

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

Jonas Agápio Rodrigues de Medeiros de Oliveira

Relatório de Trabalho de Conclusão de Curso:
Simulação em Matlab de Esquema de Controle de Conversor PWM CA/CC
Trifásico Sem Detecção de Fase Sob Condições de Tensão de Entrada
Desbalanceada

Campina Grande
2006

JONAS AGÁPITO RODRIGUES DE MEDEIROS E OLIVEIRA

Relatório de Trabalho de Conclusão de Curso:
Simulação em Matlab de Esquema de Controle de Conversor PWM CA/CC
Trifásico Sem Detecção de Fase Sob Condições de Tensão de Entrada
Desbalanceada

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica como exigência parcial para a obtenção do grau de Engenheiro Elétricista.

Orientador: Prof. Dr. Talvanes
Meneses Oliveira, Dsc

Campina Grande
2006



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

Aluno: Jonas Agápio Rodrigues de Medeiros e Oliveira

Título: Simulação em Matlab de Esquema de Controle de Conversor PWM
CA/CC Trifásico Sem Detecção de Fase Sob Condições de Tensão de
Entrada Desbalanceada.

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica
como exigência parcial para a obtenção do
grau de Engenheiro Elétricista.

Orientador: Prof. Dr. Talvanes
Menezes Oliveira, Dsc

A banca examinadora dos Trabalhos de Conclusão em sessão
pública realizada em ___ / ___ / _____, considerou o candidato:

1) Orientador

1) Convidado

Lista de Figuras

1.1	Diagrama Elétrico de um conversor ca/cc trifásico	2
1.2	Princípio da Modulação Senoidal	3
1.3	Diagrama esquemático por fase do conversor conectado à ali- mentação e à carga	4
1.4	Diagrama de bloco do sistema com os controladores PI	5
1.5	Relação entre os referenciais 123, $\alpha\beta$ e dq	6
1.6	Relação entre E_d , E_q , E_d^p , E_d^n , E_q^p e E_q^n	7
1.7	Componentes \bar{E}_d e \tilde{E}_d de E_d	8
1.8	Diagrama de bolcos do PI de corrente	9
4.1	Variável gama (γ) em função das fases de E_d e E_d^n	20
5.1	Tensões de entrada balanceadas	32
5.2	Tensões de entrada desbalanceadas	32
5.3	Componentes E_d e E_q para o caso balanceado	33
5.4	Componentes \bar{E}_d e \bar{E}_q para o caso desbalanceado	33
5.5	E_d e \tilde{E}_d para o caso balanceado	34
5.6	E_d e \tilde{E}_d para o caso desbalanceado	34
5.7	\tilde{E}_d e E_d^n para o caso balanceado	35
5.8	\tilde{E}_d e E_d^n para o caso desbalanceado	35
5.9	Componentes E'_d e E'_q para o caso balanceado	36
5.10	Componentes E'_d e E'_q para o caso desbalanceado	36
5.11	V_d e V_q para o caso balanceado	37
5.12	V_d e V_q para o caso desbalanceado	37
5.13	Componentes i_d e i_q para o caso balanceado	38
5.14	Componentes i_d e i_q para o caso desbalanceado	38
5.15	i_C para o caso balanceado	39
5.16	i_C para o caso desbalanceado	39
5.17	V_C para o caso balanceado	40
5.18	V_C para o caso desbalanceado	40
7.1	Relação entre os referenciais 123 e $\alpha\beta$	43

7.2	Relação entre os referenciais 123 e $\alpha\beta$	44
-----	---	----

Lista de Tabelas

4.1	Ganhos para os controladores da simulação	29
-----	---	----

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Conversor CA/CC	1
1.1.1	PWM	3
1.2	Controle do Conversor	4
1.2.1	Controladores PI em Cascata	4
1.2.2	Detecção do Ângulo de Fase	5
1.3	Método Proposto Para o Controle do Conversor	6
1.3.1	Análise da Tensão de Entrada Desbalanceada	6
1.3.2	Projeto dos Controladores	8
2	Objetivos	12
2.1	Objetivos Gerais	12
2.2	Objetivos Específicos	12
3	Metodologia	13
4	Desenvolvimento	15
4.1	Implementação da Rotina em Matlab	15
4.1.1	Alimentação	16
4.1.2	Implementação do Método Proposto	17
4.1.3	Controle de Tensão	19
4.1.4	Controle de Corrente	22
4.1.5	Conversor	24
4.1.6	Capacitor no Lado CC do Conversor	26
4.2	Determinação do Ganhos do Controlador PI de Corrente e Tensão	28
4.2.1	PI de Corrente	28
4.2.2	PI de Tensão	28

5	Resultados Obtidos	30
5.1	Apresentação e Análise dos Resultados Obtidos	31
6	Conclusão	41
7	Anexos	43
7.1	Anexo 1 - Matemática	43
7.1.1	Transformação de 123 para $\alpha\beta$	43
7.1.2	Transformação de $\alpha\beta$ para dq	44
7.1.3	Determinação em Espaço de Estados Discreto de i_d e i_q	45
7.1.4	Discretização de um PI	46
7.2	Código em Matlab	47

Capítulo 1

Introdução

A utilização de conversores ca/cc é muito comum, visto que o sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica está baseado em sua maior parte em grandezas elétricas (tensão e corrente) senoidiais. Dessa forma, o acionamento de qualquer carga cc depende da presença de um conversor ca/cc. Além disso, para cargas ca que apresentem necessidade de alimentação numa frequência diferente daquela da distribuição utiliza-se os conversores ca/ca, que baseam-se, na sua maioria, em um conversor ca/cc em série com um conversor cc/ca. Desse modo, observa-se que é de importância fundamental o papel do conversor ca/cc no sistema elétrico.

Um ponto importante, porém, em qualquer dispositivo eletro-eltrônico é a sua robustez. Todo o sistema deve mostra-se o mais imune possível às perturbações externas ou provenientes do próprio sistema. Este trabalho aborda uma proposta de esquema para a implementação de conversores ca/cc robusta a desbalanceamento da tensão de alimentação ca [1].

Como objetivo principal deste trabalho tem-se é o estudo e a simulação de tal esquema proposto por [1]. No seu escopo será discutido e estudado o esquem proposto assim como apresentada uma breve discussão dos aspectos gerais para o entendimento e a simulação do mesmo.

1.1 Conversor CA/CC

Uma diagrama elétrico de um conversor ca/cc trifásico que permite fluxo bidirecional de potência e controle de fator de potência é ilustrado na figura 1.1.

A função básica de um conversor cc é prover à carga um nível de tensão cc constante e com o mínimo nível de ruído. Sobre o conversor trifásico

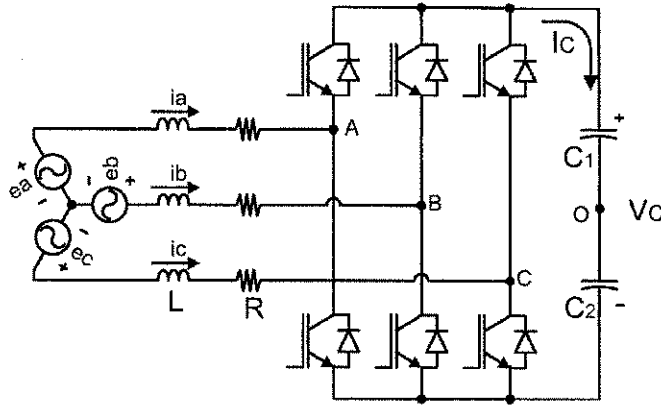


Figura 1.1: Diagrama Elétrico de um conversor ca/cc trifásico

existem duas particularidades. A retificação de um sinal trifásico garante um sinal cc com menor nível de oscilação na saída do que se o mesmo fosse feito utilizando-se um sistema com menos fases, e este é o conversor que é comumente utilizado na indústria, por ser alimentado diretamente na rede trifásica.

Para o conversor dado, temos a corrente no capacitor e a tensão sobre este mesmo elemento em (1.1) e (1.2), respectivamente.

$$i_C = i_a q_a + i_b q_b + i_c q_c \quad (1.1)$$

onde q_a , q_b e q_c são as funções de chaveamento de cada braço do conversor,

$$V_C = \frac{1}{C} \int i_C dt \quad (1.2)$$

Ainda, para o caso a ser estudado, como se está interessado nas correntes na entrada (lado ca) do conversor, são necessárias as equações das tensões em cada fase. Para isso, utiliza-se as definições das tensões de pólo e de fase do inversor, já que um inversor nada mais é do que um retificador apresentando operação dual.

As expressões para as tensões de pólo e de fase utilizadas são explicitadas pelas equações de (1.3) a (1.5):

$$\begin{aligned} v_{AO} &= (2q_a - 1) \left(\frac{E}{2} \right) \\ v_{BO} &= (2q_b - 1) \left(\frac{E}{2} \right) \\ v_{CO} &= (2q_c - 1) \left(\frac{E}{2} \right) \end{aligned} \quad (1.3)$$

$$\begin{aligned}
 v_{AN} &= v_{AO} - v_{ON} \\
 v_{BN} &= v_{BO} - v_{ON} \\
 v_{CN} &= v_{CO} - v_{ON}
 \end{aligned}
 \tag{1.4}$$

onde

$$v_{ON} = -\left(\frac{1}{3}\right)(v_{AO} + v_{BO} + v_{CO})
 \tag{1.5}$$

1.1.1 PWM

Para o acionamento das chaves do conversor, várias técnicas são possíveis. Das quais a modulação por largura de pulso, PWM (do inglês *Pulse Width Modulation*), é a mais usada. Dentre as técnicas de PWM uma bastante simples tanto no seu entendimento quanto na sua implementação é a Modulação Senoidal. Esta técnica consiste em modular um sinal senoidal utilizando uma portadora triangular para gerar uma onda quadrada onde as larguras dos pulsos são diretamente proporcionais á amplitude do sinal senoidal. Vide figura 1.2.

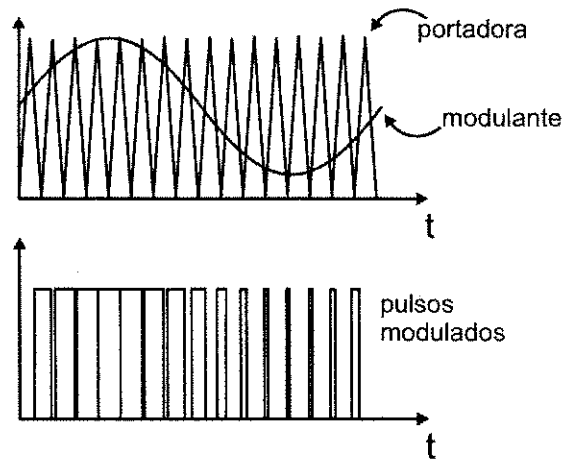


Figura 1.2: Princípio da Modulação Senoidal

Como se está tratando de um conversor trifásico, três referências destas devem ser geradas. Uma para cada fase. O que implica em três referências defasadas de 120° entre si. Estes sinais quadrados devem ser enviados às duas chaves de cada braço, sendo que a chave de cima recebe o sinal diretamente e a inferior o complemento dele.

1.2 Controle do Conversor

A primeira função do conversor é garantir tensão adequada sobre a carga. A tensão sobre esta é dependente da corrente sobre a mesma. O conversor deve, portanto, ser controlado de modo que esta corrente (a corrente de saída do conversor) seja tal que mantenha tensão adequada sobre a carga.

A equação (1.1) mostra que a corrente sobre a carga na saída de um retificador é função direta das correntes no seu lado ca. Desse modo, estas é que devem ser controladas. Um diagrama esquemático por fase do conversor conectado à alimentação e à carga pode ser visto na figura 1.3. A partir do diagrama é possível escrever as equações das correntes de fase no lado ca do retificador. As correntes são funções da queda de tensão sobre a indutância e a resistência na saída do alimentador. Ao realizar a ação de controle sobre o conversor é possível controlar diretamente a tensão no lado ca do conversor. Essa ação permite controlar assim, a queda no conjunto resistor-indutor e como consequência, a corrente no conjunto obterá tensão desejada no barramento cc.

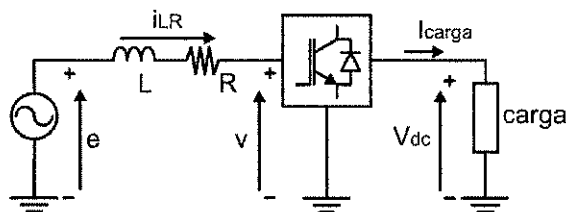


Figura 1.3: Diagrama esquemático por fase do conversor conectado à alimentação e à carga

Como descrito anteriormente, o controle do sistema como o exposto, consiste de um controle de corrente cuja referência é gerada por um controle de tensão. Tem-se, então, um controle de tensão e corrente em cascata. Além disso, todo o sistema deve estar sincronizado com a alimentação. Estes dois pontos são abordados a seguir.

1.2.1 Controladores PI em Cascata

A variável de referência para o sistema proposto aqui é a tensão sobre a carga. Para tanto, um primeiro controlador PI processa esta referência juntamente com a tensão instantânea na carga gerando um sinal de corrente. Este sinal de corrente gera a referência para a corrente na entrada do conversor. Junto com a corrente instantânea este sinal é processado agora por um

controlador PI gerando, na saída, o sinal de tensão de referência para o conversor. Neste ponto do processo se tem o controle suficiente para o equilíbrio do sistema. A figura 1.4 ilustra um diagrama de bloco mas detalhado do sistema agora já contendo os controladores PI.

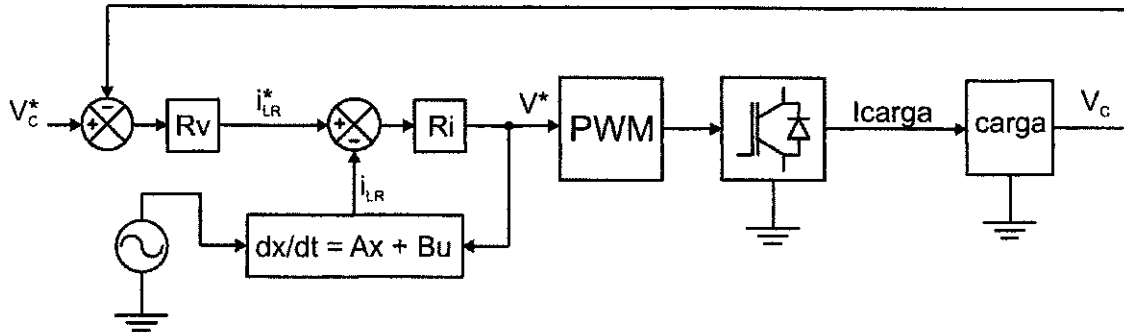


Figura 1.4: Diagrama de bloco do sistema com os controladores PI

Nota-se ainda na figura 1.4, a presença de um bloco que implementa uma equação em espaço de estados para gerar a corrente de fase na entrada de Ri a partir da tensão de alimentação da rede e da tensão de referência na entrada do conversor. O segundo tópico da seção 1.3.2 trata sobre este detalhe.

