



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - *Campus de Ilha Solteira*

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**“Análise da Máquina de Indução Trifásica através das
Grandezas de Buchholz-Goodhue aplicando os Vetores
Espaciais Instantâneos nas condições de desequilíbrio e
distorção conforme a IEEE 1459-2000”**

MARCELO YOSHIYUKI MOTOKI

Orientador: Prof. Dr. Dalgerti Lelis Milanese

Ilha Solteira, Junho de 2008.

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

“Análise da Máquina de Indução Trifásica através das Grandezas de Buchholz-Goodhue aplicando os Vetores Espaciais Instantâneos nas condições de desequilíbrio e distorção conforme a IEEE 1459-2000”

MARCELO YOSHIYUKI MOTOKI

Orientador: Prof. Dr. Dalgerti Lelis Milanese

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Automação.

Ilha Solteira – SP
junho/2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

M919a Motoki, Marcelo Yoshiyuki
Análise da máquina de indução trifásica através das grandezas de Buchholz-Goodhue aplicando os vetores espaciais instantâneos nas condições de desequilíbrio e distorção conforme a IEEE 1459-2000 / Marcelo Yoshiyuki Motoki. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2008
98 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2008

Orientador: Dalgerti Lélis Milanese
Bibliografia: p. 86-89

1. Potência complexa instantânea. 2. Vetores espaciais instantâneos.
3. Parâmetros de Buchholz-Goodhue. 4. Fator de potência.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Análise da Máquina de Indução Trifásica através das Grandezas de Buchholz-Goodhue aplicando os Vetores Espaciais Instantâneos nas condições de desequilíbrio e com ondas não-senoidais conforme a IEEE 1459-2000

AUTOR: MARCELO YOSHIYUKI MOTOKI

ORIENTADOR: Prof. Dr. DALGERTI LELIS MILANESE

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA ELÉTRICA pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. DALGERTI LELIS MILANESE
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. JÚLIO BORGES DE SOUZA
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. MILTON ITSUO SAMESIMA
Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal de Uberlândia

Data da realização: 09 de junho de 2008.

Presidente da Comissão Examinadora
Prof. Dr. DALGERTI LELIS MILANESE

Ao meu pai Iwane Motoki

À minha mãe Toshie Motoki

AGRADECIMENTOS

Eu agradeço aos meus pais, aos meus irmãos Futoshi, Seiko, Toyoko, Eiko, Kazuyoshi e Hiroaki e ao meu tio Mikio, que são meus maiores exemplos de vida.

Ao professor Dalgerti pela confiança e pelo apoio dado.

Aos funcionários da Unesp pelo empenho e paciência que tiveram durante todo o desenvolvimento do mestrado.

Aos meus amigos de república/faculdade, José Aparecido (Russo), Danilo (Piqui), Cristiano (Morfético), Edivaldo (Gemada), Marco Antônio (D4), Gustavo (Babésia), Carlos (Baguete), Guilherme (Migué), Renato, Leandro (Babinha), João (Fusca), Semensato, Roberta, Ludmila, Lígia, Loraine, Márcia, Elaine, Renata e Flávia. Sem eles, Ilha Solteira não teria a mesma graça.

Aos meus amigos da “Esquina”, Leandro (Bozó), Leandro (Mexicano), Kleber e Júlio, que há muito me acompanham nesta jornada.

Aos funcionários e à diretoria da CERT, que possibilitaram o término deste trabalho.

E agradeço, principalmente, a DEUS por tudo que tem me dado e, especialmente, por ter colocado em meu caminho tantas pessoas iluminadas.

POR QUEM OS SINOS DOBRAM

(RAUL SEIXAS)

Nunca se vence uma guerra lutando sozinho
Você sabe que a gente precisa entrar em contato
Com toda essa força contida é que vive guardada
O eco de suas palavras não repercutem em nada

É sempre mais fácil achar que a culpa é do outro
Evita o aperto de mão de um possível aliado, é
Convence as paredes do quarto, e dorme tranquilo
Sabendo no fundo do peito que não era nada daquilo

Coragem, coragem, se o que você quer é aquilo que pensa e faz

Coragem, coragem, eu sei que você pode mais

É sempre mais fácil achar que a culpa é do outro
Evita o aperto de mão de um possível aliado
Convence as paredes do quarto, e dorme tranquilo
Sabendo no fundo do peito que não era nada daquilo

Coragem, coragem, se o que você quer é aquilo que pensa e faz

Coragem, coragem, eu sei que você pode mais

RESUMO

Realiza-se neste trabalho um estudo da Teoria da Potência Complexa Instantânea aplicada na máquina de indução trifásica, onde são mostrados os vetores espaciais instantâneos (VEI's), pois estes reduzem os parâmetros para estudo (o sistema trifásico é representado por um equivalente ortogonal).

Através dos vetores espaciais instantâneos serão calculadas as grandezas de Buchholz-Goodhue para a determinação do aproveitamento da linha (melhoria do fator de potência) - que são recomendados pela norma IEEE 1459-2000.

A máquina estará submetida a variadas condições de assimetria e desequilíbrio possibilitando a apresentação de novos parâmetros, que serão utilizadas para a compensação harmônica.

Palavras-chave: Potência Complexa Instantânea; Vetores Espaciais Instantâneos; Parâmetros de Buchholz-Goodhue.

ABSTRACT

It takes place in this work a study of the Theory of the Instantaneous Complex Power applied will be accomplished in the three-phase induction machine, where the instantaneous space phasors are shown (ISP's), because these reduce the parameters for study (the system three-phase is represented by an equivalent orthogonal).

Through the instantaneous space phasors the parameters of Buchholz-Goodhue will be calculated for the determination of the use of the line (improvement of the power factor) - that are recommended by the norm IEEE 1459-2000.

The machine will be submitted to varied asymmetry conditions and unbalance making possible the presentation of new parameters, which will be used for the harmonic compensation.

Keywords: Instantaneous Complex Power; Instantaneous Space Phasor; Buchholz-Goodhue parameters.

Simbologia

v	Tensão instantânea
i	Corrente instantânea
p	Potência ativa instantânea
q	Potência reativa instantânea
P	Potência real
Q	Potência imaginária
P_m	Potência mecânica do eixo da máquina
P_{cobre}	Perdas no cobre
V	Tensão eficaz
V_e	Tensão de Buchholz-Goodhue
I	Corrente eficaz
I_e	Corrente de Buchholz-Goodhue
S	Potência aparente
S_e	Potência aparente de Buchholz-Goodhue
\hat{V}	Amplitude da tensão
\hat{I}	Amplitude da corrente
\tilde{V}	Vetor espacial instantâneo de tensão
\tilde{I}	Vetor espacial instantâneo de corrente

\tilde{S}	Vetor espacial instantâneo da potência aparente complexa
$ \tilde{V} $	Módulo do vetor espacial instantâneo de tensão
$ \tilde{I} $	Módulo do vetor espacial instantâneo de corrente
$ \tilde{S} $	Módulo do vetor espacial instantâneo da potência aparente complexa
ϕ	Ângulo de fase
ω	Velocidade angular
$\langle \rangle$	Valor médio
n	Índice da ordem harmônica
\tilde{I}^*	Vetor espacial instantâneo corrente conjugado

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ilustração dos vetores girantes tensão e corrente.....19

Figura 2.2 – VEI’s tensão e corrente no plano complexo, com indicação dos eixos de referência para as fases *a*, *b* e *c* do sistema trifásico.....20

Figura 2.3 – Decomposição do vetor espacial instantâneo \tilde{I} , na direção do vetor \tilde{V} e em quadratura com o mesmo.....23

Figura 3.1 – Correntes trifásicas em regime permanente senoidal e equilibrado.....27

Figura 3.2 – Vetor espacial instantâneo corrente em regime permanente senoidal e equilibrado.....27

Figura 3.3 – Instalação com cargas lineares e não-lineares.....29

Figura 3.4 – Correntes trifásicas para o regime permanente não-senoidal e equilibrado.....31

Figura 3.5 – Vetor espacial corrente para o regime permanente não-senoidal e equilibrado.....32

Figura 3.6 – Correntes instantâneas para o regime permanente senoidal e desequilibrado.....33

Figura 3.7 – Trajetória descrita pelo vetor complexo instantâneo.....34

Figura 3.8 – Maior magnitude $\left(\left| \tilde{I} \right|_M \right)$ e menor magnitude $\left(\left| \tilde{I} \right|_m \right)$ do vetor espacial instantâneo de corrente.....36

Figura 3.9 – Correntes não-senoidais e desequilibradas.....39

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.10 – Vetor espacial instantâneo para o regime permanente não-senoidal e desequilibrado.....	41
Figura 3.11 – Potência complexa média e potências complexas de seqüência positiva e negativa.....	44
Figura 4.1 – (a) Tensões instantâneas e (b) correntes instantâneas.....	54
Figura 4.2 – (a) Tensão complexa instantânea (b) corrente complexa instantânea.....	55
Figura 4.3 – (a) Tensão instantânea e (b) corrente instantânea.....	57
Figura 4.4 – (a) Tensão complexa instantânea (b) corrente complexa instantânea.....	58
Figura 4.5 – Fontes de tensão harmônica.....	64
Figura 4.6 – (a) Tensão instantânea e (b) corrente instantânea.....	65
Figura 4.7 – (a) Tensão complexa instantânea (b) corrente complexa instantânea.....	66
Figura 4.8 – (a) Tensão instantânea e (b) corrente instantânea.....	70
Figura 4.9 – (a) Tensão complexa instantânea (b) corrente complexa instantânea.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Parâmetros do modelo da MIT.....	52
Tabela 4.2 – Valores de amplitude e fase da fundamental para os casos de desequilíbrio.....	53
Tabela 4.3 – Parâmetros determinados para os casos de desequilíbrio com VU%=10% e VU%=15%.....	61
Tabela 4.4 – Parâmetros de qualidade da MIT operando com harmônicas e desequilíbrio (THD_V=10%).....	62
Tabela 4.5 – Valores de amplitude e fase das componentes harmônicas.....	64
Tabela 4.6 – Valores de amplitude e fase das componentes harmônicas.....	69
Tabela 4.7 – Parâmetros determinados para os casos de desequilíbrio com THD_V=5%.....	74
Tabela 4.8 – Parâmetros de qualidade da MIT operando com harmônicas e desequilíbrio (THD_V=5%).....	74
Tabela 4.9 – Valores fixados para as fontes de tensão para THD_V=10%.....	76
Tabela 4.10 – Parâmetros de potência para a MIT operando com harmônicas e desequilíbrio (THD_V=10%).....	77
Tabela 4.11 – Parâmetros de qualidade da MIT operando com harmônicas e desequilíbrio (THD_V=10%).....	77
Tabela 4.12 – Valores fixados para as fontes de tensão para THD_V=15%.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.13 – Parâmetros de potência para MIT operando com harmônicas e desequilíbrio ($THD_V=15\%$).....	79
Tabela 4.14 – Parâmetros de qualidade da MIT operando com harmônicas e desequilíbrio ($THD_V=15\%$).....	79
Tabela 4.15 – Valores fixados para as fontes de tensão para $THD_V=20\%$	80
Tabela 4.16 – Parâmetros de potência para MIT operando com harmônicas e desequilíbrio ($THD_V=20\%$).....	81
Tabela 4.17 – Parâmetros de qualidade da MIT operando com harmônicas e desequilíbrio ($THD_V=20\%$).....	81
Tabela 4.18 – Fator de Potência (através da Potência Complexa).....	82
Tabela 4.19 – Fator de Potência (através da Potência de Buchholz-Goodhue).....	83
Tabela 5.1 – Rendimento da MIT para as situações de desequilíbrio e assimetria.....	84

SUMÁRIO

1 – APRESENTAÇÃO	16
2 – TEORIA DA POTÊNCIA COMPLEXA INSTANTÂNEA.	18
2.1 – Introdução.....	18
2.2 – Vetores girantes.	18
2.3 – A potência complexa instantânea.....	22
3 – APLICAÇÃO DOS VEI’S NO CÁLCULO DAS GRANDEZAS DE BUCHHOLZ- GOODHUE PARA SISTEMAS TRIFÁSICOS.....	26
3.1 – Transformação do modelo trifásico para um equivalente bifásico.....	26
3.1.1 – Formas de onda senoidal e equilibrada.	26
3.1.2 – Formas de onda não-senoidais e equilibradas.	29
3.1.3 – Formas de onda senoidais e desequilibradas.	32
3.1.4 – Determinação da magnitude da corrente e da tensão de seqüência positiva e negativa.....	35
3.1.5 – Fator de desequilíbrio de corrente (IU%) e de tensão (VU%).	37
3.1.6 – Formas de onda não-senoidais e desequilibradas.	38
3.1.7 – Potência complexa instantânea.....	41
3.1.8 – Potência complexa de seqüência positiva e negativa.	43
3.1.9 – Valores efetivos de Buchholz-Goodhue para a corrente e tensão.	45
3.1.10 – Potência eficaz de Buchholz-Goodhue.....	46
4 – APLICAÇÃO DOS VEI’S NO CÁLCULO DAS GRANDEZAS DE BUCHHOLZ- GOODHUE PARA A MIT.....	49
4.1 – Modelagem da máquina de indução trifásica com vetores espaciais instantâneos.	49
4.1.1 – Introdução.	49
4.2 – Materiais e métodos.	50
4.2.1 – Introdução.	50
4.3 – Configuração da MIT e fontes de tensão utilizadas para a simulação.	51
4.4 – A MIT operando sob condição senoidal.....	52
4.4.1 – Introdução	52
4.4.2 – Simulação e discussão de resultados.	53
4.5 – A MIT operando sob condição não-senoidal.	63
4.5.1 – Introdução.	63
4.5.2 – Simulação e discussão de resultados.	63
4.6 – Discussão dos resultados.	82
5 - Conclusão.....	84

6 - Referências.....	86
APÊNDICE A: Modelo dinâmico da máquina assíncrona trifásica, também conhecida como máquina de indução.	90
APÊNDICE B: Esquemático do programa simulado.	93
APÊNDICE C: Cálculo da Potência Aparente de Buchholz-Goodhue (sem condutor neutro) – uma outra abordagem.....	95
APÊNDICE D: Distorção Harmônica Total de Corrente (THDI) e de Tensão (THDV).....	97

1 – APRESENTAÇÃO

Objetivando uma melhor eficiência energética o setor elétrico tem utilizado métodos que melhor descrevam o desempenho do sistema, permitindo a construção de dispositivos que possam minimizar eventuais perdas. A aplicação dos Vetores Espaciais Instantâneos (VEI's) tem se mostrado mais abrangente na análise dos sistemas elétricos, permitindo uma avaliação tanto em regime permanente quanto no transitório. Eles permitem uma redução nos parâmetros elétricos, uma vez que é feita uma modelagem bifásica ao invés da trifásica, sem a perda de informações (o equivalente bifásico pode retornar seus valores para o trifásico). Para realizar a mudança é aplicada a transformação de Clarke, como mostra Milanez (2003).

Fazendo uma extensão das aplicações dos VEI's são calculadas as grandezas de Buchholz-Goodhue (IEEE WORKING GROUP ON NONSINUSOIDAL SITUATIONS, 2000). A versatilidade dos VEI's possibilita um estudo quanto às condições de desequilíbrio, permitindo a separação em seqüências positiva, negativa e nula (para este estudo não será considerada a seqüência nula).

O estudo visa aprofundar a teoria da potência complexa instantânea juntamente com as grandezas de Buchholz-Goodhue e, proporcionar um debate acerca dessa abordagem.

No Capítulo 2 será apresentada uma introdução à Teoria da Potência Complexa Instantânea, baseada na abordagem de Milanez (2000), com ênfase nos VEI's que compõem a teoria.

No Capítulo 3 temos a aplicação dos VEI's nas máquinas de indução trifásica (MIT), quanto aos cálculos a serem utilizados no estudo, priorizando os parâmetros de utilização da linha de alimentação.

No Capítulo 4 são mostrados os resultados obtidos para diversas situações de desequilíbrio e assimetria adquiridos através de simulações.

No Capítulo 5 é feita uma discussão sobre o estudo desenvolvido.

2 – TEORIA DA POTÊNCIA COMPLEXA INSTANTÂNEA.

2.1 – Introdução.

A necessidade de métodos que possibilitem a compreensão, na plenitude das grandezas relacionadas à potência é causa de uma intensa discussão na comunidade científica, visto que não existe ainda um estudo que se apresente como definitivo e único. A teoria convencional já não se aplica na maioria dos casos práticos, pois devido às cargas não-lineares ou em desequilíbrio que estão presentes nos sistemas elétricos, perdeu-se a linearidade entre as grandezas elétricas Emanuel (1996).

Milanez (2000) propõem uma análise baseada nos Vetores Espaciais Instantâneos (VEI's) que vem a ser a Teoria da Potência Complexa Instantânea. Essa abordagem é válida para qualquer modo de operação do sistema elétrico. No estudo serão consideradas apenas as grandezas referentes à Máquina de Indução Trifásica (MIT) operando em regime permanente.

2.2 – Vetores girantes.

Considerando o caso monofásico cujas equações de tensão e corrente, no tempo, são dadas por:

$$v = \sqrt{2}V \cos(\omega_v t + \phi_v) \quad (2.1)$$

$$i = \sqrt{2}I \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (2.2)$$

Podem-se representar estas equações instantâneas no tempo em um plano complexo, através dos vetores girantes de tensão \tilde{V} e corrente \tilde{I} .

$$\tilde{V} = \sqrt{2}V e^{j\phi_v} e^{j\omega_v t} \quad (2.3)$$

$$\tilde{I} = \sqrt{2}I e^{j\phi_i} e^{j\omega_v t} \quad (2.4)$$

Na Fig. 2.1 é mostrada esta representação no plano complexo:

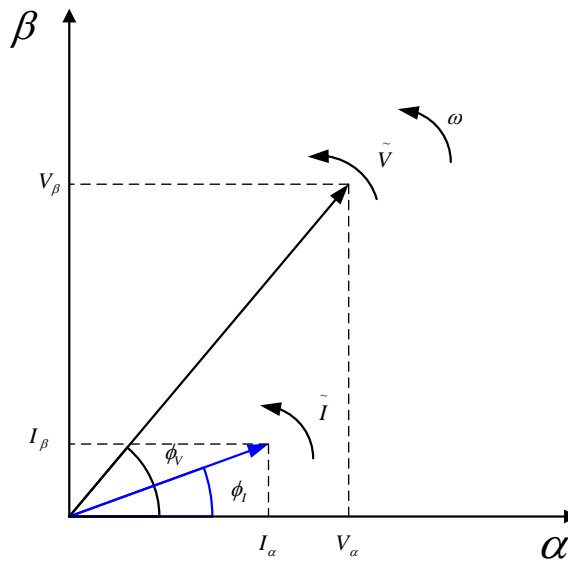


Figura 2.1 – Ilustração dos vetores girantes tensão e corrente.

A velocidade angular do vetor tensão, ω_V , é a variação do ângulo de fase da tensão, ϕ_V , em relação ao tempo t :

$$\omega_V = \frac{d\phi_V}{dt} \quad (2.5)$$

Da mesma forma, temos para a velocidade angular do vetor corrente, ω_I :

$$\omega_I = \frac{d\phi_I}{dt} \quad (2.5)$$

Deve-se observar que sendo, neste caso, v e i senoidais, os valores angulares ω_v e ω_i são constantes.

As representações cartesianas destes vetores são as seguintes:

$$\tilde{V} = V_\alpha + jV_\beta \quad (2.5)$$

$$\tilde{I} = I_\alpha + jI_\beta \quad (2.6)$$

Sendo,

$$V_\alpha = \text{Re}\left\{\tilde{V}\right\} = \hat{V} \cos(\omega_v t + \phi_v) = v \quad (2.7)$$

$$\mathbf{I}_\alpha = \operatorname{Re}\left\{\tilde{\mathbf{I}}\right\} = \hat{\mathbf{I}} \cos(\omega_i t + \phi_i) = i \quad (2.8)$$

Com isso, retornam-se os valores dos vetores girantes para àqueles já conhecidos no tempo. Para o caso trifásico deve ser feita a representação para cada uma das fases.

