , para o Caso 2; enquanto que a maior diferença é de 8,21%, entre Q_1^+ e N , no Caso 2.

Assim como para sistema monofásico, pode-se dizer que, com base na Tabela 4.5, as diferenças entre alguns valores de potência reativa trifásica, em casos específicos, pode exceder os limites de erros associados a medidores de energia convencionais.

Na Figura 4.4 são traçados os comportamentos do fator de potência vetorial ($FP_V^{3\phi}$), do fator de potência efetivo (FP_e) e do fator de potência fundamental (FP_1^+), em relação a variação da THD_{eV} de 0 a 30%. Os Casos 1, 2 e 3 são identificados pelas cores azul, magenta e amarela, respectivamente. A curva FP_1^+ aparece na cor preta, mostrando a existência de uma única curva para os três casos simulados.

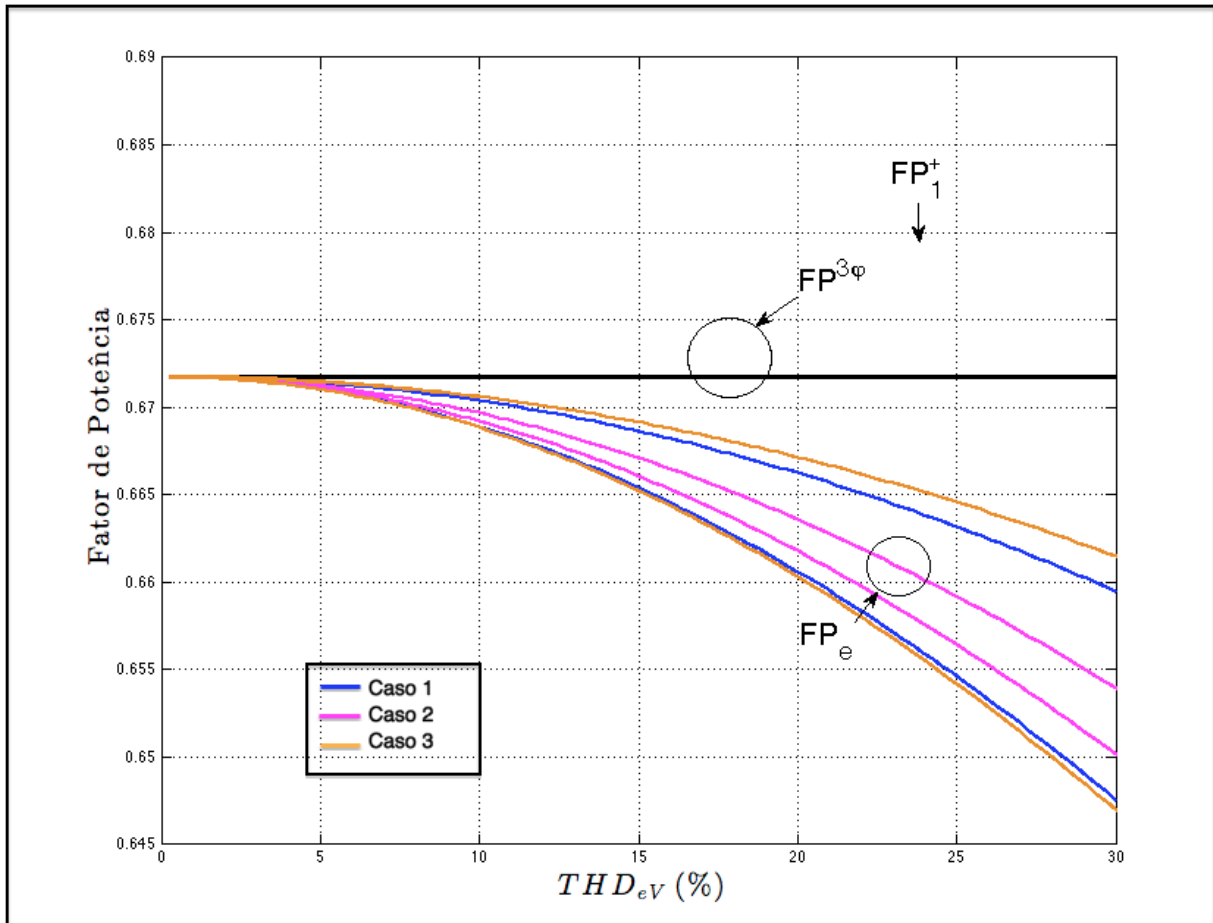


Figura 4.4: Comportamento dos Fatores de Potência ($FP_V^{3\phi}$, FP_e e FP_1^+) frente a Variação da THD_{eV} de 0 a 30%.

Da Figura 4.4 pode ser visto que FP_1^+ , como já mencionado é constante em relação a distorção harmônica, já que considera apenas a componente em frequência fundamental ($220 V_{rms}$) em seu cálculo. Já os fatores de potência $FP^{3\phi}$ e FP_e são representados por curvas com inclinação negativa, pois quanto maior o grau de distorção no sinal, menor se torna o fator de potência.

É possível perceber que, no Caso 2, as curvas $FP^{3\phi}$ e FP_e mantêm uma proximidade maior que no Caso 1 e 3, sendo que para o último caso, tem-se o maior distanciamento entre esses fatores de potência.

Pode-se inferir da Figura 4.4 que há uma ordem no valor dado por esses indicadores, como mostrado na equação (4.8).

$$FP_1^+ > FP^{3\phi} > FP_e \quad (4.8)$$

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho foi realizado um levantamento de diversos métodos de medição de potência presentes na literatura. No Capítulo 2, eles foram expostos em detalhes para que se tornasse possível o seu emprego em simulações computacionais que visam uma avaliação comparativa entre os métodos. A apresentação das principais definições para cada configuração de circuito (monofásico ou trifásico) em ambientes senoidais e não-senoidais, evidencia que, ao longo do desenvolvimento das teorias de medição de potência, houve uma tentativa dos catedráticos da área de manter um padrão nas nomenclaturas dos parâmetros. Isso, contudo, culmina em incertezas quanto ao significado físico desses parâmetros. Por exemplo, a potência reativa em um circuito monofásico senoidal representa uma energia elétrica que circula continuamente entre os diversos campos elétricos e magnéticos presentes, em determinado intervalo de tempo. Entretanto, quando do estudo de circuitos monofásicos não-senoidais e de circuitos trifásicos, verificou-se que não é possível a associação de um significado físico para a energia reativa. Na verdade, muitas definições mencionadas neste trabalho não possuem uma aceção clara, tratando-se apenas de conceituações matemáticas que foram expandidas do caso senoidal. Nestas situações, a tentativa de atrelar os significados dos conceitos de ambientes senoidais às definições do caso não-senoidal pode conduzir a interpretações equivocadas.

No Capítulo 3, foram apresentados os casos envolvendo ambientes não-senoidais (monofásico e trifásico) que constituem as simulações computacionais apresentadas neste estudo de comparação entre os métodos expostos. Com o objetivo de avaliar o comportamento dos métodos devido ao fenômeno de distorção harmônica separadamente dos efeitos decorrentes do desequilíbrio do sistema, foram utilizadas cargas e tensões equilibradas para circuito trifásico. Ressalta-se que o emprego de valores elevados de distorção harmônica total (de 15 a 30%) foi feito com o intuito de se identificar até que ponto as discrepâncias entre os valores dos parâmetros poderiam ser ignoradas em circuitos de baixa tensão, sem que houvesse preocupação com a precisão das medições.

Na análise dos resultados, efetuada no Capítulo 4, constatou-se que a grande quantidade de definições de parâmetros de medição não é justificável, já que vários desses parâmetros apresentam valores iguais, mesmo pertencendo a teorias distintas.

As discrepâncias entre os valores de potência reativa e não-ativa, tanto para sistemas monofá-

sicos quanto para trifásicos, observadas quando há uma THD_V ou THD_{eV} de 5%, mostram que caso não sejam consideradas as componentes harmônicas dos sinais na determinação da potência, é possível que ocorram erros da ordem de 0,33 a 0,73% do valor total, em sistemas monofásicos, e de 0,11 a 0,24%, em sistemas trifásicos. Visto que esses valores percentuais são da mesma ordem de grandeza da precisão dos medidores de energia disponíveis no mercado, é aconselhável considerar a existência dessas discrepâncias quando da escolha de uma definição adequada para fins de tarifação do excedente de potência reativa.