Além deste, mais um detalhe pode ser citado. A referência para o PI de corrente, no método proposto não é gerada apenas pelo PI de tensão. A potência na entrada do sistema também é utilizada. O segundo tópico da seção 1.3.2 trata deste ponto.

1.2.2 Detecção do Ângulo de Fase

É muito comum implementar-se esquemas de controle no referencial dq dadas suas vantagens. Porém, para realizar a transformadas das variáveis do referencial 123 para o dq é preciso o ângulo de fase, como visto na seção 7.1.1. O procedimento de detecção de ângulo de fase é, porém, considerado desvantajoso do ponto de vista da implementação do PLL (do inglês, *Phase Locked Loop*). Esta implementação implica na detecção de cruzamento pelo zero e na detecção de magnitude para cada fase do sistema, ou seja, mais *hardware* e mais *software*. Além disso, distorções no sinal dificultam a detecção do cruamento pelo zero.

O método proposto aborda justamente a não necessidade de utilização de um PLL.

1.3 Método Proposto Para o Controle do Conversor

O método analisado neste trabalho foi proposto por Sung-Chan Ahn e Dong-Seok Hyun em [1].

Como visto na seção 1.2.2, a detecção do ângulo de fase é importante para o controle do conversor. Porém, apresenta desvantagens na sua implementação. Neste trabalho é apresentado um esquema de controle que dispensa o PLL. O princípio fundamental deste é, justamente, a determinação das componentes dq da tensão de entrada sem a detecção do ângulo de fase.

Este procedimento é descrito a seguir.

1.3.1 Análise da Tensão de Entrada Desbalanceada

No procedimento tradicional, a transformação para o referencial síncrono, dq , é feita utilizando-se uma transformação intermediária para o referencial $\alpha\beta$. De modo que realiza-se a seguinte sequência de transformações: $123 \rightarrow \alpha\beta \rightarrow dq$. A relação entre estes referenciais é vista na figura 1.5.

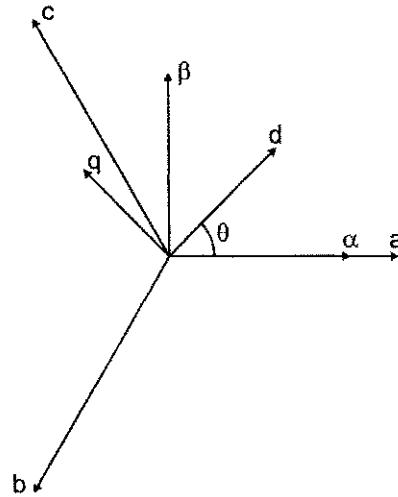


Figura 1.5: Relação entre os referenciais 123, $\alpha\beta$ e dq

Neste trabalho estas transformações são aplicadas às tensões de alimentação, E_a , E_b e E_c . Os diagramas vetoriais seguintes farão referência a estas grandezas. Nos demais referenciais, as seguintes nomenclaturas serão utilizadas: E_α e E_β , para o referencial $\alpha\beta$, e E_d e E_q , para o referencial dq .

Uma outra maneira de se obter as componentes dq de uma grandeza é o uso das componentes de sequência positiva e negativa desta grandeza. Para o caso tratado aqui, E_d^p , E_d^n , E_q^p e E_q^n . A figura 1.6 ilustra estes fasores.

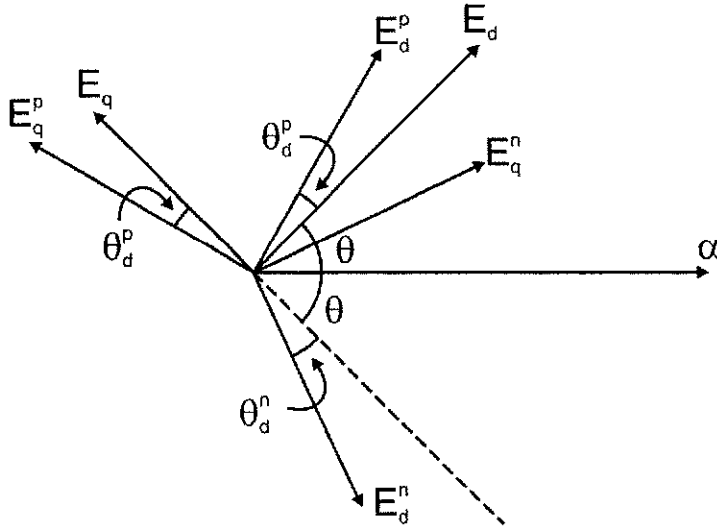


Figura 1.6: Relação entre E_d , E_q , E_d^p , E_d^n , E_q^p e E_q^n

A partir do esquema ilustrado na figura 1.3.1 é possível escrever as componentes E_d e E_q em função de E_d^p , E_d^n , E_q^p e E_q^n como consta na equação (1.6).

$$\begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_p & -\sin \theta_p \\ \sin \theta_p & \cos \theta_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_d^p \\ E_q^p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(2\theta + \theta_n) & \sin(2\theta + \theta_n) \\ -\sin(2\theta + \theta_n) & \cos(2\theta + \theta_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_d^n \\ E_q^n \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

Por conveniência, e para simplificar as manipulações matemáticas para a implementação do esquema, faz-se $\theta_d^p = 0^\circ$, alinhando E_d^p e E_q^p . Isto leva da equação (1.6) à equação (1.7).

$$\begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_d^p + E_d^n \cos(2\theta + \theta_n) \\ -E_d^n \sin(2\theta + \theta_n) \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

Um método para a determinação de E_d^p e E_d^n é estudado como proposto em [1] Neste, E_d pode ser decomposto em duas componentes, uma contínua (\bar{E}_d) e uma alternada (\tilde{E}_d), como ilustra a figura 1.7.

Sendo que, ainda como pode ser visto na figura ??, o valor médio da componente pode ser expresso como a média direta dos valores máximo e mínimo da variável, como na equação (1.8).

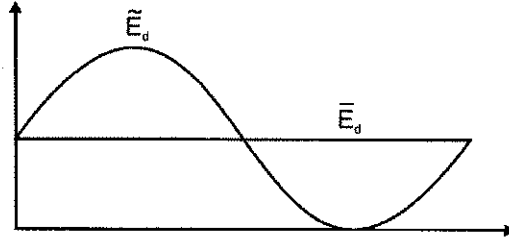


Figura 1.7: Componentes \bar{E}_d e \tilde{E}_d de E_d

$$\bar{E}_d = \frac{1}{2} (E_{d \max} + E_{d \min}) \quad (1.8)$$

E a componente alternada pode ser encontrada em função da componente alternada pela equação (1.9).

$$\tilde{E}_d = E_d - \bar{E}_d \quad (1.9)$$

Finalmente, destas duas expressões, as componentes de sequência positiva e negativa de E_d são expressas como nas equações (1.10) e (1.11).

$$E_d^p = \bar{E}_d \quad (1.10)$$

$$E_d^n = E_{d \max} - \bar{E}_d \quad (1.11)$$

Portanto, pode se determinar as componentes de sequência positiva e negativa a partir da detecção dos valores máximo e mínimo de E_d utilizando-se as equações de (1.8) a (1.11).

1.3.2 Projeto dos Controladores

Um diagrama geral do sistema com os controladores PI é ilustrado na figura 1.4.

Os detalhes dos controladores de corrente e tensão são descritos nas duas seções que seguem.

Projeto do Controlador de Corrente

As equações dinâmicas para o sistema da figura 1.1 são descritas no sistema de equações (1.12).

$$\begin{aligned}
(2E_a - E_b - E_c) &= 3Ri_a + 3L\frac{d}{dt}i_r + (2V_a - V_b - V_c) \\
(2E_b - E_c - E_a) &= 3Ri_b + 3L\frac{d}{dt}i_b + (2V_b - V_c - V_a) \\
(2E_c - E_a - E_b) &= 3Ri_c + 3L\frac{d}{dt}i_c + (2V_c - V_a - V_b)
\end{aligned}
\tag{1.12}$$

E em condições balanceadas, o sistema de equações (1.12) pode ser reescrito evidenciando as correntes de fase, i_d e i_q , chegando ao sistema de equações (1.13).

$$\begin{aligned}
L\frac{d}{dt}i_d &= -Ri_d + \omega Li_q - V_d + E_d \\
L\frac{d}{dt}i_q &= -Ri_q - \omega Li_d - V_q + E_q
\end{aligned}
\tag{1.13}$$

O sistema de equações (1.13) fornece as correntes de fase a partir das tensões de alimentação e de fase do conversor. Exatamente como visto, e comentado, no diagrama da figura 1.4.

Na figura 1.8 é ilustrada apenas a parte equivalente da figura 1.4 correspondente ao PI de corrente. O bloco que gera as correntes de fase a partir das tensões de alimentação e de fase do conversor através de equações diferenciais implementa exatamente a equação (1.13).

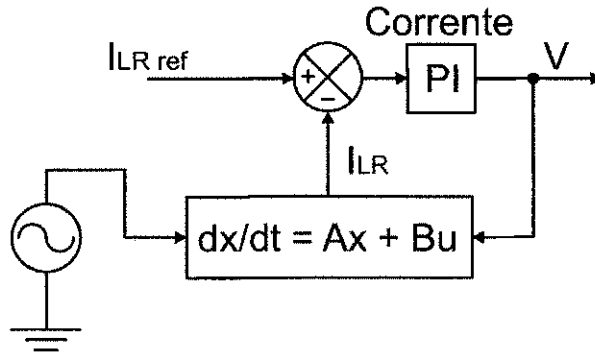


Figura 1.8: Diagrama de blocos do PI de corrente

Por fim, o PI utilizado aqui é descrito neste tópico.

A equação (1.12) pode ser ainda reescrita isolando as tensões de fase do conversor e gerando o sistema de equações (1.14).

$$\begin{aligned} V_d &= -\frac{d}{dt}i_d - Ri_d + \omega Li_q + E_d \\ V_q &= -\frac{d}{dt}i_q - Ri_q - \omega Li_d + E_q \end{aligned} \quad (1.14)$$

Substituindo-se as derivadas das correntes de fase pelas saídas dos PI de corrente, tem-se as tensões de referência para o conversor, V_d^* e V_q^* .

$$\begin{aligned} V_d^* &= -\left(kp_d + \frac{ki_d}{s}\right)(i_d^* - i_d) - Ri_d + \omega Li_q + E_d \\ V_q^* &= -\left(kp_q + \frac{ki_q}{s}\right)(i_q^* - i_q) - Ri_q - \omega Li_d + E_q \end{aligned} \quad (1.15)$$

O conjunto de equações (1.15), é utilizado para a implementação do PI de corrente.

Determinação da Corrente de Referência

Como já comentado na seção 1.2.1, as correntes de referência para o PI de corrente não são obtidas diretamente da saída do PI de tensão. Elas são obtidas a partir da potência na alimentação do sistema.

A potência média ativa, P_0 , potência reativa, Q_0 , e a potência ativa harmônica de segunda ordem, P_2 , são expressas segundo o sistema de equações (1.16).

$$\begin{aligned} P_0 &= \frac{3}{2}(E_d^p i_d^p + E_d^n i_d^n) \\ P_2 &= \frac{3}{2}[(E_d^p i_d^p + E_d^n i_d^n)\cos 2\omega t + (E_d^p i_q^p - E_d^n i_q^n)\sin 2\omega t] \\ Q_0 &= \frac{3}{2}(E_d^p i_q^p + E_d^n i_q^n) \end{aligned} \quad (1.16)$$

E para fator de potência unitário, o sistema de equações (1.16) é reescrito no sistema de equações (1.17).

$$\begin{aligned} P_0 &= \frac{3}{2}(E_d^p i_d^p + E_d^n i_d^n) \\ P_2 &= \frac{3}{2}[(E_d^p i_d^p + E_d^n i_d^n)\cos 2\omega t] \\ Q_0 &= 0 \end{aligned} \quad (1.17)$$

Dessa forma, pode se utilizar o sistema de equações (1.17) para encontrar uma expressão para as componentes de sequência positiva e negativa das correntes de linha (caso do fator de potência unitário) a partir de um sistema onde este fator de potência não é unitário. Isto leva ao sistema de equações (1.18).

$$\begin{aligned}
i_d^{p*} &= \frac{2}{3} \frac{E_d^p}{(E_d^p)^2 - (E_d^n)^2} P_O \\
i_d^{n*} &= \frac{2}{3} \frac{-E_d^n}{(E_d^p)^2 - (E_d^n)^2} P_O \\
i_q^{p*} &= 0 \\
i_q^{n*} &= 0
\end{aligned} \tag{1.18}$$

E para se obter i_d^* e i_q^* a partir de i_d^{p*} e i_d^{n*} , aplica-se o mesmo raciocínio utilizado para a obtenção da equação (1.7), obtendo-se a equação (1.19). A equação é substituída (1.19) na equação (1.15), juntamente com a saída do PI de tensão, para a obtenção da referência para o conversor. Cada componente de corrente de referência obtida da equação (1.15) é SOMADA à saída do PI de tensão.

$$\begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d^{p*} + i_d^{n*} \cos(2\theta + \theta_n) \\ -i_d^{n*} \sin(2\theta + \theta_n) \end{bmatrix} \tag{1.19}$$

Projeto do Controlador de Tensão

Ao contrário do controlador de corrente, o controlador de tensão é simples e direto. Um PI convencional processa o erro entre a tensão de referência e a tensão sobre o capacitor no lado cc do conversor. E este sinal de saída é somado a cada referência de corrente obtida em (1.19) para gerar os sinais de referência de corrente definitivos para Ri.