Na abordagem proposta por Milanez, os vetores girantes são representados pelos VEI's, que são determinados através da transformação de Clarke (considerando o sistema trifásico sem neutro):

$$\tilde{\mathbf{V}} = \frac{2}{3}(\mathbf{v}_a + a\mathbf{v}_b + a^2\mathbf{v}_c) \quad (2.9)$$

$$\tilde{\mathbf{I}} = \frac{2}{3}(\mathbf{i}_a + a\mathbf{i}_b + a^2\mathbf{i}_c) \quad (2.10)$$

Onde o operador unitário complexo a é:

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$$

Esses VEI's apresentam forma cartesiana mostradas nas equações 2.5 e 2.6, na Fig. 2.2 tem-se a trajetória destes no plano complexo.

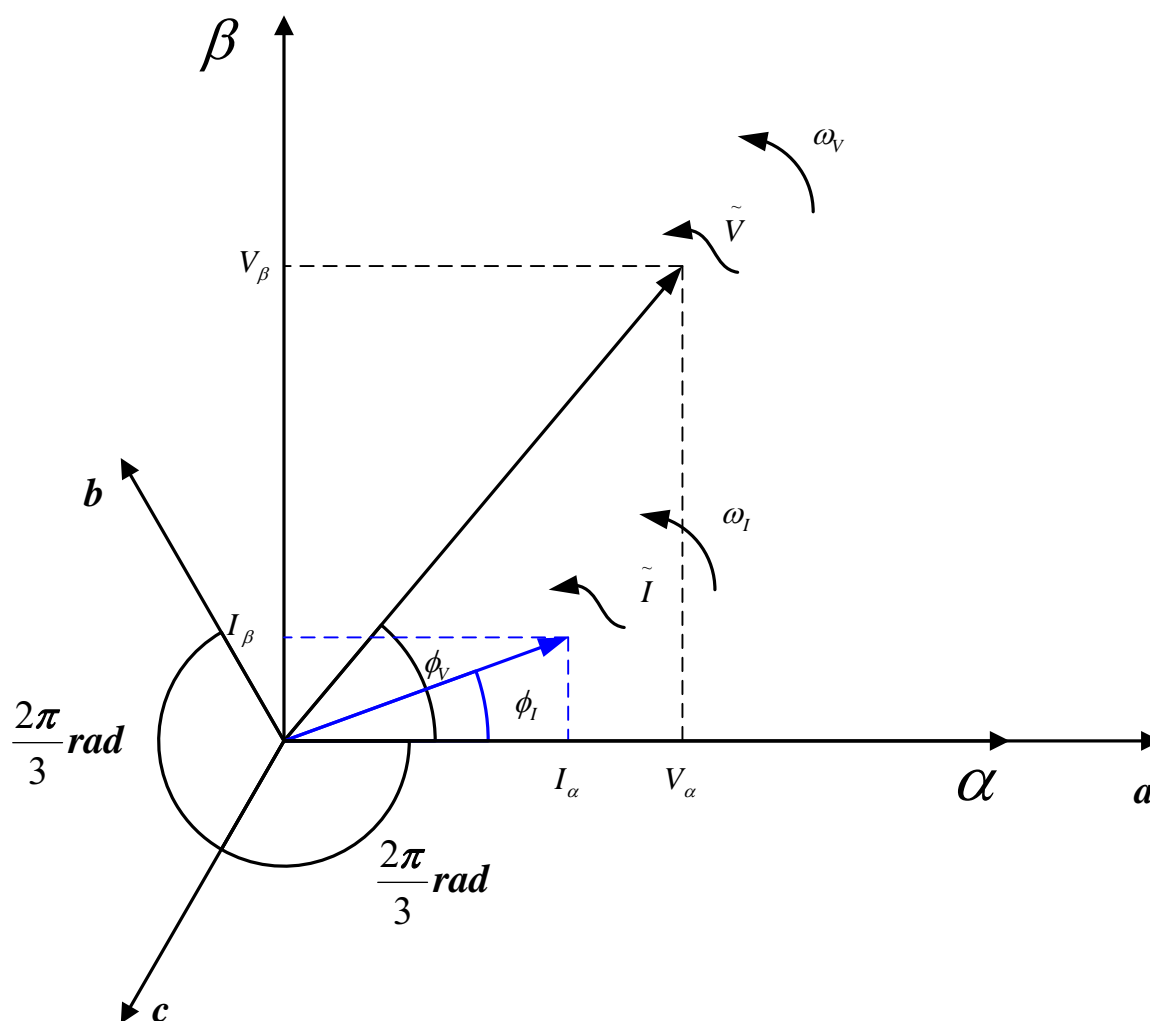


Figura 2.2 – VEI's tensão e corrente no plano complexo, com indicação dos eixos de referência para as fases *a*, *b* e *c* do sistema trifásico.

A transformação de Clarke pode ser também considerada matricialmente (sem condutor neutro):

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Considerando o sistema sem neutro, tem-se:

$$v_a + v_b + v_c = 0 \quad (2.12)$$

Pode-se então, realizar a transformação inversa, sendo que as fases de tensão ficam:

$$v_a = V_\alpha \quad (2.13)$$

$$v_b = -\frac{1}{2}V_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}V_\beta \quad (2.14)$$

$$v_c = -\frac{1}{2}V_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}V_\beta \quad (2.15)$$

De forma dual as correntes ficam:

$$i_a = I_\alpha \quad (2.16)$$

$$i_b = -\frac{1}{2}I_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}I_\beta \quad (2.17)$$

$$i_c = -\frac{1}{2}I_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}I_\beta \quad (2.18)$$

2.3 – A potência complexa instantânea.

A potência complexa instantânea trifásica definida por Milanez (1993) é dada pela expressão.

$$\tilde{S} = \frac{3}{2} \tilde{V} \tilde{I}^* \quad (2.19)$$

Em termos cartesianos tem-se a seguinte forma:

$$\tilde{S} = P + jQ \quad (2.20)$$

Onde a parte real tem seu significado físico relacionado à potência trocada entre os elementos armazenadores de energia do circuito elétrico e a carga, essa transferência resulta em trabalho ou na conversão em outras formas de energia (térmica, por exemplo) tratadas no caso das máquinas como perdas. Em regime permanente, a parte real corresponde à energia ativa (MORAES, 2005).

$$P = \text{Real} \left\{ \tilde{S} \right\} \quad (2.21)$$

A potência imaginária corresponde à amplitude da potência reativa instantânea determinada em qualquer fase do sistema trifásico quando a velocidade

angular do vetor instantâneo corrente é constante. Em sistemas lineares o significado físico dessa potência equivale à energia trocada entre os elementos armazenadores internamente no circuito elétrico. No entanto, para casos não-lineares perde-se o significado físico, uma vez que esta potência era medida através da defasagem entre a corrente e a tensão, mas este fato ocorre também nas situações em que não existem elementos armazenadores como discutido por Emanuel.

$$Q = \text{Imag} \left\{ \tilde{S} \right\} \quad (2.22)$$

Para se determinar as expressões instantâneas das potências ativa e reativa, é feita a decomposição do vetor corrente em suas componentes em fase e em quadratura em relação ao vetor tensão, como proposto por Milanez e Nabae (MORAES, 2005).

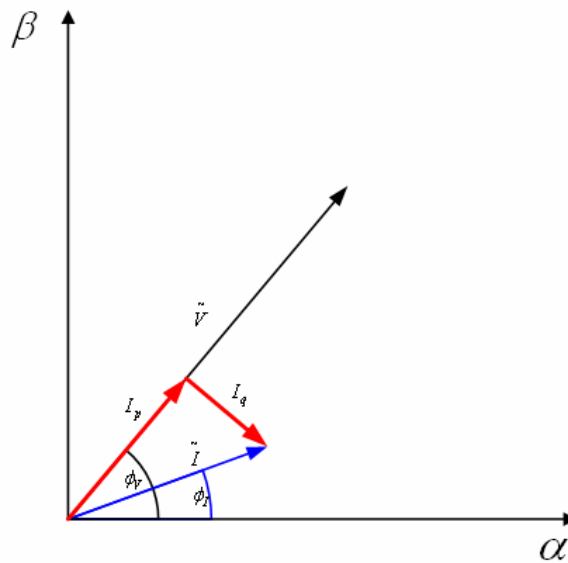


Figura 2.3 – Decomposição do vetor espacial instantâneo \tilde{I} , na direção do vetor \tilde{V} e em quadratura com o mesmo.

As potências reativas instantâneas, das fases α e β podem ser obtidas utilizando-se a expressão para a potência real devida à componente da corrente, \tilde{I}_Q , em quadratura com a tensão:

$$P_Q = \text{Real} \left\{ \tilde{V} \tilde{I}_Q^* \right\} = 0 \quad (2.23)$$

a qual pode ser decomposta da seguinte forma (uma vez que a potência reativa instantânea não contribui na transferência de energia entre a fonte e a carga para o sistema trifásico):

$$P_Q = P_{Q\alpha} + P_{Q\beta} = 0 \quad (2.24)$$

onde

$$P_{Q\alpha} = -V_\alpha \text{sen}(\phi_V) \left| \tilde{I}_Q \right| \quad (2.24)$$

e a parcela $P_{Q\beta}$ fica

$$P_{Q\beta} = V_\beta \cos(\phi_I) \left| \tilde{I}_Q \right| \quad (2.25)$$

O significado dos sinais (positivo e negativo) das potências reativas de mesmo módulo, segundo Akagi (MORAES, 2005), é devido à troca de energia entre os elementos armazenadores de energia, indutores e capacitores.

As potências ativas instantâneas são obtidas considerando-se a componente do vetor corrente, \tilde{I}_P , em fase com o vetor tensão, como descrito na expressão:

$$P_P = \text{Real} \left\{ \tilde{V} \tilde{I}_P^* \right\} = P \quad (2.23)$$

Que se decompõe também em duas parcelas:

$$P_P = P_{P\alpha} + P_{P\beta} \quad (2.24)$$

onde

$$P_{P\alpha} = V_\beta \text{sen}(\phi_V) \left| \tilde{I}_P \right| \quad (2.24)$$

e

$$P_{P\beta} = V_\beta \cos(\phi_I) \left| \tilde{I}_P \right| \quad (2.25)$$

Podem-se definir as potências ativas e reativas instantâneas matricialmente, dadas por:

$$\begin{bmatrix} P_P \\ P_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

3 – APLICAÇÃO DOS VEI'S NO CÁLCULO DAS GRANDEZAS DE BUCHHOLZ-GOODHUE PARA SISTEMAS TRIFÁSICOS.

3.1 – Transformação do modelo trifásico para um equivalente bifásico.

Visando a redução de variáveis, será implementada a transformação de Clarke que possibilitará a transformação do modelo trifásico para um equivalente bifásico. Inicialmente serão consideradas as formas de onda (corrente e tensão) como senoidal e equilibrada, depois serão inseridos os efeitos das componentes harmônicas, depois será considerada a situação de desequilíbrio sem harmônicas e, enfim, o caso mais genérico onde as formas de onda são não-senoidais e desequilibradas. O uso dos vetores espaciais instantâneos simplifica significativamente o equacionamento e a representação gráfica, também permitindo a recuperação das informações, posteriormente.

3.1.1 – Formas de onda senoidal e equilibrada.

Considerando o motor operando com tensão de entrada simétrica (senoidal) e equilibrada (com a mesma magnitude e defasada de 120° elétricos), as correntes instantâneas que circulam nos enrolamentos do estator e que irão produzir o campo girante são as seguintes:

$$\hat{i}_a = \hat{I} \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi_a) \quad (3.1)$$

$$\hat{i}_b = \hat{I} \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi_b - \frac{2 \cdot \pi}{3}) \quad (3.2)$$

$$\hat{i}_c = \hat{I} \cdot \cos(\omega \cdot t + \phi_c + \frac{2 \cdot \pi}{3}) \quad (3.3)$$

A critério de ilustração tem-se a Fig. 3.1, onde está um exemplo de ondas senoidais e equilibradas.

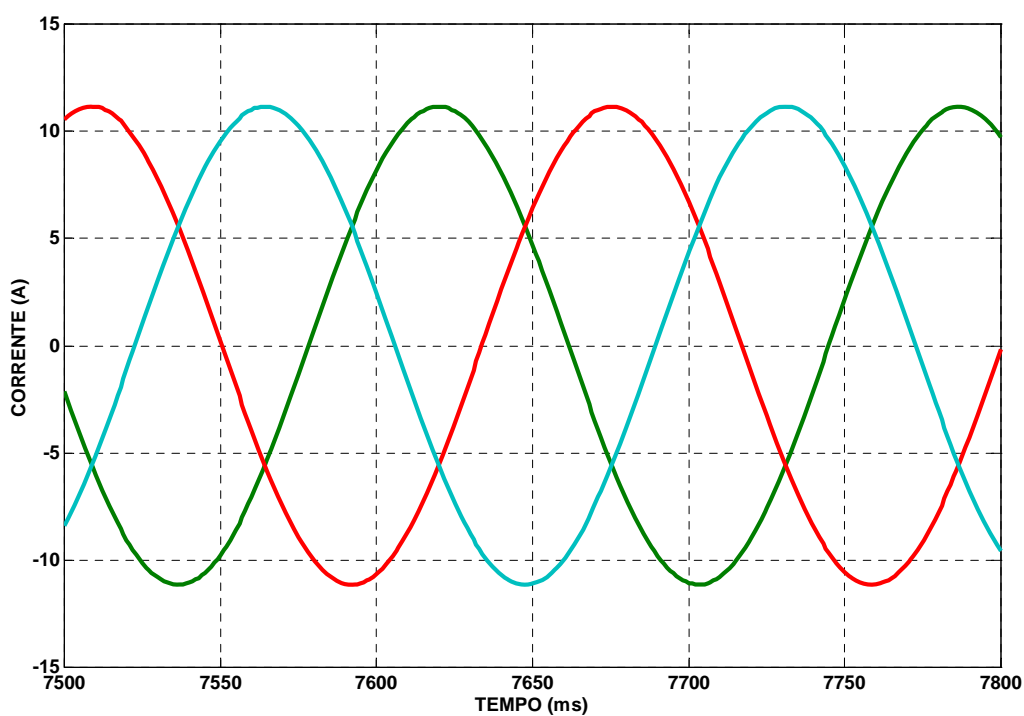


Figura 3.1 – Correntes trifásicas em regime permanente senoidal e equilibrado.

Pela transformação de Clarke, consideram-se as correntes representadas por um vetor girante em um plano complexo (VEI).

$$\tilde{\mathbf{I}} = \frac{2}{3} \cdot (\mathbf{i}_a + \mathbf{a} \cdot \mathbf{i}_b + \mathbf{a}^2 \cdot \mathbf{i}_c) \quad (3.4)$$

Para exemplificar a curva descrita pelo vetor espacial instantâneo corrente no regime permanente senoidal e equilibrado, é mostrada a Fig. 3.2.

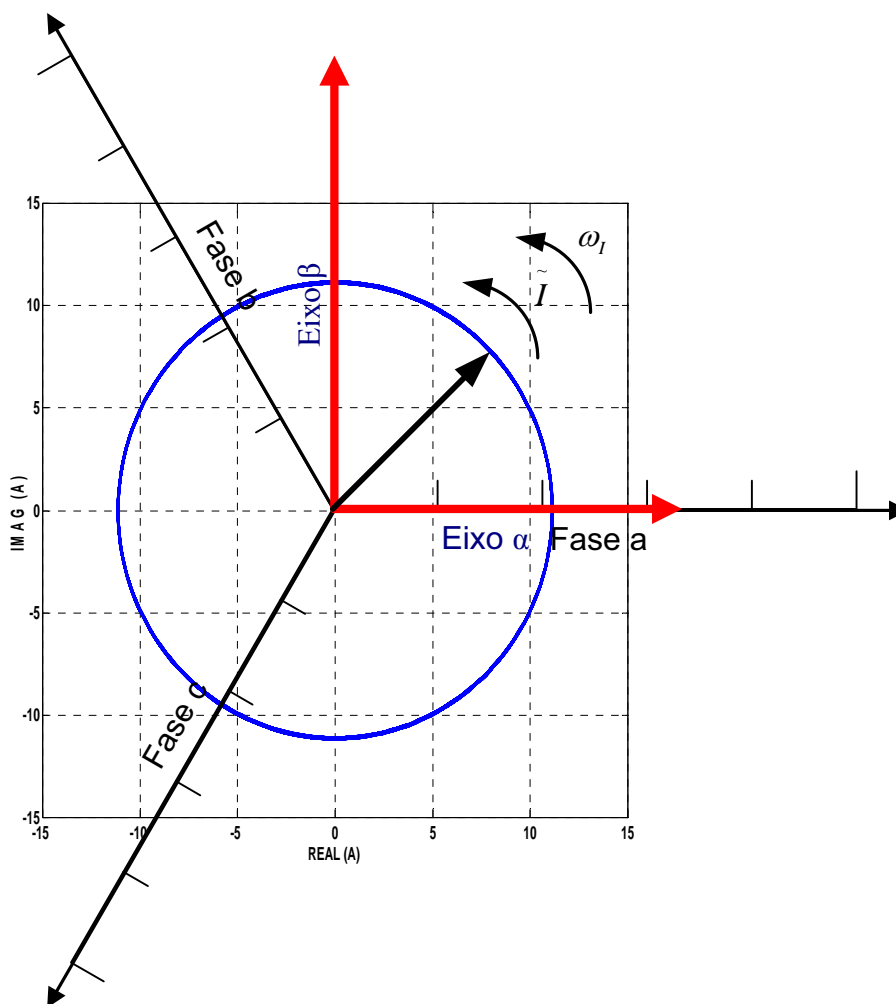


Figura 3.2 – Vetor espacial instantâneo corrente em regime permanente senoidal e equilibrado.

Da mesma forma, as tensões nos enrolamentos do estator são representadas por:

$$\tilde{\mathbf{V}} = \frac{2}{3} \cdot (\mathbf{v}_a + \mathbf{a} \cdot \mathbf{v}_b + \mathbf{a}^2 \cdot \mathbf{v}_c) \quad (3.5)$$

As equações 3.4 e 3.5 podem ser reescritas da seguinte forma cartesiana:

$$\tilde{\mathbf{I}} = \mathbf{I}_\alpha + \mathbf{j} \cdot \mathbf{I}_\beta \quad (3.6)$$

$$\tilde{\mathbf{V}} = \mathbf{V}_\alpha + \mathbf{j} \cdot \mathbf{V}_\beta \quad (3.7)$$

3.1.2 – Formas de onda não-senoidais e equilibradas.

Considerando uma instalação elétrica com dois motores, um alimentado através de inversor de frequência e outro com partida direta, conectados ao mesmo barramento, têm-se correntes harmônicas circulando pelos enrolamentos dos mesmos, que foram injetadas pelo inversor de frequência. Esse é um caso particular, mas pode-se tratá-lo mais genericamente como sendo uma instalação ligada a um mesmo barramento em que as cargas instaladas possuem características lineares e não-lineares, devido a presença destas últimas existem correntes harmônicas que circulam pelas instalações e pelas cargas sem que resulte em trabalho, constando apenas como perdas.

