



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

DEPARTAMENTO DE SISTEMAS E CONTROLE DE ENERGIA

CONTROLE POR DSP DE CONVERSORES DE POTÊNCIA PARA ACIONAMENTO DE GERADOR DE INDUÇÃO CONECTADO À REDE MONOFÁSICA

RICARDO QUADROS MACHADO

BANCA EXAMINADORA:

Este exemplar corresponde a redação final da tese defendida por Ricardo Quadros Machado e aprovada pela Comissão Julgada em 23/08/00. José Antenor Pomílio Orientador

Prof. Dr. José Antenor Pomílio - Orientador (UNICAMP)

Prof. Dr. Antonio Melo de Oliveira (UFG)

Prof. Dr. Ernesto Ruppert Filho (UNICAMP)

Prof. Dr. Sigmar Maurer Deckmann (UNICAMP)

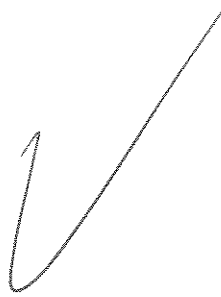
Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

CAMPINAS (SP), 23 AGOSTO DE 2000.



2000-08-23

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	T/Unicamp
	M18c
V.	Ex.
TOMBO BC/	42394
PROC.	16-392107
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREC#	R\$ 11,00
DATA	09/04/07
N.º CPD	



CM-00153700-6

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M18c Machado, Ricardo Quadros
Controle por DSP de conversores de potência para acionamento de gerador de indução conectado à rede monofásica / Ricardo Quadros Machado.--Campinas, SP: [s.n.], 2000.

Orientador: José Antenor Pomilio
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Processamento de sinais – Técnicas digitais. 2. Máquinas elétricas de indução. I. Pomilio, José Antenor. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

RESUMO

O uso de máquina de indução trifásica como gerador apresenta inúmeros atrativos, especialmente por sua robustez e baixos custos de aquisição e operacional. No entanto a má regulação de tensão e de frequência são restrições importantes em aplicações em que a boa qualidade da energia suprida deva ser garantida. O uso adequado de conversores eletrônicos de potência associados ao gerador de indução permitem obter os desempenhos desejados e, adicionalmente, podem operar em um sistema sem controle da velocidade mecânica do gerador, o que simplifica expressivamente a instalação de microcentrais hidrelétricas, com aplicação típica no meio rural. Em tais situações é comum a existência de redes monofásicas. Este trabalho estuda métodos de conexão do sistema de geração a uma rede monofásica, a qual serve como supridora de um excesso de demanda local, ou como receptora do excedente da energia gerada. O comando dos conversores eletrônicos empregados é feito por meio de um DSP, o qual controla o fluxo de potência e as formas de onda sintetizadas pelos conversores. São apresentadas e discutidas características e limitações de diferentes tipos de conversores com relação à capacidade de garantir a qualidade da energia gerada e, ao mesmo tempo, fazer o balanço de potência entre gerador e rede. Resultados experimentais verificam as análises e simulações, comprovando as expectativas.

ABSTRACT

The use of three-phase induction generator presents many advantages mainly due to its robustness and low cost. However, the low performance in terms of voltage and frequency stabilization are important drawbacks if it is necessary to guarantee the power quality. The use of power electronic converters associated with the induction generator allows to improve the operation characteristics of the system, stabilizing both, voltage and frequency. Additionally it is not necessary to control the speed of the generator, drastically simplifying the installation of such a system in micro rural hydro power plants. It is common in the Brazilian rural areas to have access only to a single-phase grid. This work studies methods to connect the local three-phase generator to the single-phase grid. The grid works supplying the additional power consumed by the local load or absorbing the exceeding generated power. The power electronic converters are controlled by a DSP that determines the power flow and the current waveforms. The characteristics and limitations of each different approach are presented and discussed, considering power quality aspects. The analysis and simulation results are confirmed by experimental results.

Agradecimentos

Inicialmente agradeço a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho através do incentivo, amizade e soluções técnicas.

Ao Prof. José Antenor Pomilio pela orientação e dedicação no desenvolvimento deste trabalho e, também pela oportunidade e confiança.

Ao amigo Edson A. Vendrusculo por sua estimada cooperação técnica tanto na parte teórica quanto no desenvolvimento prático e, principalmente, por seu companheirismo que tanto me auxiliou no decorrer desses anos.

Aos amigos Fernando P. Marafão, Luciana C. Leite, Marcus V. Ataíde, Teresa N. Zuniga, Márcio M. Kubo, Roberto P. Homrich e Maria Isabel C. Alegria pelo constante apoio e amizade, principalmente nos momentos difíceis do trabalho.

Ao Prof. Enes G. Marra pela sua atenção e apoio durante as simulações e desenvolvimento teórico do trabalho e ao Prof. Simone Buso por suas idéias e sugestões na programação do DSP.

Ao pessoal do Departamento de Sistemas e Controle de Energia (DSCE), em particular ao Nelson V. Augusto e à Mariza Geraldino.

A todos os colegas do Laboratório de Condicionamento de Energia Elétrica (LCEE) e em geral da Faculdade de Energia Elétrica e de Computação da UNICAMP.

Gostaria de agradecer em especial ao Prof. Félix A. Farret pelo seu voto de confiança e auxílio nos projetos científicos ainda na graduação e, também pela constante amizade e motivação em meus planos profissionais.

Aos meus irmãos Carlos, Henrique e Marcia e ao pequeno Rhuann.

Ao Prof. Carlos A. C. Coronel pelo seu incentivo e apoio no início de minha jornada à Unicamp.

Aos amigos de Santa Maria pela motivação ao iniciar mais esta etapa de minha vida, em especial aos amigos Elvio M. Alves, Sérgio P. Camargo e Ana L. S. Camargo.

A realização deste trabalho contou com o suporte financeiro da CAPES e da FAPESP e a doação do módulo de desenvolvimento TMS320F240 pela TEXAS INSTRUMENTS.

À Rita Margarete minha amada esposa e a meus pais Nilo e Luci pelo apoio, dedicação e principalmente à ajuda nos momentos difíceis de minha vida.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

A sabedoria louvará a sua alma, e se
louvará em Deus, e se gloriará no meio de seu
povo.