Capítulo 2

Objetivos

2.1 Objetivos Gerais

Adquirir conhecimentos sobre técnicas de controle em sistemas trifásicos desbalanceados utilizadas para tanto (transformadas dq , $\alpha\beta$ e componentes de seqüência positiva e negativa) assim aprimorar o conhecimento de conversores ca/cc adicionando-se ao aprendizado nas disciplinas: de Eletrônica de Potência e Acionamentos Elétricos; além de estimular o aluno a utilizar um ambiente de programação (matlab) e instruí-lo no desenvolvimento de relatórios técnicos.

2.2 Objetivos Específicos

Simular um esquema de controle de um conversor trifásico PWM ca/cc, sem detecção de ângulo de fase e sob condições de tensão de entrada desbalanceada em ambiente matlab e analisar seu comportamento.

Capítulo 3

Metodologia

A metodologia adotada dividiu-se entre das seguintes partes:

- Revisão bibliográfica;
- Modelagem matemática;
- Desenvolvimento do programa para simulação digital;
- Obtenção dos resultados; e
- Confeção do relatório.

De forma mais detalhada:

Revisão bibliográfica Já tendo sido feita a revisão do artigo base deste trabalho [1], partiu-se para os artigos citados como referência nele, [2], [3], [4], [5] e [6]. Apenas, porém, cinco (05) das sete (07) referências foram encontradas.

Consultados estes trabalhos, sentiu-se necessidade de uma revisão, também, de alguns textos de base da graduação de engenharia elétrica. Esta revisão foi realizada em material próprio, como notas de aula tomadas ao longo do curso, além de duas referências disponibilizadas pelo professor orientador, [8] e [7]

Modelagem matemática O primeiro ponto da modelagem foi o desenvolvimento do algoritmo a ser implementado. Feito isso, partiu-se para a discretização dos PI de tensão e corrente, a resolução por espaço de estados e posterior discretização do sistema de equações diferenciais para determinação da corrente de fase no lado ca do conversor e a dedução das transformadas necessárias. Todas estas deduções podem ser encontradas no anexo 7.1

Desenvolvimento do programa para simulação digital A implementação da rotina em Matlab© para simulação foi feita do modo mais simples possível. Os detalhes desta implementação podem ser encontrados na seção 4.1 do capítulo 4

Obtenção dos resultados Pronta e funcional, a rotina implementada foi utilizada para a obtenção dos resultados presentes no artigo base do trabalho [1], além de demais resultados afim de uma análise mais rica. Estes resultados, assim como suas análises, podem ser encontrados no capítulo 5

Confecção do relatório À medida em que o trabalho como um todo fora realizado, procedeu-se paralelamente a confecção deste relatório.

Capítulo 4

Desenvolvimento

4.1 Implementação da Rotina em Matlab

A implementação da rotina de simulação em Matlab não apresenta-se diferente de qualquer outra para este tipo de trabalho. O programa consiste de uma função em loop (`while`) com interações em número suficiente para a simulação do sistema funcionando por um tempo pré-determinado.

Os valores das variáveis e dados relevantes utilizados no programa são listados abaixo:

- Tempo de simulação: $1s$;
- Passo de cálculo: $10^{-4}s$ ou $100\mu s$;
- Amplitude de tensão do barramento de entrada: $192V$;
- Frequência da rede: $60Hz$;
- Resistência da fonte: 0Ω ;
- Indutância da fonte: $950e - 6$, ou $960\mu H$;
- Capacitância do capacitor do barramento cc: $1485\mu F$;
- Tensão de referência para o barramento cc: $370V$;
- Índice de modulação de frequência do PWM: 30; e
- Índice de modulação amplitude do PWM: < 1 .

E as etapas do algoritmo implementado são explicadas uma a uma nas seções que se seguem.

4.1.1 Alimentação

Geração das Tensões de Entrada

Para a alimentação trifásica de entrada são geradas três funções senoidais com 120° de defasagem entre elas. No programa, as variáveis vr , vs e vt .

```
vr = E*sin(w*t);  
vs = E*sin(w*t - 2*pi/3);  
vt = E*sin(w*t + 2*pi/3);
```

Além disso, um desbalanceamento na amplitude da tensão de uma das fases (fase s) é inserido a partir de um momento pré-determinado pelo usuário.

```
if(t1 > tmax/2)  
    vs = (E/2)*sin(w*t - 2*pi/3);  
end
```

Transformação de abc para $\alpha\beta$ das Tensões de Entrada

A transformação de abc para $\alpha\beta$ é implementada utilizando as equações da transformada de Park como descrito na equação (4.1).

$$\begin{bmatrix} E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

No programa, as componentes $\alpha\beta$ são implementadas, respectivamente, pelas variáveis $E\alpha$ e $E\beta$.

```
Ealfa = (2/3)*((1)*vr + (-1/2)*vs + (-1/2)*vt);  
Ebeta = (2/3)*((0)*vr + (sqrt3/2)*vs + (-sqrt3/2)*vt);
```

Mais detalhes desta ferramenta matemática pode ser vista no anexo 7.1, seção 7.1.1.

Transformação de $\alpha\beta$ para dq das Tensões de Entrada

Aqui também, a transformação de $\alpha\beta$ para dq é implementada diretamente. Isto é feito seguindo a equação (4.7).

$$\begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

No programa, as componentes dq são implementadas, respectivamente, pelas variáveis E_d e E_q .

$$E_d = \cos(\text{teta}) * E_{\text{alfa}} - \sin(\text{teta}) * E_{\text{beta}};$$

$$E_q = \sin(\text{teta}) * E_{\text{alfa}} + \cos(\text{teta}) * E_{\text{beta}};$$

Detalhes para a obtenção destas equações podem ser obtidos no anexo 7.1, seção 7.1.2

4.1.2 Implementação do Método Proposto

Cálculo de E_d^p e E_d^n segundo o Método Proposto (eq. de (1.8) a (1.11))

O método proposto consiste em obter-se as componentes de sequência positiva e negativa da componente de eixo direto das tensões de entrada (E_d^p e E_d^n , no programa Edp e Edn, respectivamente) sem a utilização de transformações. Para a obtenção destas componentes, foi escrito um bloco da rotina onde os valores máximo e mínimo da componente E_d (Edmax e Edmin) são calculados. O algoritmo implementado para este cálculo requer que um período da variável E_d tenha transcorrido para que seus valores máximo e mínimo sejam calculados. Destas duas variáveis são obtidas as componentes cc e ca de E_d , (\bar{E}_d e \tilde{E}_d , no programa Edcc e Edca, respectivamente) (equações (1.8) e (1.9)). E destas duas componentes, obtêm-se E_d^p e E_d^n (equações (1.10) e (1.11)). Vale salientar que os valores encontrados são atualizados a cada ciclo, renovando os valores de Edmax e Edmin no caso de desbalanceamentos. Além disso, as variáveis não assumem valores menores do que o passo de cálculo h. Isto é feito para evitar divisões por zero mais adiante na rotina.

```

if(tEd <= TEd)      %encontrando Edmax e Edmin
    if(Ed > Edmax)  %calculo de Edmax
        Edmax = Ed;
    end

    if(Ed < Edmin)  %calculo de Edmin
        Edmin = Ed;
    end

    tEd = tEd + h;

else
    Edcc = (1/2)*(Edmax + Edmin);    %Edcc valido durante o
                                     %proximo ciclo

    tEd = 0;
    EdMAX = Edmax;
    EdMIN = Edmin;

```

```

    Edmax = 0;
    Edmin = 0;
end
Edac = Ed - Edcc;    %Edac valido durante o proximo ciclo
                    %(nao e usada)

if(EdMAX == 0)
    EdMAX = h;
end

if(Edcc < h)
    Edcc = 0;
end

%calculo de Edp e Edn (eq. 06)

Edp = Edcc;
Edn = EdMAX - Edp;

```

Determinação das Componentes E'_d e E'_q (equação (1.7))

Para a determinação das componentes direta e em quadratura das tensões de entrada pelo método aqui proposto (E'_d e E'_q , no programa Ed2 e Eq2, respectivamente), um ponto importante é o cálculo do ângulo de defasagem entre E_d e E_d^n ($2\theta + \theta_n$, no programa DoisTetaMaisTetaN) para a aplicação da equação (1.7).

Estando E_d e E_d^n girando em sentidos opostos e com a mesma velocidade (vide figura 1.6), o argumento $2\theta + \theta_n$ calculado oscila circularmente de 0° para 180° e deste de retorna para 0° no sentido oposto passando agora decrescentemente pelos mesmos valores do início do ciclo, como ilustra a figura 4.1. Além disso, o ângulo não está necessariamente em fase com nenhuma destas componentes. Desta forma, uma nova variável, *gama*, é definida para ser utilizada como argumento. Esta nova variável oscila com mesma velocidade e fase que $2\theta + \theta_n$, porém, completando um ciclo de oscilação normalmente, girando no mesmo sentido sempre. Vide figura 4.1.

```

DoisTetaMaisTetaN = acos((Ed - Edp)/Edn);
TetaN = (2*teta - DoisTetaMaisTetaN);

if(DoisTetaMaisTetaN >= 3)
    Q = 1;

```

```

end

if(DoisTetaMaisTetaN <= 0.036)
    Q = 0;
end

if(Q == 1)
    gama = 2*pi - DoisTetaMaisTetaN;
else
    gama = DoisTetaMaisTetaN;
end
gama = real(gama);

```

Definido o argumento da equação (1.7), a aplicação desta equação nos dá as variáveis E'_d e E'_q ($Ed2$ e $Eq2$ no programa).

```

Ed2 = Edp + Edn*cos(gama);
Eq2 = Edn*sin(gama);

```

Todas as variáveis são oscilatórias, senoidais e cossenoidais. Deste ponto em diante, ou seja, no restante do programa, elas utilizarão γ como argumento.

4.1.3 Controle de Tensão

Determinação de i_d e i_q (equação (1.13))

Como demonstrado em [1], a determinação de i_d e i_q , no programa id e iq , pode ser realizada pela solução de um sistema de duas equações diferenciais. Uma para cada componente.

$$\begin{aligned} L \frac{di_d}{dt} &= Ri_d + \omega Li_q - V_d + E_d \\ L \frac{di_q}{dt} &= Ri_q - \omega Li_d - V_q + E_q \end{aligned}$$

Para a implementação do caso estudado, o sistema de equações foi escrito na forma de equação em espaço de estados e discretizado para a sua implementação satisfatória.

```

Fidq = eye(2) + Aidq*h + ((Aidq*h)*(Aidq*h))/2;
Hidq = (eye(2) + (Aidq*h)/2 + ...
        ((Aidq*h)*(Aidq*h))/(3*2))*Bidq*h;

```

```

idq = Fidq*idq + Hidq*Vdq_Edq;

```

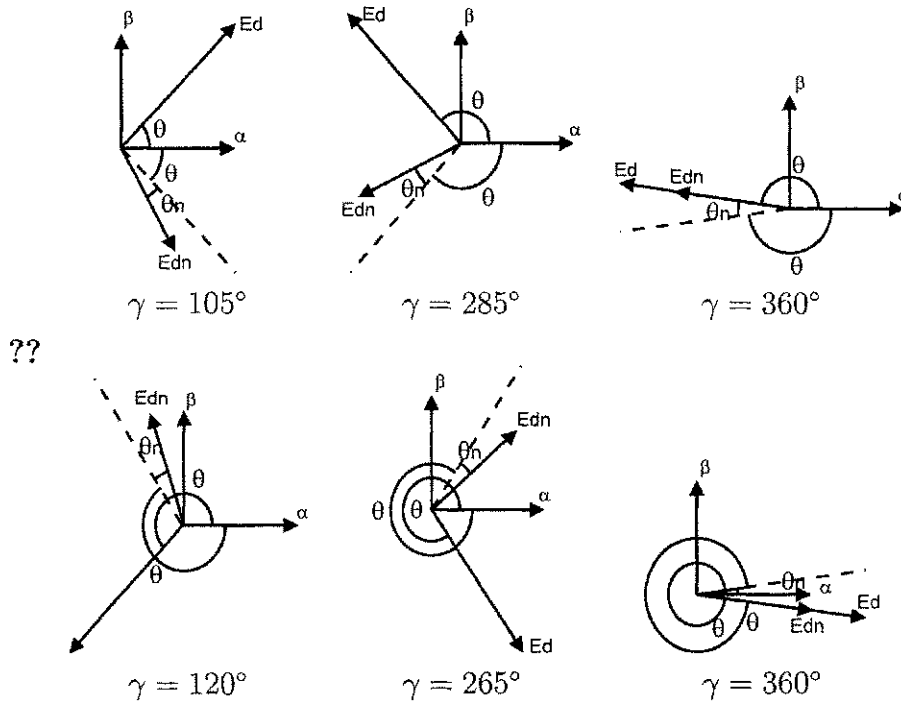


Figura 4.1: Variável γ em função das fases de E_d e E_d^n

Os detalhes de toda esta manipulação matemática são encontrados no anexo 7.1, seção 7.1.3

Determinação de i_d^p e i_d^n pelo Método Proposto

Para a determinação da potência de saída como proposta em [1] são utilizadas as componentes de sequência positiva e negativa da componente direta das correntes de fase no lado ca do conversor, i_d^p e i_d^n . Utilizou-se aqui o mesmo método proposto para a determinação das componentes de sequência positiva e negativa das componentes diretas das tensões de alimentação, E_d^p e E_d^n .

```

if(tid < Tid)
    if(id > idmax)
        idmax = id;
    end

    if(id < idmin)
        idmin = id;
    end
end

```

```

    tid = tid + h;
else
    idcc = (1/2)*(idmax + idmin);
    tid = 0;
    idMAX = idmax;
    idMIN = idmin;
    idmax = 0;
    idmin = 0;

end
idac = id - idcc;

if(idMAX == 0)
    idMAX = h;
end

idp = idcc;
idn = idMAX - idp;

```

Os detalhes desta implementação, por serem análogos aos realizadas anteriormente, pode ser vistos no primeiro tópico da seção 4.1.2

Determinação da Potência de Saída (equação (1.17))

A equação (1.17) foi implementada diretamente. Sendo que a potência de saída é implementada pela variável P_o .

$$P_o = \frac{3}{2}(E_d^p i_d^p + E_d^n i_d^n)$$

No programa

```
Po = (3/2)*(Edp*idp + Edn*idn);
```

PI de V_{dc}^* e V_{dc} (equações (1.18) e (1.19))

A tensão cc de saída do conversor, V_{dc} , e sua referência, V_{dc}^* , são implementadas no programa pelas variáveis $vCap$ e $VdcREF$, respectivamente. E para o PI destas duas variáveis é utilizada a implementação discreta de um PI convencional. Como saída é obtida a variável de corrente $iVdc$.

```

FiVdc = 1;
HiVdc = kiiVdc*h;

```

```

xiVdc = FiVdc*xiVdc + HiVdc*(VdcREF - vCap);
iVdc = xiVdc + kpiVdc*(VdcREF - vCap);

```

Os detalhes da discretivação do PI é encontrada no anexo 7.1, seção 7.1.4

4.1.4 Controle de Corrente

Determinação de i_d^{p*} e i_d^{n*} Preliminares(equação (1.18))

As correntes de referência para os PI de corrente são obtidas de maneira semelhante ao modo como se encontram E_d' e E_q' . Neste caso, a partir de i_d^{p*} e i_d^{n*} (no programa, idpREF e idnREF). Estas correntes intermediárias são, por sua vez, calculadas pela equação (4.3).

$$\begin{aligned}
 i_d^{p*} &= \frac{2}{3} \frac{E_d^p}{(E_d^p)^2 - (E_d^n)^2} P_O \\
 i_d^{n*} &= \frac{2}{3} \frac{-E_d^n}{(E_d^p)^2 - (E_d^n)^2} P_O
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

No programa

```

idpREF = (2/3)*(Edp/(Edp*Edp - Edn*Edn))*Po;
idnREF = (2/3)*(-Edn/(Edp*Edp - Edn*Edn))*Po;

```

Não sendo ainda as correntes intermediárias definitivas, elas precisam ser adicionadas à corrente de saída do PI de tensão iVdc.