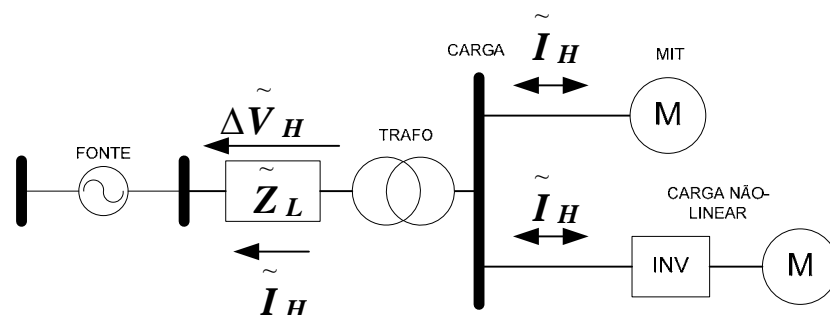


Figura 3.3 – Instalação com cargas lineares e não-lineares.

A Figura 3.3 mostra a corrente harmônica circulante na instalação devido à carga não-linear (no caso um inversor de frequência), verifica-se também que parte dessas correntes podem ser transferidas para o primário do transformador, podendo resultar em quedas de tensão harmônicas na linha de distribuição. Neste caso, as tensões no barramento das cargas serão distorcidas.

Nessas condições, as correntes no estator de ambos os motores serão consideradas como:

$$i_a = \sum_{n=1}^{n=\infty} \hat{I}_n \cdot \text{sen}[n \cdot \omega \cdot t + \phi_{an}] \quad (3.8)$$

$$i_b = \sum_{n=1}^{n=\infty} \hat{I}_n \cdot \text{sen}\left[n \cdot (\omega \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3}) + \phi_{bn}\right] \quad (3.9)$$

$$i_c = \sum_{n=1}^{n=\infty} \hat{I}_n \cdot \text{sen}\left[n \cdot (\omega \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3}) + \phi_{cn}\right] \quad (3.10)$$

onde o índice n representa a ordem harmônica.

Sendo a MIT considerada com rotor gaiola de esquilo, devido a sua construção, não há componentes das ordens pares e múltiplas de três, ou seja, o índice n não irá assumir valores como 2, 3, 4, 6, 8, 9, etc. Assim 3.8, 3.9 e 3.10 são reescritas como:

$$i_a = i_{a1} + i_{a5} + i_{a7} + i_{a11} + i_{a13} + \dots \quad (3.11)$$

$$i_b = i_{b1} + i_{b5} + i_{b7} + i_{b11} + i_{b13} + \dots \quad (3.12)$$

$$i_c = i_{c1} + i_{c5} + i_{c7} + i_{c11} + i_{c13} + \dots \quad (3.13)$$

As correntes trifásicas para esta condição operativa podem ser exemplificadas pela Fig. 3.4.

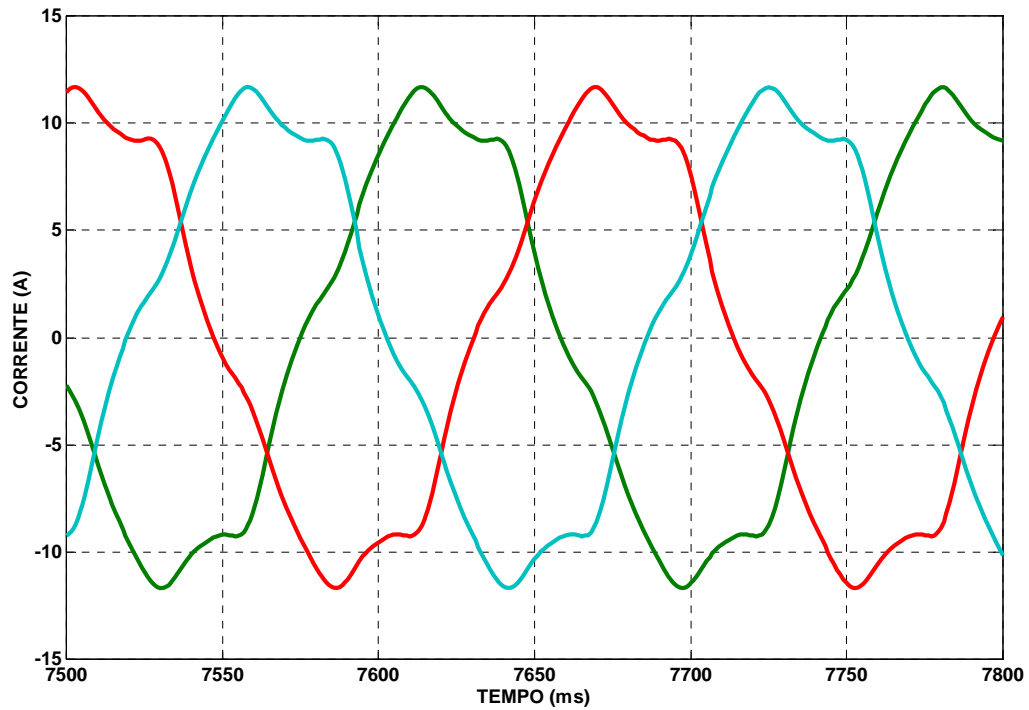


Figura 3.4 – Correntes trifásicas para o regime permanente não-senoidal e equilibrado.

A transformação de Clarke fica:

$$\tilde{\mathbf{I}} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} (\mathbf{i}_{a1} + \mathbf{i}_{a5} + \mathbf{i}_{a7} + \mathbf{i}_{a11} + \mathbf{i}_{a13} + \dots) + \\ + \mathbf{a} \cdot (\mathbf{i}_{b1} + \mathbf{i}_{b5} + \mathbf{i}_{b7} + \mathbf{i}_{b11} + \mathbf{i}_{b13} + \dots) + \\ + \mathbf{a}^2 \cdot (\mathbf{i}_{c1} + \mathbf{i}_{c5} + \mathbf{i}_{c7} + \mathbf{i}_{c11} + \mathbf{i}_{c13} + \dots) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

A equação 3.14 é, então, reescrita da seguinte forma:

$$\tilde{\mathbf{I}} = \tilde{\mathbf{I}}_1 + \tilde{\mathbf{I}}_5 + \tilde{\mathbf{I}}_7 + \tilde{\mathbf{I}}_{11} + \tilde{\mathbf{I}}_{13} + \dots \quad (3.15)$$

De modo análogo o vetor espacial instantâneo tensão:

$$\tilde{\mathbf{V}} = \tilde{\mathbf{V}}_1 + \tilde{\mathbf{V}}_5 + \tilde{\mathbf{V}}_7 + \tilde{\mathbf{V}}_{11} + \tilde{\mathbf{V}}_{13} + \dots \quad (3.16)$$

Mostra-se na Fig. 3.5 a trajetória do VEI corrente para um caso típico, com este conteúdo de harmônicos.

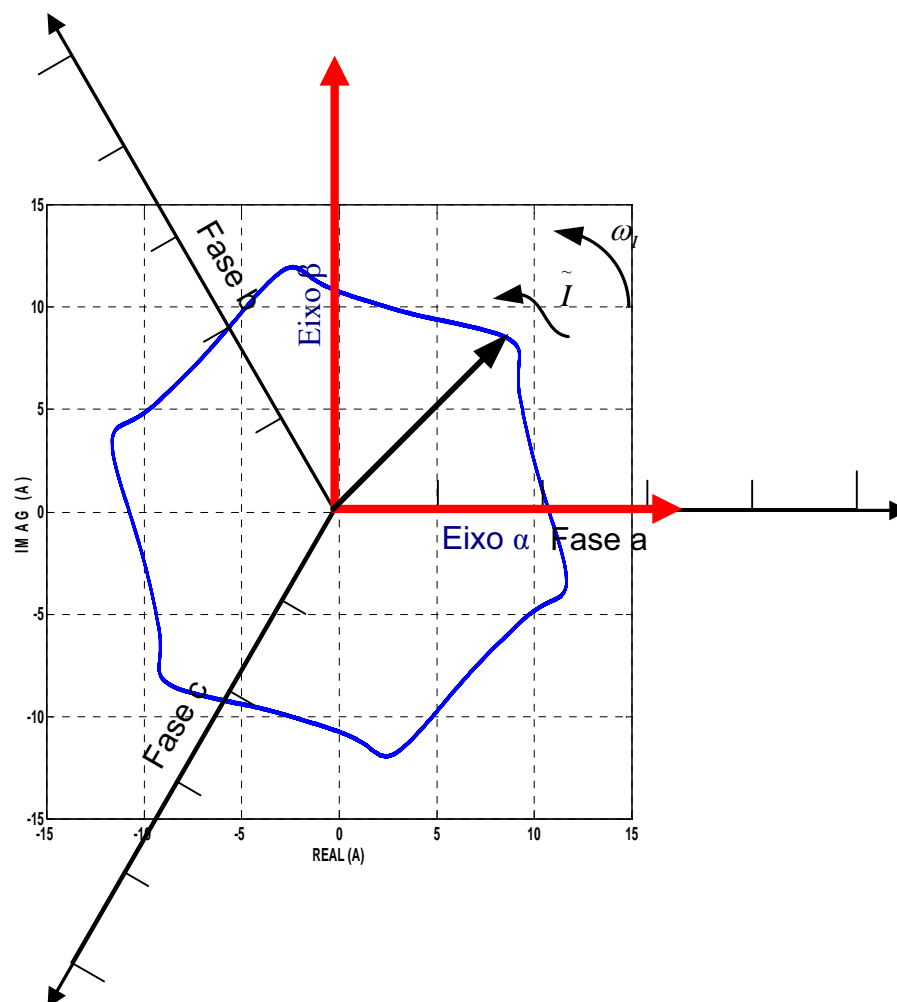


Figura 3.5 – Vetor espacial corrente para o regime permanente não-senoidal e equilibrado.

3.1.3 – Formas de onda senoidais e desequilibradas.

Quando existe uma diferença entre as amplitudes ou nos ângulos das fases das tensões ou correntes, diz-se que existe um desequilíbrio das mesmas. Para

representar e analisar o desequilíbrio separa-se as componentes de corrente de seqüência positiva, negativa e zero, como nas equações abaixo.

$$i_a = i_a^+ + i_a^- + i_a^0 \quad (3.17)$$

$$i_b = i_b^+ + i_b^- + i_b^0 \quad (3.18)$$

$$i_c = i_c^+ + i_c^- + i_c^0 \quad (3.19)$$

A Fig. 3.6. traz uma ilustração de correntes desequilibradas:

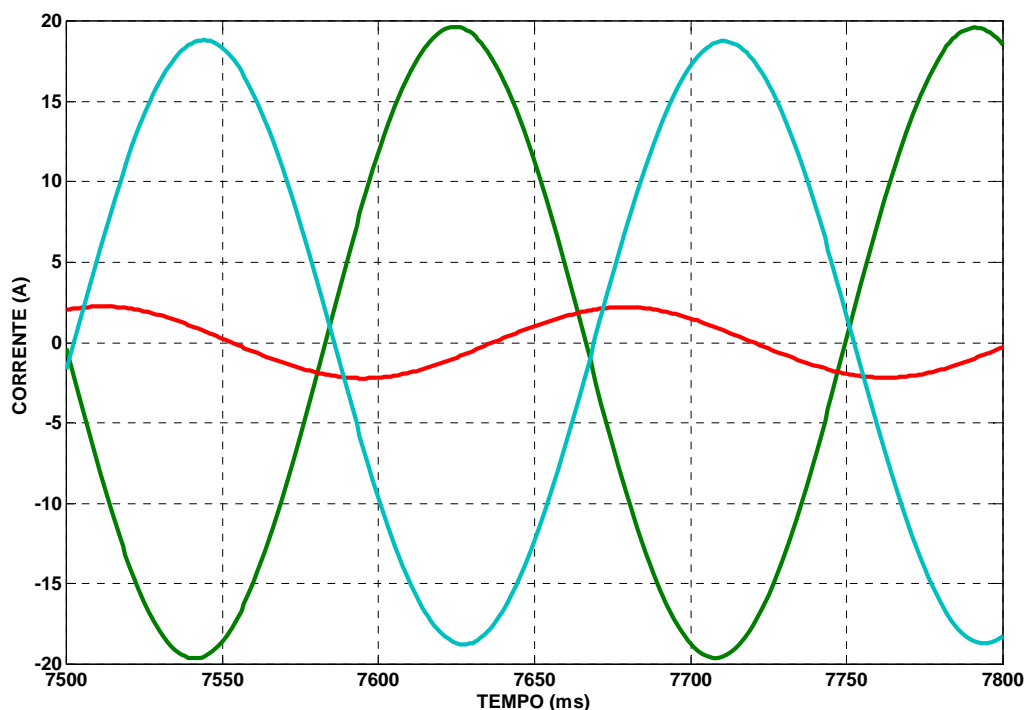


Figura 3.6: Correntes instantâneas para o regime permanente senoidal e desequilibrado.

Considerando a MIT com rotor gaiola de esquilo, não serão obtidas componentes de seqüência zero.

A transformação de Clarke para o desequilíbrio fica:

$$\tilde{\mathbf{I}} = \frac{2}{3} \cdot (\mathbf{i}_a^+ + a\mathbf{i}_b^+ + a^2\mathbf{i}_c^+) + \frac{2}{3} \cdot (\mathbf{i}_a^- + a\mathbf{i}_b^- + a^2\mathbf{i}_c^-) \quad (3.20)$$

Ou

$$\tilde{\mathbf{I}} = \tilde{\mathbf{I}}^+ + \tilde{\mathbf{I}}^- \quad (3.21)$$

Neste caso o vetor complexo instantâneo de corrente descreverá uma elipse semelhante a da Figura 3.7, onde se observa que a fase b está com amplitude muito inferior às demais.

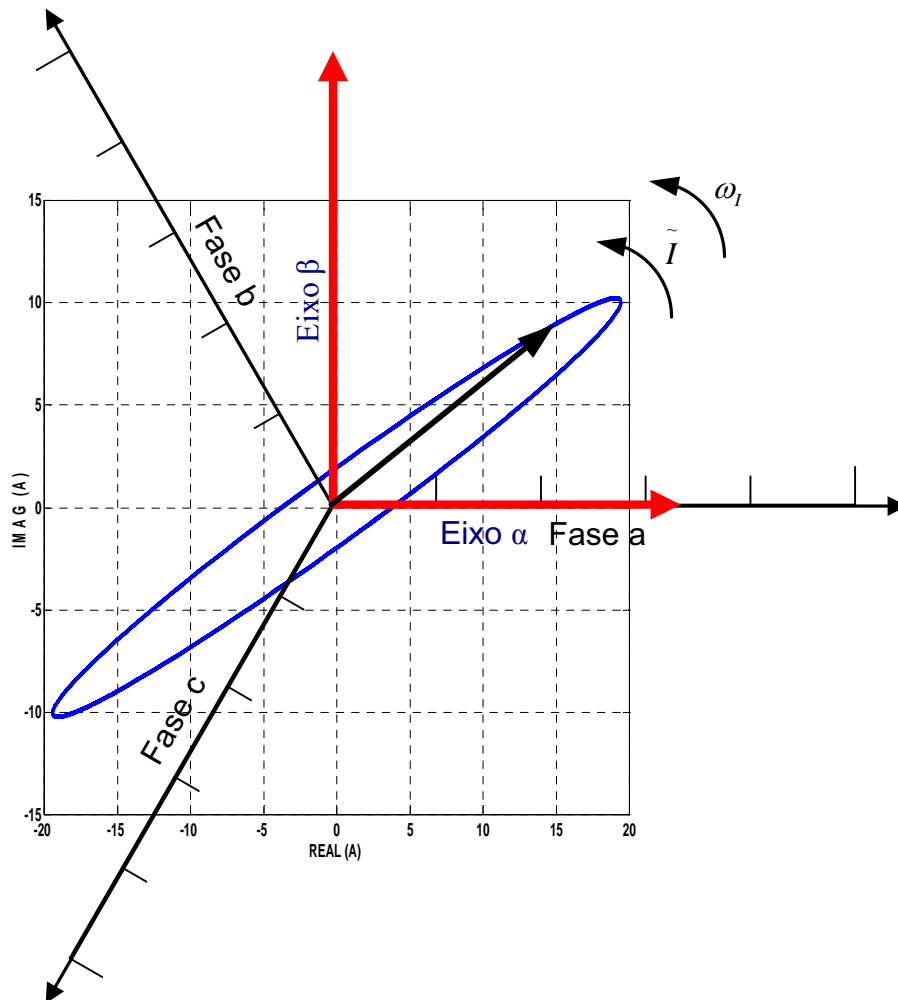


Figura 3.7: Trajetória descrita pelo vetor complexo instantâneo.

Será observado mais adiante que a trajetória descrita pelo vetor complexo para o caso desequilibrado é uma elipse que se acentua conforme o desequilíbrio.

De forma semelhante da corrente, o equacionamento é válido também para a tensão, ou seja:

$$\tilde{V} = \tilde{V}^+ + \tilde{V}^- \quad (3.22)$$

3.1.4 – Determinação da magnitude da corrente e da tensão de seqüência positiva e negativa.

Através dos vetores espaciais instantâneos, podem-se determinar as magnitudes de seqüência positiva e negativa da corrente e tensão (no caso desequilibrado). Considerando a Figura 3.8, temos a trajetória do vetor espacial instantâneo de corrente (o mesmo raciocínio será válido para a tensão), onde estão

destacadas a maior magnitude $\left(\left| \tilde{I} \right|_M \right)$ e a menor magnitude $\left(\left| \tilde{I} \right|_m \right)$.

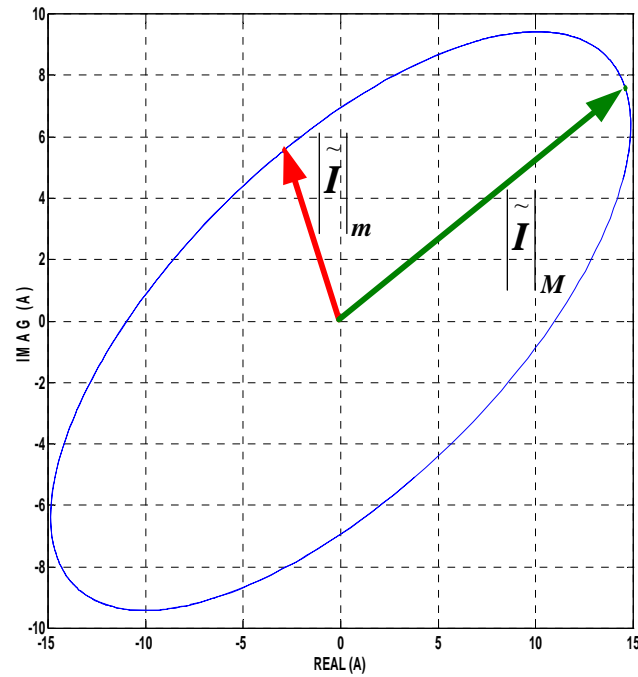


Figura 3.8 – Maior magnitude ($|\tilde{\mathbf{I}}_M|$) e menor magnitude ($|\tilde{\mathbf{I}}_m|$) do vetor espacial instantâneo de corrente.

Segundo Milanez e Emanuel (2003), as magnitudes dos vetores correntes de seqüência positiva e negativa são dados por:

$$\hat{\mathbf{I}}^+ = \frac{\left(|\tilde{\mathbf{I}}_M| + |\tilde{\mathbf{I}}_m| \right)}{2} \quad (3.23)$$

$$\hat{\mathbf{I}}^- = \frac{\left(|\tilde{\mathbf{I}}_M| - |\tilde{\mathbf{I}}_m| \right)}{2} \quad (3.24)$$

Analogamente tem-se para as tensões:

$$\hat{V}^+ = \frac{\left(\left| \tilde{V} \right|_M + \left| \tilde{V} \right|_m \right)}{2} \quad (3.25)$$

$$\hat{V}^- = \frac{\left(\left| \tilde{V} \right|_M - \left| \tilde{V} \right|_m \right)}{2} \quad (3.26)$$

Nota-se que no caso senoidal e equilibrado (Figura 3.2), a curva descrita é uma circunferência, o que não resulta numa componente de seqüência negativa, uma vez que a maior e menor magnitude são iguais.