Eclesiástico

1. INTRODUÇÃO	01
1.1. AS TOPOLOGIAS EM ESTUDO.....	02
2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA.....	07
2.1. SISTEMA EMPREGADO	07
2.2. CONVERSOR ESTÁTICO DE POTÊNCIA	10
2.3. DETERMINAÇÃO DAS CORRENTES DE COMPENSAÇÃO	12
2.3.A. CEP MONOFÁSICO E CONEXÃO DIRETA À REDE MONOFÁSICA	12
2.3.B. CEP TRIFÁSICO E CONEXÃO DIRETA À REDE MONOFÁSICA.....	17
2.3.C. CEP MONOFÁSICO E TRIFÁSICO CONEXÃO NÃO DIRETA À REDE MONOFÁSICA.....	22
2.4. CONCLUSÕES	25
3. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO.....	26
3.1. GERADOR CONECTADO DIRETAMENTE AO BARRAMENTO MONOFÁSICO SEM CEP.....	26
3.1.A. SEM CARGA.....	26
3.1.B. COM CARGA RESISTIVA EQUILIBRADA	29
3.1.C. COM CARGA RESISTIVA DESEQUILIBRADA	32
3.2. GERADOR CONECTADO AO BARRAMENTO MONOFÁSICO COM CEP MONOFÁSICO.....	34
3.2.A. SEM CARGA.....	34
3.3. GERADOR CONECTADO AO BARRAMENTO MONOFÁSICO COM CEP TRIFÁSICO.....	36
3.3.A. SEM CARGA.....	36
3.4. GERADOR SEM CONEXÃO DIRETA COM O BARRAMENTO MONOFÁSICO, COM CEP MONOFÁSICO E TRIFÁSICO	38
3.4.A. SEM CARGA.....	38
3.4.B. COM CARGA EQUILIBRADA TRIFÁSICA RESISTIVA.....	40
3.4.C. COM CARGA MONOFÁSICA RESISTIVA.....	42
3.4.D. COM CARGA REATIVA TRIFÁSICA.....	44

3.3.E. COM CARGA TRIFÁSICA NÃO-LINEAR.....	46
3.5. CONCLUSÕES	48
4. CONTROLADORES DIGITAIS.....	49
4.1. O TMS320F240	50
4.2. LEITURA DE DADOS.....	51
4.3. CONCLUSÕES	54
5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	55
5.1. GERADOR SEM CONEXÃO COM O BARRAMENTO MONOFÁSICO COM CEP'S MONOFÁSICO E TRIFÁSICO	55
5.1.A. "BOOST"	55
5.1.B. SEM CARGA	58
5.1.C. CARGA TRIFÁSICA.....	60
5.1.D. CARGA CA MONOFÁSICA.....	61
5.1.E. CARGA NÃO-LINEAR	62
5.1.F. PARTIDA DE UM MOTOR DE INDUÇÃO	63
5.2. GERADOR CONECTADO AO BARRAMENTO MONOFÁSICO COM CEP TRIFÁSICO.....	63
5.3. CONCLUSÕES	65
6. CONCLUSÕES	66
A. MODELAGEM E PARÂMETROS DO GI	68
B. DEFINIÇÃO DAS TENSÕES EQUILIBRADAS	73
C. DEFINIÇÕES DE POTÊNCIA	75
D. CIRCUITOS UTILIZADOS	76
E. FORMATO DAS VARIÁVEIS E VALORES BASE	78
F. PROGRAMA EM LINGUAGEM ASSEMBLER.....	80
G. CIRCUITOS DO PSPICE	93
LISTA DE FIGURAS	97
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIÇÕES	102
REFERÊNCIAS BIBLIGRÁFICAS	108

INTRODUÇÃO

O interesse na investigação de estruturas que possibilitem a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis tem crescido consideravelmente, por motivos econômicos e ambientais. O emprego de estruturas que utilizam geradores de indução acionados em velocidade variável, em associação com conversores estáticos é atualmente uma das tendências das pesquisas realizadas nesta área [1,2,3].

A investigação do emprego de geradores de indução (GI) associados a conversores eletrônicos de potência e acionados por turbinas hidráulicas em pequenas quedas d'água, vai de encontro à atual necessidade de se encontrarem soluções economicamente viáveis para geração de energia elétrica, a partir de fontes de energia renováveis.

Até pouco tempo, a eletrificação rural preocupava-se essencialmente em levar energia aos usuários para fins de iluminação e para alimentação de motores monofásicos de pequena potência. O perfil do usuário, no entanto, tem se modificado, bem como as cargas alimentadas. A disponibilidade de uma alimentação trifásica e com boa qualidade de energia é uma necessidade real, uma vez que aumenta o uso de equipamentos eletro-eletrônicos que fazem esta exigência (principalmente da tensão suprida) para sua correta operação.

É bastante comum em diversas áreas rurais do país a presença de redes monofásicas, numa estrutura radial e com significativo problema de regulação de tensão, associado às longas distâncias cobertas. É objeto de estudo desta dissertação a associação de uma microcentral hidroelétrica, utilizando gerador de indução trifásico conectado uma rede monofásica.

A situação típica a ser estudada prevê que o sistema deve atuar de modo a garantir ao usuário o fornecimento de energia elétrica de boa qualidade e enviar para rede monofásica o excesso da energia produzida.

Por boa qualidade da energia gerada considera-se o fornecimento de tensões senoidais, simétricas e equilibradas, com valor e frequência constantes, independentes da carga. Além disso, a carga vista pelo gerador deve apresentar-se equilibrada, evitando torques pulsantes no eixo da máquina. Tais requisitos podem ser garantidos pelo uso adequado de um conversor eletrônico de potência (CEP), associado ao GI.

Acredita-se que as estruturas estudadas apresentam contribuições para a área de geração de energia elétrica com acionamento em velocidade variável, a partir de turbina hidráulica não regulada.

Dada a situação de aplicação prevista (meio rural com disponibilidade hídrica), a questão da otimização da geração da energia não é fundamental. Pode-se mesmo conceber o uso em cargas auxiliares para o consumo do excedente de energia gerada (caso a rede monofásica não esteja disponível), se isto significar a não necessidade de uma regulação da velocidade da turbina hidráulica, o que pode ter um impacto significativo no custo global do sistema [4,5]. Em sistemas já em funcionamento nos quais exista de antemão a possibilidade de controle da turbina, o sistema aqui proposto pode também atuar, alterando-se apenas a variável a ser comandada para fins de absorção (ou redução) da potência gerada excedente.

1.1. As Topologias em Estudo

Consideremos inicialmente o sistema mostrado na figura 1.1.1. O inversor atua como processador da potência gerada pela máquina de indução [5], MP designa a máquina primária (turbina).