Determinação de i_d^{p*} e i_d^{n*} Definitivas

As correntes intermediárias definitivas, i_d^{p*} e i_d^{n*} , são agora obtidas pela adição da saída do PI de tensão, iVdc, a cada uma delas. Estas novas correntes intermediárias, no programa idpREF2 e idnREF2, é que serão utilizadas em seguida para o cálculo das referências i_d^* e i_q^* .

```

idpREF2 = idpREF + iVdc;
idnREF2 = idnREF + iVdc;

```

Determinação de i_d^* e i_q^* (equação (1.19))

Obtidas as correntes intermediárias definitivas ($idpREF2$ e $idnREF2$), como descrito no ítem anterior, a equação (1.15) fornece as referências para os PI de corrente, i_d^* e i_q^* . No programa $idREF$ e $iqREF$.

```
idREF = idpREF2 + idnREF2*cos(gama);  
iqREF = idnREF2*sin(gama);
```

Nota-se que na aplicação desta última equação, 15 de [1], o argumento das funções oscilatórias é a variável $gama$ como já descrito no segundo tópico desta seção.

PI de i_d^* e i_q^*

Considerando o mesmo procedimento de implementação dos controladores PI de tensão, aqui os de corrente são feitos de forma semelhante. A diferença, porém, são realizadas as implementações do PI de corrente com ligeiras diferenças. De acordo com a equação (1.15). Mesmo assim, a implementação da equação é direta dada a sua semelhança com um PI convencional e sua simplicidade.

Por fim, são obtidas as duas tensões de referência para o PWM que controla o conversor: V_d^* e V_q^* , no programa $VdREF$ e $VqREF$.

```
%componente direta (VdREF)  
Fid = 1;  
Hid = kiid*h;  
  
xVdREF = Fid*xVdREF + Hid*(idREF - id);  
VdREF = -(xVdREF + kpid*(idREF - id)) + w*L*iq - R*id + Ed2;  
  
%componente em quadratura (VqREF)  
Fiq = 1;  
Hiq = kiiq*h;  
  
xVqREF = Fiq*VqREF + Hiq*(iqREF - iq);  
VqREF = -(xVqREF + kpiq*(iqREF - iq)) - w*L*id - R*iq + Eq2;
```


4.1.5 Conversor

Transformação de dq para $\alpha\beta$ das Tensões de Referência Para o Conversor

O inverso do que é feito com as tensões de alimentação é feito aqui. A transformação é semelhante, porém, inversa.

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma \\ -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d^* \\ V_q^* \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

As tensões de referência para o PWM que controla o conversor, V_d^* e V_q^* , são transformadas para o referencial $\alpha\beta$. As variáveis de saída são denominadas de valfa e beta.

```
valfa = VdREF*cos(gama) + VqREF*sin(gama);  
vbeta = -VdREF*sin(gama) + VqREF*cos(gama);
```

E o argumento das funções senoidais é a variável *gama*, como explicado no primeiro tópico da seção 4.1.4.

Transformação de $\alpha\beta$ para 123 das Tensões de Referência Para o Conversor

Obtidas as tensões no referencial $\alpha\beta$, aqui elas são levadas ao referencial 123.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(\frac{1}{2}) & (\frac{\sqrt{3}}{2}) \\ -(\frac{1}{2}) & -(\frac{\sqrt{3}}{2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

No programa as variáveis obtidas são *va*, *vb* e *vc*.

```
va = 1*valfa + 0*vbeta;  
vb = (-1/2)*valfa + (sqrt3/2)*vbeta;  
vc = (-1/2)*valfa + (-sqrt3/2)*vbeta;
```

PWM e Tensões de Polo e Fase do Conversor

O PWM implementado aqui utiliza modulação senoidal com uma portadora triangular. Este tipo de modulação foi escolhida pela simplicidade de implementação.

Este trecho do programa, portanto, implementa um comparador que recebe os sinais senoidais de referência e a portadora triangular.

```

vTriang = E*asin(sin(wt*t));

if (va > vTriang)
    q1 = 1;
else
    q1 = 0;
end

if (vb > vTriang)
    q2 = 1;
else
    q2 = 0;
end

if (vc > vTriang)
    q3 = 1;
else
    q3 = 0;
end

```

Feito isso, são calculadas as tensões de polo (no programa, v10, v20 e v30) e fase (no programa, vs1, vs2 e vs3) do inversor.

```

v10 = (2*q1-1)*vCap;
v20 = (2*q2-1)*vCap;
v30 = (2*q3-1)*vCap;

von = -(1/3)*(v10 + v20 + v30);

vs1 = v10 + von;
vs2 = v20 + von;
vs3 = v30 + von;

```

As tensões de fase são justamente as tensões no lado ca do conversor.

Nota-se ainda que as tensões de polo possuem a tensão sobre o capacitor (no programa, vCap) como referência, já que esta é a tensão no lado cc do conversor

Transformação de 123 para $\alpha\beta$ das Tensões de Fase do Conversor

Na saída do conversor, o procedimento é exatamente o mesmo que para a alimentação, primeiro tópico da seção 4.1.1.

$$\begin{bmatrix} V_{S\alpha} \\ v_{S\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \\ V_{S3} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Como saída, o programa gera as variáveis Vdalfa e Vdbeta.

```
Vdalfa = (2/3)*((1)*vs1 + (-1/2)*vs2 + (-1/2)*vs3);
Vdbeta = (2/3)*((0)*vs1 + (sqrt3/2)*vs2 + (-sqrt3/2)*vs3);
```

Transformação de $\alpha\beta$ para dq das Tensões de Fase do Conversor

Como no tópico anterior, aqui segue igual a como na alimentação, segundo tópico da seção 4.1.1.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{S\alpha} \\ V_{S\beta} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Na saída, o programa gera as variáveis Vd e Vq, que são utilizadas no controle de tensão. Mais especificamente na geração das correntes de fase no lado ca do conversor, primeiro tópico da seção 4.1.3.

```
Vd = cos(gama)*Vdalfa - sin(gama)*Vdbeta;
Vq = sin(gama)*Vdalfa + cos(gama)*Vdbeta;
```

Aqui também, o argumento das funções senoidais é a variável gama, como explicado no primeiro tópico da seção 4.1.4.

4.1.6 Capacitor no Lado CC do Conversor

Transformação de dq para $\alpha\beta$ das Correntes de Fase do Conversor

Assim como para as grandezas de tensão, seguemos equações para as correntes.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma \\ -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Gerando no programa as variáveis ialfa e ibeta.

```
ialfa = id*cos(gama) + iq*sin(gama);
ibeta = -id*sin(gama) + iq*cos(gama);
```

A mesma consideração sobre o argumento das funções senoidais é feita (primeiro tópico da seção 4.1.4).

Transformação de 123 para $\alpha\beta$ das Correntes de Fase do Conversor

Repete-se a mesma transformação, gerando as variáveis i_a , i_b e i_c .

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(\frac{1}{2}) & (\frac{\sqrt{3}}{2}) \\ -(\frac{1}{2}) & -(\frac{\sqrt{3}}{2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

No programa

```
ia = 1*ialfa + 0*ibeta;  
ib = (-1/2)*ialfa + (sqrt3/2)*ibeta;  
ic = (-1/2)*ialfa + (-sqrt3/2)*ibeta;
```

Corrente no Capacitor

Pela equação que dá a corrente no capacitor do lado cc de um inversor, equação 4.10, a equação que é implementada e o seu entendimento é intrínseco. Como resposta, temos a variável i_{Cap} para a corrente no capacitor.

$$i_{cc} = -(i_a q_1 + i_b q_2 + i_c q_3) \quad (4.10)$$

No programa

```
iaq = ia*q1;  
ibq = ib*q2;  
icq = ic*q3;  
  
iCap = -(iaq + ibq + icq);
```

Tensão no Capacitor

Não tão simples como a equação para a sua corrente, a equação para a tensão (equação 4.11) sobre o capacitor é

$$V_C = \frac{1}{C} \int i_C dt \quad (4.11)$$

A implementação desta equação diferencial é direta e simples. Gerando a variável v_{Cap} , usada no controle de tensão, último tópico da seção 4.1.4.

```
vCap = vCap + (1/C)*iCap*h;
```

4.2 Determinação do Ganhos do Controlador PI de Corrente e Tensão

Como já explicado na introdução deste trabalho, seção 1.2.1, a sintonia dos controladores PI em cascata não pode ser realizada com a configuração em cascata intacta. As duas seção deste capítulo tratam dos detalhes dos procedimentos tomados para a sintonia deste conjunto.

Referenciá-se-á ainda às variáveis do programa, não citando variáveis das equações tomadas como base para a implementação do mesmo. Tal iniciativa é tomada para simplificar as notações, além de deixá-las mais objetivas, deixando o texto mais claro e inteligível.

4.2.1 PI de Corrente

Devendo o PI de corrente ser retirado do sistema em cascata com o PI de tensão e sintonizado individualmente, os sinais de referência na entrada deste controlador, i_{dREF} e i_{qREF} , foram impostos como um seno e um cosseno, respectivamente, ambos de amplitude $10V$. Para isso impõe-se as variáveis i_{dpREF2} e i_{dnREF2} iguais a 0 e 10, respectivamente. Vide equação (1.19).

Definidas as variáveis de entrada do PI, iniciou-se pelo controlador da componente de corrente i_d . Fazendo o ganho integral do controlador, k_{iid} , igual a zero e variando o valor do ganho proporcional, k_{pid} , até que um erro mínimo fosse verificado entre as variáveis de entrada do controlador, i_d e i_{dREF} . Encontrado um k_{pid} satisfatório, o k_{iid} é variado até obter-se erro nulo nas variáveis de controle.

Sintonizado o primeiro controlador de corrente, partiu-se para a sintonia do controlador de i_q , seguindo o mesmo procedimento tomado para o primeiro controlador, o de i_d .

Uma peculiaridade foi observada na sintonia dos controladores de corrente. Os ganhos dos controladores proporcionais não são iguais. A melhor sintonia obtida foi com os ganhos k_p e k_i diferentes e como seguem na tabela 4.1.

O valor utilizado para todos os ganhos do controladores na simulação são listados na tabela 4.1.

4.2.2 PI de Tensão

Sintonizado o PI de corrente, pôde-se partir para o PI de tensão. Sendo o controlador mas externo da malha de controle, e não havendo mais ajuste algum a ser feito nesta malha, o PI de tensão foi sintonizado com o sis-

Tabela 4.1: Ganhos para os controladores da simulação

Controladores	Ganho Proporcional (k_p)	Ganho integral (k_i)
PI de Corrente (i_d)	15	100
PI de Corrente (i_q)	10	100
PI de Tensão	5	58

tema funcionando por completo. A referência de tensão para o capacitor já existindo no programa (V_{dcREF}), adotou-se mais uma vez o mesmo procedimento usado para o primeiro controlador de corrente, aqui para o de tensão, encontrando-se seus ganhos proporcional (k_{piVdc}) e integral (k_{iiVdc}) consecutivamente

Capítulo 5

Resultados Obtidos

Após completamente implementada a rotina de simulação da estratégia proposta em [1], uma série de resultados foram obtidos para duas situações distintas:

Sistema operando sob condições de tensões de entrada balanceadas:

Desde que o método seja válido e esteja sendo executado corretamente, ele deve ser capaz de garantir o funcionamento do sistema sob condições normais de funcionamento;

Sistema operando sob condições de tensões de entrada desbalanceadas:

Verificada a validade do método proposto em [1] para condições normais de funcionamento, sua validade deve ser posta a prova para condições de desbalanceamento e comparada com o primeiro caso.

A condição de desbalanceamento imposta ao sistema simulado para análise como descrita acima foi o caso da fase b da alimentação apresentando amplitude de tensão com o dobro do valor das duas outras fases. Para estas duas situações são apresentados gráficos com as variáveis necessárias para o acompanhamento dos passos de implementação do método proposto em [1].

São apresentados, ainda, gráficos com a tensão sobre o capacitor e as correntes de fase no lado cc do conversor para mais três situações distintas:

- Desbalanceamento semelhante ao do caso anterior, porém agora aplicado a cada uma das outras duas fases;
- Desbalanceamento onde a tensão cai para metade da nominal em cada uma das três fases por vez; e
- Desbalanceamento levando a tensão na fase b para o dobro da nominal a partir de 1s para um tempo de simulação de 4s.

5.1 Apresentação e Análise dos Resultados Obtidos

A análise dos resultados obtidos para o caso balanceado e o desbalanceado, assim como a apresentação destes resultados é feita nesta seção.

Os resultados ilustrados nas figuras a seguir apresentam a evolução das variáveis no tempo de 0,0s a 0,3s. Este intervalo de tempo foi escolhido porque é suficiente para que as correntes de linha se estabilizem, e proporciona boa visualização das formas de onda. Como a tensão no capacitor se estabiliza apenas após aproximadamente 1,0s, as figuras que ilustram esta variável, apresentam intervalo de tempo de 0,0s a 1,0s.