3.1.5 – Fator de desequilíbrio de corrente (IU%) e de tensão (VU%).

O IU% é definido pela razão entre a magnitude de seqüência negativa e a amplitude de seqüência positiva, este índice é dado em valor percentual:

$$IU\% = 100 \cdot \frac{\hat{I}^-}{\hat{I}^+} \quad (3.27)$$

O mesmo vale para a tensão:

$$VU\% = 100 \cdot \frac{\hat{V}^-}{\hat{V}^+} \quad (3.28)$$

3.1.6 – Formas de onda não-senoidais e desequilibradas.

Para representar a condição de desequilíbrio serão consideradas as componentes simétricas.

$$\mathbf{i}_a = \mathbf{i}_a^+ + \mathbf{i}_a^- + \mathbf{i}_a^0 \quad (3.29)$$

$$\mathbf{i}_b = \mathbf{i}_b^+ + \mathbf{i}_b^- + \mathbf{i}_b^0 \quad (3.30)$$

$$\mathbf{i}_c = \mathbf{i}_c^+ + \mathbf{i}_c^- + \mathbf{i}_c^0 \quad (3.31)$$

Como já foi mencionado, na MIT gaiola de esquilo, as componentes simétricas de seqüência zero são nulas, como já consideradas anteriormente. Como está sendo considerada a presença de ondas não-senoidais, as equações 3.29, 3.30 e 3.31 serão reescritas como:

$$\mathbf{i}_a = \left[\begin{array}{l} (\mathbf{i}_{a1}^+ + \mathbf{i}_{a5}^+ + \mathbf{i}_{a7}^+ + \mathbf{i}_{a11}^+ + \mathbf{i}_{a13}^+ + \dots) + \\ + (\mathbf{i}_{a1}^- + \mathbf{i}_{a5}^- + \mathbf{i}_{a7}^- + \mathbf{i}_{a11}^- + \mathbf{i}_{a13}^- + \dots) \end{array} \right] \quad (3.32)$$

$$\mathbf{i}_b = \left[\begin{array}{l} (\mathbf{i}_{b1}^+ + \mathbf{i}_{b5}^+ + \mathbf{i}_{b7}^+ + \mathbf{i}_{b11}^+ + \mathbf{i}_{b13}^+ + \dots) + \\ + (\mathbf{i}_{b1}^- + \mathbf{i}_{b5}^- + \mathbf{i}_{b7}^- + \mathbf{i}_{b11}^- + \mathbf{i}_{b13}^- + \dots) \end{array} \right] \quad (3.33)$$

$$\mathbf{i}_c = \left[\begin{array}{l} (\mathbf{i}_{c1}^+ + \mathbf{i}_{c5}^+ + \mathbf{i}_{c7}^+ + \mathbf{i}_{c11}^+ + \mathbf{i}_{c13}^+ + \dots) + \\ + (\mathbf{i}_{c1}^- + \mathbf{i}_{c5}^- + \mathbf{i}_{c7}^- + \mathbf{i}_{c11}^- + \mathbf{i}_{c13}^- + \dots) \end{array} \right] \quad (3.34)$$

Essas correntes são semelhantes às mostradas na Figura 3.9.

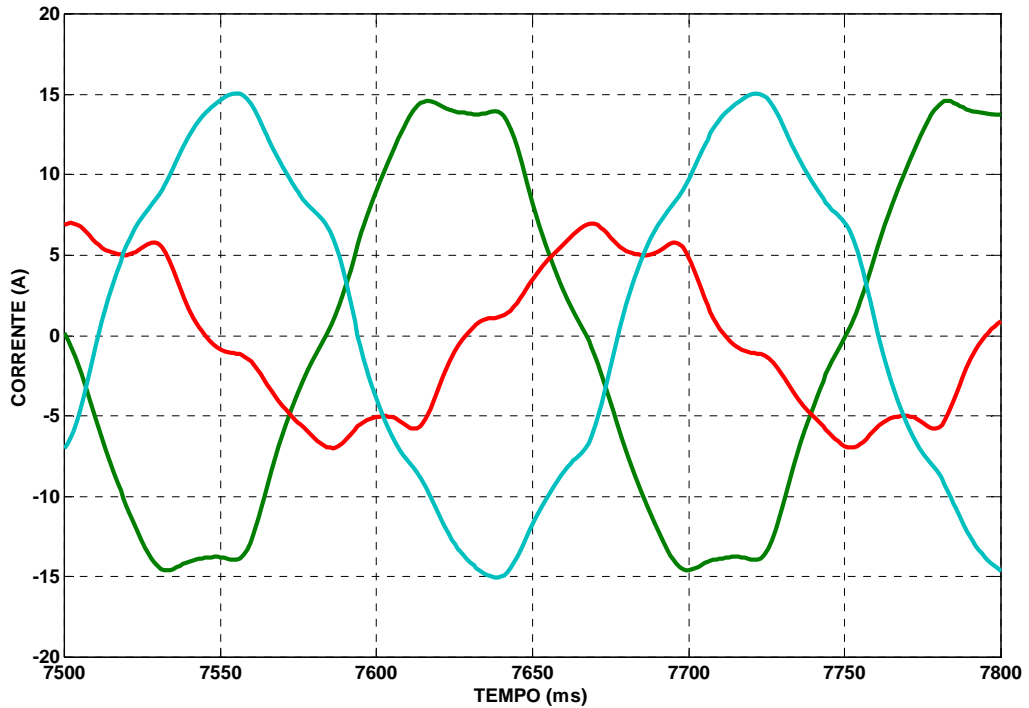


Figura 3.9 – Correntes não-senoidais e desequilibradas.

Aplicando-se a Transformação de Clarke nas equações 3.32 a 3.34, tem-se:

$$\tilde{\mathbf{I}} = \frac{2}{3} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \left[\begin{array}{l} (\mathbf{i}_{a1}^+ + \mathbf{i}_{a5}^+ + \mathbf{i}_{a7}^+ + \mathbf{i}_{a11}^+ + \mathbf{i}_{a13}^+ + \dots) + \\ + (\mathbf{i}_{a1}^- + \mathbf{i}_{a5}^- + \mathbf{i}_{a7}^- + \mathbf{i}_{a11}^- + \mathbf{i}_{a13}^- + \dots) \end{array} \right] + \\ + \mathbf{a} \cdot \left[\begin{array}{l} (\mathbf{i}_{b1}^+ + \mathbf{i}_{b5}^+ + \mathbf{i}_{b7}^+ + \mathbf{i}_{b11}^+ + \mathbf{i}_{b13}^+ + \dots) + \\ + (\mathbf{i}_{b1}^- + \mathbf{i}_{b5}^- + \mathbf{i}_{b7}^- + \mathbf{i}_{b11}^- + \mathbf{i}_{b13}^- + \dots) \end{array} \right] + \\ + \mathbf{a}^2 \cdot \left[\begin{array}{l} (\mathbf{i}_{c1}^+ + \mathbf{i}_{c5}^+ + \mathbf{i}_{c7}^+ + \mathbf{i}_{c11}^+ + \mathbf{i}_{c13}^+ + \dots) + \\ + (\mathbf{i}_{c1}^- + \mathbf{i}_{c5}^- + \mathbf{i}_{c7}^- + \mathbf{i}_{c11}^- + \mathbf{i}_{c13}^- + \dots) \end{array} \right] \end{array} \right\} \quad (3.35)$$

Separando-se as correntes que possuem os mesmos índices de seqüência e componente harmônica e, reescrevendo a equação 3.35 tem-se:

$$\tilde{\mathbf{I}} = \left[\begin{array}{c} \tilde{\mathbf{I}}_1^+ + \tilde{\mathbf{I}}_5^+ + \tilde{\mathbf{I}}_7^+ + \tilde{\mathbf{I}}_{11}^+ + \tilde{\mathbf{I}}_{13}^+ + \dots \\ + (\tilde{\mathbf{I}}_1^- + \tilde{\mathbf{I}}_5^- + \tilde{\mathbf{I}}_7^- + \tilde{\mathbf{I}}_{11}^- + \tilde{\mathbf{I}}_{13}^- + \dots) \end{array} \right] \quad (3.36)$$

De modo análogo, o vetor espacial instantâneo tensão fica:

$$\tilde{\mathbf{V}} = \left[\begin{array}{c} \tilde{\mathbf{V}}_1^+ + \tilde{\mathbf{V}}_5^+ + \tilde{\mathbf{V}}_7^+ + \tilde{\mathbf{V}}_{11}^+ + \tilde{\mathbf{V}}_{13}^+ + \dots \\ + (\tilde{\mathbf{V}}_1^- + \tilde{\mathbf{V}}_5^- + \tilde{\mathbf{V}}_7^- + \tilde{\mathbf{V}}_{11}^- + \tilde{\mathbf{V}}_{13}^- + \dots) \end{array} \right] \quad (3.37)$$

A Fig. 3.10 ilustra este caso geral de desequilíbrio com componentes harmônicos.

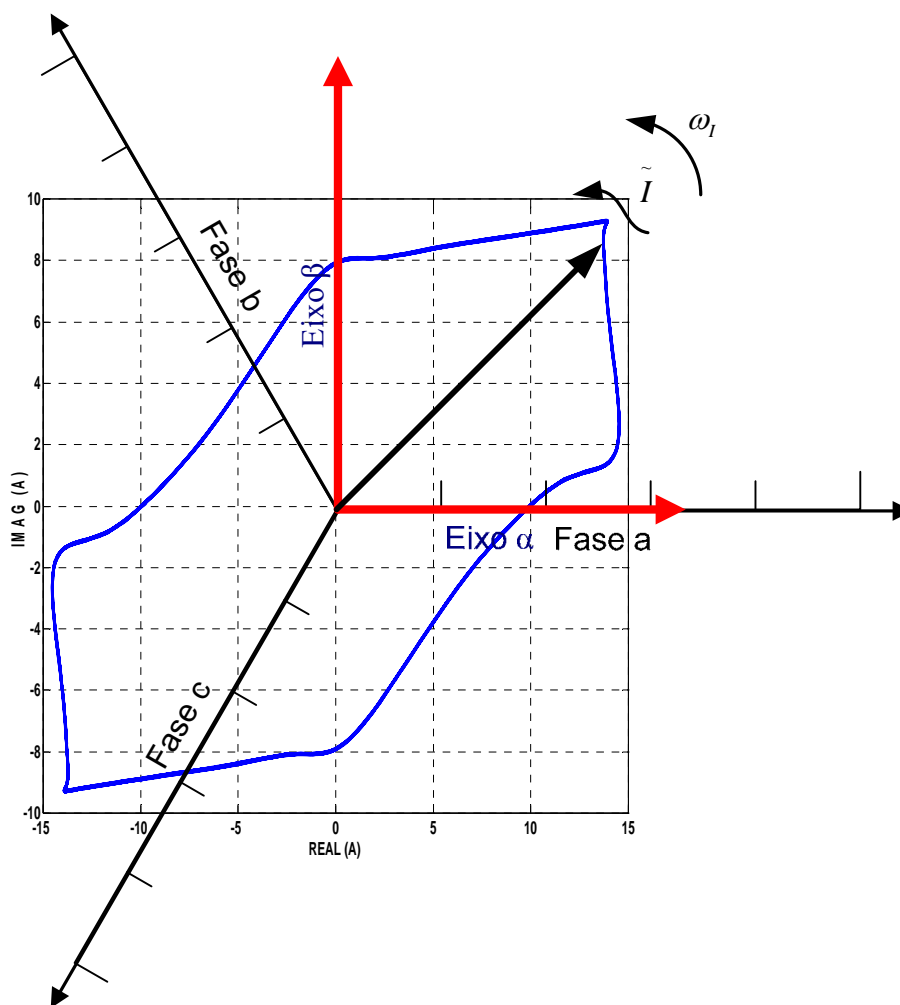


Figura 3.10 – Vetor espacial instantâneo corrente para o regime permanente não-senoidal e desequilibrado.

3.1.7 – Potência complexa instantânea.

A potência complexa instantânea como definida por Milanez (1993) é a seguinte:

$$\tilde{S} = \frac{3}{2} \cdot \tilde{V} \cdot \tilde{I}^* \quad (3.38)$$

A equação 3.38 em termos cartesianos fica:

$$\tilde{S} = P + j \cdot Q \quad (3.39)$$

onde P é a potência real e Q é a potência imaginária. O módulo de \tilde{S} é a potência aparente instantânea.

Considerando a situação de desequilíbrio e não-senoidal a equação 3.40 fica:

$$\tilde{S} = \frac{3}{2} \cdot \left[\tilde{V}^+ + \tilde{V}^- \right] \cdot \left[\tilde{I}^+ + \tilde{I}^- \right]^* \quad (3.40)$$

Onde:

$$\tilde{V}^+ = \tilde{V}_1 + \sum_{n=2}^{n=\infty} \tilde{V}_n \quad (3.41)$$

$$\tilde{V}^- = \tilde{V}_1 + \sum_{n=2}^{n=\infty} \tilde{V}_n \quad (3.42)$$

$$\tilde{I}^+ = \tilde{I}_1 + \sum_{n=2}^{n=\infty} \tilde{I}_n \quad (3.43)$$

$$\tilde{I}^- = \tilde{I}_1 + \sum_{n=2}^{n=\infty} \tilde{I}_n \quad (3.44)$$

Desenvolvendo a equação 3.40, tem-se:

$$\tilde{S} = \frac{3}{2} \cdot \left[\tilde{V}^+ \cdot \left(\tilde{I}^+ \right)^* + \tilde{V}^- \cdot \left(\tilde{I}^- \right)^* + \tilde{V}^+ \cdot \left(\tilde{I}^- \right)^* + \tilde{V}^- \cdot \left(\tilde{I}^+ \right)^* \right] \quad (3.45)$$

Ou seja:

$$\tilde{S} = \tilde{S}^+ + \tilde{S}^- + \tilde{S}^\pm + \tilde{S}^\mp \quad (3.46)$$

As potências \tilde{S}^{\pm} e \tilde{S}^{\mp} possuem valor médio zero (MILANEZ, 2003), sendo assim:

$$\langle \tilde{S} \rangle = \langle \tilde{S}^+ \rangle + \langle \tilde{S}^- \rangle \quad (3.47)$$

E a equação (3.47), em coordenadas cartesianas, passa a ser:

$$\langle \tilde{S} \rangle = \langle P \rangle + j \cdot \langle Q \rangle \quad (3.48)$$

Onde:

$$\langle P \rangle = \left\langle P_1^+ + \sum_{n=2}^{n=\infty} P_n^+ \right\rangle + \left\langle P_1^- + \sum_{n=2}^{n=\infty} P_n^- \right\rangle \quad (3.49)$$

$$\langle Q \rangle = \left\langle Q_1^+ + \sum_{n=2}^{n=\infty} Q_n^+ \right\rangle + \left\langle Q_1^- + \sum_{n=2}^{n=\infty} Q_n^- \right\rangle \quad (3.50)$$

3.1.8 – Potência complexa de seqüência positiva e negativa.

Como mostrado por Milanez (2003), o valor médio da potência complexa instantânea $\langle \tilde{S} \rangle$ se relaciona com as potências de seqüência positiva e negativa da forma mostrada em 3.47, e aquela está também representada graficamente na Figura 3.11.

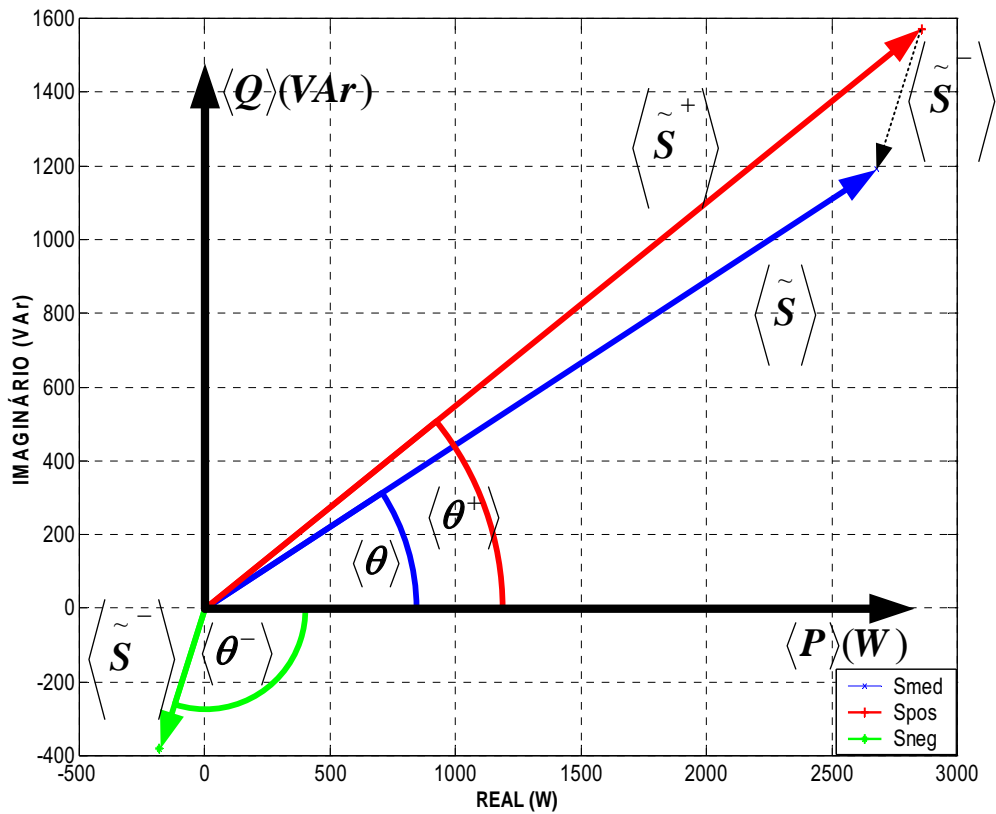


Figura 3.11 – Potência complexa média e potências complexas de seqüência positiva e negativa.

Os módulos das potências complexas de seqüência positiva e negativa são determinados em função das equações 3.23 a 3.26.

$$S^+ = \frac{3}{2} \cdot \hat{V}^+ \cdot \hat{I}^+ \quad (3.51)$$

$$S^- = \frac{3}{2} \cdot \hat{V}^- \cdot \hat{I}^- \quad (3.52)$$

Aplicando a Lei dos cossenos, determinam-se os valores da potência real e imaginária de seqüência positiva.

$$\langle \theta^+ \rangle = \langle \theta \rangle + \arccos \left[\frac{(S^+)^2 + \left(\langle \tilde{S} \rangle \right)^2 - (S^-)^2}{2 \cdot (S^+)^2 \cdot \left(\langle \tilde{S} \rangle \right)^2} \right] \quad (3.53)$$

$$\operatorname{Re} \left\{ \left\langle \tilde{S}^+ \right\rangle \right\} = S^+ \cdot \cos \langle \theta^+ \rangle \quad (3.54)$$

$$\operatorname{Im} \left\{ \left\langle \tilde{S}^+ \right\rangle \right\} = S^+ \cdot \operatorname{sen} \langle \theta^+ \rangle \quad (3.55)$$

E, então se calcula a potência complexa de seqüência negativa:

$$\left\langle \tilde{S}^- \right\rangle = \left\langle \tilde{S} \right\rangle - \left\langle \tilde{S}^+ \right\rangle \quad (3.56)$$

O fator de potência da fundamental de seqüência positiva é:

$$FP_1^+ = \frac{P_1^+}{S_1^+} \quad (3.57)$$

3.1.9 – Valores efetivos de Buchholz-Goodhue para a corrente e tensão.