O inversor atua apenas com o objetivo de manter a tensão e frequência fixas nos terminais do gerador. A tensão alternada praticamente não se altera, uma vez que a tensão contínua que alimenta o inversor é, ativamente, mantida sob regulação. No entanto, dada a queda no filtro passivo de saída do

inversor, para um índice de modulação constante, observa-se uma variação na tensão. Além disso, o inversor não tem capacidade de compensar os eventuais desequilíbrios presentes na corrente da carga, de modo que o torque no eixo do gerador pode apresentar oscilações.

Supondo a inexistência de um controle de velocidade sobre a turbina, toda a energia gerada deve ser consumida. Caso a carga não seja suficiente, o excedente pode ser enviado para a rede.

O excesso de potência produz uma elevação na tensão do barramento CC. O circuito denominado “modulador de corrente” é, topologicamente, um conversor abaixador de tensão (“buck”), cujo controle pode ser feito de modo que a corrente produzida sobre a indutância tenha uma forma senoidal retificada. O inversor de corrente, por sua vez, identifica a polaridade da tensão da rede e injeta a corrente de modo a enviar energia para o sistema, mantendo assim o balanço de potência. Variações na tensão do barramento CC são indicadores de desbalanços no fluxo de potência, e levam a um ajuste na amplitude da corrente injetada na rede.

No caso de perda de conexão com a rede monofásica, o sistema deve prever o consumo do excedente da potência gerada.

Neste sistema existem três conversores processando o excedente da energia gerada: o inversor/retificador trifásico, o conversor abaixador de tensão e o inversor de corrente. Não há qualquer vínculo entre as formas de onda no gerador e a rede monofásica.

Uma primeira proposta apresentada nesta dissertação (figuras 1.1.2 e 1.1.3) é uma alternativa que utiliza apenas um conversor para processamento de energia. Neste caso tem-se uma conexão direta da linha monofásica (eventualmente através de reatores de acoplamento). Na figura, a título de exemplo, considera-se o uso de um DSP para implementar as funções de controle e comando necessários aos IGBT's do conversor.

As correntes vistas pelo gerador devem caracterizar uma carga trifásica equilibrada e o eventual excedente de potência gerada deve ser enviado à rede monofásica. O equilíbrio é obtido através do controle das amplitudes e das fases das correntes de linha do CEP que é realizado individualmente e

assimetricamente em cada ramo do conversor.

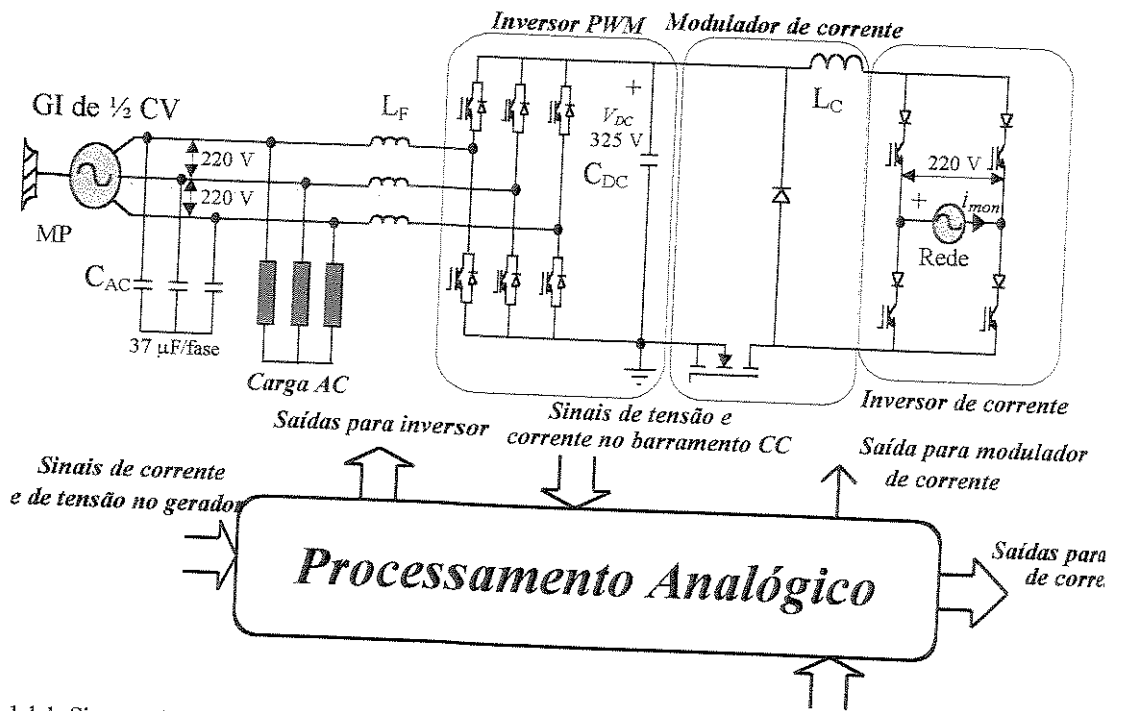


Figura 1.1.1. Sistema de geração de energia com gerador de indução conectado à rede monofásica através de barramento CC.

A estratégia de controle pode utilizar a formulação da Teoria da Potência Instantânea [6-11] em sistema a três fios proporcionando a não existência de componentes de seqüência zero nas variáveis elétricas do sistema em estudo.