Das figuras 5.5 e 5.6 vê-se que o método proposto em [1] é eficaz para o cálculo de \bar{E}_d tanto para condições balanceadas quanto para desbalanceadas. E das figuras 5.7 e 5.8 vê-se que \bar{E}_d também é encontrada para ambos os casos.

Estas duas variáveis são necessárias para o cálculo de E'_d e E'_q pelo método proposto em [1]. Das figuras 5.9 e 5.10, confirma-se que estas transformadas são obtidas de maneira satisfatória, apenas um pequeno erro é verificado no valor encontrado em E'_q para o caso desbalanceado.

As tensões V_d e V_q são mostradas nas figuras 5.11 e 5.12, respectivamente. E em seguida as correntes de linha i_d e i_q nas figuras 5.13 e 5.14, respectivamente. O desbalanceamento nas tensões é verificado pelo aumento na amplitude de i_q . O qual influencia diretamente a corrente do capacitor, i_C . Nas figuras 5.15 e 5.16 percebe-se que há uma queda no valor médio da corrente do capacitor no caso desbalanceado.

Em ambos os casos, a tensão no capacitor alcança a referência após aproximadamente um 1s. No caso desbalanceado, o pico da oscilação de tensão no capacitor é menor. Isto é esperado visto que o valor médio da corrente neste elemento cai para o caso desbalanceado.