Para a obtenção das grandezas de Buchholz-Goodhue, Milanez e Emanuel (2003) propõem o uso dos vetores espaciais instantâneos (considerando a corrente):

$$I_e = \sqrt{\frac{\left(\hat{I}^+ \right)^2 + \left(\hat{I}^- \right)^2}{2}} \quad (3.58)$$

Igualmente a tensão fica:

$$V_e = \sqrt{\frac{\left(\hat{V}^+\right)^2 + \left(\hat{V}^-\right)^2}{2}} \quad (3.59)$$

Deve-se salientar que as equações 3.60 e 3.61 estão desconsiderando as componentes de seqüência zero (uma vez que estas não estão presentes na MIT).

3.1.10 – Potência eficaz de Buchholz-Goodhue.

A potência eficaz de Buchholz-Goodhue, S_e , possibilita uma relação quase linear entre seu valor quadrático e as perdas na carga, como estudado por Emanuel [8], o que por sua vez assegura maior consistência na análise do fator de potência (que foi mostrado como sendo menor do que o fator de potência aritmético e vetorial) para as seguintes condições: onda senoidal e equilíbrio, onda não-senoidal e equilíbrio, onda senoidal e desequilíbrio e, onda não-senoidal e desequilíbrio. Esta potência trifásica é definida por:

$$S_e = 3 \cdot V_e \cdot I_e \quad (3.60)$$

O fator de potência de Buchholz-Goodhue é dado por:

$$FP_e = \frac{\langle P \rangle}{S_e} \quad (3.61)$$

Visando uma melhor definição para o aproveitamento da rede elétrica, a equação (3.61), pode ser reescrita em função da potência ativa fundamental como:

$$FP_1^+ = \frac{P_1^+}{S_1^+} \quad (3.62)$$

Sendo S_{e1} a potência trifásica aparente efetiva fundamental, então a potência aparente efetiva não-fundamental (S_{eN}) é dada por:

$$S_{eN}^2 = S_e^2 - S_{e1}^2 \quad (3.63)$$

Ou ainda:

$$S_{eN}^2 = D_{eI}^2 + D_{eV}^2 + S_{eH}^2 \quad (3.64)$$

Sendo que as potências trifásicas de distorção de corrente (D_{eI}) e de tensão (D_{eV}) e a potência aparente trifásica harmônica (S_{eH}) são definidas por:

$$D_{eI} = 3 \cdot V_{e1} \cdot I_{eH} \quad (3.65)$$

$$D_{eV} = 3 \cdot V_{eH} \cdot I_{e1} \quad (3.66)$$

$$S_{eH} = 3 \cdot V_{eH} \cdot I_{eH} \quad (3.67)$$

Onde

$$I_{eH} = \sqrt{I_e^2 - I_{e1}^2} \quad (3.68)$$

$$V_{eH} = \sqrt{V_e^2 - V_{e1}^2} \quad (3.69)$$

Ou também:

$$D_{eI} = S_{e1} \cdot (THD_I) \quad (3.70)$$

$$D_{eV} = S_{e1} \cdot (THD_V) \quad (3.71)$$

$$S_{eH} = S_{e1} \cdot (THD_I) \cdot (THD_V) \quad (3.72)$$

Como mostrado pelas equações anteriores as potências aparentes harmônica e não-fundamental diferem pelo fato da primeira contar com apenas as parcelas harmônicas e, a segunda conter também a interação entre as componentes harmônicas e fundamental.

Define-se também a Distorção Harmônica Total equivalente para a corrente (THD_{eI}) e tensão (THD_{eV}):

$$THD_{eI} = \frac{I_{eH}}{I_{e1}} \quad (3.73)$$

$$THD_{eV} = \frac{V_{eH}}{V_{e1}} \quad (3.74)$$

A equação 3.63 pode ser reescrita como:

$$S_{eN} = S_{e1} \cdot \sqrt{THD_{eI}^2 + THD_{eV}^2 + (THD_{eI} \cdot THD_{eV})^2} \quad (3.75)$$

A potência de desequilíbrio da fundamental (S_{U1}) permite a análise do desequilíbrio da carga, ou seja:

$$S_{U1} = \sqrt{S_{e1}^2 - (S_1^+)^2} \quad (3.76)$$

4 – APLICAÇÃO DOS VEI's NO CÁLCULO DAS GRANDEZAS DE BUCHHOLZ-GOODHUE PARA A MIT.

4.1 – Modelagem da máquina de indução trifásica com vetores espaciais instantâneos.

4.1.1 – Introdução.

O acionamento com velocidade variável sempre foi um grande empecilho para a aplicação da máquina de indução trifásica (MIT), pois esta possuía a alimentação fixa de tensão e frequência. O progresso da eletrônica de potência e da informática permitiu que fossem produzidos conversores de frequência que conciliassem confiabilidade e economia, tornando a MIT muito mais interessante do que a máquina de corrente contínua (que era a mais utilizada para situações com controle de velocidade), já que ela (considerando o rotor gaiola de esquilo) tem uma série de vantagens, tais como:

- Custo de aquisição menor do que o motor de corrente contínua.;
- Custo de manutenção reduzido (devido à ausência de escovas);
- Operação em ambientes hostis;
- Construção simples;
- Robustez.

Esse mesmo desenvolvimento que possibilitou o uso extensivo da MIT gerou alguns inconvenientes, pois o sistema elétrico passou a contar com um alto conteúdo harmônico, além disso, a expansão do sistema elétrico aumentou o desequilíbrio entre as fases de tensão de suprimento. A análise do comportamento

da MIT pelo modelo convencional passou, então, a não ser satisfatória para o sistema atual, em condição de desequilíbrio ou com presença de harmônicas, para corrigir algumas distorções presentes no modo convencional são utilizadas as grandezas de Buchholz-Goodhue (IEEE WORKING GROUP ON NONSINUSOIDAL SITUATIONS, 2000).

Será, então, utilizada para a determinação dos parâmetros uma abordagem proposta por Milanez (1993).

4.2 – Materiais e métodos.

4.2.1 – Introdução.

Será analisada a eficácia da aplicação dos vetores espaciais em concordância com a IEEE 1459-2000 através da simulação do motor de indução tipo gaiola-de-esquilo em situações variadas de equilíbrio e simetria. Para analisar a relação entre perdas serão levadas em conta apenas as perdas no cobre.

Considerar-se-á componentes harmônicas de tensão em um barramento que alimenta uma MIT, cujas ordens são além da fundamental:

- Quinta;
- Sétima;
- Décima primeira;
- Décima terceira.

Para condição de desequilíbrio será considerado o Fator de Desequilíbrio de Tensão (VU%), cujos valores adotados, serão:

- 0 %;
- 5%;
- 10%;
- 15%.

Neste trabalho será utilizado como simulador do sistema, o software SIMULINK do MATLAB 5.3 (as equações envolvidas no modelo da MIT, encontram-se no APÊNDICE A). O esquemático do modelo construído se encontra no APÊNDICE B.

4.3 – Configuração da MIT e fontes de tensão utilizadas para a simulação.

Para a simulação digital foram utilizados os seguintes parâmetros para a MIT, definidos na Tabela 4.1, abaixo:

Tabela 4.1 – Parâmetros do modelo da MIT.

Potência Nominal (HP)		3
Tensão Nominal (Vrms)		220
Frequência (Hz)		60
Pólos		4
Velocidade (rpm)		1780
Estator	Resistência Série (Ω)	0,435
	Indutância de dispersão (mH)	2
Rotor	Resistência Série (Ω)	0,816
	Indutância de dispersão (mH)	2
Indutância Mútua (mH)		69,31
Momento de Inércia (Kg.m ²)		0,089
Torque Nominal (N.m)		11,9

4.4 – A MIT operando sob condição senoidal.

4.4.1 – Introdução

Primeiramente, considerar-se-á uma situação simétrica e totalmente equilibrada, depois será incluído um desequilíbrio e, o mesmo será acentuado para que se possam aplicar as definições propostas pela IEEE 1459-2000.

4.4.2 – Simulação e discussão de resultados.

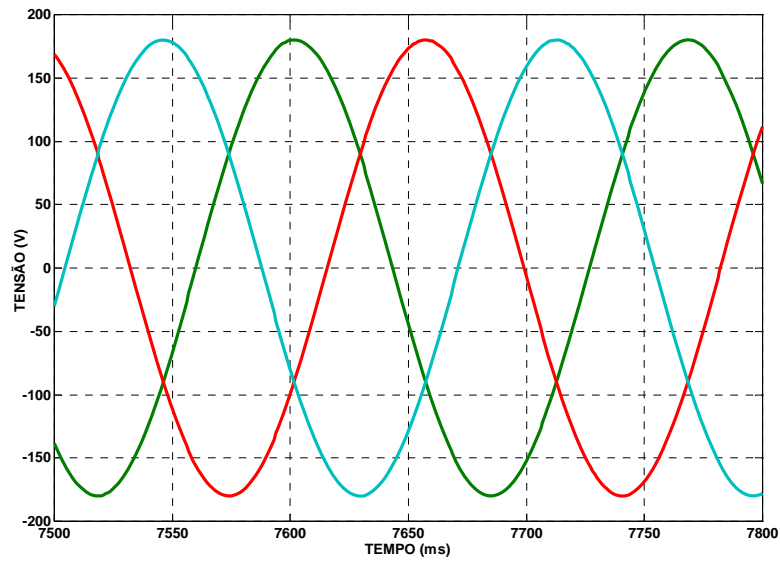
Para as simulações ter-se-ão as fontes configuradas da forma mostrada na Tabela 4.2, para avaliação de quatro casos distintos, considerando diferentes condições operativas da MIT.

Tabela 4.2 – Valores de amplitude e fase da fundamental para os casos de desequilíbrio.

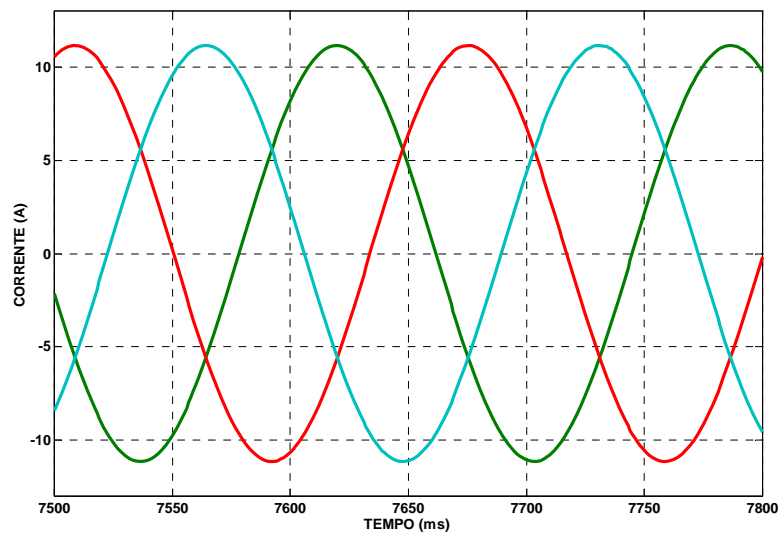
	VU%			
	CASO 1	CASO 2	CASO 3	CASO 4
	0	5	10	15
\dot{V}_a	$180 \angle 0^\circ$	$180 \angle 0^\circ$	$180 \angle 0^\circ$	$180 \angle 0^\circ$
\dot{V}_b	$180 \angle -120^\circ$	$165 \angle 120^\circ$	$150 \angle -120^\circ$	$140 \angle 120^\circ$
\dot{V}_c	$180 \angle 120^\circ$	$173 \angle -124,31$	$167,03 \angle 128,95^\circ$	$163,71 \angle -132,22^\circ$

CASO 1 – VU%=0%.

Nessa condição as formas de onda instantâneas da tensão e da corrente apresentaram-se como mostradas na Fig. 4.1:



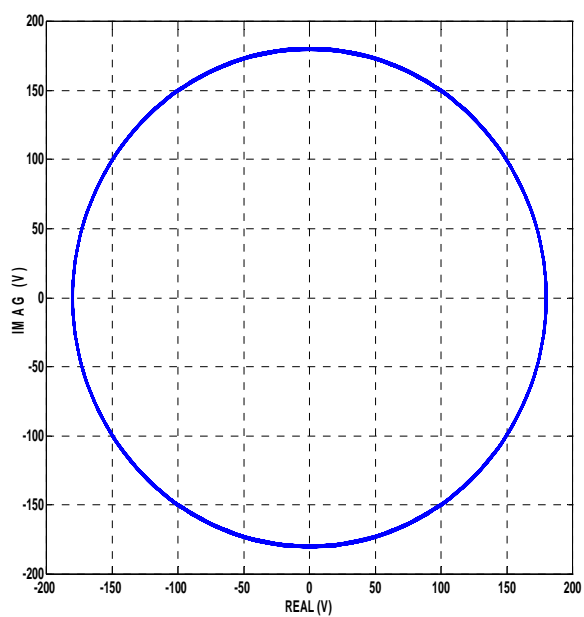
(a)



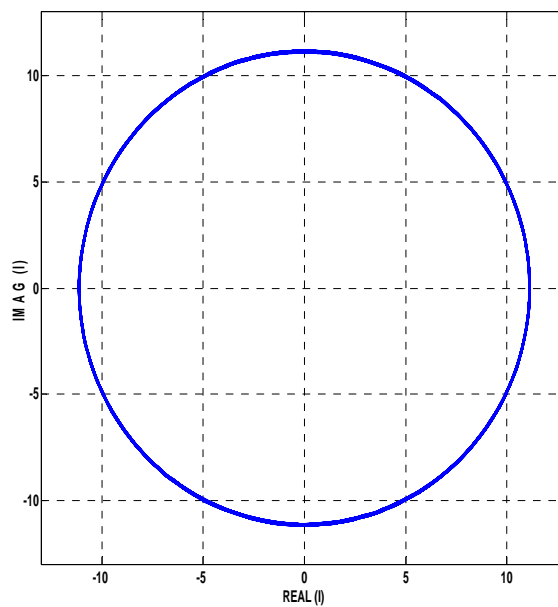
(b)

Figura 4.1 – (a) Tensões instantâneas e (b) correntes instantâneas.

A trajetória descrita pela tensão e corrente uma vez feita a transformação de Clarke é mostrada na Figura 4.2:



(a)



(b)

Figura 4.2 – (a) Tensão complexa instantânea (b) corrente complexa instantânea.

Observa-se da Fig. 4.2. que, tanto a tensão quanto a sua corrente apresentam uma trajetória circular, com raio constante. Os VEI's descrevem trajetórias no sentido anti-horário.

O valor médio da potência complexa instantânea como mostrada no Capítulo 3, obtido experimentalmente, fica igual a:

$$\langle \tilde{S} \rangle = \langle P \rangle + j\langle Q \rangle = \langle P^+ \rangle + j\langle Q^+ \rangle = 2324 + j1905 \text{ VA}$$

$$|\tilde{S}| = 3005 \text{ VA}$$

A potência aparente de Buchholz-Goodhue calculada é:

$$S_e = 3V_e I_e = 3005 \text{ VA}$$

Tem-se nesta condição, tem-se que:

$$|\tilde{S}| = S_e = S^+$$

O fator de potência por sua vez é dado por:

$$FP = \frac{P}{|\tilde{S}|} = \cos \theta = 0,77 = FP_e = FP^+$$

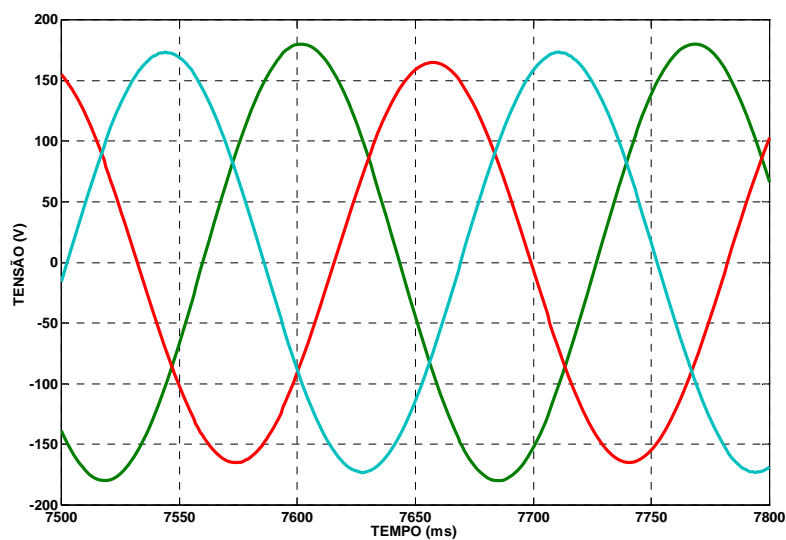
As perdas relacionadas ao motor (tanto no estator quanto no rotor) estão vinculadas, como já determinadas antes, apenas às perdas no cobre. Pela simulação foi obtida a potência mecânica, P_m :

$$P_{cobre} = P - P_m = 2324 - 2149 = 175 \text{ W}$$

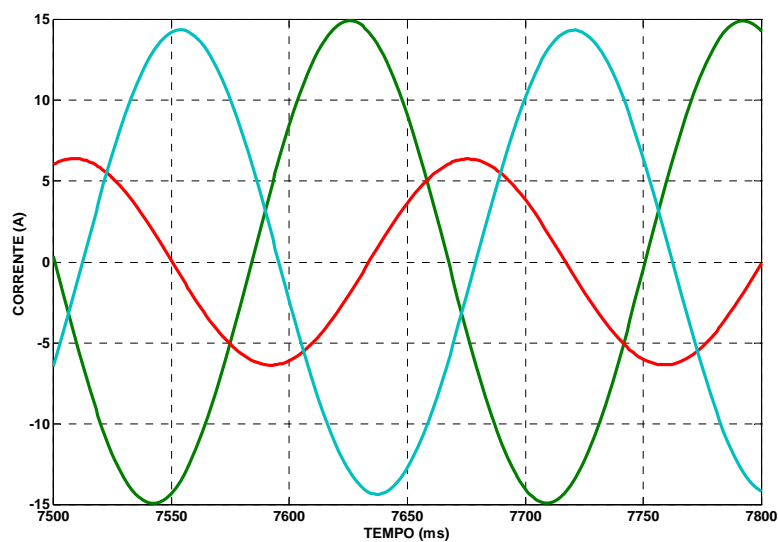
Neste caso não existem perdas adicionais devido ao desequilíbrio e às harmônicas.

CASO 2 – VU%=5%.

Acrescenta-se agora um desequilíbrio (determinado pelo índice VU%). Nesta situação as formas de onda de tensão e corrente no tempo ficam da seguinte forma:



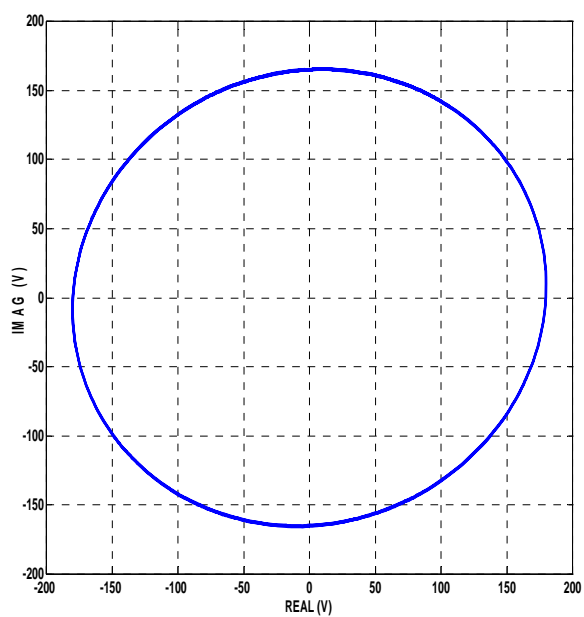
(a)



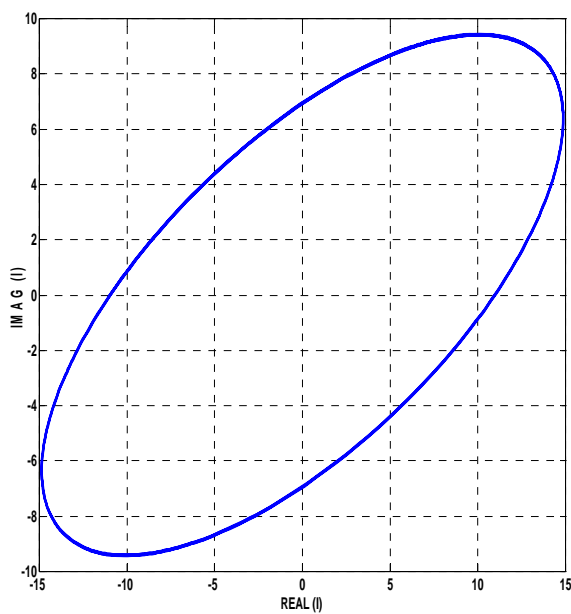
(b)

Figura 4.3 – (a) Tensão instantânea e (b) corrente instantânea.