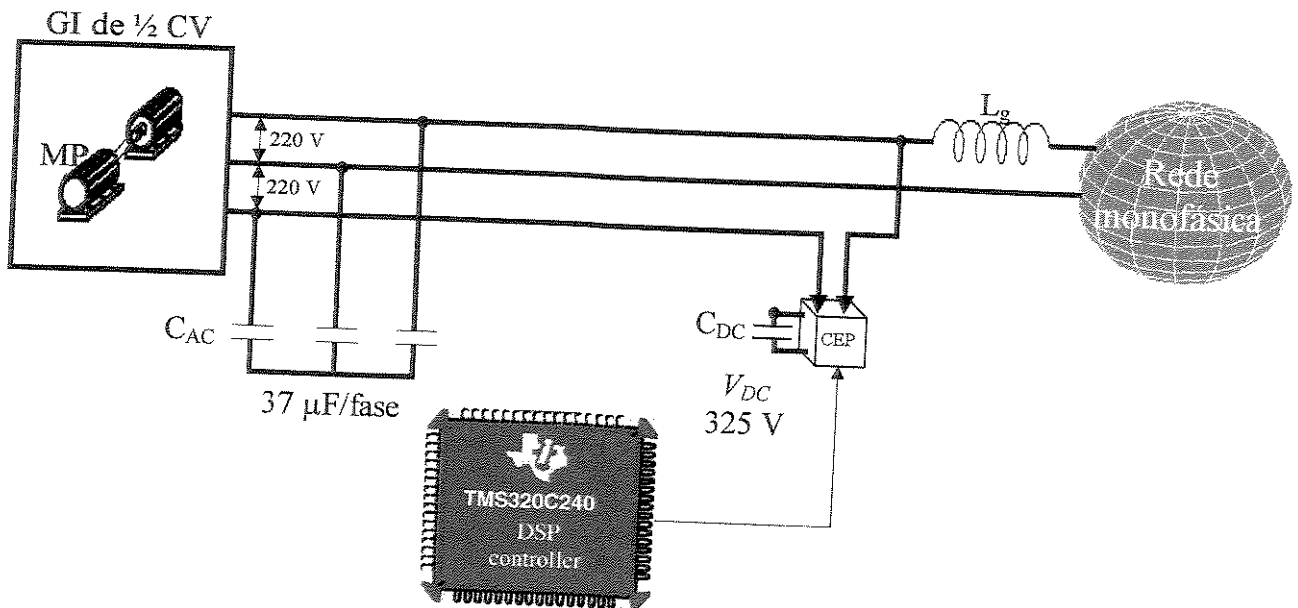


Figura 1.1.2. Circuito de potência e controle para o CEP monofásico.

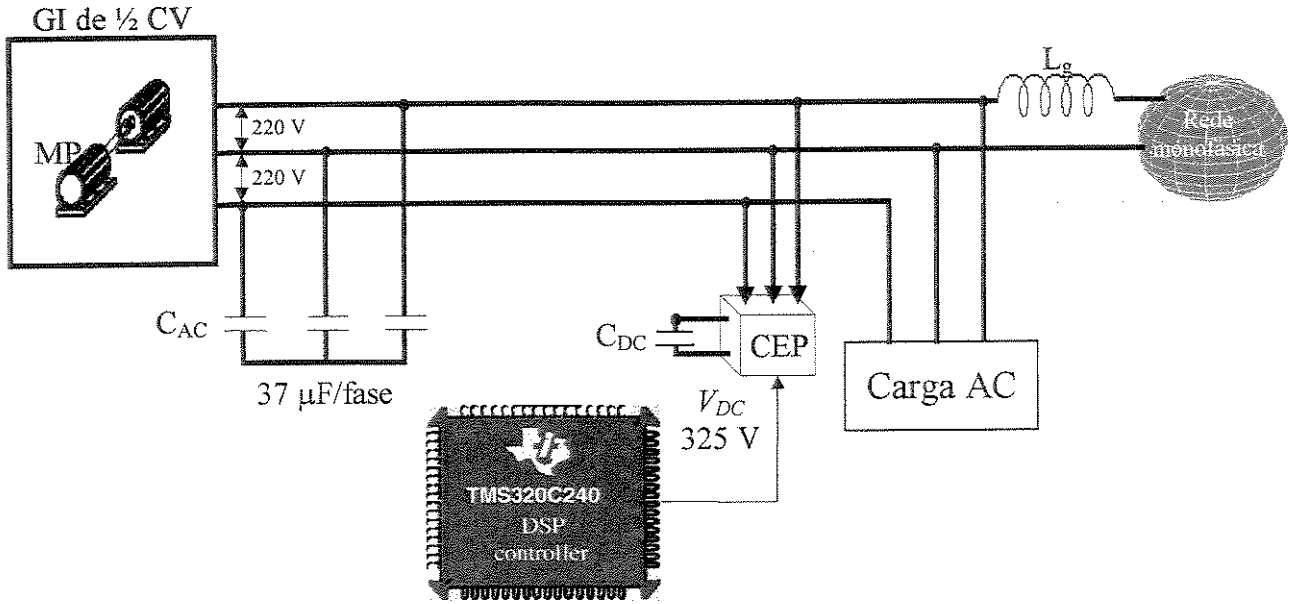


Figura 1.1.3. Circuito de potência e controle para o CEP trifásico com a carga.

Uma outra possibilidade apresentada neste trabalho é vista na figura 1.1.4. Ela é similar ao circuito da figura 1.1.1 com a vantagem de possuir fluxo bidirecional de potência característica esta, que a torna uma boa opção à ser implementada em relação à proposta da referência [5]. Tem-se o uso de dois conversores, com uma melhoria no rendimento.

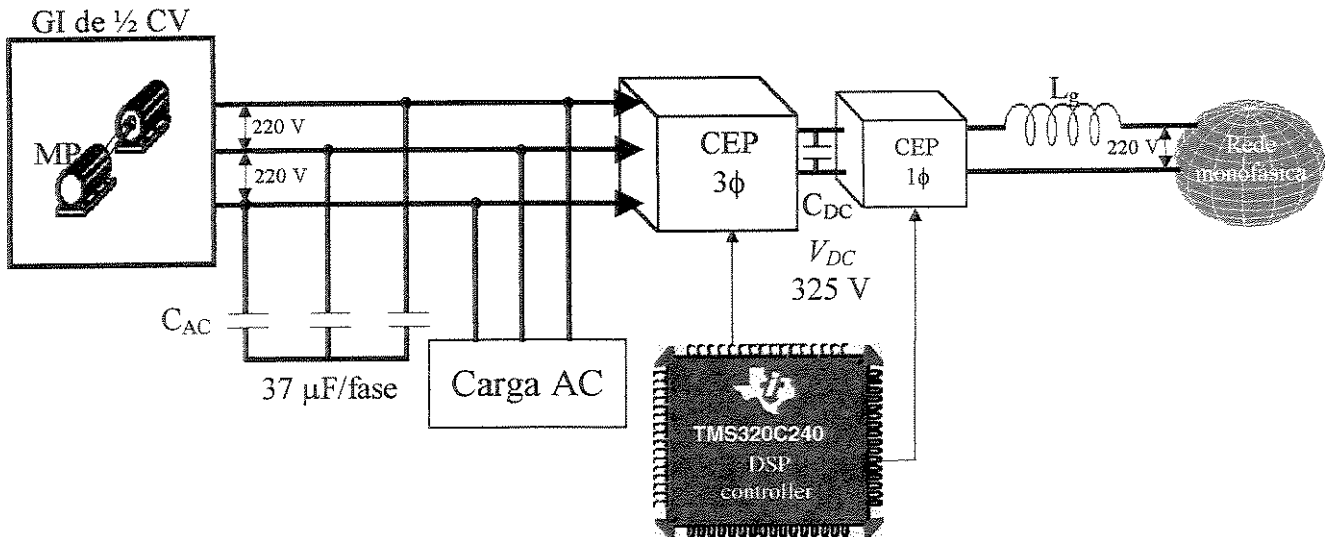


Figura 1.1.4. Circuito de potência e controle para o sistema isolado com a carga.