De forma semelhante, nota-se que a escolha de um determinado fator de potência para fins de faturamento pode gerar contestações, visto que os indicadores analisados neste trabalho apresentaram diferenças de até 0,02 em valor absoluto, a depender do tipo de distorção encontrada no sinal. Tomando-se como exemplo uma situação hipotética, em que na determinação do fator de potência é considerada apenas a componente fundamental do sinal, encontra-se como resultado o valor de 0,93 indutivo. Como apresentado na seção 2.4, o limite mínimo brasileiro para que não haja cobrança por baixo fator de potência é de 0,92 indutivo. Nesta situação, o consumidor não poderia ser tarifado pelo baixo fator de potência. Entretanto, se a legislação definir que no cálculo do fator de potência devem ser levadas em consideração as componentes harmônicas do sinal, o novo valor encontrado pode ser menor que 0,92 indutivo, o que levará à penalização do consumidor. Caso se trate de um consumidor residencial, é bastante provável que ele não tenha condições técnicas para corrigir o fator de potência da unidade consumidora. Dessa forma, a tarifação por excedente de energia reativa deixa de ser uma política de incentivo ao uso eficiente da rede para ser apenas uma penalidade. A situação pode-se agravar caso seja constatado que a unidade consumidora não possui responsabilidade na geração das distorções harmônicas, ou seja, quando a distribuidora de energia já fornece um sinal com a forma de onda distorcida ao consumidor.

Verifica-se que a escolha da definição de potência reativa e de fator de potência mais adequada para fins de faturamento em ambientes não-senoidais deve ser analisada com cuidado, uma vez que as definições mencionadas neste trabalho apresentam discrepâncias consideráveis em seus resultados, podendo ser ainda mais elevadas se aplicadas a um sistema com demanda de potência maior. Ainda, é possível concluir que a escolha de uma definição que represente de forma fiel as condições de operação do sistema sem, contudo, tarifar indevidamente o consumidor não pode ser atingida com bases nos métodos aqui expostos, visto que não houve constatação de superioridade nesse sentido de nenhum dos métodos apresentados.

Neste trabalho, foram avaliadas configurações específicas de circuitos, observando apenas o fenômeno de distorção harmônica. Porém, existem outros fenômenos de qualidade de energia elétrica que podem influenciar nos valores apresentados pelas definições expostas na literatura. Além disso, há outros métodos de medição de potência, não menos importantes, a serem investigados e comparados com os aqui presentes. Sugere-se, então, que trabalhos futuros acerca dessa temática sejam elaborados a fim de complementar o estudo aqui apresentado. Algumas sugestões são elencadas a seguir:

- Explorar o comportamento dos parâmetros de medição de potência em relação aos fenômenos de desequilíbrio de tensão e de carga;

- Observar o comportamento das definições de potência em condições não-senoidais com componentes harmônicas defasadas da componente de 60 Hz;
- Estudar e comparar as teorias de potência instantânea para medição de potência em sistemas trifásicos que utilizam a Transformada de Park, a Transformada de Clark, dentre outras;
- Investigar o impacto econômico causado pela escolha de uma ou outra definição de potência por parte das autoridades legislativas; e
- Realizar medições em laboratório, utilizando sinais com harmônicas e desequilíbrios, com o objetivo de comparar os resultados obtidos por diversos medidores eletrônicos convencionais com os resultados obtidos por meio das simulações computacionais deste trabalho.

Referências Bibliográficas

- [1] AKAGI, H.; WATANABE, E. H.; AREDES, M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. [S.l.]: John Wiley and Sons, 2007.
- [2] TERZIJA, V. et al. Active and reactive power metering in non-sinusoidal conditions using newton type algorithm. *ICREPO*, 2005.
- [3] FILIPSKI, P. S.; BAGHZOUZ, Y.; COX, M. D. Discussions of power definitions contained in the iee dictionary. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1994.
- [4] VIEIRA, D. *Comparação de Técnicas de Medição de Potência Reativa sob Condições Não-Senoidais com Ênfase na Transformada Wavelet*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, 2012.
- [5] EMANUEL, A. E. *Power Definitions and the Physical Mechanism of Power Flow*. [S.l.]: John Wiley and Sons, 2010.
- [6] WATANABE, E. H.; STEPHAN, R. M.; AREDES, M. New concepts of instantaneous active and reactive powers in electrical systems with generic loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 8, n. 2, p. 697–703, 1993.
- [7] AREDES, M.; WATANABE, E. H. New control algorithms for series and shunt three-phase four-wire active power filters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 10, n. 3, p. 1649–1656, 1995.
- [8] IEEE. Ieee standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions. *IEEE Std 1459*, 2010.
- [9] DEPENBROCK, M. The fbd-method, a generally applicable tool for analysing power relations. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 8, n. 2, p. 381–387, 1993.
- [10] ALMEIDA, W. G.; FREITAS, F. D. *Circuitos Polifásicos: Teoria e Ensaio*. [S.l.]: FINATEC, 1995.
- [11] BUCHHOLZ, F. Die drehstrom-scheinleistung bei ungleichmassiger belastung der drei zweige. *Licht und Kraft*, n. 2, p. 9–11, 1922.
- [12] EMANUEL, A. E. Summary of iee standard 1459: Definitions for the measurement of electric quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced or unbalanced conditions. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 40, n. 3, p. 869–876, 2004.

- [13] GOODHUE, W. M. Discussion to "reactive power concepts in need of clarification". *AIEE Transactions*, v. 52, p. 787, 1933.
- [14] BUDEANU, C. I. *Puissances Réactives et Fictives*. [S.l.]: Inst. National Roumain pour l'Étude de l'Aménagement et de l'Utilisation des Sources d'Énergie, 1927.
- [15] CZARNECKI, L. S. What is wrong with the budeanu concept of reactive and distortion power and why it should be abandoned. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 36, n. 3, 1987.
- [16] ARRILLAGA, J.; BRADLEY, D. A.; BODGER, P. S. *Power Systems Harmonics*. [S.l.]: John Wiley, 1985.
- [17] HART, D. *Introduction to Power Electronics*. [S.l.]: Prentice Hall, 1997.
- [18] ACHA, E.; MADRIGAL, M. *Power Systems Harmonics*. [S.l.]: John Wiley, 2001.
- [19] DUGAN, R. C. et al. *Electrical Power Systems Quality*. 2nd edition. ed. [S.l.]: McGraw Hill, 2003.
- [20] CURTIS, H. L.; SILSBEE, F. B. Definitions of power and related quantities. *Electrical Engineering*, p. 394–404, 1935.
- [21] ANEEL. Resolução normativa n. 414. 2010.
- [22] ANEEL. Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional - módulo 1. *PRODIST*, 2008.
- [23] INMETRO. *Portaria n. 431*. [S.l.], 2007.

APÊNDICES

Simulação 1

```
1 clear all;
2 clc;
3
4 THD_V1 = [0.05 0.15 0.3];
5 THD_V2 = linspace(0,0.3,100);
6
7 [THD_V,THD_I,P_B,Q_B,D_B,S,FP_B,Fd_1,Fd_2,P_F,Q_F,FP_F,P_1,P_H,P,...
8   Q_1,N,D_I,D_V,D_H,S_1,S_N,S_H,FP,FP_1] = sim1_1(THD_V1);
9
10 [Q_B,FP_B,Fd_1,Fd_2,Q_F,FP_F,Q_1,N,FP,FP_1] = sim1_2(THD_V2);
```

Parte 1

```
1 function [THD_V,THD_I,P_B,Q_B,D_B,S,FP_B,Fd_1,Fd_2,P_F,Q_F,FP_F,P_1,...
2   P_H,P,Q_1,N,D_I,D_V,D_H,S_1,S_N,S_H,FP,FP_1] = sim1_1(THD_V1)
3
4 f = 60; % frequencia da rede
5 w = 2*pi*f; % frequencia angular
6 T = 1/f; % periodo do sinal
7 n = 3; % quantidade de periodos
8 fT = n*T; % tempo total de amostragem
9 Tx = 256; % quantidade de amostras por ciclo
10 nA = n*Tx; % quantidade total de amostras
11 t = linspace(0,fT,nA); % vetor tempo
12 NL = size(THD_V1,2); % tamanho do vetor THD_V1
13 NH = 7; % numero de componentes harmonicas
14
15 % Porcao da THD_V destinada a cada componente harmonica:
16 %(Usar um caso de cada vez, comentando os outros dois)
17
18 % Caso 1:
19 pTHD_V = sqrt([14.29 28.57 9.52 23.81 4.76 19.05]/100);
20
```

```

21
22 % Caso 2:
23     %pTHD_V = sqrt([50 0 33.33 0 16.67 0]/100);
24
25
26 % Caso 3:
27     %pTHD_V = sqrt([0 50 0 33.33 0 16.67]/100);
28
29 % Sinal de Tensao:
30     % Amplitude:
31     mV = ones(1,NH,NL);
32     for j = 1:NL
33         U_rms = 220;
34         mV(1, :, j) = U_rms*[1 pTHD_V(1)*THD_V1(j) pTHD_V(2)*THD_V1(j)
35             ) ...
36             pTHD_V(3)*THD_V1(j) pTHD_V(4)*THD_V1(j) pTHD_V(5) * ...
37             THD_V1(j) pTHD_V(6)*THD_V1(j)];
38     end
39
40 % Fase:
41     fV = zeros(1,NH,NL);
42
43 % Sinal:
44     V = ones(1,NH,NL);
45     for h = 1:NL
46         for j = 1:NH
47             V(1, j, h) = mV(1, j, h)*cos(fV(1, j, h)) + 1i*mV(1, j, h) * ...
48                 sin(fV(1, j, h));
49         end
50     end
51
52 % Carga:
53     R = 100;
54     L = w*0.1*(1:NH);
55     Z = R+1i*L;
56
57 % Sinal de Corrente:
58     % Sinal:
59     I = ones(1,NH,NL);
60     for j = 1:NL
61         I(:, :, j) = V(1, :, j) ./ Z;
62     end