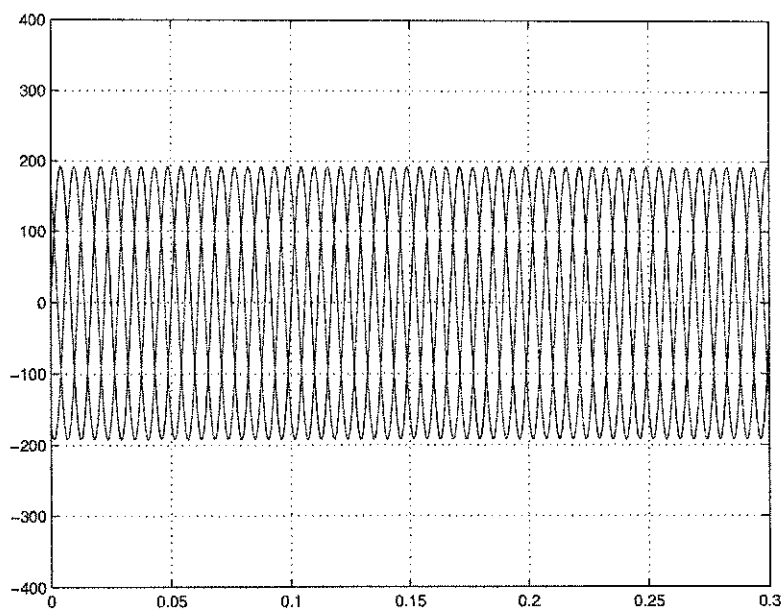


Figura 5.1: Tensões de entrada balanceadas

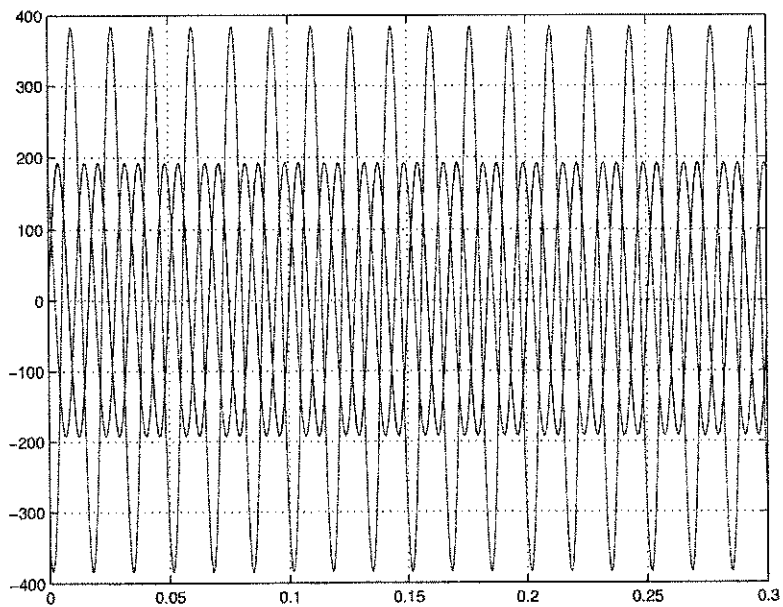


Figura 5.2: Tensões de entrada desbalanceadas

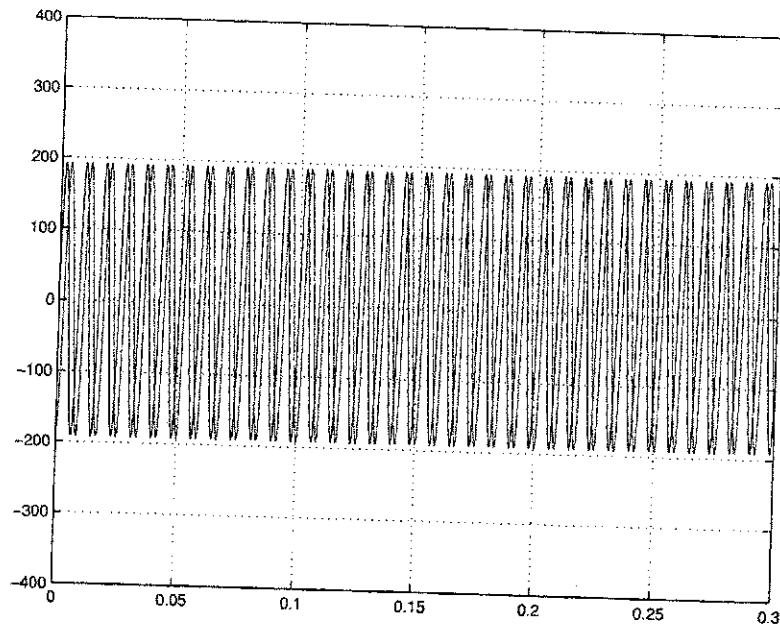


Figura 5.3: Componentes E_d e E_q para o caso balanceado

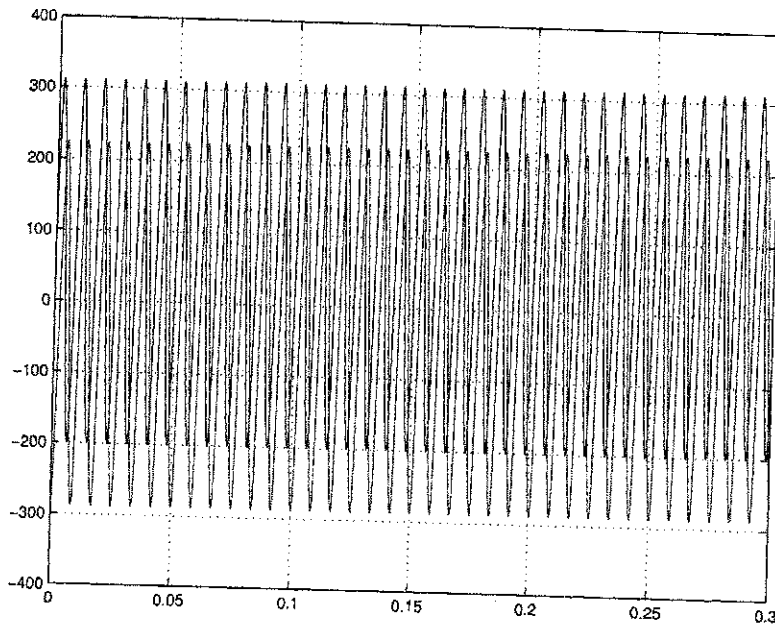


Figura 5.4: Componentes E_d e E_q para o caso desbalanceado

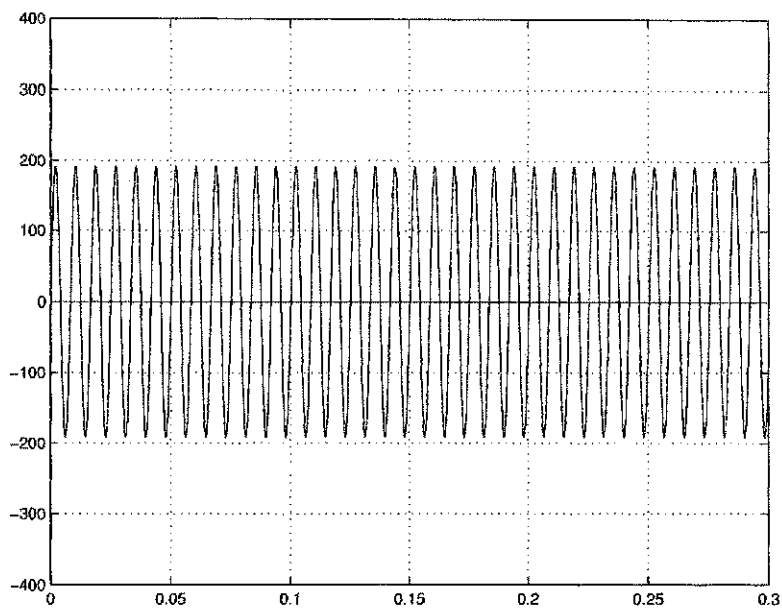


Figura 5.5: E_d e \bar{E}_d para o caso balanceado

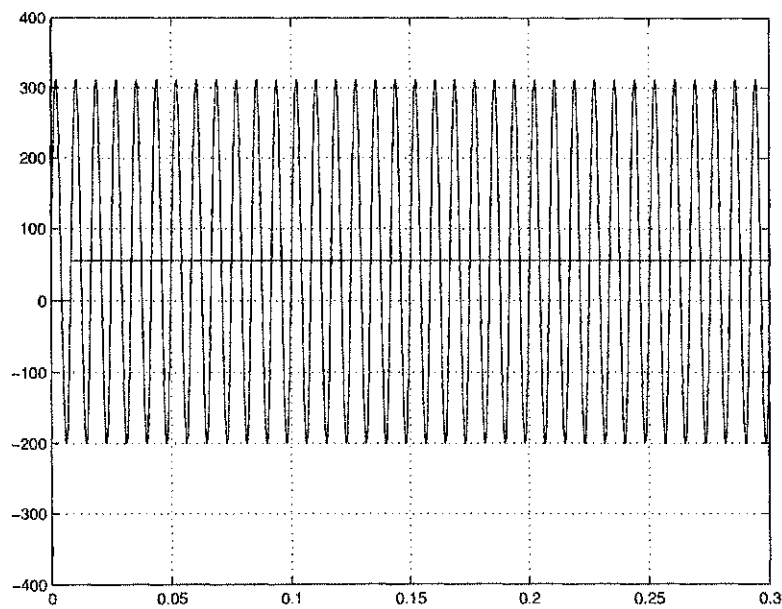


Figura 5.6: E_d e \bar{E}_d para o caso desbalanceado

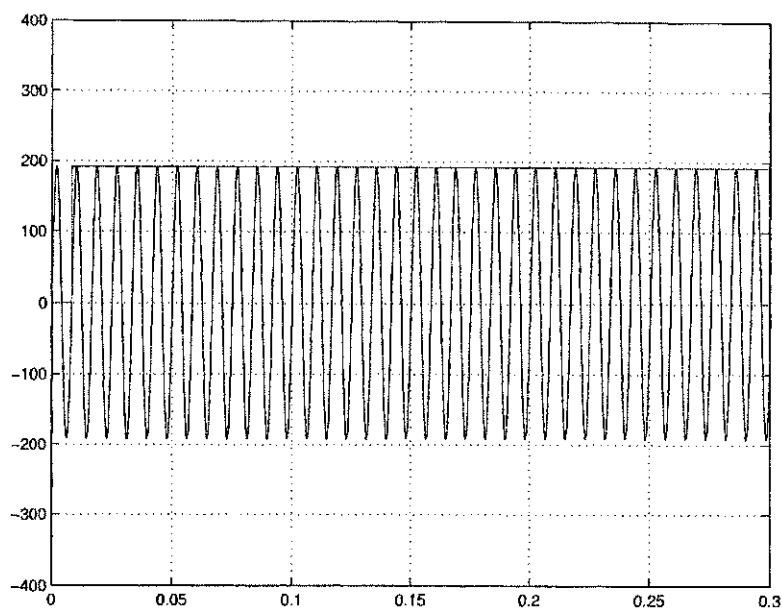


Figura 5.7: \tilde{E}_d e E_d^n para o caso balanceado

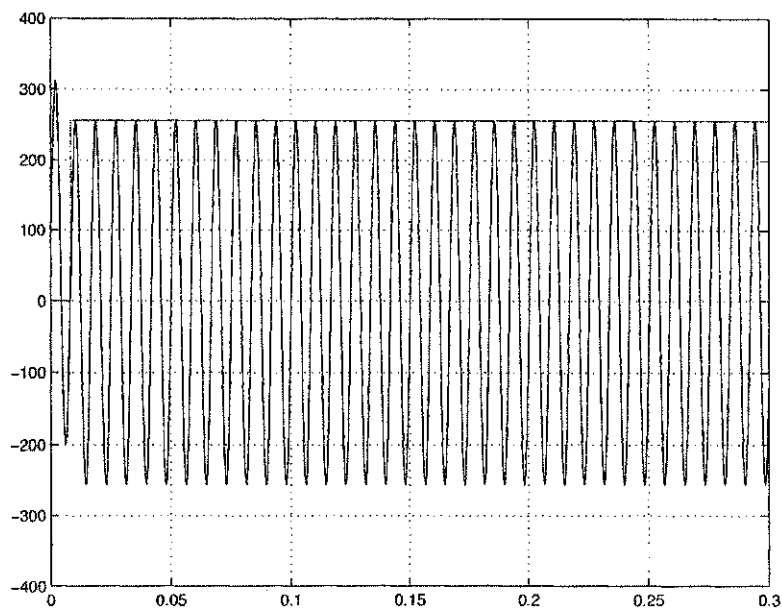


Figura 5.8: \tilde{E}_d e E_d^n para o caso desbalanceado

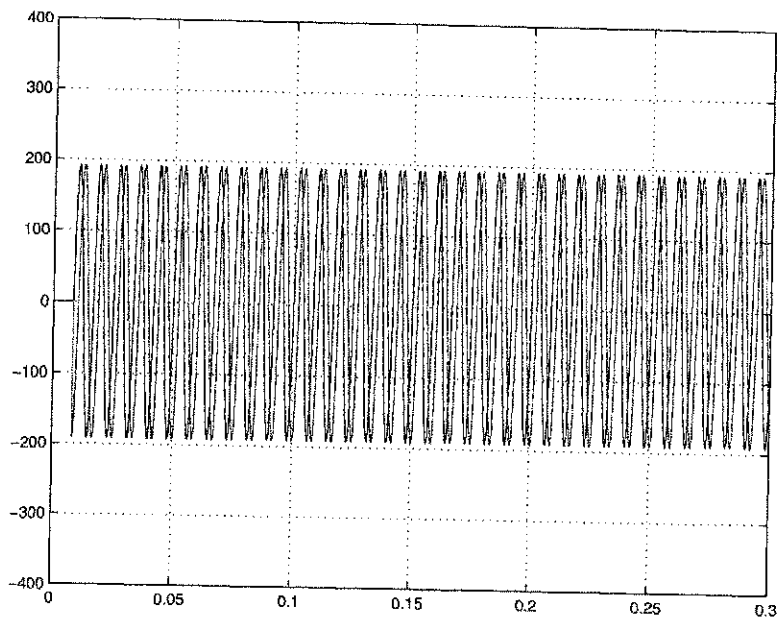


Figura 5.9: Componentes E'_d e E'_q para o caso balanceado

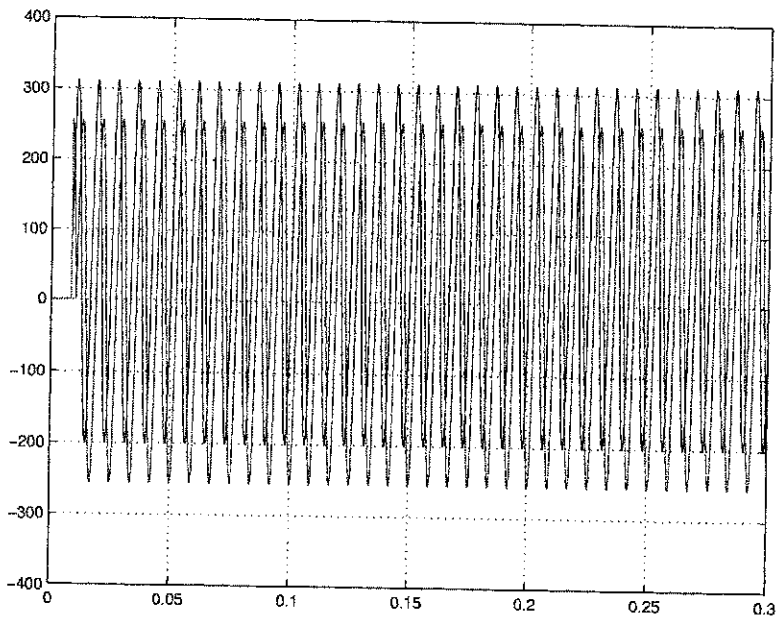


Figura 5.10: Componentes E'_d e E'_q para o caso desbalanceado

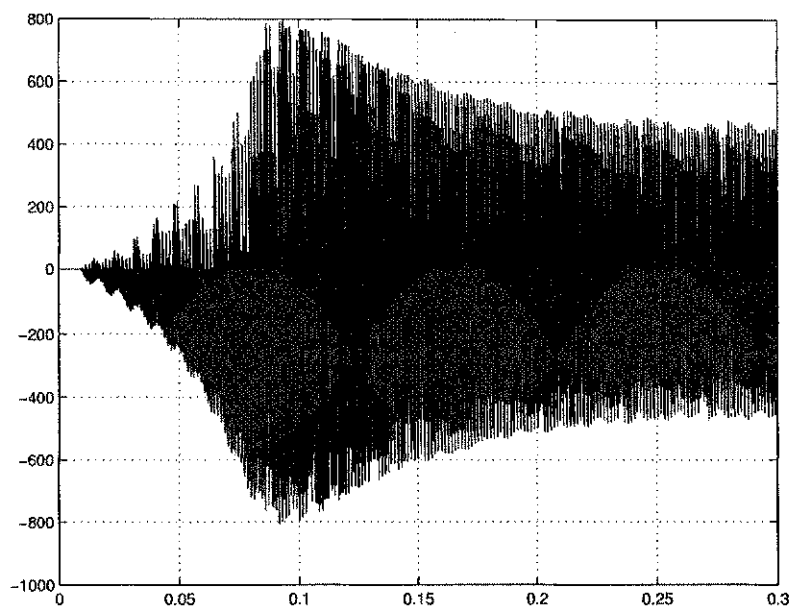


Figura 5.11: V_d e V_q para o caso balanceado

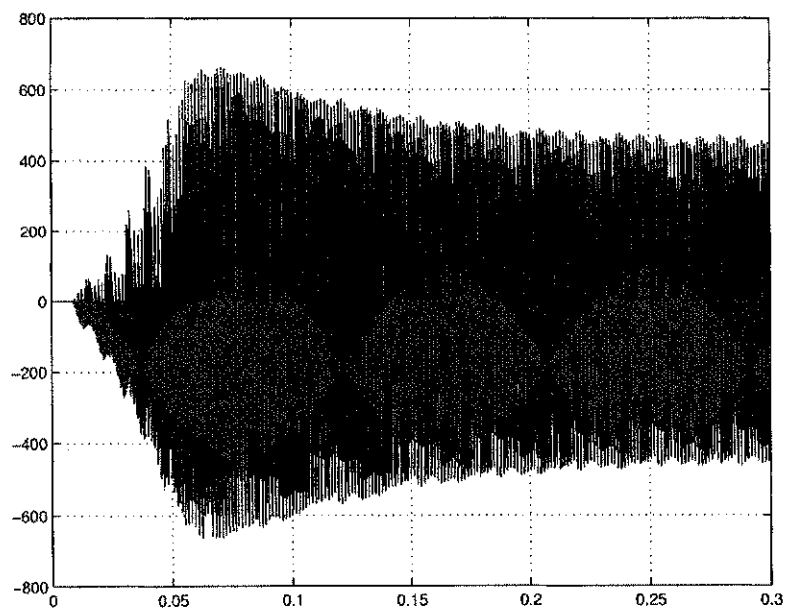


Figura 5.12: V_d e V_q para o caso desbalanceado

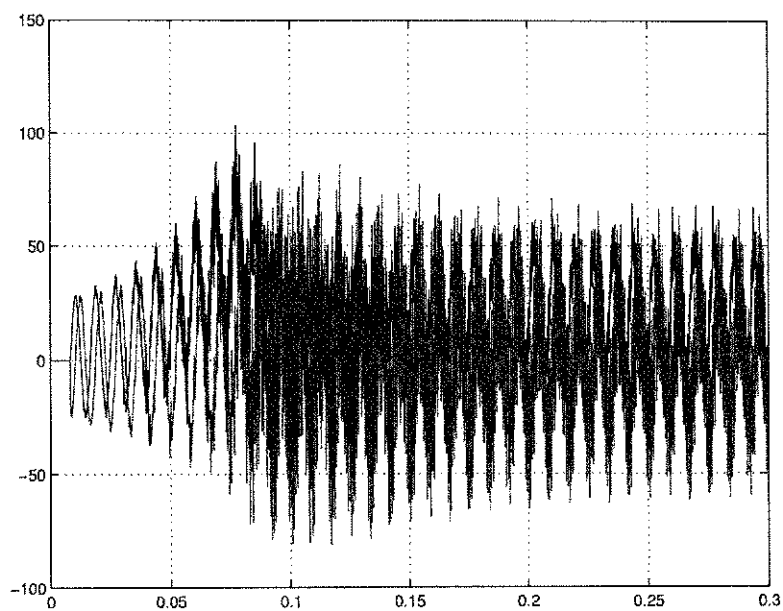


Figura 5.13: Componentes i_d e i_q para o caso balanceado

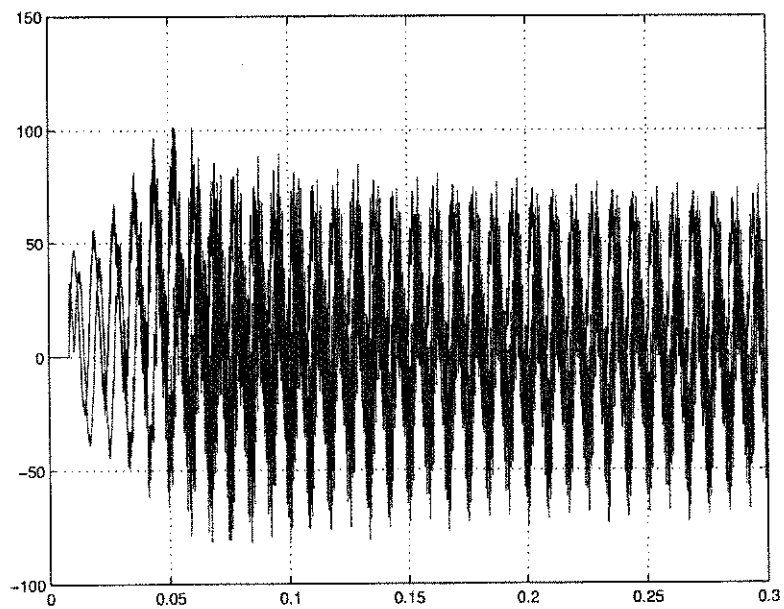


Figura 5.14: Componentes i_d e i_q para o caso desbalanceado

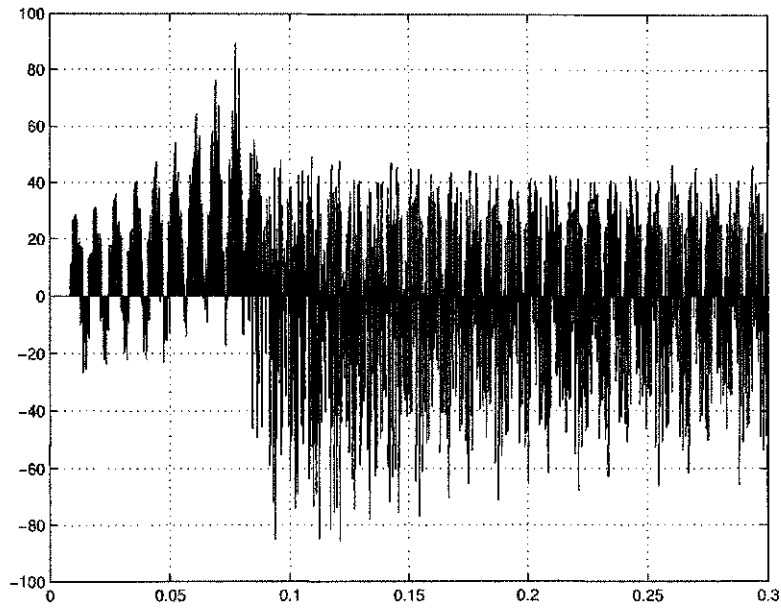


Figura 5.15: i_C para o caso balanceado

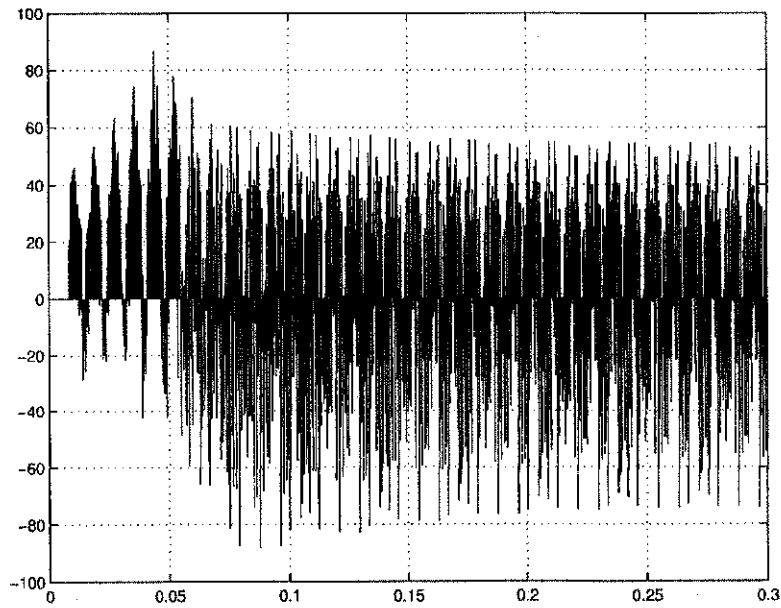


Figura 5.16: i_C para o caso desbalanceado

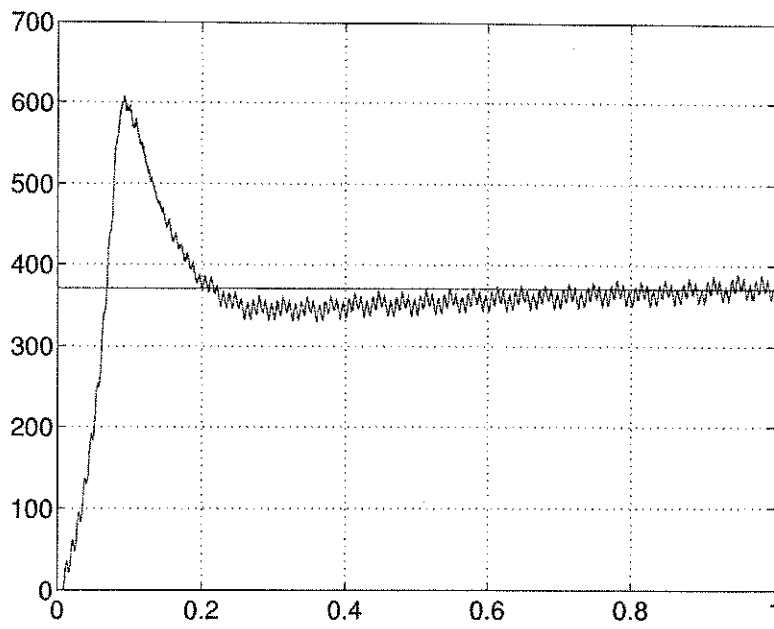


Figura 5.17: V_C para o caso balanceado

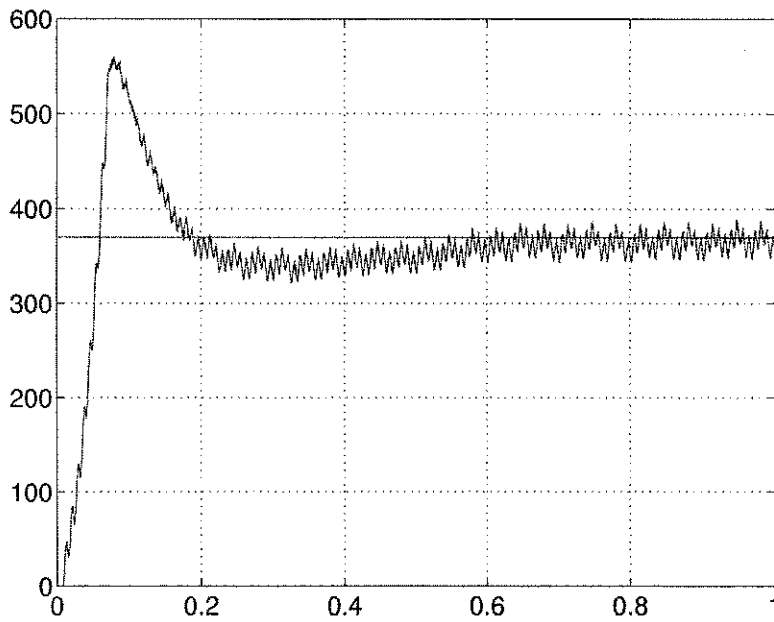


Figura 5.18: V_C para o caso desbalanceado

Capítulo 6

Conclusão

Graças a todos os estudos e trabalhos realizados para o entendimento e a implementação do método proposto em [1], paraticamente todos os conhecimentos abordados durante o curso de graduação referêntes à área de eletrônica industrial e acionamento de máquinas puderam se revisados e melhor ceditados. Além disso, as atividades desenvolvidas durante o projeto, serviram tanto para aprimorar um pouco mais a capacidade de realização de projetos nesta área, quanto para aumentar a afeição por este tipo de trabalho.