No capítulo 2 são apresentadas as propostas (CEP monofásico, trifásico e o sem conexão direta à rede monofásica) e suas particularidades.

O CEP monofásico apresenta limitações no processamento da energia ativa.

O CEP trifásico não possui os problemas apresentados pelo CEP monofásico, mas sua utilização torna-se comprometida quando colocado frente a uma situação que possua desbalanços nas tensões e harmônicos nas correntes.

Como alternativa, utiliza-se um sistema sem conexão direta entre GI e rede monofásico mas que também possua fluxo bidirecional de potência. No final deste capítulo, é apresentado um algoritmo para controlar o sistema e que será a base para o programa desenvolvido no DSP.

No capítulo 3, são simuladas os quatros sistemas: o primeiro apresenta o sistema com uma configuração básica composta por MP-GI-carga-rede monofásica; no segundo é introduzido um CEP monofásico com conexão direta entre máquina e rede, no terceiro, substitui-se o CEP monofásico por um trifásico sendo que a conexão direta com a rede é mantida e no quarto, utiliza-se o sistema sem conexão direta com a rede monofásica.

Em todas as situações são analisados os fluxos de potência ativa nas diversas seções de estudo como também a potência reativa.

No capítulo 4, é feita uma apresentação do controle digital que emprega um DSP “TMS320F240” e o tratamento necessário para que as variáveis medidas estejam disponíveis “on chip”.

No capítulo 5 é feita uma verificação experimental utilizando controle digital para comandar os CEP's.

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas conclusões e as propostas para continuação deste trabalho.

DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O desenvolvimento de um sistema capaz de conectar um GI trifásico a uma rede monofásica será analisado e discutido.

Conectar um GI trifásico diretamente a uma rede monofásica, leva-o a situações de desequilíbrio tanto em suas tensões quanto nas correntes. Para eliminar este problema, três propostas serão apresentadas, uma fazendo uso de um CEP monofásico, a segunda de um CEP trifásico, ambos com conexão direta do GI à rede monofásica. A terceira alternativa faz uma conexão indireta, intermediada por um barramento CC.

No apêndice A é apresentado o modelo da máquina e seu equacionamento.

2.1. Sistema Empregado

O sistema em estudo compreende GI, conectado diretamente ou não a uma rede monofásica, sendo que a corrente de magnetização necessária à auto-excitação é fornecida por um banco capacitores C_{AC} . Seja I_G o vetor das correntes (com as componentes de magnetização) e V_G o vetor das tensões de linha, equação 2.1.1 [12,13,14].

$$I_G = \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \text{ e } V_G = \begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} \quad (2.1.1)$$

Se o tipo de conexão é direta, a rede monofásica define não só a frequência de operação da máquina, como também sua tensão de trabalho. Caso não exista vínculo direto entre rede e GI quem

define a frequência e a tensão de operação é um dos CEP's.

Por não existir controle de velocidade da MP, toda energia gerada deve ser consumida em uma carga local ou fluir para a rede monofásica, o que leva o GI ao desequilíbrio, como ilustra a figura 2.1.1.

As cargas mesmo sendo equilibradas, não eliminam o desbalanço devido à presença da rede monofásica. Esses desequilíbrios serão sentidos tanto por I_G como também por V_G .

Os distúrbios mencionados serão analisados no capítulo referente às simulações onde verifica-se que o conjunto, em determinadas situações, não atende à premissa de fornecimento de energia com boa qualidade ao consumidor. Para sanar estas limitações, serão testados vários conjuntos de CEP's que terão como função equilibrar I_G e V_G .

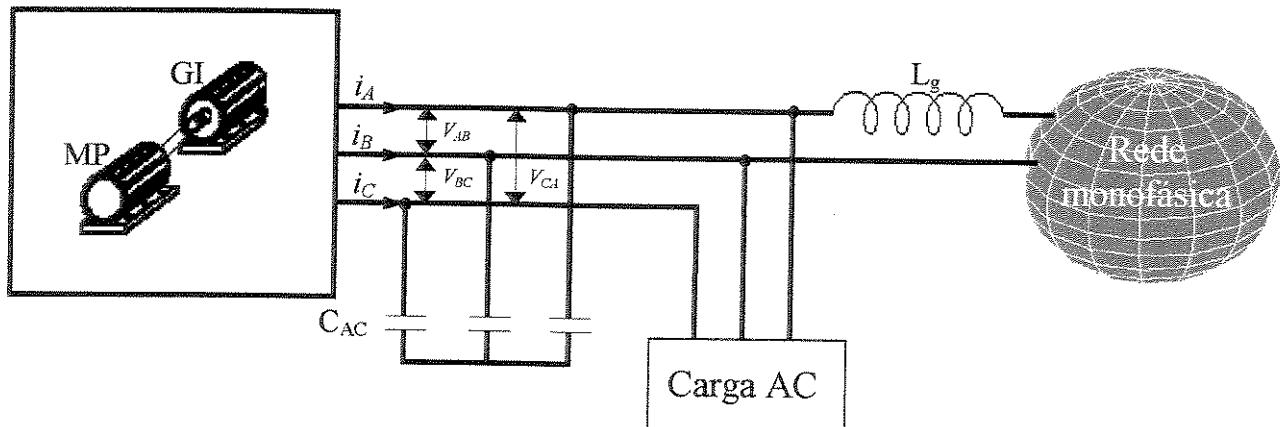


Figura 2.1.1. Circuito de potência de um GI conectado diretamente a uma rede monofásica com carga.

Com o GI conectado diretamente à rede monofásica e um CEP monofásico (figura 2.1.2) ou trifásico (figura 2.1.3) haverá uma nova distribuição das correntes, possibilitando equilíbrio tanto de I_G como de V_G . Nesta situação pode haver fluxo bidirecional de potência pela rede se a carga consumir uma energia superior à fornecida pelo GI.