```

```

62
63 % Amplitude e Fase:
64     mI = ones(1,NH,NL);
65     fI = ones(1,NH,NL);
66     for h = 1:NL
67         for j = 1:NH
68             [fI(1,j,h),mI(1,j,h)] = cart2pol(real(I(1,j,h)),...
69                 imag(I(1,j,h)));
70         end
71     end
72
73 % Parametros do Modelo de Budeanu
74     % Potencia Ativa:
75     auxP = ones(1,NH,NL);
76     P_1 = ones(1,NL);
77     P_B = ones(1,NL);
78     for h = 1:NL
79         auxP(:, :, h) = (mV(:, :, h) .* mI(:, :, h) .* cos(fV(:, :, h) - fI(:, :, h)
80             ));
81         P_1(h) = auxP(1,1,h);
82         P_B(h) = sum(auxP(:, :, h));
83     end
84
85     % Potencia Reativa:
86     Q = ones(1,NH,NL);
87     Q_1 = ones(1,NL);
88     Q_B = ones(1,NL);
89     for h = 1:NL
90         Q(:, :, h) = (mV(:, :, h) .* mI(:, :, h) .* sin(fV(:, :, h) - fI(:, :, h)))
91             ;
92         Q_1(h) = Q(1,1,h);
93         Q_B(h) = sum(Q(:, :, h));
94     end
95
96     % Potencia de Distorcao:
97     D = zeros(1,1,NL);
98     D_B = ones(1,NL);
99     for h = 1:NL
100         for m = 1:(NH-1)
101             D(1,1,h) = D(1,1,h) + (mV(:,m,h) * mI(:,m+1,h))^2 + ...
102                 (mV(:,m+1,h) * mI(:,m,h))^2 - 2 * mV(:,m,h) * mI(:,m+1,h)
103                 ...

```

```

101         *mV(:,m+1,h)*mI(:,m,h)*cos((fV(:,m,h)-fI(:,m,h))
           - ...
102         (fV(:,m+1,h)-fI(:,m+1,h)));
103     end
104     D_B(h) = sqrt(D(1,1,h));
105 end
106
107 % Potencia Aparente:
108     % Tensao e corrente eficaz:
109     V_rms = ones(1,NL);
110     I_rms = ones(1,NL);
111     for h = 1:NL
112         V_rms(h) = sqrt(sum(mV(:, :, h).^2));
113         I_rms(h) = sqrt(sum(mI(:, :, h).^2));
114     end
115     S = V_rms.*I_rms;
116
117 % Potencia Aparente Fundamental:
118     S_1 = ones(1,NL);
119     for h = 1:NL
120         S_1(h) = (mV(:,1,h)*mI(:,1,h));
121     end
122
123 % Fator de Potencia:
124     FP_B = ones(1,NL);
125     for h = 1:NL
126         FP_B(h) = P_B(h)/S(h);
127     end
128
129 % Fator de Deslocamento 1:
130     Fd_1 = ones(1,NL);
131     for h = 1:NL
132         Fd_1(h) = P_1(h)/S_1(h);
133     end
134
135 % Fator de Deslocamento 2:
136     Fd_2 = ones(1,NL);
137     for h = 1:NL
138         Fd_2(h) = P_B(h)/sqrt((P_B(h)^2)+(Q_B(h))^2);
139     end
140
141 % Parametros do Modelo de Fryze

```

```

142 % Potencia Ativa:
143 % Sinais de Tensao e Corrente Instantaneos:
144     v = ones(1,nA,NL);
145     i = ones(1,nA,NL);
146     for h = 1:NL
147         v(:, :, h) = mV(:, 1, h)*sqrt(2)*sin(w*t + fV(:, 1, h)) +...
148             mV(:, 2, h)*sqrt(2)*sin(2*w*t + fV(:, 2, h)) +...
149             mV(:, 3, h)*sqrt(2)*sin(3*w*t + fV(:, 3, h)) +...
150             mV(:, 4, h)*sqrt(2)*sin(4*w*t + fV(:, 4, h)) +...
151             mV(:, 5, h)*sqrt(2)*sin(5*w*t + fV(:, 5, h)) +...
152             mV(:, 6, h)*sqrt(2)*sin(6*w*t + fV(:, 6, h)) +...
153             mV(:, 7, h)*sqrt(2)*sin(7*w*t + fV(:, 7, h));
154         i(:, :, h) = mI(:, 1, h)*sqrt(2)*sin(w*t + fI(:, 1, h)) +...
155             mI(:, 2, h)*sqrt(2)*sin(2*w*t + fI(:, 2, h)) +...
156             mI(:, 3, h)*sqrt(2)*sin(3*w*t + fI(:, 3, h)) +...
157             mI(:, 4, h)*sqrt(2)*sin(4*w*t + fI(:, 4, h)) +...
158             mI(:, 5, h)*sqrt(2)*sin(5*w*t + fI(:, 5, h)) +...
159             mI(:, 6, h)*sqrt(2)*sin(6*w*t + fI(:, 6, h)) +...
160             mI(:, 7, h)*sqrt(2)*sin(7*w*t + fI(:, 7, h));
161     end
162
163 % Potencia Ativa:
164     p = ones(1,nA,NL);
165     P_F = ones(1,NL);
166     for h = 1:NL
167         p(:, :, h) = v(:, :, h).*i(:, :, h);
168         P_F(h) = trapz(t, p(:, :, h))/(n*T);
169     end
170
171 % Potencia Reativa:
172     Q_F = ones(1,NL);
173     for h = 1:NL
174         Q_F(h) = sqrt((S(h)^2)-(P_F(h)^2));
175     end
176
177 % Fator de Potencia:
178     FP_F = ones(1,NL);
179     for h = 1:NL
180         FP_F(h) = P_F(h)./S(h);
181     end
182
183 % Parametros do Modelo da Norma IEEE 1459-2010

```

```

184 % Potencia Ativa Harmonica:
185     P_H = zeros(1,NL);
186     for h = 1:NL
187         P_H(h) = P_B(h) - P_1(h);
188     end
189
190 % Potencia Ativa:
191     P = zeros(1,NL);
192     for h = 1:NL
193         P(h) = P_1(h) + P_H(h);
194     end
195
196
197 % Potencia Nao-Ativa:
198     N = zeros(1,NL);
199     for h = 1:NL
200         N(h) = sqrt(S(h)^2 - P(h)^2);
201     end
202
203 % Distorcao Harmonica Total de Tensao e de Corrente:
204     V_H = zeros(1,NL);
205     I_H = zeros(1,NL);
206     V_1 = zeros(1,NL);
207     I_1 = zeros(1,NL);
208     for h = 1:NL
209         V_H(h) = sqrt(sum(mV(:,2:NH,h).^2));
210         V_1(h) = mV(1);
211         I_H(h) = sqrt(sum(mI(:,2:NH,h).^2));
212         I_1(h) = mI(1);
213     end
214     THD_V = V_H./V_1;
215     THD_I = I_H./I_1;
216
217 % Potencia de Distorcao de Corrente:
218     D_I = zeros(1,NL);
219     for h = 1:NL
220         D_I(h) = S_1(h).*THD_I(h);
221     end
222
223 % Potencia de Distorcao de Corrente:
224     D_V = zeros(1,NL);
225     for h = 1:NL

```



```

226         D_V(h) = S_1(h) .* THD_V(h);
227     end
228
229     % Potencia Aparente Harmonica:
230     S_H = zeros(1,NL);
231     for h = 1:NL
232         S_H(h) = S_1(h) .* THD_I(h) .* THD_V(h);
233     end
234
235     % Potencia de Distorcao Harmonica:
236     D_H = zeros(1,NL);
237     for h = 1:NL
238         D_H(h) = sqrt(S_H(h)^2 - P_H(h)^2);
239     end
240
241     % Potencia Aparente Nao-Fundamental:
242     S_N = zeros(1,NL);
243     for h = 1:NL
244         S_N(h) = sqrt(D_I(h)^2 + D_V(h)^2 + S_H(h)^2);
245     end
246
247     % Fator de Potencia:
248     FP = zeros(1,NL);
249     for h = 1:NL
250         FP(h) = P(h) ./ S(h);
251     end
252
253     % Fator de Potencia Fundamental:
254     FP_1 = zeros(1,NL);
255     for h = 1:NL
256         FP_1(h) = P_1(h) ./ S_1(h);
257     end
258 end

```

Parte 2

```

1 function [Q_B,FP_B,Fd_1,Fd_2,Q_F,FP_F,Q_1,N,FP,FP_1] = sim1_2(THD_V2)
2
3 f = 60; % frequencia da rede
4 w = 2*pi*f; % frequencia angular
5 T = 1/f; % periodo do sinal
6 n = 3; % quantidade de periodos