A trajetória descrita pela tensão e corrente uma vez feita a transformação de Clarke é mostrada na Figura 4.4:



(a)



(b)

Figura 4.4 – (a) Tensão complexa instantânea (b) corrente complexa instantânea.

Observa-se que, nessa condição tanto a tensão quanto a sua corrente apresentam uma trajetória elíptica. Esse achatamento ocorre devido ao desequilíbrio de tensão.

O valor médio da potência complexa instantânea como mostrada no Capítulo 3 fica igual:

$$\langle \tilde{\mathbf{S}} \rangle = \langle \mathbf{P} \rangle + j \langle \mathbf{Q} \rangle = 2375 + j1721 \text{ VA}$$

$$\langle |\tilde{\mathbf{S}}| \rangle = 3087 \text{ VA}$$

Verifica-se que, neste caso, o valor médio $|\tilde{\mathbf{S}}|$ é diferente da potência aparente de Buchholz-Goodhue, S_e ,

$$S_e = 3226,08 \text{ VA}$$

Calculou-se a potência aparente de seqüência positiva e, através dela obtém-se os valores das potências ativa e reativa de seqüência positiva.

$$S^+ = 2940,6 \text{ VA}$$

De onde se obtém a potência ativa de seqüência positiva, na realidade esta é aquela da qual se subtrai o trabalho útil no eixo da MIT.

$$\langle \mathbf{P}^+ \rangle = 2343 \text{ W}$$

A potência reativa de seqüência positiva é:

$$\langle \mathbf{Q}^+ \rangle = 1777 \text{ VAR}$$

Como determinado no capítulo anterior, a potência aparente de desequilíbrio fundamental fica:

$$S_U = 598,85 \text{ VA}$$

Este índice representa as perdas decorrentes ao desequilíbrio, que estão intrínsecas à potência aparente de Buchholz-Goodhue.

Como as potências aparentes em estudo não são iguais como no item anterior, temos os seguintes fatores de potência:

1. Considerando a Potência Aparente Complexa:

$$FP = \frac{P}{|\tilde{S}|} = 0,81$$

2. Considerando a Potência Aparente de Buchholz-Goodhue:

$$FP_e = \frac{P}{S_e} = 0,74$$

3. Considerando a Potência Aparente Seqüência Positiva Fundamental:

$$FP_1^+ = \frac{P_1^+}{S_1^+} = 0,80$$

Os dois primeiros fatores de potência relacionam a potência total do sistema, sendo que o primeiro, FP, não relaciona as perdas na linha, já a FP_e leva em conta estas perdas, sendo este o melhor índice que deve ser escolhido para a análise do circuito. Considerando o fator de potência do item 3, temos a relação entre as potências ativa e aparente que desenvolve o trabalho útil e, servirão de parâmetros para se determinar dispositivos compensadores de energia.

As perdas relacionadas ao motor (tanto no estator quanto no rotor) estão vinculadas, como já determinadas antes, apenas à dissipação no cobre.

$$P_{\text{cobre}} = P - P_m = 2375 - 2140 = 235 \text{ W}$$

Essas perdas remetem à exigência de mais potência de entrada para que o motor mantenha a potência mecânica, resultando em um acréscimo de perdas e, ao menor aproveitamento da capacidade de condução dos condutores. Por isso a importância de um índice que utilize parâmetros mais adequados que possibilitem uma melhor escolha para qualquer tomada de decisão na correção do fator de potência.

Na Tabela 4.3 estão os parâmetros calculados para a $THD_V=0\%$ (o índice é determinado no APÊNDICE D). Semelhantemente, para os demais casos de desequilíbrio (caso 3 e caso 4, Tabela 4.2), os índices determinados estão na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Parâmetros determinados para os casos de desequilíbrio com $THD_V=0\%$

$VU\%$	$\langle \tilde{S} \rangle$ (VA)	$\langle P \rangle$ (W)	$\langle Q \rangle$ (VAr)	S_e (VA)	S^+ (VA)	$\langle P^+ \rangle$ (W)	$\langle Q^+ \rangle$ (VAr)
0	3005	2324	1905	3005	3005	2324	1905
5	3087	2375	1721	3226,08	2940,6	2343	1777
10	2902	2523	1433,902	3877,5	2916,9	2395	1665
15	2930	2677	1191,038	4428,14	3621	2858	2225

Com os dados obtidos na Tabela 4.3, obtém-se os parâmetros referentes à utilização do sistema elétrico, os quais são apresentados na Tabela 4.4. a seguir:

Tabela 4.4 – Parâmetros de qualidade da MIT operando com harmônicas e desequilíbrio ($\text{THD}_V=0\%$).

$VU\%$	FP	FP_e	FP_1^+	P_{cobre} (W)	P_m (W)	S_{U1} (VA)	η
0	0,77	0,77	0,7	175	2149	0	0,92
5	0,81	0,74	0,80	235	2140	598,85	0,90
10	0,87	0,66	0,82	396	2127	2554,8	0,84
15	0,91	0,60	0,79	560	2117	2994,8	0,79

Observa-se uma diminuição da potência mecânica P_m , com o aumento do desequilíbrio, e também um aumento das perdas no cobre, P_{cobre} .

Embora a potência mecânica diminua, aumenta a potência ativa demandada da rede, P , pois as perdas aumentam numa proporção maior.

Há uma diminuição significativa do rendimento como era esperado.

Observa-se também, um aumento do fator de potência, FP , calculado utilizando-se o módulo da potência complexa instantânea como potência aparente. Este procedimento deve ser descartado, pois não existe nenhuma base física que a justifique.

Quanto às potências de seqüência positiva, deve-se observar que também são pouco significativas.

4.5 – A MIT operando sob condição não-senoidal.

4.5.1 – Introdução.

A situação, aqui neste estudo, é decorrente da presença de correntes harmônicas presentes no barramento em que está acoplado o motor, essas são causadas por cargas não-lineares. As harmônicas são um sério inconveniente, uma vez que influenciam na queda de rendimento da máquina, assim como diminuem o fator de potência, causando sobre aquecimento e vibrações mecânicas.

Na análise serão levados em conta os efeitos das harmônicas de primeira, quinta, sétima, décima - primeira e décima - terceira ordem. Posteriormente serão também somados às situações os efeitos do desequilíbrio, mostrados no item anterior.

4.5.2 – Simulação e discussão de resultados.

Para simular a máquina alimentada por um sistema contendo harmônicas, foi considerado cada componente harmônico como sendo uma fonte de tensão em série. Conforme é ilustrado na Fig. 4.5:

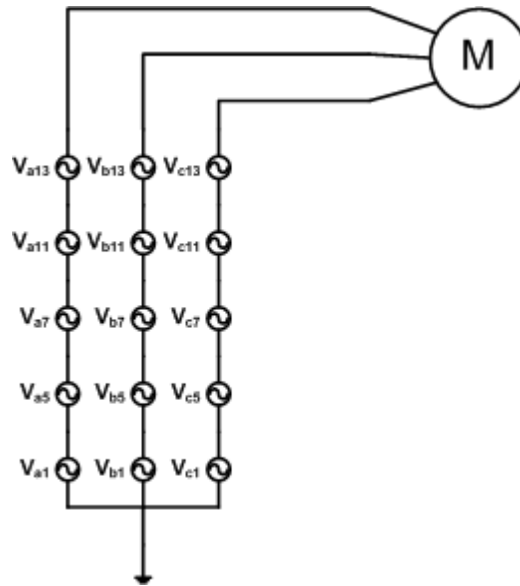


Figura 4.5: Fontes de tensão harmônica.

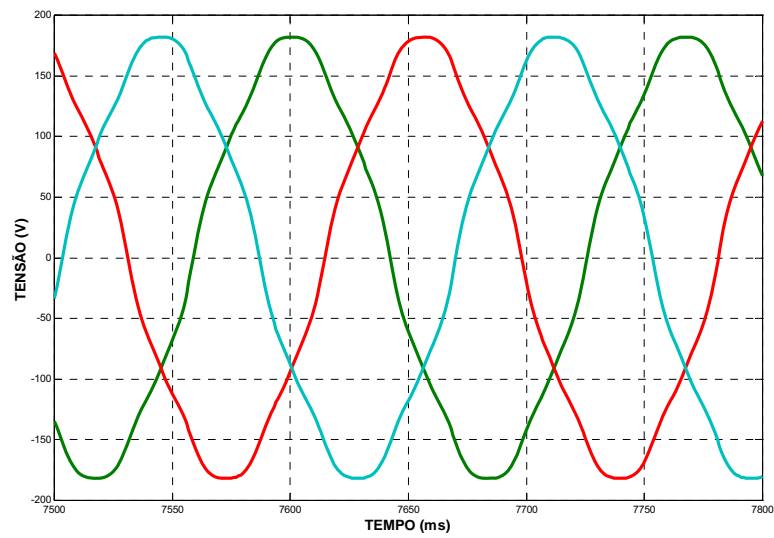
CASO 1 – $VU\%=0\%$ e $THD_V=5\%$.

Na Tabela 4.5, tem-se os valores que foram determinados para cada componente.

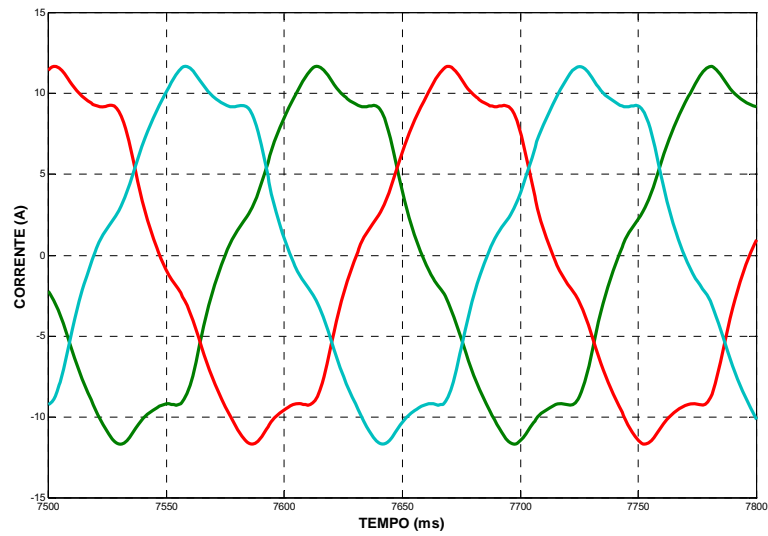
Tabela 4.5 – Valores de amplitude e fase das componentes harmônicas.

	THD _V =5%				
	1	5	7	11	13
\dot{V}_{ah}	$180 \angle 0^\circ$	$7 \angle 0^\circ$	$4 \angle 0^\circ$	$2 \angle 0^\circ$	$1 \angle 0^\circ$
\dot{V}_{bh}	$180 \angle -120^\circ$	$7 \angle 120^\circ$	$4 \angle -120^\circ$	$2 \angle 120^\circ$	$1 \angle -120^\circ$
\dot{V}_{ch}	$180 \angle 120^\circ$	$7 \angle -120^\circ$	$4 \angle 120^\circ$	$2 \angle -120^\circ$	$1 \angle 120^\circ$

A tensão e a corrente instantâneas estão mostradas na Figura 4.6.



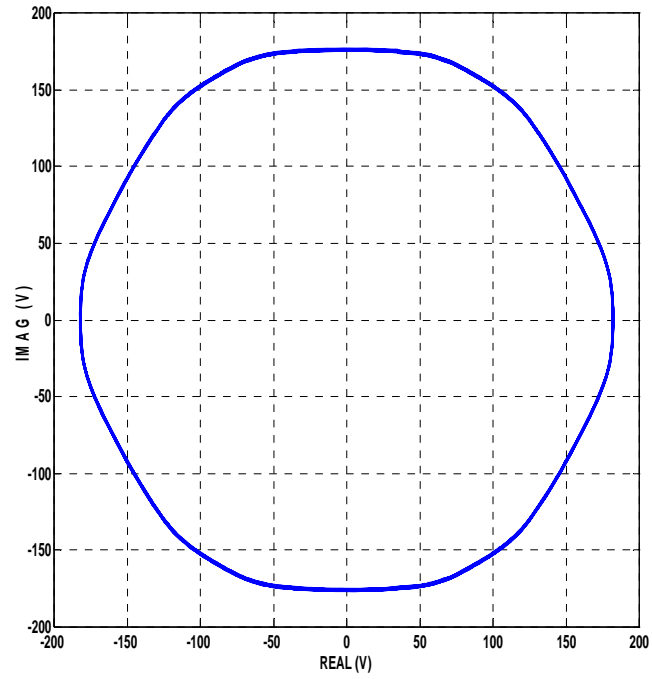
(a)



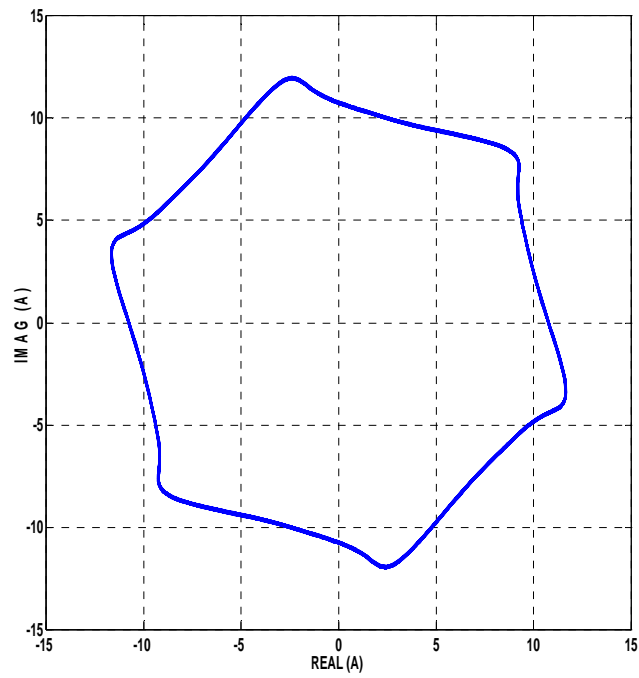
(b)

Figura 4.6 – (a) Tensão instantânea e (b) corrente instantânea.

A trajetória descrita pela tensão e corrente uma vez feita a transformação de Clarke é mostrada na Figura 4.7:



(a)



(b)

Figura 4.7 – (a) Tensão complexa instantânea (b) corrente complexa instantânea.

Observa-se nesta figura que a trajetória descrita pelos VEI's, apresenta deformações, decorrentes das harmônicas. Neste caso, assim, como nos anteriores o sentido de rotação dos VEI's é anti-horário (seqüência positiva) – já mostrado no Capítulo 3.

A potência complexa instantânea como mostrada no Capítulo 3 fica igual:

$$\langle \tilde{\mathbf{S}} \rangle = \langle \mathbf{P} \rangle + j \langle \mathbf{Q} \rangle = 2326 + j1897 \text{ VA}$$

$$\langle \langle \tilde{\mathbf{S}} \rangle \rangle = 3001,5 \text{ VA}$$

A potência aparente de Buchholz-Goodhue, por sua vez:

$$S_e = 3021,08 \text{ VA}$$

$$S_{e1} = 3005 \text{ VA}$$

Calculando a potência aparente de seqüência positiva fundamental:

$$S_1^+ = 3005 \text{ VA}$$

A potência ativa de seqüência positiva fundamental:

$$\langle \mathbf{P}_1^+ \rangle = 2326 \text{ W}$$

A potência reativa de seqüência positiva fundamental:

$$\langle \mathbf{Q}_1^+ \rangle = 1905 \text{ VAR}$$

Neste caso a potência aparente de desequilíbrio fica:

$$S_{U1} = 0 \text{ VA}$$

Outras potências aparentes, dadas pelas grandezas de Buchholz-Goodhue, a serem consideradas são a Potência aparente harmônica e a Potência aparente não-fundamental. Neste sentido, são eles:

Potência aparente harmônica:

$$S_{eH} = 12,22 \text{ VA}$$

Esta potência aparente representa os efeitos causados pelas componentes harmônicas de mesma frequência.

Potência aparente não-fundamental:

$$S_{eN} = 360,73 \text{ VA}$$

Esta potência aparente representa os efeitos resultantes pelas componentes harmônicas de mesma frequência ou não.

Com relação ao estudo dos fatores de potência, tem-se que:

1 – Considerando a Potência Aparente Complexa:

$$FP = \frac{P}{|\tilde{S}|} = 0,77$$

2 – Considerando a Potência Aparente de Buchholz-Goodhue:

$$FP_e = \frac{P}{S_e} = 0,77$$

3 – Considerando a Potência Aparente de Seqüência Positiva Fundamental:

$$FP_1^+ = \frac{P_1^+}{S_1^+} = 0,77$$

As perdas ficam:

$$P_{cobre} = P - P_m = 2326 - 2149 = 177 \text{ W}$$

Portanto, para os casos cuja THD_V seja inferior a 5%, não houve influência no desempenho da MIT (IEEE, 1992), além disso, a análise é feita corretamente,

independente do método escolhido. Bem seja dito, nesta condição não há desequilíbrio.

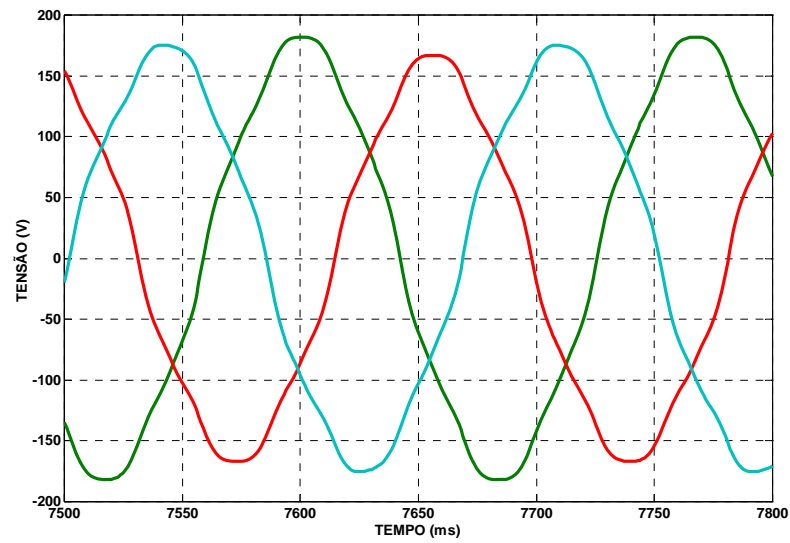
CASO 2 – VU%=5% e THD_V=5%.

Na Tabela 4.6, temos os valores que foram determinados para cada componente.