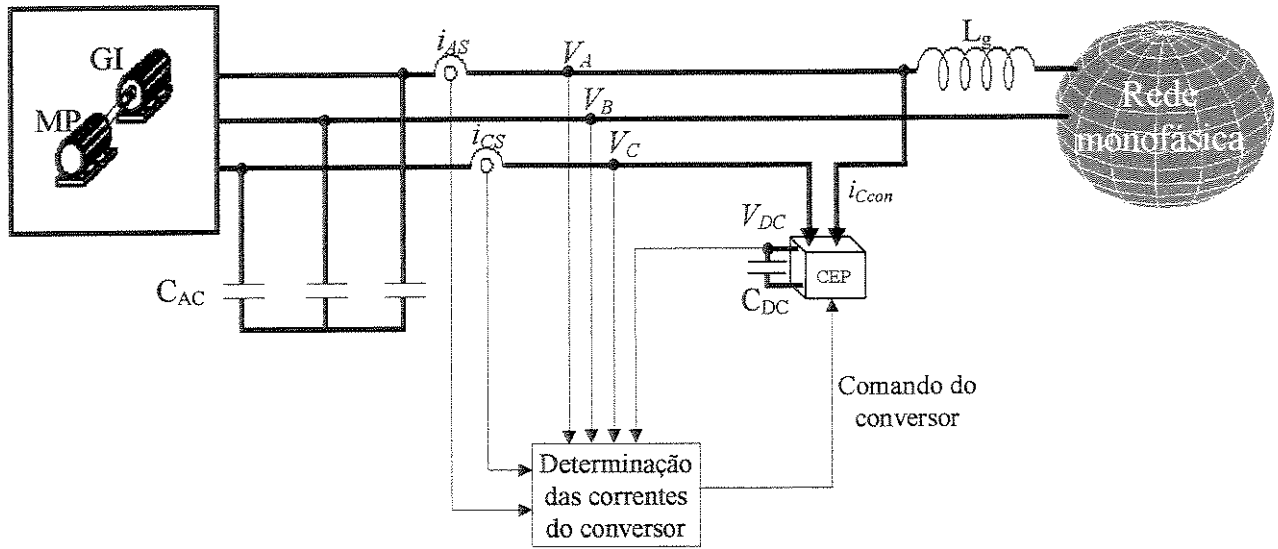


Figura 2.1.2. Circuito de potência e CEP monofásico com controle e sem carga.

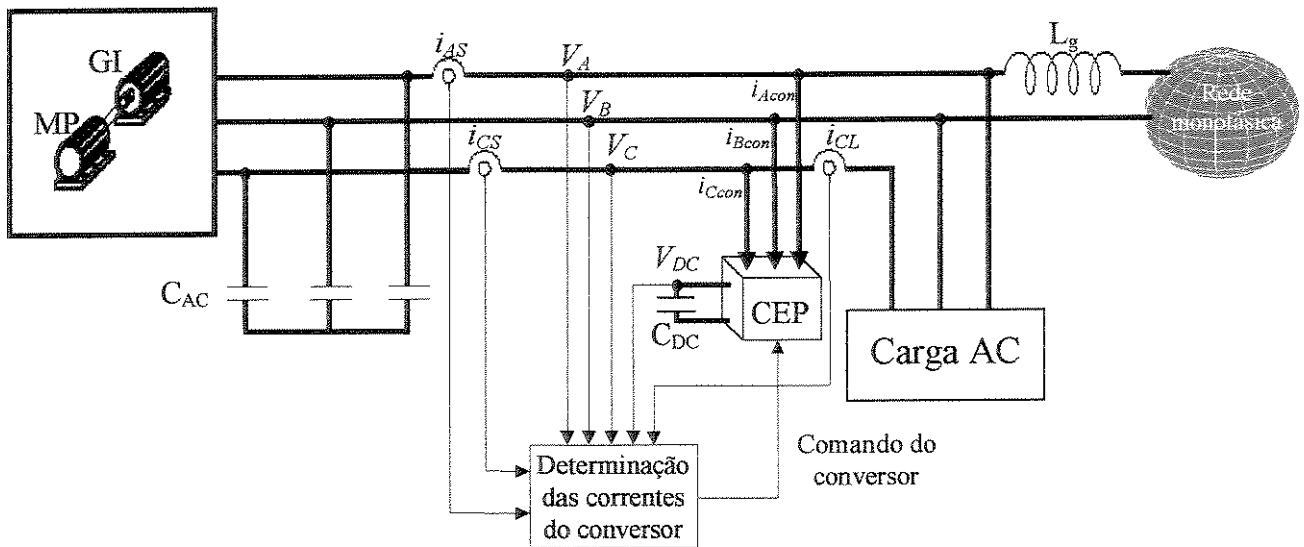


Figura 2.1.3. Circuito de potência e CEP trifásico com controle e com carga.

A posição de conexão da carga é relevante pois, da maneira indicada na figura 2.1.3, o CEP é capaz de refletir para o GI sempre uma carga equilibrada.

Se o sistema utilizado não for conectado diretamente à rede monofásica (figura 2.1.4) novamente há o equilíbrio tanto de I_G quanto de V_G . Como no sistema não isolado, há fluxo bidirecional de potência.