```

```

7  fT = n*T;           % tempo total de amostragem
8  Tx = 256;          % quantidade de amostras por ciclo
9  nA = n*Tx;         % quantidade total de amostras
10 t = linspace(0,fT,nA); % vetor tempo
11 NL = size(THD_V2,2); % tamanho do vetor THD_V2
12 NH = 7;            % numero de componentes harmonicas
13
14 % Porcao da THD_V destinada a cada componente harmonica:
15 %(Usar um caso de cada vez, comentando os outros dois)
16
17 % Caso 1:
18     pTHD_V = sqrt([14.29 28.57 9.52 23.81 4.76 19.05]/100);
19
20
21 % Caso 2:
22     %pTHD_V = sqrt([50 0 33.33 0 16.67 0]/100);
23
24
25 % Caso 3:
26     %pTHD_V = sqrt([0 50 0 33.33 0 16.67]/100);
27
28 % Sinal de Tensao:
29     % Amplitude:
30     mV = ones(1,NH,NL);
31     for j = 1:NL
32         U_rms = 220;
33         mV(1,:,j) = U_rms*[1 pTHD_V(1)*THD_V1(j) pTHD_V(2)*THD_V1(j)
34             ) ...
35             pTHD_V(3)*THD_V1(j) pTHD_V(4)*THD_V1(j) pTHD_V(5)*...
36             THD_V1(j) pTHD_V(6)*THD_V1(j)];
37     end
38
39 % Fase:
40     fV = zeros(1,NH,NL);
41
42 % Sinal:
43     V = ones(1,NH,NL);
44     for h = 1:NH
45         for j = 1:NH
46             V(1,j,h) = mV(1,j,h)*cos(fV(1,j,h)) + 1i*mV(1,j,h)*...
47                 sin(fV(1,j,h));
48         end

```

```

48         end
49
50 % Carga:
51     R = 100;
52     L = w*0.1*(1:NH);
53     Z = R+1i*L;
54
55 % Sinal de Corrente:
56     % Sinal:
57     I = ones(1,NH,NL);
58     for j = 1:NL
59         I(:,j,:) = V(1, :, j) ./ Z;
60     end
61
62 % Amplitude e Fase:
63     mI = ones(1,NH,NL);
64     fI = ones(1,NH,NL);
65     for h = 1:NL
66         for j = 1:NH
67             [fI(1,j,h), mI(1,j,h)] = cart2pol(real(I(1,j,h)), ...
68                 imag(I(1,j,h)));
69         end
70     end
71
72 % Parametros do Modelo de Budeanu
73     % Potencia Ativa:
74     auxP = ones(1,NH,NL);
75     P_1 = ones(1,NL);
76     P_B = ones(1,NL);
77     for h = 1:NL
78         auxP(:, :, h) = (mV(:, :, h) .* mI(:, :, h) .* cos(fV(:, :, h) - fI(:, :, h)
79             ));
80         P_1(h) = auxP(1,1,h);
81         P_B(h) = sum(auxP(:, :, h));
82     end
83
84 % Potencia Reativa:
85     Q = ones(1,NH,NL);
86     Q_1 = ones(1,NL);
87     Q_B = ones(1,NL);
88     for h = 1:NL
89         Q(:, :, h) = (mV(:, :, h) .* mI(:, :, h) .* sin(fV(:, :, h) - fI(:, :, h)))

```

```

89         ;
90         Q_1(h) = Q(1,1,h);
91         Q_B(h) = sum(Q(:, :, h));
92     end
93
94     % Potencia de Distorcaao:
95     D = zeros(1,1,NL);
96     D_B = ones(1,NL);
97     for h = 1:NL
98         for m = 1:(NH-1)
99             D(1,1,h) = D(1,1,h) + (mV(:,m,h)*mI(:,m+1,h))^2 + ...
100                (mV(:,m+1,h)*mI(:,m,h))^2 - 2*mV(:,m,h)*mI(:,m+1,h)
101                ...
102                *mV(:,m+1,h)*mI(:,m,h)*cos((fV(:,m,h)-fI(:,m,h))
103                - ...
104                (fV(:,m+1,h)-fI(:,m+1,h))));
105         end
106         D_B(h) = sqrt(D(1,1,h));
107     end
108
109     % Potencia Aparente:
110     % Tensao e corrente eficaz:
111     V_rms = ones(1,NL);
112     I_rms = ones(1,NL);
113     for h = 1:NL
114         V_rms(h) = sqrt(sum(mV(:, :, h).^2));
115         I_rms(h) = sqrt(sum(mI(:, :, h).^2));
116     end
117     S = V_rms.*I_rms;
118
119     % Potencia Aparente Fundamental:
120     S_1 = ones(1,NL);
121     for h = 1:NL
122         S_1(h) = (mV(:,1,h)*mI(:,1,h));
123     end
124
125     % Fator de Potencia:
126     FP_B = ones(1,NL);
127     for h = 1:NL
128         FP_B(h) = P_B(h)/S(h);
129     end

```

```

128     % Fator de Deslocamento 1:
129         Fd_1 = ones(1,NL);
130         for h = 1:NL
131             Fd_1(h) = P_1(h)/S_1(h);
132         end
133
134     % Fator de Deslocamento 2:
135         Fd_2 = ones(1,NL);
136         for h = 1:NL
137             Fd_2(h) = P_B(h)/sqrt((P_B(h)^2)+(Q_B(h))^2);
138         end
139
140     % Parametros do Modelo de Fryze
141     % Potencia Ativa:
142     % Sinais de Tensao e Corrente Instantaneos:
143         v = ones(1,nA,NL);
144         i = ones(1,nA,NL);
145         for h = 1:NL
146             v(:, :, h) = mV(:, 1, h)*sqrt(2)*sin(w*t + fV(:, 1, h)) +...
147                 mV(:, 2, h)*sqrt(2)*sin(2*w*t + fV(:, 2, h)) +...
148                 mV(:, 3, h)*sqrt(2)*sin(3*w*t + fV(:, 3, h)) +...
149                 mV(:, 4, h)*sqrt(2)*sin(4*w*t + fV(:, 4, h)) +...
150                 mV(:, 5, h)*sqrt(2)*sin(5*w*t + fV(:, 5, h)) +...
151                 mV(:, 6, h)*sqrt(2)*sin(6*w*t + fV(:, 6, h)) +...
152                 mV(:, 7, h)*sqrt(2)*sin(7*w*t + fV(:, 7, h));
153             i(:, :, h) = mI(:, 1, h)*sqrt(2)*sin(w*t + fI(:, 1, h)) +...
154                 mI(:, 2, h)*sqrt(2)*sin(2*w*t + fI(:, 2, h)) +...
155                 mI(:, 3, h)*sqrt(2)*sin(3*w*t + fI(:, 3, h)) +...
156                 mI(:, 4, h)*sqrt(2)*sin(4*w*t + fI(:, 4, h)) +...
157                 mI(:, 5, h)*sqrt(2)*sin(5*w*t + fI(:, 5, h)) +...
158                 mI(:, 6, h)*sqrt(2)*sin(6*w*t + fI(:, 6, h)) +...
159                 mI(:, 7, h)*sqrt(2)*sin(7*w*t + fI(:, 7, h));
160         end
161
162     % Potencia Ativa:
163         p = ones(1,nA,NL);
164         P_F = ones(1,NL);
165         for h = 1:NL
166             p(:, :, h) = v(:, :, h).*i(:, :, h);
167             P_F(h) = trapz(t, p(:, :, h))/(n*T);
168         end
169

```

```

170 % Potencia Reativa:
171     Q_F = ones(1,NL);
172     for h = 1:NL
173         Q_F(h) = sqrt((S(h)^2)-(P_F(h)^2));
174     end
175
176 % Fator de Potencia:
177     FP_F = ones(1,NL);
178     for h = 1:NL
179         FP_F(h) = P_F(h)./S(h);
180     end
181
182 % Parametros do Modelo da Norma IEEE 1459-2010
183 % Potencia Ativa Harmonica:
184     P_H = zeros(1,NL);
185     for h = 1:NL
186         P_H(h) = P_B(h) - P_1(h);
187     end
188
189 % Potencia Ativa:
190     P = zeros(1,NL);
191     for h = 1:NL
192         P(h) = P_1(h) + P_H(h);
193     end
194
195
196 % Potencia Nao-Ativa:
197     N = zeros(1,NL);
198     for h = 1:NL
199         N(h) = sqrt(S(h)^2 - P(h)^2);
200     end
201
202 % Distorcao Harmonica Total de Tensao e de Corrente:
203     V_H = zeros(1,NL);
204     I_H = zeros(1,NL);
205     V_1 = zeros(1,NL);
206     I_1 = zeros(1,NL);
207     for h = 1:NL
208         V_H(h) = sqrt(sum(mV(:,2:NH,h).^2));
209         V_1(h) = mV(1);
210         I_H(h) = sqrt(sum(mI(:,2:NH,h).^2));
211         I_1(h) = mI(1);