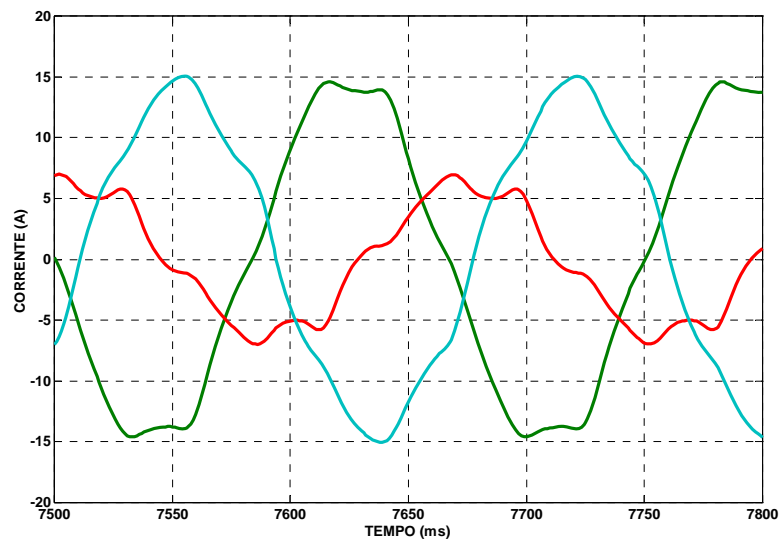
Tabela 4.6 – Valores de amplitude e fase das componentes harmônicas.

	THD _V =5%				
	1	5	7	11	13
\dot{V}_{ah}	180L 0 ⁰	7L 0 ⁰	4L 0 ⁰	2L 0 ⁰	1L 0 ⁰
\dot{V}_{bh}	165L -120 ⁰	7L 120 ⁰	4L -120 ⁰	2L 120 ⁰	1L -120 ⁰
\dot{V}_{ch}	173L 124,31 ⁰	7L -120 ⁰	4L 120 ⁰	2L -120 ⁰	1L 120 ⁰

A tensão e a corrente instantâneas são mostradas na Fig. 4.8, a seguir:



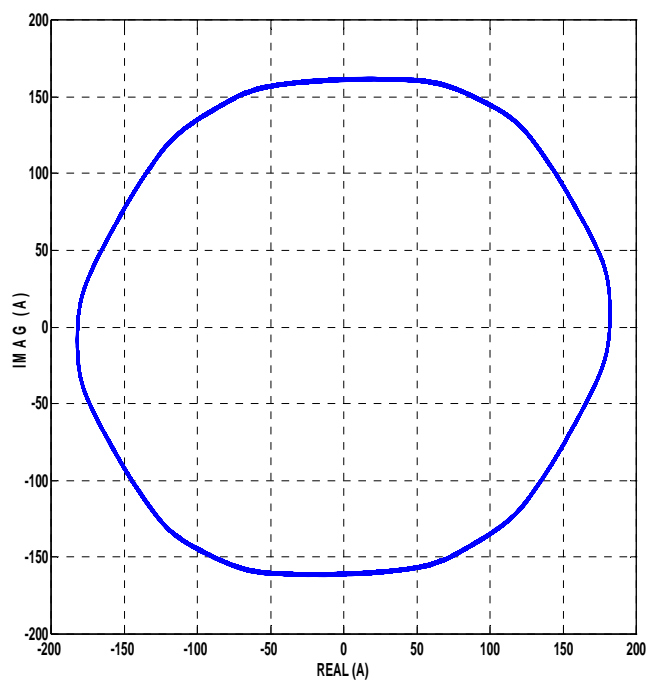
(a)



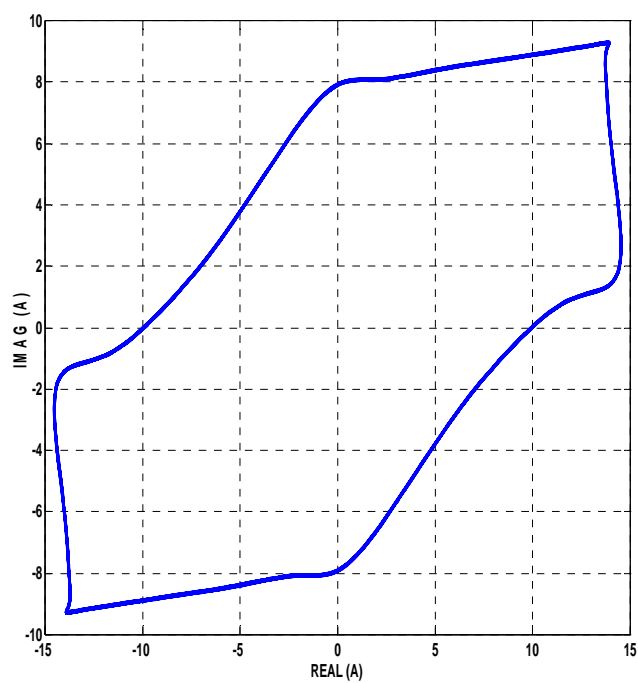
(b)

Figura 4.8 – (a) Tensão instantânea e (b) corrente instantânea.

A trajetória descrita pela tensão e corrente uma vez feita a transformação de Clarke é mostrada na Figura 4.9:



(a)



(b)

Figura 4.9 – (a) Tensão complexa instantânea (b) corrente complexa instantânea.

Analogamente aos casos anteriormente analisados, tem-se que:

$$\langle \tilde{\mathbf{S}} \rangle = \langle \mathbf{P} \rangle + j\langle \mathbf{Q} \rangle = 2377 + j1711 \text{ VA}$$

$$\langle |\tilde{\mathbf{S}}| \rangle = 2928,8 \text{ VA}$$

A potência aparente de Buchholz-Goodhue, por sua vez:

$$S_e = 3240,66 \text{ VA}$$

$$S_{e1} = 3890,7 \text{ VA}$$

Calculando a potência aparente de seqüência positiva fundamental:

$$S_1^+ = 2950,9 \text{ VA}$$

A potência ativa de seqüência positiva fundamental:

$$\langle \mathbf{P}_1^+ \rangle = 2343 \text{ W}$$

A potência reativa de seqüência positiva fundamental:

$$\langle \mathbf{Q}_1^+ \rangle = 1793,92 \text{ VAr}$$

Como determinado no Capítulo 3, a potência aparente de desequilíbrio fica:

$$S_{U1} = 1303,7 \text{ VA}$$

Outras potências aparentes, dadas pelas grandezas de Buchholz-Goodhue, a serem consideradas são a Potência aparente harmônica e a Potência aparente não-fundamental, que são apresentados a seguir:

Potência aparente harmônica:

$$S_{eH} = 12,80 \text{ VA}$$

Potência aparente não-fundamental:

$$S_{eN} = 367,97 \text{ VA}$$

Fazendo um estudo dos fatores de potência, obtém-se que:

1 – Considerando a Potência Aparente Complexa:

$$FP = \frac{P}{\left| \tilde{S} \right|} = 0,81$$

2 – Considerando a Potência Aparente de Buchholz-Goodhue:

$$FP_e = \frac{P}{S_e} = 0,73$$

3 – Considerando a Potência Aparente de Seqüência Positiva Fundamental:

$$FP_1^+ = \frac{P_1^+}{S_1^+} = 0,79$$

As perdas ficam:

$$P_{cobre} = P - P_m = 2377 - 2140 = 237 \text{ W}$$

Na Tabela 4.7 estão os parâmetros para todos os casos de desequilíbrio, para $THD_v=5\%$:

Tabela 4.7 – Parâmetros determinados para os casos de desequilíbrio com $THD_V=5\%$.

$VU\%$	$\langle \tilde{S} \rangle$ (VA)	$\langle P \rangle$ (W)	$\langle Q_1 \rangle$ (VAr)	S_e (VA)	S_{e1} (VA)	S_1^+ (VA)	$\langle P_1^+ \rangle$ (W)	$\langle Q_1^+ \rangle$ (VAr)
0	3001,5	2326	1905	3021,08	3005	3005	2326	1905
5	2928,8	2377	1718,96	3240,66	3890,7	2950,9	2343	1793,92
10	2899,8	2525	1433,9	3890,72	3877,5	2917,7	2523	1665
15	2928,6	2679	1191,04	4440,97	4428,14	3260,5	2677	1573

Com os dados obtidos na Tabela 4.7, determinamos os parâmetros referentes à utilização do sistema elétrico, Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Parâmetros de qualidade da MIT operando com harmônicas e desequilíbrio ($THD_V=5\%$).

$VU\%$	FP	FP_e	FP_1^+	P_{cobre} (W)	P_m (W)	S_{eH} (VA)	S_{eN} (VA)	S_{U1} (VA)	η
0	0,77	0,77	0,77	177	2149	12,22	360,73	0	0,92
5	0,81	0,73	0,79	237	2140	1280	367,97	1303,7	0,90
10	0,87	0,65	0,82	398	2127	12,78	390	2553,8	0,84
15	0,92	0,60	0,88	562	2117	12,78	412,5	2996,2	0,79

Considerando a MIT operando aos mesmos fatores de desequilíbrio, VU%, estudadas, tem-se agrupado em tabelas o desempenho da máquina para uma $THD_V=10\%$, $THD_V=15\%$ e $THD_V=20\%$, e são apresentados nas Tabelas 4.9 a 4.17, respectivamente.

Tabela 4.9: Valores fixados para as fontes de tensão para $THD_V=10\%$:

VU%=0 %	HARMÔNICA				
	1	5	7	11	13
\dot{V}_{ah}	180L0 ⁰	13L0 ⁰	10L0 ⁰	5L0 ⁰	3L0 ⁰
\dot{V}_{bh}	180L-120 ⁰	13L120 ⁰	10L-120 ⁰	5L120 ⁰	3L-120 ⁰
\dot{V}_{ch}	180L120 ⁰	13L-120 ⁰	10L120 ⁰	5L-120 ⁰	3L120 ⁰
VU%=5 %	HARMÔNICA				
	1	5	7	11	13
\dot{V}_{ah}	180L0 ⁰	13L0 ⁰	10L0 ⁰	5L0 ⁰	3L0 ⁰
\dot{V}_{bh}	180L-120 ⁰	13L120 ⁰	10L-120 ⁰	5L120 ⁰	3L-120 ⁰
\dot{V}_{ch}	173L124,31 ⁰	13L-120 ⁰	10L120 ⁰	5L-120 ⁰	3L120 ⁰
VU%=10 %	HARMÔNICA				
	1	5	7	11	13
\dot{V}_{ah}	180L0 ⁰	13L0 ⁰	10L0 ⁰	5L0 ⁰	3L0 ⁰
\dot{V}_{bh}	150L-120 ⁰	13L120 ⁰	10L-120 ⁰	5L120 ⁰	3L-120 ⁰
\dot{V}_{ch}	167,03L128,95 ⁰	13L-120 ⁰	10L120 ⁰	5L-120 ⁰	3L120 ⁰
VU%=15 %	HARMÔNICA				
	1	5	7	11	13
\dot{V}_{ah}	180L0 ⁰	13L0 ⁰	10L0 ⁰	5L0 ⁰	3L0 ⁰
\dot{V}_{bh}	140L-120 ⁰	13L120 ⁰	10L-120 ⁰	5L120 ⁰	3L-120 ⁰
\dot{V}_{ch}	163,71L132,22 ⁰	13L-120 ⁰	10L120 ⁰	5L-120 ⁰	3L120 ⁰

Tabela 4.10 – Parâmetros de potência para a MIT operando com harmônicas e desequilíbrio (THD_V=10%).

$VU\%$	$\langle \tilde{S} \rangle$ (VA)	$\langle P \rangle$ (W)	$\langle Q_1 \rangle$ (VAr)	S_e (VA)	S_{e1} (VA)	S_1^+ (VA)	$\langle P_1^+ \rangle$ (W)	$\langle Q_1^+ \rangle$ (VAr)
0	2997,2	2331	1905	3067,88	3005	3005	2324	1905
5	2925,3	2382	1719	3283,96	3226,08	2940,6	2343	1777
10	2888,3	2528	1418	3878,26	3837,51	2905,8	2396	1644,04
15	2928,8	2685	1196	4471,04	4428,14	3260,5	2856	152,94

Tabela 4.11 – Parâmetros de qualidade da MIT operando com harmônicas e desequilíbrio (THD_V=10%).

$VU\%$	FP	FP_e	FP_1^+	P_{cobre} (W)	P_m (W)	S_{eH} (VA)	S_{eN} (VA)	S_{U1} (VA)	η
0	0,78	0,76	0,77	182	2149	52,19	729,83	0	0,92
5	0,81	0,72	0,80	242	2140	52,19	736,49	1326,7	0,89
10	0,88	0,65	0,82	402	2126	40,7	684,79	2506,6	0,84
15	0,91	0,60	0,88	568	2117	42,12	752,66	2996,2	0,79

Tabela 4.12: Valores fixados para as fontes de tensão para $THD_V=15\%$:

VU%=0 %	HARMÔNICA				
	1	5	7	11	13
\dot{V}_{ah}	180L 0 ⁰	20L 0 ⁰	15L 0 ⁰	10L 0 ⁰	5L 0 ⁰
\dot{V}_{bh}	180L -120 ⁰	20L 120 ⁰	15L -120 ⁰	10L 120 ⁰	5L -120 ⁰
\dot{V}_{ch}	180L 120 ⁰	20L -120 ⁰	15L 120 ⁰	10L -120 ⁰	5L 120 ⁰
VU%=5 %	HARMÔNICA				
	1	5	7	11	13
\dot{V}_{ah}	180L 0 ⁰	20L 0 ⁰	15L 0 ⁰	10L 0 ⁰	5L 0 ⁰
\dot{V}_{bh}	180L -120 ⁰	20L 120 ⁰	15L -120 ⁰	10L 120 ⁰	5L -120 ⁰
\dot{V}_{ch}	173L 124,31 ⁰	20L -120 ⁰	15L 120 ⁰	10L -120 ⁰	5L 120 ⁰
VU%=10 %	HARMÔNICA				
	1	5	7	11	13
\dot{V}_{ah}	180L 0 ⁰	20L 0 ⁰	15L 0 ⁰	10L 0 ⁰	5L 0 ⁰
\dot{V}_{bh}	150L -120 ⁰	20L 120 ⁰	15L -120 ⁰	10L 120 ⁰	5L -120 ⁰
\dot{V}_{ch}	167,03L 128,95 ⁰	20L -120 ⁰	15L 120 ⁰	10L -120 ⁰	5L 120 ⁰
VU%=15 %	HARMÔNICA				
	1	5	7	11	13
\dot{V}_{ah}	180L 0 ⁰	20L 0 ⁰	15L 0 ⁰	10L 0 ⁰	5L 0 ⁰
\dot{V}_{bh}	140L -120 ⁰	20L 120 ⁰	15L -120 ⁰	10L 120 ⁰	5L -120 ⁰
\dot{V}_{ch}	163,71L 132,22 ⁰	20L -120 ⁰	15L 120 ⁰	10L -120 ⁰	5L 120 ⁰

Tabela 4.13 – Parâmetros de potência para a MIT operando com harmônicas e desequilíbrio (THD_V=15%).

$VU\%$	$\langle \tilde{S} \rangle$ (VA)	$\langle P \rangle$ (W)	$\langle Q_1 \rangle$ (VAr)	S_e (VA)	S_{e1} (VA)	S_1^+ (VA)	$\langle P_1^+ \rangle$ (W)	$\langle Q_1^+ \rangle$ (VAr)
0	2983,8	2341	1905	3155,07	3005	3005	2324	1905,05
5	2914,4	2392	1719	3365,45	3226,08	2941,4	2344	1776,94
10	2880,8	2538	1363	3966,47	3837,51	2906,3	2396	1644,92
15	2925	2695	1191	4555,09	4428,14	3257,8	2851	1575,99

Tabela 4.14 – Parâmetros de qualidade da MIT operando com harmônicas e desequilíbrio (THD_V=15%).

$VU\%$	FP	FP_e	FP_1^+	P_m (W)	P_{cobre} (W)	S_{eH} (VA)	S_{eN} (VA)	S_{U1} (VA)	η
0	0,78	0,74	0,77	2149	192	126,91	1134,21	0	0,92
5	0,82	0,71	0,80	2140	252	126,91	1145,47	1325	0,89
10	0,88	0,64	0,82	2125	413	126,9	1215,5	2505,9	0,84
15	0,92	0,59	0,88	2117	578	126,95	1298,62	2999,4	0,79

Tabela 4.15: Valores fixados para as fontes de tensão para $THD_V=20\%$:

VU%=0 %	HARMÔNICA				
	1	5	7	11	13
\dot{V}_{ah}	180L0 ⁰	25L0 ⁰	20L0 ⁰	15L0 ⁰	10L0 ⁰
\dot{V}_{bh}	180L-120 ⁰	25L120 ⁰	20L-120 ⁰	15L120 ⁰	10L-120 ⁰
\dot{V}_{ch}	180L120 ⁰	25L-120 ⁰	20L120 ⁰	15L-120 ⁰	10L120 ⁰
VU%=5 %	HARMÔNICA				
	1	5	7	11	13
\dot{V}_{ah}	180L0 ⁰	25L0 ⁰	20L0 ⁰	15L0 ⁰	10L0 ⁰
\dot{V}_{bh}	180L-120 ⁰	25L120 ⁰	20L-120 ⁰	15L120 ⁰	10L-120 ⁰
\dot{V}_{ch}	173L124,31 ⁰	25L-120 ⁰	20L120 ⁰	15L-120 ⁰	10L120 ⁰
VU%=10 %	HARMÔNICA				
	1	5	7	11	13
\dot{V}_{ah}	180L0 ⁰	25L0 ⁰	20L0 ⁰	15L0 ⁰	10L0 ⁰
\dot{V}_{bh}	150L-120 ⁰	25L120 ⁰	20L-120 ⁰	15L120 ⁰	10L-120 ⁰
\dot{V}_{ch}	167,03L128,95 ⁰	25L-120 ⁰	20L120 ⁰	15L-120 ⁰	10L120 ⁰
VU%=15 %	HARMÔNICA				
	1	5	7	11	13
\dot{V}_{ah}	180L0 ⁰	25L0 ⁰	20L0 ⁰	15L0 ⁰	10L0 ⁰
\dot{V}_{bh}	140L-120 ⁰	25L120 ⁰	20L-120 ⁰	15L120 ⁰	10L-120 ⁰
\dot{V}_{ch}	163,71L132,22 ⁰	25L-120 ⁰	20L120 ⁰	15L-120 ⁰	10L120 ⁰

Tabela 4.16 – Parâmetros de potência para a MIT operando com harmônicas e desequilíbrio (THD_V=20%).

$VU\%$	$\langle \tilde{S} \rangle$ (VA)	$\langle P \rangle$ (W)	$\langle Q_1 \rangle$ (VAr)	S_e (VA)	S_{e1} (VA)	S_1^+ (VA)	$\langle P_1^+ \rangle$ (W)	$\langle Q_1^+ \rangle$ (VAr)
0	2977,6	2352	1905,00	3257,41	3005	3005	2324	1905,05
5	2909,3	2403	1718,94	3470,65	3234	2941,4	2344	1776,94
10	2879,7	2550	1363,26	4098,94	3877,5	2918,5	2397	1664,94
15	2925,2	2706	1190,94	4647,57	4428,19	3257,6	2851	1575,99

Tabela 4.17 – Parâmetros de qualidade da MIT operando com harmônicas e desequilíbrio (THD_V=20%).

$VU\%$	FP	FP_e	FP_1^+	P_m (W)	P_{cobre} (W)	S_{eH} (VA)	S_{eN} (VA)	S_{U1} (VA)	η
0	0,79	0,72	0,77	2149	203	219,19	1479,22	0	0,91
5	0,83	0,69	0,80	2140	263	219,27	1499,23	1344,1	0,89
10	0,89	0,62	0,82	2125	425	219,27	1602,62	2552,9	0,83
15	0,93	0,58	0,88	2117	589	219,27	1707,14	2999,4	0,78

4.6 – Discussão dos resultados.