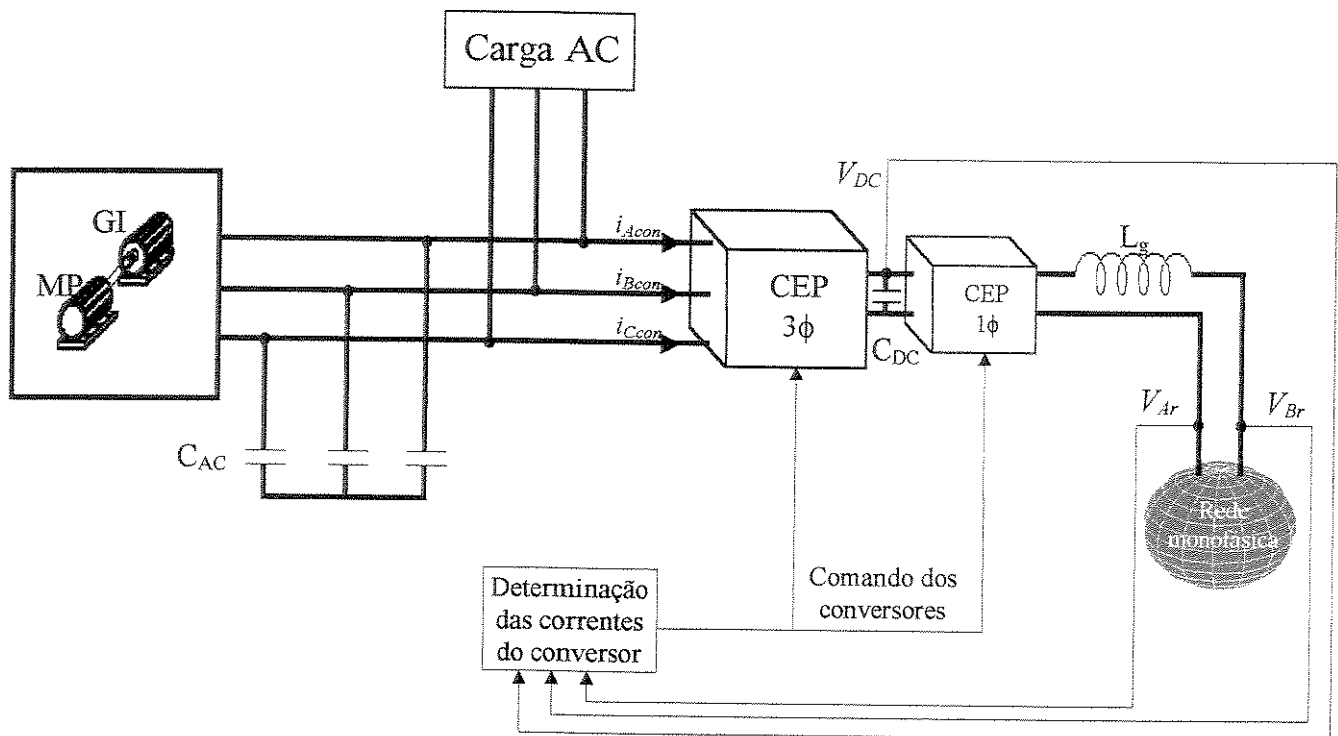


Figura 2.1.4. Circuito de potência com CEP trifásico e monofásico no sistema isolado com controle e com carga.

2.2. Conversor Estático de Potência

A implementação dos CEP's pode ser feita através de inversor monofásico (figura 2.2.1), inversor trifásico (figura 2.2.2), ou através de um sistema isolado (figura 2.2.3), um capacitor C_{DC} no barramento CC e indutores de filtragem L_F , nas saídas dos inversores. No ponto de conexão com o barramento monofásico é modelado um indutor L_g que representa a indutância da rede monofásica.

Nos casos monofásico e trifásico, o CEP trabalha como uma fonte de corrente controlada. No caso isolado, um dos CEP's trabalha como fonte de corrente (CEP monofásico) e o outro (CEP trifásico) é utilizado para definir tensão e frequência de trabalho para o GI.

Se o valor médio da potência ativa que circula pelo CEP não é nulo, há uma variação de energia acumulada no conversor e isso se reflete na variação de V_{DC} . Esta é uma situação indesejada e a eventual energia excedente presente no barramento CC deve ser, retirada caso contrário poderá danificar os CEP's. A solução deste problema no caso com CEP monofásico implica em grandes restrições de operação, como será mostrado [15].

O CEP trifásico não apresenta as restrições mencionadas no caso monofásico. Ele é capaz de promover balanceamento das variáveis elétricas do GI e também controlar a energia armazenada no barramento CC. No entanto, em sistemas que apresentam desequilíbrios de tensões e harmônicos nas correntes a estratégia de controle estudada pode tornar-se ineficiente, como se verá na seqüência deste trabalho.

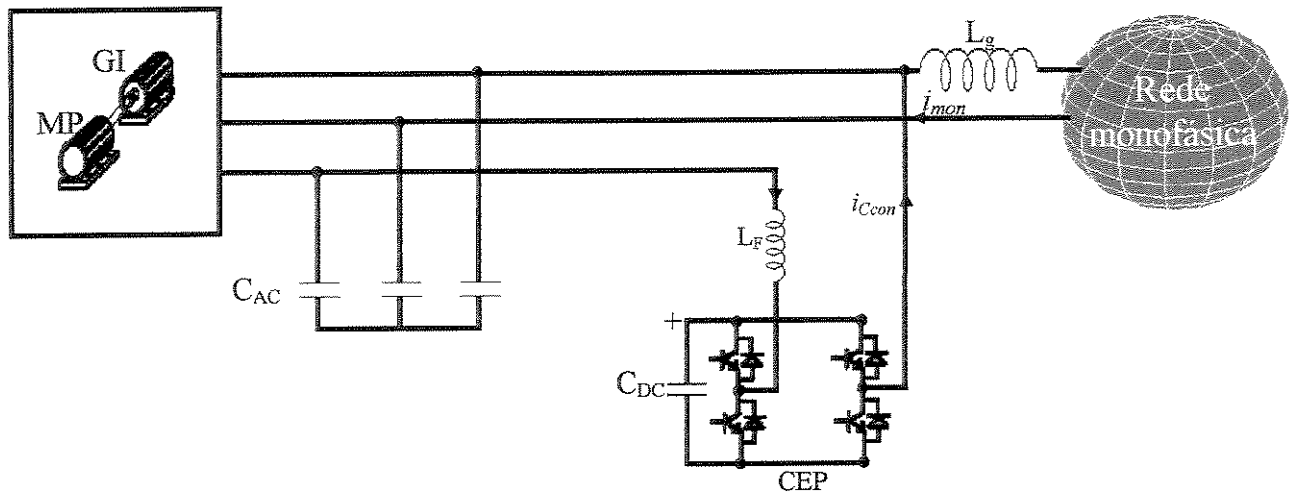


Figura 2.2.1. Configuração do circuito de potência e CEP monofásico.