Por fim, pode ser verificada a validade do método proposto em [1].

Referências Bibliográficas

- [1] Sung-Chan Ahn Dong-Seok Hyun, New Control Scheme of Three-Phase PWM AC/DC Converter Without Phase Angle Detection Under the Unbalanced Input Voltage Conditions, IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 17, NO. 5, SEPTEMBER 2002
- [2] P. N. Enjeti, P. D. Ziogas, and M. Ehsani, "Unbalanced PWM converter analysis and corrective measures," in Proc. Conf. Rec. IEEE-IAS, 1989, pp. 861–870.
- [3] M. H. Rashid and A. I. Maswood, "Analysis of three-phase ac-dc converter under unbalanced supply conditions," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 24, pp. 449–455, May/June 1988.
- [4] P. Verdelho, "Voltage type reversible rectifiers control methods in unbalanced and nonsinusoidal conditions," in Proc. Conf. Rec. IECON'98, 1998, pp. 479–484.
- [5] P. N. Enjeti and S. A. Choudhury, "A new control stratage to improve the performance of a PWM ac to dc converter under unbalanced operating conditions," IEEE Trans. Power Electron., vol. 8, pp. 493–500, Oct. 1993.
- [6] P. Rioual, H. Pouliquen, and J. P. Louis, "Regulation of a PWM rectifier in the unbalanced network state using a generalized model," IEEE Trans. Power Electron., vol. 11, pp. 495–502, May 1996.
- [7] J. Chatelain, "Machines Électriques," vol. 1, 1983.
- [8] Jacobina, C. B., Apostila do curso de máquinas elétricas.

Capítulo 7

Anexos

7.1 Anexo 1 - Matemática

Este anexo apresenta as ferramentas matemáticas utilizadas durante o trabalho.

7.1.1 Transformação de 123 para $\alpha\beta$

Da relação entre os dois conjuntos de fasores ilustrados na figura 7.1 é possível escrever uma matriz de transformação do referencial 123 para o $\alpha\beta$ pela projeção dos vetores dq sobre os vetores 123. A matriz de transformação encontrada, $\bar{T}_{123}^{\alpha\beta}$, é escrita na equação (7.1).

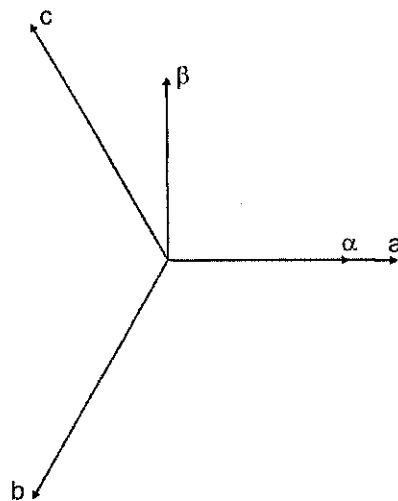


Figura 7.1: Relação entre os referenciais 123 e $\alpha\beta$.

$$\bar{T}_{123}^{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(\frac{1}{2}) & (\frac{\sqrt{3}}{2}) \\ -(\frac{1}{2}) & -(\frac{\sqrt{3}}{2}) \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

As transformações de 123 para $\alpha\beta$ e de $\alpha\beta$ para 123, ficam definidas pelas equações (7.2) e (7.3), respectivamente.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \bar{T}_{123}^{\alpha\beta} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \bar{T}_{123}^{\alpha\beta -1} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (7.3)$$

7.1.2 Transformação de $\alpha\beta$ para dq

A figura 7.2 ilustra a relação entre o referencial dq e o $\alpha\beta$, onde o referencial dq encontra-se defasado do $\alpha\beta$ de um ângulo θ qualquer.

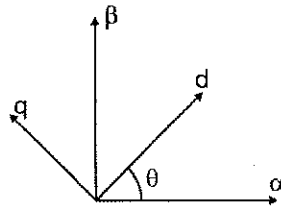


Figura 7.2: Relação entre os referenciais 123 e $\alpha\beta$.

A partir da figura 7.2, a matriz de transformação $\bar{T}_{dq}^{\alpha\beta}$ do referencial $\alpha\beta$ para dq é mostrada na equação 7.4.

$$\bar{T}_{dq}^{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (7.4)$$

As transformações de $\alpha\beta$ para dq e de dq para $\alpha\beta$ são definidas pelas equações 7.5 e 7.6, respectivamente.

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \bar{T}_{\alpha\beta}^{dq} \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad (7.5)$$

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \bar{T}_{\alpha\beta}^{dq -1} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad (7.6)$$

7.1.3 Determinação em Espaço de Estados Discreto de i_d e i_q

A expressão genérica para uma equação diferencial de primeira ordem visto na equação (7.7). Onde a variável $x(t)$ é a saída e $u(t)$ a entrada.

$$\frac{d}{dt}x(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (7.7)$$

A solução na forma discreta da equação (7.7) é escrita como mostra (7.8).

$$x(t+h) = Fx(t) + Hu(t) \quad (7.8)$$

onde h é o passo de cálculo, $F = e^{Ah}$ e $H = B \int_0^h e^{Av} dv$.

Aproximando F e H por série de Taylor encontra-se (7.9) e (7.10), respectivamente.

$$F = e^{Ah} = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(Ah)^j}{j!} = 1 + Ah + \frac{(Ah)^2}{2!} \quad (7.9)$$

$$H = e^{Ah} = B \left[\sum_{j=0}^{\infty} \frac{A^j h^{j+1}}{(j+1)!} \right] = B \left[1 + \frac{Ah}{2!} + \frac{(Ah)^2}{3!} \right] \quad (7.10)$$

O sistema de equações diferenciais para as correntes de linha i_d e i_q é visto na equação (1.13).

$$\begin{aligned} L \frac{di_d}{dt} &= Ri_d + \omega Li_q - V_d + E_d \\ L \frac{di_q}{dt} &= Ri_q - \omega Li_d - V_q + E_q \end{aligned}$$

Na forma discreta, o sistema de equações (1.13) é reescrito como visto na equação (7.11).

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & \omega L \\ -\omega L & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -V_d(t) + E_d(t) \\ -V_q(t) + E_q(t) \end{bmatrix} \quad (7.11)$$

Das equações (7.11) e (7.8) encontram-se os coeficientes (no caso, matrizes) \bar{A}_{idq} e \bar{B}_{idq} .

$$\bar{A}_{idq} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega \\ -\omega & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \quad (7.12)$$

$$\bar{B}_{idq} = \frac{1}{L} \quad (7.13)$$

E destes coeficientes, \bar{A}_{idq} e \bar{B}_{idq} , e das equações 7.9 e 7.10, encontram-se os coeficientes \bar{F}_{idq} e \bar{H}_{idq} , pelas equações 7.14 e 7.15.

$$\bar{F}_{idq} = e^{\bar{A}_{idq}h} = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(\bar{A}_{idq}h)^j}{j!} = I + \bar{A}_{idq}h + \frac{(\bar{A}_{idq}h)^2}{2!} \quad (7.14)$$

$$\bar{H}_{idq} = e^{Ah} = \bar{B}_{idq} \left[\sum_{j=0}^{\infty} \frac{\bar{A}_{idq}^j h^{j+1}}{(j+1)!} \right] = \bar{B}_{idq} \left[I + \frac{\bar{A}_{idq}h}{2!} + \frac{(\bar{A}_{idq}h)^2}{3!} \right] \quad (7.15)$$

A solução discreta para a equação (1.13) é, então, dada pela equação 7.16.

$$\begin{bmatrix} i_d(t+h) \\ i_q(t+h) \end{bmatrix} = F_{idq} \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \end{bmatrix} + H_{idq} \begin{bmatrix} -V_d(t) + E_d(t) \\ -V_q(t) + E_q(t) \end{bmatrix} \quad (7.16)$$

7.1.4 Discretização de um PI

Um controlador PI pode ser analisado como um controlador P em paralelo com um controlador I. Dessa forma a discretização de um controlador PI pode ser realizada discretizando cada um dos controladores individualmente e somando-se as expressões encontradas para cada um.

A função de transferência de um controlador I é vista na equação (7.17).

$$G_I(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{ki}{s} \quad (7.17)$$

onde $X(s)$ e $U(s)$ são, respectivamente, a saída e a entrada do controlador.

Escrevendo a equação (7.17) no referencial do tempo tem-se a equação (7.18).

$$\frac{d}{dt}x(t) = ki e(t) \quad (7.18)$$

Comparando a equação (7.18) com (7.7) e (7.8), é possível determinar os coeficientes para a discretização de (7.17) como sendo:

$$\begin{aligned} A_I &= 0; \\ B_I &= ki; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_I &= 1; \\ H_I &= B_I h. \end{aligned}$$

A função de transferência do controlador P é expressa na equação (7.19).

$$G_P(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = kp \quad (7.19)$$

Aplicando-se para o controlador P o mesmo raciocínio aplicado para o I, encontra-se os seguintes coeficientes de discretização:

$$\begin{aligned} A_P &= 0; \\ B_P &= kp; \\ F_P &= 1; \\ H_P &= B_P h. \end{aligned}$$

A expressão para o controlador PI é descrita na equação 7.20.

$$\begin{aligned} x'(t) &= F_I x(t) + H_I u(t) \\ x(t+h) &= x'(t) + F_P x(t) + H_P u(t) \end{aligned} \quad (7.20)$$

7.2 Código em Matlab

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Universidade Federal de Campina Grande
%Centro de Engenharia Eletrica e Informatica
%Departamento de Engenharia Eletrica
%
%Aluno: Jonas Agapito Rodrigues de Medeiros e Oliveira
%Matricula:20221123
%
%Orientador: Professor Talvanes Meneses de Oliveira
%
%Rotina desenvolvida para o Trabalho de Conclusao de Curso
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all;
close all;
clc;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%variáveis iniciais do programa
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```


%

%%%

%tensao dc de referencia para a carga

%%%

%

VdcREF = 370;

%

%%%

%%%

%variaveis gerais

%

t = 0; %tempo inicial de simulação

tmax = 1; %tempo máximo de simulação

h = 1e-4; %passo de calculo

s = 0;

numpnts = 40e3;

ta = 0;

ha = tmax/numpnts;

%

%%%

%%%

%variaveis eletricas

%

f = 60; %frequência da rede

w = 2*pi*f; %frequência angular da rede

teta = w*t; %para usar nas equações da dedução

TetaN = 0;

Q = 0;

E = 192; %tensão de barramento de entrada(192)

R = 10; %resistência da fonte(0)

L = 950e-6; %indutância da fonte(950e-6)

Rcarga = 26; %resistência da carga(26)

Lcarga = 0; %indutância da carga(0)

```

%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%variaveis para o modelo em espaço de estados da equação 09
%(correntes idq)
%
id = 0;
iq = 0;
idq = [id iq]';          %variaveis de saida

%transformadas dq das tensoes
gama = 0;

Vd = 0;
Vq = 0;
%transformadas dq das tensoes da rede
Ed = 0;
Eq = 0;

Ed2 = 0;
Eq2 = 0;
% Vdq_Edq = [Vd -Ed; Vq -Eq];   %variaveis de entrada

Aidq = [-(R/L) w; -w -(R/L)];   %variaveis de discretização
Bidq = 1/L;
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%variaveis matematicas
%
sqrt3 = sqrt(3);
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%variaveis para a implementação do metodo proposto
%
Edmax = 0;  %valor maximo de Ed em cada ciclo de calculo
EdMAX = 0;