Analisando os resultados obtidos com a aplicação das grandezas de Buchholz-Goodhue, observa-se que existe uma coerência entre os parâmetros de qualidade, o aproveitamento da linha está em concordância com a relação de perdas, aumentando o desequilíbrio ou aumentando as harmônicas diminui-se o fator de potência. A Potência Complexa Instantânea, assim como a teoria convencional, não relaciona as perdas da linha, os resultados acabam sendo “mascarados” pelo aumento da potência exigida para que seja desenvolvido o mesmo torque no eixo. Na Tabela 4.18, nota-se o aumento do Fator de Potência – quando considerado a módulo do valor médio da Potência Complexa Instantânea – com o aumento tanto da distorção quanto do desequilíbrio.

TABELA 4.18 – Fator de Potência (através da Potência Complexa)

THD _v (%)	VU%			
	0	5	10	15
0	0,77	0,77	0,87	0,91
5	0,78	0,81	0,87	0,92
10	0,78	0,81	0,88	0,92
15	0,79	0,83	0,88	0,92
20	0,79	0,83	0,89	0,92

Quando aplicado a Potência de Buchholz-Goodhue, Tabela 4.19, são obtidos resultados mais coerentes. À medida que são aumentadas as distorções ou os desequilíbrios ocorre a diminuição do fator de potência:

TABELA 4.19 – Fator de Potência (através da Potência de Buchholz-Goodhue).

THD _v (%)	VU%			
	0	5	10	15
0	0,77	0,74	0,65	0,60
5	0,77	0,73	0,65	0,60
10	0,76	0,72	0,65	0,60
15	0,74	0,71	0,64	0,59
20	0,72	0,69	0,62	0,58

No entanto, o uso dos VEI's que é a base da Teoria da Potência Complexa Instantânea, facilita a determinação das grandezas d Buchholz-Goodhue, tanto na modelagem, que passa a contar com variáveis ortogonais, reduzindo consideravelmente o tempo de simulação (PONTES; FERNANDES NETO; MENEZES, 2004).

5 – Conclusão

Foram apresentados neste estudo parâmetros relativos às recomendações da IEEE 1459-2000, derivadas das grandezas de Buchholz-Goodhue. Pela análise do comportamento da MIT sob variadas condições de desequilíbrio e assimetria, encontrou-se uma diferenciação entre os fatores de potência, obtidos pela potência aparente complexa e pela potência aparente de Buchholz-Goodhue. A escolha da potência aparente complexa dada pela Teoria da Potência Complexa Instantânea foi feita, baseando-se no princípio de que os VEI's incorporam os efeitos das 3 fases, ao contrário da teoria convencional que considera o circuito trifásico como 3 circuitos monofásicos (WATANABE ; AREDES, 1998), essa idéia também é a base da potência aparente de Buchholz-Goodhue.

Ao contrário do esperado não foi possível atingir valores próximos entre as duas potências, uma vez que a potência de Buchholz-Goodhue possui intrínseca ao seu cálculo perdas relacionadas às linhas e estas são mais evidenciadas na presença de desequilíbrio e harmônicas (S_{U1} e S_{eN}). Comparando os efeitos causados entre a assimetria e o desequilíbrio, é notável que a variação do rendimento é maior para um mesmo $THD_V(\%)$ do que para um mesmo índice $VU(\%)$.

Na Tabela 5.1 é apresentado o rendimento da MIT em relação às condições de desequilíbrio e assimetria, sendo que o cálculo do rendimento é feito da seguinte forma:

$$\eta = \frac{P_m}{P}$$

TABELA 5.1 – Rendimento da MIT para as situações de desequilíbrio e assimetria.

THDV(%)	VU%			
	0	5	10	15
0	0,92	0,90	0,84	0,79
5	0,92	0,9	0,84	0,79
10	0,92	0,89	0,84	0,79
15	0,92	0,89	0,84	0,79
20	0,91	0,89	0,83	0,78

Pelas grandezas de Buchholz-Goodhue, a potência aparente não é composta apenas por uma parcela ativa e outra reativa – esta se refere apenas aos elementos armazenadores de energia (WATANABE; AREDES, 1998), mas sim dividida entre uma parcela responsável pelo trabalho e a energia armazenada fundamental (S_{e1}) e outra que corresponderiam às perdas causadas pelas harmônicas e eventuais desequilíbrios (S_{eN}). Dentro da potência aparente de Buchholz-Goodhue fundamental, existe uma parcela que corresponde ao desequilíbrio (S_{U1}), que é também indesejável. Tem-se como parcela que efetua o trabalho propriamente dito, a grandeza S_1^+ , que pode ser tratada como tendo uma parcela real (ativa) e outra imaginária (reativa).

6 - Referências

BALDIN, M. C. **Aplicação da teoria da potência complexa instantânea na compensação de potência reativa em sistemas elétricos de potência usando as definições de Buchholz-Goodhue.** 2003. 72f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2003.

BARBI, I. **Teoria fundamental do motor de indução.** Florianópolis: UFSC, 1985, 237 p.

MORAES, J.P. **Aplicação da teoria da potência complexa instantânea na análise e estimação de parâmetros da máquina síncrona em condições transitórias.** 2005. 113f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade De Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

DEL TORO, V. **Fundamentos de máquinas elétricas.** Rio de Janeiro: LTC, 1994, 550 p.

EMANUEL, A.E. Apparent power definitions for three-phase systems. **IEEE Trans. on Power Delivery**, New York, v.14, n. 3, p. 767-772, 1999.

EMANUEL, A.E. The Buchholz-Goodhue apparent power definition: the practical approach for nonsinusoidal and unbalanced systems. **IEEE Trans. on Power Delivery**, New York, v.13, n.2, p. 344-350, 1998.

IEEE WORKING GROUP ON NONSINUSOIDAL SITUATIONS. **Trial-Use for Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions**: Std 1459. New York, 2000, 42 p. Disponível em: <http://www.ieeexplore.ieee.org/iel5/7738/21240/00985671.pdf?arnumber=985671>.

Acessado em: 13 out. 2006

IEEE. **Recommend Practices And Requirements For Harmonic Control In Electrical Power Systems**: Std 519. New York, 1992, 101 p. Disponível em: <http://www.ieeexplore.ieee.org/iel1/2227/5482/00210894.pdf?arnumber=210894>.

Acessado em: 23 mai. 2006.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais**. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 914 p.

MILANEZ, D.L. ; MISKULIN, M.S. The instantaneous complex power applied to three-phase machines. In: IAS IEEE ANNUAL MEETING, 28, 1993, Toronto. **Annals...** Toronto: IEEE, 1993. p.171-176.

MILANEZ, D.L. **A Potência complexa instantânea aplicada às máquinas elétricas trifásicas**. 1993. 102f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.

MILANEZ, D.L. **Texto que sistematiza as atividades do docente apresentado à faculdade de engenharia de ilha solteira – FEIS/UNESP**. 2000. 66f. Tese (Livre Docente em Engenharia Elétrica)-Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2000.

MILANEZ, D.L. ; EMANUEL, A. E. The Instantaneous space phasor a powerful diagnosis tool. **IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement**, New York, v. 52, n. 1, p.143-148, 2003.

MILANEZ, D.L.; EMANUEL, A.E. Clarke's alpha, beta and zero components: a possible approach for the conceptual design of instrumentation compatible with IEEE Std. 1459-2000. In: INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE – IMTC, 20, 2004, Como. **Annals....** Como: IMTC, 2004. p. 1614-1619.

PONTES, R. S. T.; FERNANDES NETO, T. R.; MENEZES, L. M.. Modelagem e simulação de motor de indução trifásico nas notações trifásica e coordenadas dq0. **Revista Tecnológica**, Fortaleza v. 25, n. 2, p. 8-17, 2004.

WATANABE, E.H.; AREDES, M. Teoria de potência ativa e reativa instantânea e aplicações – filtros ativos e facts. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 12, 1998. **Annals....** Uberlândia: Editora, 1998. p. 81-122.

WILLEMS, JACQUES L. A New interpretation of the akagi-nabae power components for nonsinusoidal three-phase. **IEEE Transactions of Instrumentation and Measurement**, New York, v. 41, n. 4, p. 523-527, 1992.

APÊNDICE A: Modelo dinâmico da máquina assíncrona trifásica, também conhecida como máquina de indução.

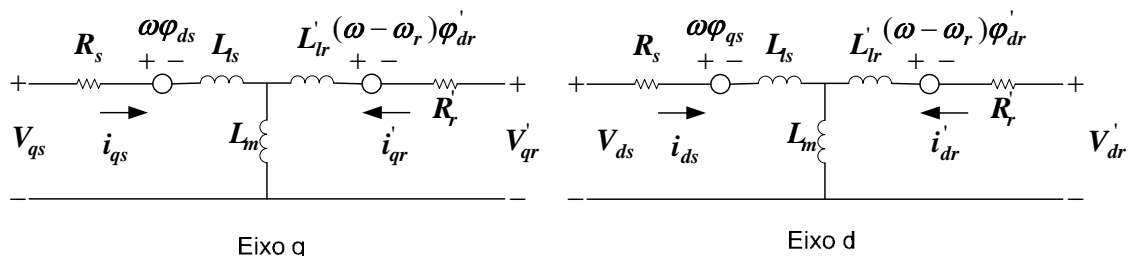
O bloco da Máquina Assíncrono opera tanto como gerador ou como motor. O modo de operação é ditado pelo sinal do torque mecânico:

- Se T_m for positivo, a máquina age como um motor.
- Se T_m for negativo, a máquina age como um gerador.

As variáveis elétricas são referidas aos parâmetros do estator. Isto é indicado pelos sinais principais nas equações de máquina dadas abaixo. Todas as grandezas do estator e do rotor estão no plano de referência de dois-eixos arbitrários (plano d-q). Os sub-índices usados estão definidos como segue:

Simbologia	Definição
d	Grandeza relativa ao eixo d
q	Grandeza relativa ao eixo q
r	Grandeza relativa ao rotor
s	Grandeza relativa ao estator
l	Indutância de dispersão
m	Indutância de magnetização

Sistema elétrico



$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega \phi_{ds}$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega \phi_{qs}$$

$$V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d\varphi'_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr}$$

$$V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d\varphi'_{dr}}{dt} - (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr}$$

$$T_e = \frac{3}{2} p (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds})$$

Onde

$$\varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr}$$

$$\varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr}$$

$$\varphi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs}$$

$$\varphi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds}$$

$$L_s = L_{ls} + L_m$$

$$L'_r = L'_{lr} + L_m$$

Sistema Mecânico

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{2H} (T_e - F\omega_m - T_m)$$

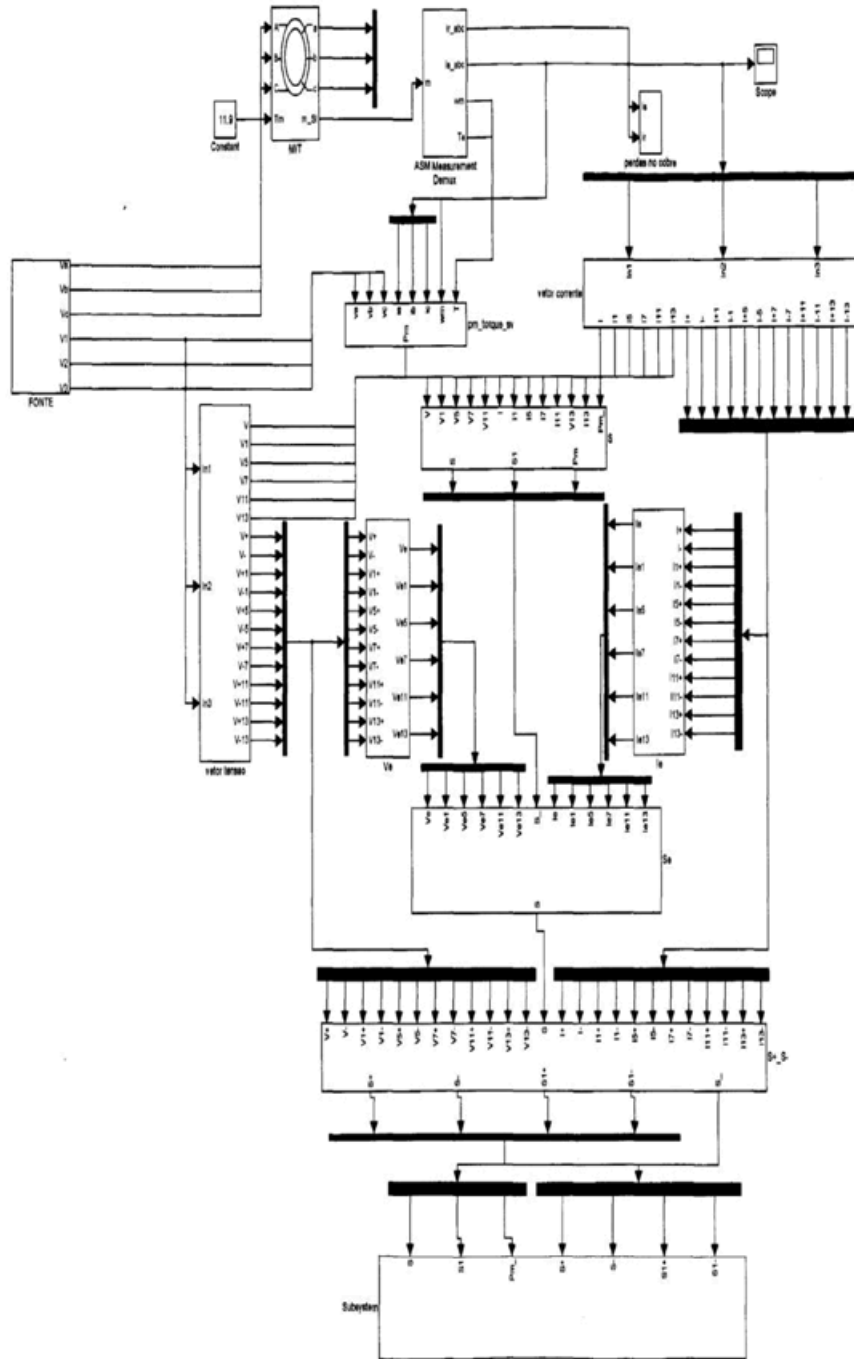
$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m$$

O bloco da máquina assíncrona tem os seguintes parâmetros (todas as grandezas são referidas ao estator):

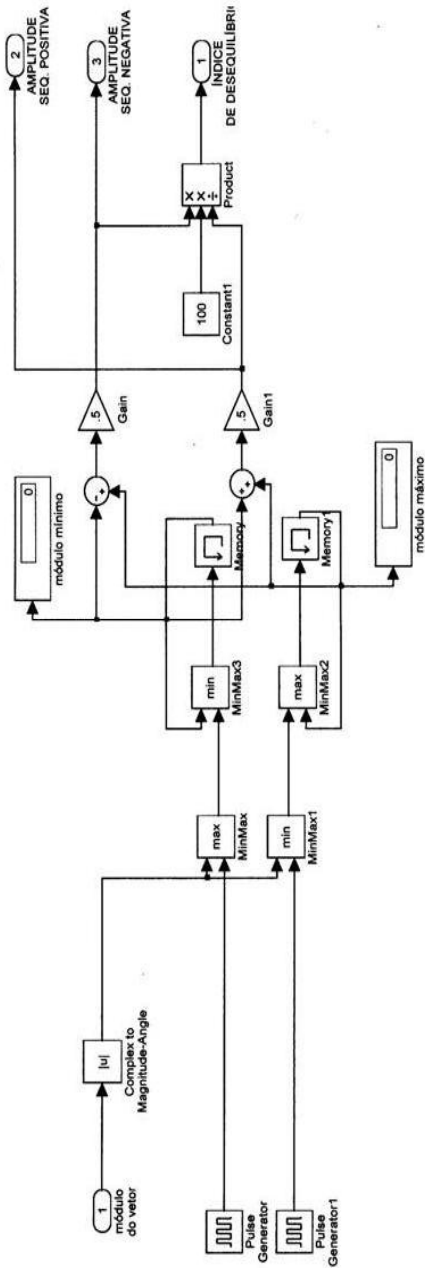
Parâmetro	Definição
R_s, L_s	Resistência do estator e indutância de dispersão
R'_r, L'_{lr}	Resistência do rotor e indutância de dispersão
L_m	Indutância magnetização
L_s, L'_r	Indutância total do estator e do rotor
V_{qs}, i_{qs}	Tensão e corrente do estator no eixo q
V'_{qr}, i'_{qr}	Tensão e corrente do rotor no eixo q
V_{ds}, i_{qs}	Tensão e corrente do estator no eixo d

V'_{dr}, i'_{dr}	Tensão e corrente do rotor no eixo d
Φ_{qs}, Φ_{ds}	Fluxo no estator nos eixos q e d
Φ'_{qr}, Φ'_{dr}	Fluxo no rotor nos eixos q e d
ω_m	Velocidade angular do rotor
θ_m	Posição angular do rotor
p	Número de pares de pólo
ω_r	Velocidade angular elétrico ($\omega_m \times p$)
θ_r	Posição angular elétrico do rotor ($\theta_m \times p$)
T_e	Torque eletromagnético
T_m	Torque da carga
J	Momento de inércia
H	Constante de inércia combinado do rotor e carga
F	Coefficiente de atrito viscoso

APÊNDICE B: Esquemático do programa simulado.



Bloco para o cálculo da amplitude de seqüência positiva e negativa tanto da corrente quanto da tensão.



APÊNDICE C: Cálculo da Potência Aparente de Buchholz-Goodhue (sem condutor neutro) – uma outra abordagem.

As grandezas de Buchholz-Goodhue podem de ser alcançadas através de outras abordagens.

Considerando inicialmente os valores determinados convencionalmente.

A corrente fica:

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

A tensão fica:

$$V_e = \sqrt{\frac{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)}{3}}$$

De onde se calcula a potência aparente:

$$S_e = 3V_e I_e$$

Considerando os valores determinados pelos VEI's.

A corrente fica:

$$I_e = \sqrt{\frac{\langle |\tilde{\mathbf{I}}|^2 \rangle}{2}}$$

A tensão fica:

$$V_e = \sqrt{\frac{\langle |\tilde{\mathbf{V}}|^2 \rangle}{2}}$$

Finalmente a potência aparente fica:

$$S_e = 3V_e I_e = 3 \sqrt{\frac{\langle |\tilde{\mathbf{V}}|^2 \rangle}{2} \frac{\langle |\tilde{\mathbf{I}}|^2 \rangle}{2}} = \frac{3}{2} \sqrt{\langle |\tilde{\mathbf{V}}|^2 \rangle \langle |\tilde{\mathbf{I}}|^2 \rangle}$$

APÊNDICE D: Distorção Harmônica Total de Corrente (THD_I) e de Tensão (THD_V).

Uma maneira de se quantificar e analisar os efeitos das harmônicas se faz pelo uso da THD (Total Harmonic Distortion), que é a relação entre os valores eficazes dos módulos das componentes harmônicas e a sua fundamental. Essa grandeza, no entanto, não permite uma compreensão particular dos efeitos de cada componente, mas possibilita visualizar o seu efeito geral e, também viabiliza a determinação de outras grandezas que serão mostradas neste mesmo capítulo.

A THD_I é definida por:

$$THD_I = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (3.17)$$

De modo semelhante THD_V fica:

$$THD_V = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (3.18)$$

Na Tabela 3.1 tem-se os valores recomendados pela IEEE Standard 519-1992 quanto a THD de tensão, considerando como referência o ponto de acoplamento comum (PAC) – que é o ponto em que estão ligadas as diversas cargas do circuito.

Tabela 3.1 – Limites da distorção harmônica para a tensão.

Tensão no PAC	Distorção Individual de Tensão (%)	Distorção Harmônica Total (THD%)
< 69 kV	3,0	5,0
≥69 kV e ≤161 kV	1,5	2,5
≥161 kV	1,0	1,5