```

```

212         end
213         THD_V = V_H./V_1;
214         THD_I = I_H./I_1;
215
216     % Potencia de Distorcao de Corrente:
217     D_I = zeros(1,NL);
218     for h = 1:NL
219         D_I(h) = S_1(h).*THD_I(h);
220     end
221
222     % Potencia de Distorcao de Corrente:
223     D_V = zeros(1,NL);
224     for h = 1:NL
225         D_V(h) = S_1(h).*THD_V(h);
226     end
227
228     % Potencia Aparente Harmonica:
229     S_H = zeros(1,NL);
230     for h = 1:NL
231         S_H(h) = S_1(h).*THD_I(h).*THD_V(h);
232     end
233
234     % Potencia de Distorcao Harmonica:
235     D_H = zeros(1,NL);
236     for h = 1:NL
237         D_H(h) = sqrt(S_H(h)^2 - P_H(h)^2);
238     end
239
240     % Potencia Aparente Nao-Fundamental:
241     S_N = zeros(1,NL);
242     for h = 1:NL
243         S_N(h) = sqrt(D_I(h)^2 + D_V(h)^2 + S_H(h)^2);
244     end
245
246     % Fator de Potencia:
247     FP = zeros(1,NL);
248     for h = 1:NL
249         FP(h) = P(h)./S(h);
250     end
251
252     % Fator de Potencia Fundamental:
253     FP_1 = zeros(1,NL);

```

```
254     for h = 1:NL
255         FP_1(h) = P_1(h) ./ S_1(h);
256     end
257 end
```


Simulação 2

Parte 1

```
1 clear all
2 clc
3
4
5 % Caso:
6 % Escolher Caso 1, 2 ou 3
7
8     E = 1;
9
10 % Distorcao:
11
12     THDV = 0.05;
13
14 [P_3phi, QB_3phi, DB_3phi, SV_3phi, FP_3phi, THDe_V, THDe_I, Se_1, De_I, De_V...
15     , Se_H, Se_N, Pe_H, De_H, P, Se, FPe, N, P1_pos, Q1_pos, S1_pos, ...
16     FP1_pos] = calc_pot_tri(E, THDV);
17
18 function [rmsVa, rmsVb, rmsVc, rmsVab, rmsVbc, rmsVca, rmsIa, rmsIb, rmsIc, ...
19     ang_a, ang_b, ang_c, mV1, aV1, mI1, aI1, In] = ger_sinal(H_a, H_b, H_c)
20
21
22
23
24 f = 60; % frequencia da rede
25 w = 2*pi*f; % frequencia angular
26 T = 1/f; % periodo do sinal
27 n = 3; % quantidade de periodos
28 fT = n*T; % tempo total de amostragem
29 Tx = 140; % quantidade de amostras por ciclo
30 nA = n*Tx; % quantidade total de amostras
31 t = linspace(0, fT, nA); % vetor tempo
32 nH = 7; % numero de componentes harmonicas
33
34 % Sinais de Tensao
```

```

15     rmsVa = 220*H_a;
16     rmsVb = 220*H_b;
17     rmsVc = 220*H_c;
18     xVa = zeros(1,nH);
19     xVb = zeros(1,nH);
20     xVc = zeros(1,nH);
21     yVa = zeros(1,nH);
22     yVb = zeros(1,nH);
23     yVc = zeros(1,nH);
24     Va = zeros(1,nH);
25     Vb = zeros(1,nH);
26     Vc = zeros(1,nH);
27     for i = 1:nH
28         [xVa(i),yVa(i)] = pol2cart(0,rmsVa(i));
29         [xVb(i),yVb(i)] = pol2cart(deg2rad(240),rmsVb(i));
30         [xVc(i),yVc(i)] = pol2cart(deg2rad(120),rmsVc(i));
31         Va(i) = xVa(i) + 1i*yVa(i);
32         Vb(i) = xVb(i) + 1i*yVb(i);
33         Vc(i) = xVc(i) + 1i*yVc(i);
34     end
35     rmsVab = abs(Va - Vb);
36     rmsVbc = abs(Vb - Vc);
37     rmsVca = abs(Vc - Va);
38
39 % Carga RL
40     R_delta = 600;
41     R_Y = 200;
42     L_delta = 1.755;
43     L_Y = 0.585;
44     R = 1/((1/R_Y) + (3/R_delta));
45     X_delta = L_delta*w*(1:nH);
46     X_Y = L_Y*w*(1:nH);
47     X = zeros(1,nH);
48     Z = zeros(1,nH);
49     for j = 1:nH
50         X(j) = 1/((1/X_Y(j)) + (3/X_delta(j)));
51         Z(j) = R + 1i*X(j);
52     end
53
54 % Sinais de Corrente
55     rmsIa = rmsVa./abs(Z);
56     rmsIb = rmsVb./abs(Z);

```

```

57     rmsIc = rmsVc./ abs(Z);
58     ang_Z = angle(Z);
59     ang_Z = rad2deg(ang_Z);
60     ang_a = (0 - ang_Z);
61     ang_b = (240 - ang_Z);
62     ang_c = (120 - ang_Z);
63
64     % Componentes Simetricas
65     Va = [0,220];
66     Vb = [deg2rad(240),220];
67     Vc = [deg2rad(120),220];
68     alpha = -0.5 + 1i*0.866;
69     [xVa,yVa] = pol2cart(Va(1),Va(2));
70     [xVb,yVb] = pol2cart(Vb(1),Vb(2));
71     [xVc,yVc] = pol2cart(Vc(1),Vc(2));
72     Va = xVa + 1i*yVa;
73     Vb = xVb + 1i*yVb;
74     Vc = xVc + 1i*yVc;
75     V1 = (1/3)*(Va + alpha*Vb + (alpha^2)*Vc);
76     mV1 = abs(V1);
77     aV1 = angle(V1);
78     Ia = zeros(1,nH);
79     Ib = zeros(1,nH);
80     Ic = zeros(1,nH);
81     for j = 1:nH
82         Ia(j) = Va/Z(j);
83         Ib(j) = Vb/Z(j);
84         Ic(j) = Vc/Z(j);
85     end
86     I1 = (1/3)*(Ia(1) + alpha*Ib(1) + (alpha^2)*Ic(1));
87     mI1 = abs(I1);
88     aI1 = angle(I1);
89
90     % Corrente no Neutro
91     In = zeros(1,nH);
92     for j = 1:nH
93         In(j) = abs(Ia(j) + Ib(j) + Ic(j));
94     end
95 end
1 function [P_3phi,QB_3phi,DB_3phi,SV_3phi,FP_3phi,THDe_V,THDe_I,Se_1,...
2         De_I,De_V,Se_H,Se_N,Pe_H,De_H,P,Se,FPe,N,P1_pos,Q1_pos,S1_pos,...

```

```

3     FP1_pos] = calc_pot_tri(E,THDV)
4
5     % Caso 1
6     if E == 1
7         H_a = THDV*sqrt([100/(THDV)^2 14.29 28.57 9.52 23.81 4.76
8             19.05]/100);
9         H_b = THDV*sqrt([100/(THDV)^2 14.29 28.57 9.52 23.81 4.76
10            19.05]/100);
11        H_c = THDV*sqrt([100/(THDV)^2 14.29 28.57 9.52 23.81 4.76
12            19.05]/100);
13
14        % Caso 2
15        elseif E == 2
16            H_a = THDV*sqrt([100/(THDV)^2 50 0 33.33 0 16.67 0]/100);
17            H_b = THDV*sqrt([100/(THDV)^2 50 0 33.33 0 16.67 0]/100);
18            H_c = THDV*sqrt([100/(THDV)^2 50 0 33.33 0 16.67 0]/100);
19
20        % Caso 3
21        elseif E == 3
22            H_a = THDV*sqrt([100/(THDV)^2 0 50 0 33.33 0 16.67]/100);
23            H_b = THDV*sqrt([100/(THDV)^2 0 50 0 33.33 0 16.67]/100);
24            H_c = THDV*sqrt([100/(THDV)^2 0 50 0 33.33 0 16.67]/100);
25        end
26
27    [rmsVa ,rmsVb ,rmsVc ,rmsVab ,rmsVbc ,rmsVca ,rmsIa ,rmsIb ,rmsIc ,ang_a ,ang_b
28        , ...
29        ang_c ,mV1 ,aV1 ,mI1 ,aI1 ,In] = ger_sinal(H_a,H_b,H_c);
30
31    % Potencia Ativa (Curtis e Silsbee) P_3phi
32    aP_3phi = rmsVa.*rmsIa.*cosd(0 - ang_a);
33    bP_3phi = rmsVb.*rmsIb.*cosd(240 - ang_b);
34    cP_3phi = rmsVc.*rmsIc.*cosd(120 - ang_c);
35    P_3phi = sum(aP_3phi) + sum(bP_3phi) + sum(cP_3phi);
36
37    % Potencia Reativa (Curtis e Silsbee) QB_3phi
38    aQB_3phi = rmsVa.*rmsIa.*sind(0 - ang_a);
39    bQB_3phi = rmsVb.*rmsIb.*sind(240 - ang_b);
40    cQB_3phi = rmsVc.*rmsIc.*sind(120 - ang_c);
41    QB_3phi = sum(aQB_3phi) + sum(bQB_3phi) + sum(cQB_3phi);
42
43    % Potencia de Distorcao (Curtis e Silsbee) DB_3phi
44    aDB_3phi = 0;