```

```

EdMIN = 0;
Edmin = 0; %valor minimo de Ed em cada ciclo de calculo
Edcc = 0; %valor cc de Ed, calculado, em cada ciclo de calculo
Edac = 0; %valor ac de Ed, calculado, em cada ciclo de calculo

TEd = (1/f)*(1/2); %periodo de coleta de valores de Ed para o
                    %calculo de Edmax e Edmin
tEd = 0; %variavel de tempo para implementaçao do metodo
        %proposto

%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%variaveis para o calculo de idp e idn pelo metodo proposto
%
idp = 0;
idn = 0;

idmax = 0; %valor maximo de id em cada ciclo de calculo
idmin = 0; %valor minimo de id em cada ciclo de calculo
idMAX = 0;
idMIN = 0;

idREF = 0;
iqREF = 0;

idcc = 0; %valor cc de id, calculado, em cada ciclo de calculo
idac = 0; %valor ac de id, calculado, em cada ciclo de calculo

Tid = 1/f; %periodo de coleta de valores de id para o calculo de
           %idmax e idmin
tid = 0; %variavel de tempo para implementaçao do metodo
        %proposto

%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

vTriang = 0;
ft = 30*f;
wt = 2*pi*ft;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%variaveis para o PI discreto para a determinação das componentes
%VdqREF
%
VdREF = 0;
VqREF = 0;

xVdREF = 0;
xVqREF = 0;

kiid = 100;
kpid = 15;

kiiq = 100;
kpiq = 10;

iVdc = 0;
xiVdc = 0;

kiiVdc = 60;
kpiVdc = 5;

idpREF = 0;
idnREF = 0;
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
C = 1485e-6;
vCap = 0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%laço de simulação
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
t1 = 0;

while(t1<tmax)

    if (t > 1/f)
        t = 0;
    end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%alimentação - inicio
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%tensões de referência
%*(129/192)
teta = w*t;

vr = E*sin(w*t);
vs = E*sin(w*t - 2*pi/3);
vt = E*sin(w*t + 2*pi/3);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%implementação dos desbalanceamentos na amplitude
%
%   if(t > 0.015)
%       %           vs = 2*E*sin(w*t - 2*pi/3);
%       vs = 129*sin(w*t - 2*pi/3);
%   end
%
%   if(t1 > tmax/2)
%       %           vs = 2*E*sin(w*t - 2*pi/3);
%       vs = (E/2)*sin(w*t - 2*pi/3);
%   end
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%transformada alfa-beta das tensões de entrada
%
Ealfa = (2/3)*((1)*vr + (-1/2)*vs + (-1/2)*vt);
Ebeta = (2/3)*((0)*vr + (sqrt3/2)*vs + (-sqrt3/2)*vt);
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%transformada dq das tensoes de entrada

```

```

%
Ed = cos(teta)*Ealfa - sin(teta)*Ebeta;
Eq = sin(teta)*Ealfa + cos(teta)*Ebeta;
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%alimentação - fim
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%implementação do metodo proposto - inicio
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%calculo de Edp e Edn segundo o metodo proposto (eq. 05 e 06)
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%calculo de Edcc e Edac para a implementação do metodo
%proposto (eq. 05)
%
if(tEd <= TEd)          %encontrando Edmax e Edmin
    if(Ed > Edmax)      %calculo de Edmax
        Edmax = Ed;
    end

    if(Ed < Edmin)     %calculo de Edmin
        Edmin = Ed;
    end

    tEd = tEd + h;
else
    Edcc = (1/2)*(Edmax + Edmin);    %Edcc valido durante o
                                     %proximo ciclo

    tEd = 0;
    EdMAX = Edmax;
    EdMIN = Edmin;
    Edmax = 0;
    Edmin = 0;
end

```

```

end
Edac = Ed - Edcc;   %Edac valido durante o proximo ciclo
                    %(nao e usada)

if(EdMAX == 0)
    EdMAX = h;
end

if(Edcc < h)
    Edcc = 0;
end

%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%calculo de Edp e Edn (eq. 06)
%
Edp = Edcc;
Edn = EdMAX - Edp;
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%equação 07 - inicio
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%determinação do ângulo de argumento da eq. 07
%
DoisTetaMaisTetaN = acos((Ed - Edp)/Edn);
TetaN = (2*teta - DoisTetaMaisTetaN);

if(DoisTetaMaisTetaN >= 3)
    Q = 1;
end

if(DoisTetaMaisTetaN <= 0.036)
    Q = 0;

```

```

end

if(Q == 1)
    gama = 2*pi - DoisTetaMaisTetaN;
else
    gama = DoisTetaMaisTetaN;
end
gama = real(gama);
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%equação 07 (determinação das componentes E'dq)
%
Ed2 = Edp + Edn*cos(gama);
Eq2 = Edn*sin(gama);
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%equação 07 - fim
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%controlador de tensao - inicio
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%para obter Po - inicio
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%calculo de Vdq_Edq a partir da eq. 07 e das tensoes de
%entrada para uso na eq. 09
%
Vdq_Edq = [(-Vd + Ed2) (-Vq + Eq2)]';
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```



```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%equação 09 (em espaço de estados)
%(determinação das componentes idq)
%
Fidq = eye(2) + Aidq*h + ((Aidq*h)*(Aidq*h))/2;
Hidq = (eye(2) + (Aidq*h)/2 + ...
        ((Aidq*h)*(Aidq*h))/(3*2))*Bidq*h;

idq = Fidq*idq + Hidq*Vdq_Edq;

id = idq(1,1);
iq = idq(2,1);
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%determinação de idp e idn pelo metodo proposto no artigo
%
if(tid < Tid)
    if(id > idmax)
        idmax = id;
    end

    if(id < idmin)
        idmin = id;
    end

    tid = tid + h;
else
    idcc = (1/2)*(idmax + idmin);
    tid = 0;
    idMAX = idmax;
    idMIN = idmin;
    idmax = 0;
    idmin = 0;

end
idac = id - idcc;

if(idMAX == 0)
    idMAX = h;
end

```

```

idp = idcc;
idn = idMAX - idp;

%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%equação 10 (determinação da potência de saída)
%
Po = (3/2)*(Edp*idp + Edn*idn);
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%para obter Po - fim
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%PI de vCap e VdcREF entre as eq. 14 e 15
%
FiVdc = 1;
HiVdc = kiiVdc*h;

xiVdc = FiVdc*xiVdc + HiVdc*(VdcREF - vCap);
iVdc = xiVdc + kpiVdc*(VdcREF - vCap);
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%equação 14 (determinação das componentes i*dpn)
%
idpREF = (2/3)*(Edp/(Edp*Edp - Edn*Edn))*Po;
idnREF = (2/3)*(-Edn/(Edp*Edp - Edn*Edn))*Po;
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%somador entre a eq.14 e a eq.15
%
idpREF2 = idpREF + iVdc;%0;%
idnREF2 = idnREF + iVdc;%10;%

```

```

%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%equação 15 (determinação das componentes i*dq)
%
idREF = idpREF2 + idnREF2*cos(gama);
iqREF = idnREF2*sin(gama);
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%controlador de tensao - fim
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%controlador de corrente - inicio
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%equação 11 (determinação das componentes VdqREF)
%
%componente direta (VdREF)
Fid = 1;
Hid = kiid*h;

xVdREF = Fid*xVdREF + Hid*(idREF - id);
VdREF = -(xVdREF + kpid*(idREF - id)) + w*L*iq - R*id + Ed2;

%if (VdREF > 40)
%   VdREF = 40;
%end

%componente em quadratura (VqREF)
Fiq = 1;
Hiq = kiiq*h;

xVqREF = Fiq*VqREF + Hiq*(iqREF - iq);
VqREF = -(xVqREF + kpiq*(iqREF - iq)) - w*L*id - R*iq + Eq2;

```



```

if (va < -E)
    va = -E;
end

if (vb > E)
    vb = E;
end

if (vb < -E)
    vb = -E;
end

if (vc > E)
    vc = E;
end

if (vc < -E)
    vc = -E;
end

%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

vTriang = E*asin(sin(wt*t));

if (va > vTriang)
    q1 = 1;
else
    q1 = 0;
end

if (vb > vTriang)
    q2 = 1;
else
    q2 = 0;
end

if (vc > vTriang)
    q3 = 1;
else
    q3 = 0;
end

```

```

end

v10 = (2*q1-1)*vCap;%(2*E);
v20 = (2*q2-1)*vCap;%(2*E);
v30 = (2*q3-1)*vCap;%(2*E);

von = -(1/3)*(v10 + v20 + v30);

vs1 = v10 + von;%va;%
vs2 = v20 + von;%vb;%
vs3 = v30 + von;%vc;%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%transformada alfa-beta das tensões de fase
%
Vdalfa = (2/3)*((1)*vs1 + (-1/2)*vs2 + (-1/2)*vs3);
Vdbeta = (2/3)*((0)*vs1 + (sqrt3/2)*vs2 + (-sqrt3/2)*vs3);
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%transformada dq das tensoes de fase
%
Vd = cos(gama)*Vdalfa - sin(gama)*Vdbeta;%VdREF;%
Vq = sin(gama)*Vdalfa + cos(gama)*Vdbeta;%VqREF;%
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%pwm - fim
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%tensao no capacitor - inicio
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%transformada dq->alfa-beta das correntes de linha
%
```

```

ialfa = id*cos(gama) + iq*sin(gama);
ibeta = -id*sin(gama) + iq*cos(gama);
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%transformada alfa-beta -> 123 das correntes de linha
%
ia = 1*ialfa + 0*ibeta;
ib = (-1/2)*ialfa + (sqrt3/2)*ibeta;
ic = (-1/2)*ialfa + (-sqrt3/2)*ibeta;
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%corrente no capacitor
%
iaq = ia*q1;
ibq = ib*q2;
icq = ic*q3;

iCap = -(iaq + ibq + icq);
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%tensao no capacitor
%
vCap = vCap + (1/C)*iCap*h;
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%tensao no capacitor - inicio
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%montagem dos vetores de saida
%
```

```

if (t > ta)
    ta = ta + ha;
    s = s + 1;      % incremento dos vetores de saida

    vrs(s) = vr;    %tensoes de entrada
    vss(s) = vs;
    vts(s) = vt;

    Eds(s) = Ed;    %tensoes de entrada no referencial
                    %sincrono(s) = Edp;
    Edccs(s) = Edcc;
    Edacs(s) = Edac;

    Edps(s) = Edp;
    Edns(s) = Edn;

    Eqs(s) = Eq;
    %
    %      tEds(s) = tEd;
    %
    tetas(s) = teta;
    %      DoisTetaMaisTetaNs(s) = DoisTetaMaisTetaN;
    gamas(s) = gama;

    Qs(s) = Q;
    Ed2s(s) = Ed2;
    Eq2s(s) = Eq2;

    Vds(s) = Vd;
    Vqs(s) = Vq;

    Pos(s) = Po;
    %      %      Pcargas(s) = Pcarga;
    %
    VdREFs(s) = VdREF;
    VqREFs(s) = VqREF;
    %
    VdcREFs(s) = VdcREF;
    %      iVdcs(s) = iVdc;
    %
    ids(s) = idq(1,1);

```



```

iqs(s) = idq(2,1);

ias(s) = ia;
ibs(s) = ib;
ics(s) = ic;

iaqs(s) = iaq;
ibqs(s) = ibq;
icqs(s) = icq;

q1s(s) = q1;
q2s(s) = q2;
q3s(s) = q3;

iCaps(s) = iCap;
vCaps(s) = vCap;

idccs(s) = idcc;
idacs(s) = idac;

idps(s) = idp;
idns(s) = idn;

iqs(s) = iq;

idpREFs(s) = idpREF;
idnREFs(s) = idnREF;

idpREF2s(s) = idpREF2;
idnREF2s(s) = idnREF2;

idREFs(s) = idREF;
iqREFs(s) = iqREF;

%   v1s(s) = v1;
%   v3s(s) = v3;
%   v5s(s) = v5;
%
%   v4s(s) = -v4;
%   v6s(s) = -v6;
%   v2s(s) = -v2;

```

```

vas(s) = va;
vbs(s) = vb;
vcs(s) = vc;

vs1s(s) = vs1;
vs2s(s) = vs2;
vs3s(s) = vs3;

vTriangs(s) = vTriang;
%
ts(s) = t1;          %vetor tempo
t2s(s) = t;
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%incremento das variaveis de contagem
%
t = t + h;          %incremento de tempo
t1 = t1 + h;
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

end

end
%
%%

% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% %plotagem dos graficos dos vetores de saida
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% %
% figure(1)
% plot(ts,vrs, ts,vss, ts,vts), grid on, zoom;
% title('Tensoes de entrada (vr, vs e vt)');
%
% figure(2)
% plot(ts,Eds, ts,Edccs), grid on, zoom;
% title('Ed e Edcc');

```

```

%
% figure(3)
% plot(ts,Edacs, ts,Edns), grid on, zoom;
% title('Edac e Edn');
%
% figure(4)
% plot(ts,Eds, ts,Eqs), grid on, zoom;
% title('Ed e Eq');
%
% figure(5)
% plot(ts,Ed2s, ts,Eq2s), grid on, zoom;
% title('Ed2 e Eq2');
%
% % figure(6)
% % plot(ts,10*DoisTetaMaisTetaNs, ts, 10*Qs, ts,10*gamas, ts,...
% %           Vds, ts,Vqs), grid on, zoom;
%
% figure(6)
% plot(ts,idREFs, ts,iqREFs), grid on, zoom;
% title('idREF e iqREF');
%
% figure(7)
% plot(ts,ids, ts,idccs), grid on, zoom;
% title('id e idcc');
%
% figure(8)
% plot(ts,idacs, ts,idns), grid on, zoom;
% title('idac e idn');
%
% figure(9)
% plot(ts,Vqs, ts,Vds), grid on, zoom;
% title('Vd e Vq');
%
% figure(8)
% plot(ts,ids, ts,iqs), grid on, zoom;
% title('id e iq');
%
% figure(10)
% plot(ts,ias, ts,ibs, ts,ics), grid on, zoom;
% title('ia, ib e ic');
%

```

```

% figure(11)
% plot(ts,iCaps), grid on, zoom;%ts,vCaps,
% title('iCap');
% % e vCap
% figure(12)
% plot(ts,Pos), grid on, zoom;
% title('Po');
%
% figure(13)
% plot(ts,idpREFs, ts,idnREFs), grid on, zoom;
% title('idpREF e idnREF');
%
% figure(14)
% plot(ts,idpREF2s, ts,idnREF2s), grid on, zoom;
% title('idpREF2 e idnREF2');
%
% figure(15)
% plot(ts,VdcREFs, ts,vCaps), grid on, zoom;
% title('VdcREF e vCap');
%
% figure(16)
% plot(ts,VdREFs, ts,VqREFs), grid on, zoom;
% title('VdREF e VqREF');
%
% figure(17)
% plot(ts,vas, ts,vbs, ts,vcs, ts,vTriangs), grid on, zoom;
% title('va, vb e vc');
%
% figure(18)
% plot(ts,vs1s, ts,vs2s, ts,vs3s), grid on, zoom;
% title('tensoes de fase');
%
% % figure(18)
% % plot(ts,v1s,'b', ts,v3s,'g', ts,v5s,'r', ts,v4s,'r',...
% % ts,v6s,'b', ts,v2s,'g', ts,Vdcs,'k'),grid on, zoom;
% % title('saida do retificador');
%
% % figure(20)
% % plot(ts,tEds), grid on, zoom;
% % title('tEd');
%

```