```

```

41     bDB_3phi = 0;
42     cDB_3phi = 0;
43     for m = 1:6
44         aDB_3phi = aDB_3phi + (rmsVa(m)*rmsIa(m+1))^2 + (rmsVa(m+1)*...
45             rmsIa(m))^2 - 2*rmsVa(m)*rmsIa(m+1)*rmsVa(m+1)*rmsIa(m)*...
46             cos((0 - ang_a(m)) - (0 - ang_a(m+1)));
47         bDB_3phi = bDB_3phi + (rmsVb(m)*rmsIb(m+1))^2 + (rmsVb(m+1)*...
48             rmsIb(m))^2 - 2*rmsVb(m)*rmsIb(m+1)*rmsVb(m+1)*rmsIb(m)*...
49             cos((240 - ang_b(m)) - (240 - ang_b(m+1)));
50         cDB_3phi = cDB_3phi + (rmsVc(m)*rmsIc(m+1))^2 + (rmsVc(m+1)*...
51             rmsIc(m))^2 - 2*rmsVc(m)*rmsIc(m+1)*rmsVc(m+1)*rmsIc(m)*...
52             cos((120 - ang_c(m)) - (120 - ang_c(m+1)));
53     end
54     aDB_3phi = sqrt(aDB_3phi);
55     bDB_3phi = sqrt(bDB_3phi);
56     cDB_3phi = sqrt(cDB_3phi);
57     DB_3phi = aDB_3phi + bDB_3phi + cDB_3phi;
58
59     % Potencia Aparente Vetorial SV_3phi
60     SV_3phi = sqrt(P_3phi^2 + QB_3phi^2 + DB_3phi^2);
61
62     % Fator de Potencia Vetorial Trifasico
63     FP_3phi = P_3phi/SV_3phi;
64
65     % Corrente Efetiva Fundamental Ie_1
66     Ie_1 = sqrt((rmsIa(1)^2 + rmsIb(1)^2 + rmsIc(1)^2 + In(1)^2)/3);
67
68     % Corrente Efetiva Harmonica Ie_H
69     Iah = 0;
70     Ibh = 0;
71     Ich = 0;
72     Inh = 0;
73     for i = 2:7
74         Iah = Iah + rmsIa(i)^2;
75         Ibh = Ibh + rmsIb(i)^2;
76         Ich = Ich + rmsIc(i)^2;
77         Inh = Inh + In(i)^2;
78     end
79
80     Ie_H = sqrt((Iah + Ibh + Ich + Inh)/3);
81
82     % Corrente Efetiva Ie

```

```

83     Ie = sqrt(Ie_1^2 + Ie_H^2);
84
85 % Tensao Efetiva Fundamental Ve_1
86     Ve_1 = sqrt((3*(rmsVa(1)^2 + rmsVb(1)^2 + rmsVc(1)^2) + ...
87         rmsVab(1)^2 + rmsVbc(1)^2 + rmsVca(1)^2)/18);
88
89 % Tensao Efetiva Harmonica Ve_H
90     Vah = 0;
91     Vbh = 0;
92     Vch = 0;
93     Vabh = 0;
94     Vbch = 0;
95     Vcah = 0;
96     for i = 2:7
97         Vah = Vah + rmsVa(i)^2;
98         Vbh = Vbh + rmsVb(i)^2;
99         Vch = Vch + rmsVc(i)^2;
100        Vabh = Vabh + (rmsVab(i))^2;
101        Vbch = Vbch + (rmsVbc(i))^2;
102        Vcah = Vcah + (rmsVca(i))^2;
103    end
104    Ve_H = sqrt((3*(Vah + Vbh + Vch) + Vabh + Vbch + Vcah)/18);
105
106 % Tensao Efetiva Ve
107     Ve = sqrt(Ve_1^2 + Ve_H^2);
108
109 % Distorcao Harmonica Equivalente Total de Tensao THDe_V
110     THDe_V = Ve_H/Ve_1;
111
112 % Distorcao Harmonica Equivalente Total de Corrente THDe_I
113     THDe_I = Ie_H/Ie_1;
114
115 % Potencia Aparente Efetiva Fundamental Se_1
116     Se_1 = 3*Ve_1*Ie_1;
117
118 % Potencia de Distorcao de Corrente De_I
119     De_I = Se_1*THDe_I;
120
121 % Potencia de Distorcao de Tensao De_V
122     De_V = Se_1*THDe_V;
123
124 % Potencia Aparente Harmonica Se_H

```

```

125     Se_H = Se_1*THDe_I*THDe_V;
126
127 % Potencia Aparente Efetiva Nao-Fundamental Se_N
128     Se_N = sqrt(De_I^2 + De_V^2 + Se_H^2);
129
130 % Potencia Ativa Efetiva Harmonica Pe_H
131     Pe_H = P_3phi - rmsVa(1)*rmsIa(1)*cosd(0 - ang_a(1)) -...
132             rmsVb(1)*rmsIb(1)*cosd(240 - ang_b(1)) -...
133             rmsVc(1)*rmsIc(1)*cosd(120 - ang_c(1));
134
135 % Potencia de Distorcao Harmonica De_H
136     De_H = sqrt(Se_H^2 - Pe_H^2);
137
138 % Potencia Ativa P
139     P = P_3phi;
140
141 % Potencia Aparente Efetiva Se
142     Se = 3*Ve*Ie;
143
144 % Fator de Potencia Efetivo FPe
145     FPe = P/Se;
146
147 % Potencia Nao-Ativa N
148     N = sqrt(Se^2 - P^2);
149
150 % Potencia em Componentes Simetricas
151     P1_pos = 3*mV1*mI1*cos(aV1 - aI1);
152     Q1_pos = 3*mV1*mI1*sin(aV1 - aI1);
153     S1_pos = sqrt(P1_pos^2 + Q1_pos^2);
154     FP1_pos = P1_pos/S1_pos;
155
156 end

```

Parte 2

```

1 clear all
2 clc
3
4 % Caso:
5 % Escolher Caso 1, 2 ou 3
6
7     E = 1;

```

```

8
9 % Distorcao:
10
11     THDV = linspace(0,0.3,100);
12
13 [P_3phi,QB_3phi,DB_3phi,SV_3phi,FP_3phi,THDe_V,THDe_I,Se_1,De_I,...
14     De_V,Se_H,Se_N,Pe_H,De_H,P,Se,FPe,N,P1_pos,Q1_pos,S1_pos,...
15     FP1_pos] = calc_pot_tri_2(E,THDV);

1 function [rmsVa,rmsVb,rmsVc,rmsVab,rmsVbc,rmsVca,rmsIa,rmsIb,rmsIc,
        ang_a,ang_b,ang_c,...
2         mV1,aV1,mI1,aI1,In] = ger_sinal_2(H_a,H_b,H_c,THDV)
3
4     f = 60;                                % frequ?ncia da rede
5     w = 2*pi*f;                            % frequ?ncia angular
6     nH = 7;                                % n?mero de componentes harm?nicas
7     nT = size(THDV,2);
8
9 % Sinais de Tens?o
10
11     rmsVa = 220*H_a;
12     rmsVb = 220*H_b;
13     rmsVc = 220*H_c;
14
15     xVa = zeros(1,nH,nT);
16     xVb = zeros(1,nH,nT);
17     xVc = zeros(1,nH,nT);
18     yVa = zeros(1,nH,nT);
19     yVb = zeros(1,nH,nT);
20     yVc = zeros(1,nH,nT);
21
22     Va = zeros(1,nH,nT);
23     Vb = zeros(1,nH,nT);
24     Vc = zeros(1,nH,nT);
25
26     rmsVab = zeros(1,nH,nT);
27     rmsVbc = zeros(1,nH,nT);
28     rmsVca = zeros(1,nH,nT);
29
30     for h = 1:nT
31
32         for i = 1:nH

```



```

33
34     [xVa(:,i,h),yVa(:,i,h)] = pol2cart(0,rmsVa(:,i,h));
35     [xVb(:,i,h),yVb(:,i,h)] = pol2cart(deg2rad(240),rmsVb(:,i,h)
36         ));
37     [xVc(:,i,h),yVc(:,i,h)] = pol2cart(deg2rad(120),rmsVc(:,i,h)
38         ));
39
40     Va(:,i,h) = xVa(:,i,h) + 1i*yVa(:,i,h);
41     Vb(:,i,h) = xVb(:,i,h) + 1i*yVb(:,i,h);
42     Vc(:,i,h) = xVc(:,i,h) + 1i*yVc(:,i,h);
43
44     end
45
46     rmsVab(:, :, h) = abs(Va(:, :, h) - Vb(:, :, h));
47     rmsVbc(:, :, h) = abs(Vb(:, :, h) - Vc(:, :, h));
48     rmsVca(:, :, h) = abs(Vc(:, :, h) - Va(:, :, h));
49
50     end
51
52 % Carga RL
53
54     R_delta = 600;
55     R_Y = 200;
56     L_delta = 1.755;
57     L_Y = 0.585;
58
59     R = 1/((1/R_Y) + (3/R_delta));
60
61     X_delta = L_delta*w*(1:nH);
62     X_Y = L_Y*w*(1:nH);
63
64     X = zeros(1,nH);
65     Z = zeros(1,nH);
66
67     for j = 1:nH
68
69         X(j) = 1/((1/X_Y(j)) + (3/X_delta(j)));
70         Z(j) = R + 1i*X(j);
71
72     end

```

```

73
74 % Sinais de Corrente
75
76 rmsIa = zeros(1,nH,nT);
77 rmsIb = zeros(1,nH,nT);
78 rmsIc = zeros(1,nH,nT);
79
80 for h = 1:nT
81
82     rmsIa(:, :, h) = rmsVa(:, :, h) ./ abs(Z);
83     rmsIb(:, :, h) = rmsVb(:, :, h) ./ abs(Z);
84     rmsIc(:, :, h) = rmsVc(:, :, h) ./ abs(Z);
85
86 end
87
88 ang_Z = angle(Z);
89 ang_Z = rad2deg(ang_Z);
90
91 ang_a = (0 - ang_Z);
92 ang_b = (240 - ang_Z);
93 ang_c = (120 - ang_Z);
94
95
96 % Componentes Simétricas
97
98 Va = zeros(1,2,nT);
99 Vb = zeros(1,2,nT);
100 Vc = zeros(1,2,nT);
101
102 for h = 1:nT
103
104     Va(:, :, h) = [0,220];
105     Vb(:, :, h) = [deg2rad(240),220];
106     Vc(:, :, h) = [deg2rad(120),220];
107
108 end
109
110 alpha = -0.5 + 1i*0.866;
111
112 xVa = zeros(1,nT);
113 xVb = zeros(1,nT);
114 xVc = zeros(1,nT);

```

```

115     yVa = zeros(1,nT);
116     yVb = zeros(1,nT);
117     yVc = zeros(1,nT);
118
119     for h = 1:nT
120
121         [xVa(h),yVa(h)] = pol2cart(Va(:,1,h),Va(:,2,h));
122         [xVb(h),yVb(h)] = pol2cart(Vb(:,1,h),Vb(:,2,h));
123         [xVc(h),yVc(h)] = pol2cart(Vc(:,1,h),Vc(:,2,h));
124
125     end
126
127     Va = zeros(1,nT);
128     Vb = zeros(1,nT);
129     Vc = zeros(1,nT);
130
131     for h = 1:nT
132
133         Va(h) = xVa(h) + 1i*yVa(h);
134         Vb(h) = xVb(h) + 1i*yVb(h);
135         Vc(h) = xVc(h) + 1i*yVc(h);
136
137     end
138
139     V0 = zeros(1,nT);
140     V1 = zeros(1,nT);
141     V2 = zeros(1,nT);
142
143     for h = 1:nT
144
145         V0(h) = (1/3)*(Va(h) + Vb(h) + Vc(h));
146         V1(h) = (1/3)*(Va(h) + alpha*Vb(h) + (alpha^2)*Vc(h));
147         V2(h) = (1/3)*(Va(h) + (alpha^2)*Vb(h) + alpha*Vc(h));
148
149     end
150
151     mV1 = abs(V1);
152     aV1 = angle(V1);
153
154     Ia = Va/Z(1);
155     Ib = Vb/Z(1);
156     Ic = Vc/Z(1);

```

```

157
158     I0 = zeros(1,nT);
159     I1 = zeros(1,nT);
160     I2 = zeros(1,nT);
161
162     for h = 1:nT
163
164         I0(h) = (1/3)*(Ia(h) + Ib(h) + Ic(h));
165         I1(h) = (1/3)*(Ia(h) + alpha*Ib(h) + (alpha^2)*Ic(h));
166         I2(h) = (1/3)*(Ia(h) + (alpha^2)*Ib(h) + alpha*Ic(h));
167
168     end
169
170     mI1 = abs(I1);
171     aI1 = angle(I1);
172
173
174     % Corrente no Neutro
175
176     Ia = zeros(1,nH,nT);
177     Ib = zeros(1,nH,nT);
178     Ic = zeros(1,nH,nT);
179
180     for h = 1:nT
181
182         for j = 1:nH
183
184             Ia(:,j,h) = rmsIa(:,j,h)*cosd(ang_a(j)) + 1i*rmsIa(:,j,
185                 h)*sind(ang_a(j));
186             Ib(:,j,h) = rmsIb(:,j,h)*cosd(ang_b(j)) + 1i*rmsIb(:,j,
187                 h)*sind(ang_b(j));
188             Ic(:,j,h) = rmsIc(:,j,h)*cosd(ang_c(j)) + 1i*rmsIc(:,j,
189                 h)*sind(ang_c(j));
190
191         end
192
193     end
194
195     In = zeros(1,nH,nT);
196
197     for h = 1:nT

```

```

196         for j = 1:nH
197
198             In(:,j,h) = abs(Ia(:,j,h) + Ib(:,j,h) + Ic(:,j,h));
199
200         end
201
202     end
203
204 end

1 function [P_3phi, QB_3phi, DB_3phi, SV_3phi, FP_3phi, THDe_V, THDe_I, Se_1, ...
2     De_I, De_V, Se_H, Se_N, Pe_H, De_H, P, Se, FPe, N, P1_pos, Q1_pos, S1_pos, ...
3     FP1_pos] = calc_pot_tri_2(E, THDV)
4
5 nH = 7;
6 nT = size(THDV, 2);
7
8 % Caso 1
9     H_a = zeros(1, nH, nT);
10    H_b = zeros(1, nH, nT);
11    H_c = zeros(1, nH, nT);
12    if E == 1
13        for h = 1:nT
14            H_a(:, :, h) = THDV(h)*sqrt([100/(THDV(h))^2 14.29 28.57
15                9.52...
16                23.81 4.76 19.05]/100);
17            H_b(:, :, h) = THDV(h)*sqrt([100/(THDV(h))^2 14.29 28.57
18                9.52...
19                23.81 4.76 19.05]/100);
20            H_c(:, :, h) = THDV(h)*sqrt([100/(THDV(h))^2 14.29 28.57
21                9.52...
22                23.81 4.76 19.05]/100);
23        end
24
25 % Caso 2
26    elseif E == 2
27        for h = 1:nT
28            H_a(:, :, h) = THDV(h)*sqrt([100/(THDV(h))^2 50 0 33.33 0 ...
29                16.67 0]/100);
30            H_b(:, :, h) = THDV(h)*sqrt([100/(THDV(h))^2 50 0 33.33 0 ...
31                16.67 0]/100);
32            H_c(:, :, h) = THDV(h)*sqrt([100/(THDV(h))^2 50 0 33.33 0 ...

```

```

30         16.67 0]/100);
31     end
32
33 % Caso 3
34     elseif E == 3
35         for h = 1:nT
36             H_a(:, :, h) = THDV(h)*sqrt([100/(THDV(h))^2 0 50 0 33.33 0
37                 ...
38                 16.67]/100);
39             H_b(:, :, h) = THDV(h)*sqrt([100/(THDV(h))^2 0 50 0 33.33 0
40                 ...
41                 16.67]/100);
42             H_c(:, :, h) = THDV(h)*sqrt([100/(THDV(h))^2 0 50 0 33.33 0
43                 ...
44                 16.67]/100);
45         end
46     end
47
48 [rmsVa, rmsVb, rmsVc, rmsVab, rmsVbc, rmsVca, rmsIa, rmsIb, rmsIc, ang_a, ang_b
49     , ...
50     ang_c, mV1, aV1, mI1, aI1, In] = ger_sinal_2(H_a, H_b, H_c, THDV);
51
52 % Potencia Ativa (Curtis e Silsbee) P_3phi
53 aP_3phi = zeros(1, nH, nT);
54 bP_3phi = zeros(1, nH, nT);
55 cP_3phi = zeros(1, nH, nT);
56 P_3phi = zeros(1, nT);
57 for h = 1:nT
58     aP_3phi(:, :, h) = rmsVa(:, :, h).*rmsIa(:, :, h).*cosd(0 - ang_a);
59     bP_3phi(:, :, h) = rmsVb(:, :, h).*rmsIb(:, :, h).*cosd(240 - ang_b);
60     cP_3phi(:, :, h) = rmsVc(:, :, h).*rmsIc(:, :, h).*cosd(120 - ang_c);
61     P_3phi(h) = sum(aP_3phi(:, :, h)) + sum(bP_3phi(:, :, h)) + ...
62         sum(cP_3phi(:, :, h));
63 end
64
65 % Potencia Reativa (Curtis e Silsbee) QB_3phi
66 aQB_3phi = zeros(1, nH, nT);
67 bQB_3phi = zeros(1, nH, nT);
68 cQB_3phi = zeros(1, nH, nT);
69 QB_3phi = zeros(1, nT);
70 for h = 1:nT
71     aQB_3phi(:, :, h) = rmsVa(:, :, h).*rmsIa(:, :, h).*sind(0 - ang_a);

```

```

68     bQB_3phi(:, :, h) = rmsVb(:, :, h) .* rmsIb(:, :, h) .* sind(240 - ang_b)
        ;
69     cQB_3phi(:, :, h) = rmsVc(:, :, h) .* rmsIc(:, :, h) .* sind(120 - ang_c)
        ;
70     QB_3phi(h) = sum(aQB_3phi(:, :, h)) + sum(bQB_3phi(:, :, h)) + ...
71               sum(cQB_3phi(:, :, h));
72     end
73
74 % Potencia de Distorcaao (Curtis e Silsbee) DB_3phi
75     aDB_3phi = zeros(1, nT);
76     bDB_3phi = zeros(1, nT);
77     cDB_3phi = zeros(1, nT);
78     DB_3phi = zeros(1, nT);
79     for h = 1:nT
80         for m = 1:6
81             aDB_3phi(h) = aDB_3phi(h) + (rmsVa(:, m, h) * rmsIa(:, m+1, h))^2
                ...
82             + (rmsVa(:, m+1, h) * rmsIa(:, m, h))^2 - 2 * rmsVa(:, m, h) * ...
83             rmsIa(:, m+1, h) * rmsVa(:, m+1, h) * rmsIa(:, m, h) * ...
84             cos((0 - ang_a(m)) - (0 - ang_a(m+1)));
85             bDB_3phi(h) = bDB_3phi(h) + (rmsVb(:, m, h) * rmsIb(:, m+1, h))^2
                ...
86             + (rmsVb(:, m+1, h) * rmsIb(:, m, h))^2 - 2 * rmsVb(:, m, h) * ...
87             rmsIb(:, m+1, h) * rmsVb(:, m+1, h) * rmsIb(:, m, h) * ...
88             cos((240 - ang_b(m)) - (240 - ang_b(m+1)));
89             cDB_3phi(h) = cDB_3phi(h) + (rmsVc(:, m, h) * rmsIc(:, m+1, h))^2
                ...
90             + (rmsVc(:, m+1, h) * rmsIc(:, m, h))^2 - 2 * rmsVc(:, m, h) * ...
91             rmsIc(:, m+1, h) * rmsVc(:, m+1, h) * rmsIc(:, m, h) * ...
92             cos((120 - ang_c(m)) - (120 - ang_c(m+1)));
93         end
94     end
95     aDB_3phi = sqrt(aDB_3phi);
96     bDB_3phi = sqrt(bDB_3phi);
97     cDB_3phi = sqrt(cDB_3phi);
98     for h = 1:nT
99         DB_3phi(h) = aDB_3phi(h) + bDB_3phi(h) + cDB_3phi(h);
100    end
101
102 % Potencia Aparente Vetorial SV_3phi
103     SV_3phi = zeros(1, nT);
104     for h = 1:nT

```

```

105         SV_3phi(h) = sqrt(P_3phi(h)^2 + QB_3phi(h)^2 + DB_3phi(h)^2);
106     end
107
108
109 % Fator de Potencia Vetorial Trifasico
110     FP_3phi = P_3phi./SV_3phi;
111
112 % Corrente Efetiva Fundamental Ie_1
113     Ie_1 = zeros(1,nT);
114     for h = 1:nT
115         Ie_1(h) = sqrt((rmsIa(:,1,h)^2 + rmsIb(:,1,h)^2 + rmsIc(:,1,h)
116             ^2 ...
117             + In(:,1,h)^2)/3);
118     end
119
120 % Corrente Efetiva Harmonica Ie_H
121     Iah = zeros(1,nT);
122     Ibh = zeros(1,nT);
123     Ich = zeros(1,nT);
124     Inh = zeros(1,nT);
125     for h = 1:nT
126         for i = 2:7
127             Iah(h) = Iah(h) + rmsIa(:,i,h)^2;
128             Ibh(h) = Ibh(h) + rmsIb(:,i,h)^2;
129             Ich(h) = Ich(h) + rmsIc(:,i,h)^2;
130             Inh(h) = Inh(h) + In(:,i,h)^2;
131         end
132     end
133     Ie_H = zeros(1,nT);
134     for h = 1:nT
135         Ie_H(h) = sqrt((Iah(h) + Ibh(h) + Ich(h) + Inh(h))/3);
136     end
137
138 % Corrente Efetiva Ie
139     Ie = sqrt(Ie_1.^2 + Ie_H.^2);
140
141 % Tensao Efetiva Fundamental Ve_1
142     Ve_1 = zeros(1,nT);
143     for h = 1:nT
144         Ve_1(h) = sqrt((3*(rmsVa(:,1,h)^2 + rmsVb(:,1,h)^2 + rmsVc(:,1,
145             h)^2) + ...
146             rmsVab(:,1,h)^2 + rmsVbc(:,1,h)^2 + rmsVca(:,1,h)^2)/18);

```



```

145     end
146
147 % Tensao Efetiva Harmonica Ve_H
148     Vah = zeros(1,nT);
149     Vbh = zeros(1,nT);
150     Vch = zeros(1,nT);
151     Vabh = zeros(1,nT);
152     Vbch = zeros(1,nT);
153     Vcah = zeros(1,nT);
154     for h = 1:nT
155         for i = 2:7
156             Vah(h) = Vah(h) + rmsVa(:,i,h)^2;
157             Vbh(h) = Vbh(h) + rmsVb(:,i,h)^2;
158             Vch(h) = Vch(h) + rmsVc(:,i,h)^2;
159             Vabh(h) = Vabh(h) + (rmsVab(:,i,h))^2;
160             Vbch(h) = Vbch(h) + (rmsVbc(:,i,h))^2;
161             Vcah(h) = Vcah(h) + (rmsVca(:,i,h))^2;
162         end
163     end
164     Ve_H = zeros(1,nT);
165     for h = 1:nT
166         Ve_H(h) = sqrt((3*(Vah(h) + Vbh(h) + Vch(h)) + Vabh(h) + Vbch(h)
167             ) ...
168             + Vcah(h))/18);
169     end
170 % Tensao Efetiva Ve
171     Ve = sqrt(Ve_1.^2 + Ve_H.^2);
172
173 % Distorcao Harmonica Equivalente Total de Tensao THDe_V
174     THDe_V = Ve_H./Ve_1;
175
176 % Distorcao Harmonica Equivalente Total de Corrente THDe_I
177     THDe_I = Ie_H./Ie_1;
178
179 % Potencia Aparente Efetiva Fundamental Se_1
180     Se_1 = 3*Ve_1.*Ie_1;
181
182 % Potencia de Distorcao de Corrente De_I
183     De_I = Se_1.*THDe_I;
184
185 % Potencia de Distorcao de Tensao De_V

```

```

186     De_V = Se_1.*THDe_V;
187
188 % Potencia Aparente Harmonica Se_H
189     Se_H = Se_1.*THDe_I.*THDe_V;
190
191 % Potencia Aparente Efetiva Nao-Fundamental Se_N
192     Se_N = sqrt(De_I.^2 + De_V.^2 + Se_H.^2);
193
194 % Potencia Ativa Efetiva Harmonica Pe_H
195     Pe_H = zeros(1,nT);
196     for h = 1:nT
197         Pe_H(h) = P_3phi(h) - rmsVa(:,1,h)*rmsIa(:,1,h)*cosd(0 - ...
198             ang_a(1)) - rmsVb(:,1,h)*rmsIb(:,1,h)*cosd(240 - ang_b(1))
199             - ...
200             rmsVc(:,1,h)*rmsIc(:,1,h)*cosd(120 - ang_c(1));
201     end
202
203 % Potencia de Distorcao Harmonica De_H
204     De_H = sqrt(Se_H.^2 - Pe_H.^2);
205
206 % Potencia Ativa P
207     P = P_3phi;
208
209 % Potencia Aparente Efetiva Se
210     Se = 3*Ve.*Ie;
211
212 % Fator de Potencia Efetivo FPe
213     FPe = P./Se;
214
215 % Potencia Nao-Ativa N
216     N = sqrt(Se.^2 - P.^2);
217
218 % Potencia em Componentes Simetricas
219     P1_pos = zeros(1,nT);
220     Q1_pos = zeros(1,nT);
221     S1_pos = zeros(1,nT);
222     FP1_pos = zeros(1,nT);
223     for h = 1:nT
224         P1_pos(h) = 3*mV1(h)*mI1(h)*cos(aV1(h) - aI1(h));
225         Q1_pos(h) = 3*mV1(h)*mI1(h)*sin(aV1(h) - aI1(h));
226         S1_pos(h) = sqrt(P1_pos(h)^2 + Q1_pos(h)^2);
227         FP1_pos(h) = P1_pos(h)/S1_pos(h);

```

227 end

228 end