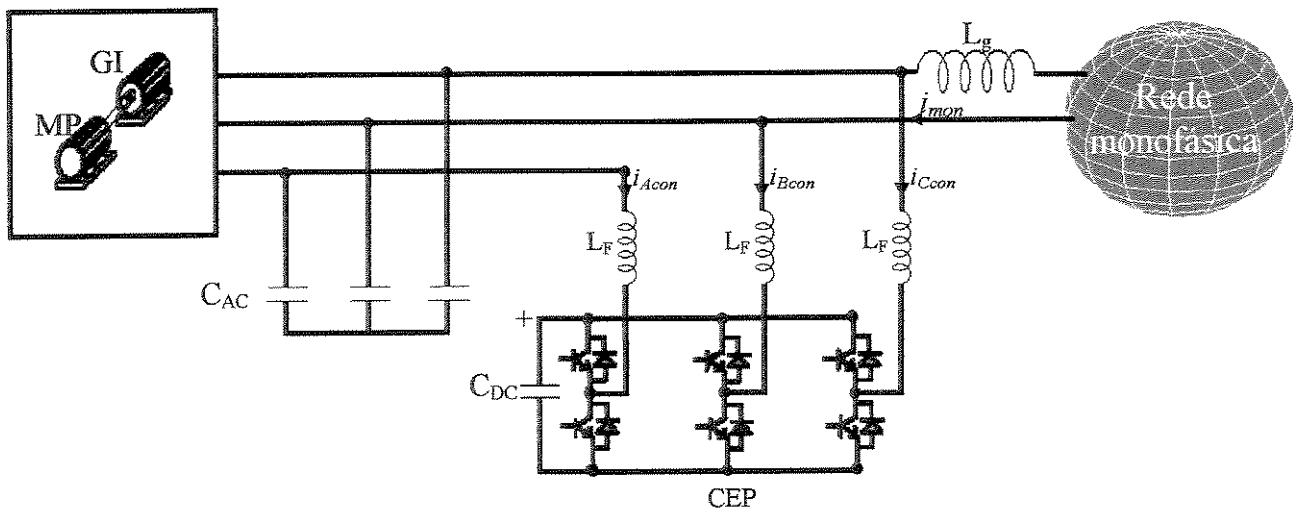


Figura 2.2.2. Configuração do circuito de potência e CEP trifásico.

Dados os problemas apresentados por estas estruturas, a solução encontrada foi empregar um sistema que isola o gerador da rede monofásica.

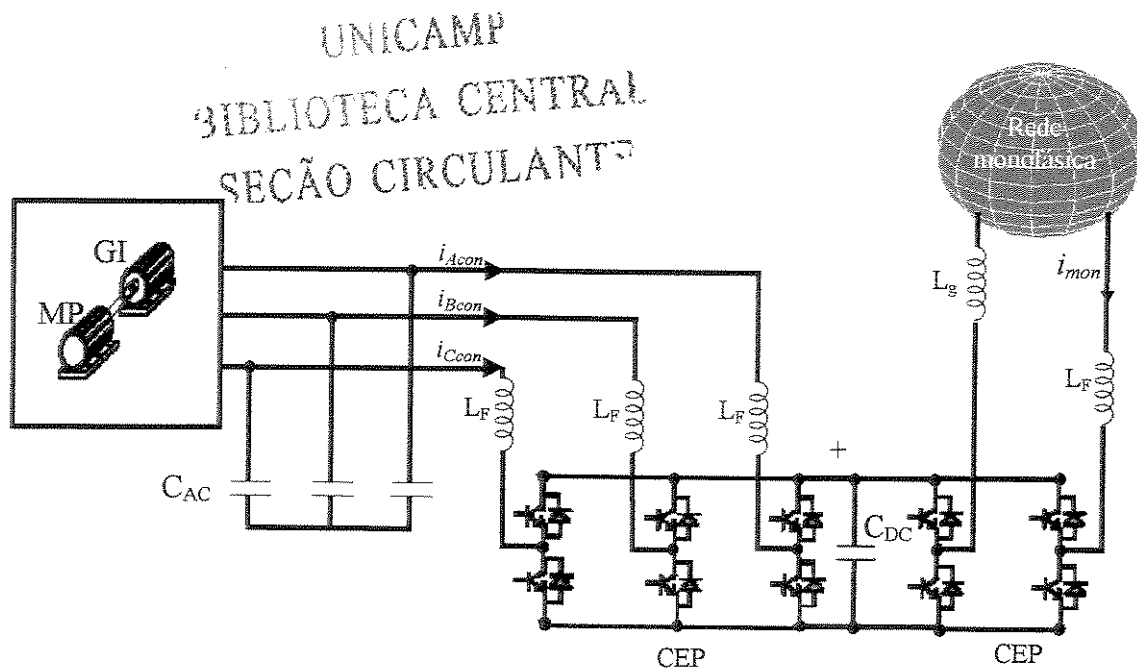


Figura 2.2.3. Configuração do circuito de potência com CEP trifásico e monofásico.

2.3. Determinação das Correntes de Compensação

2.3.a CEP monofásico e conexão direta à rede monofásica

Considerando o sistema mostrado na figura 2.2.1, a corrente de linha imposta pelo CEP na fase 'C' do GI, i_{CCP} , é a mesma corrente que circulará pelo CEP i_{Ccon} que será calculada utilizando-se a teoria da potência instantânea em sistemas a três fios, [6-11]. Neste cálculo são utilizadas as amostras de correntes nas fases 'A' e 'C' e as tensões de linha em seus terminais V_{AB} e V_{BC} . Para determinação de i_{CCP} é necessário ter conhecimento das correntes nas três fase do barramento. Medindo-se duas delas, a terceira é dada pela equação 2.3.1.

$$i_{BS} = -(i_{AS} + i_{CS}) \quad (2.3.1)$$

Uma vez determinada a potência instantânea gerada, é possível definir uma corrente para a fase 'C' que sintetiza um sistema balanceado. Dessa forma, esta corrente proporcionará um novo rearranjo para as correntes nas três fases e levará todo o conjunto ao equilíbrio.

Como já mencionado anteriormente, o sistema em estudo não possui componentes de seqüência

zero e ambos os sinais podem ser transformados para o domínio $\alpha\beta$ de acordo com as equações 2.3.2 e 2.3.3, respectivamente.

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} \quad (2.3.2)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{AS} \\ i_{BS} \\ i_{CS} \end{bmatrix} \quad (2.3.3)$$

Os seguintes fasores ilustram estas transformações (figuras 2.3.1 e 2.3.2):

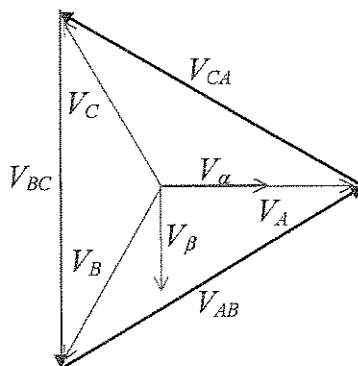


Figura 2.3.1. Fasores das transformações de tensões.

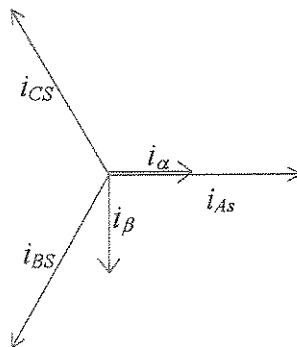


Figura 2.3.2. Fasores das transformações de correntes.

As potências P e Q são obtidas na equação 2.3.4.

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.3.4)$$

A determinação da corrente de compensação é feita a partir das tensões balanceadas ideais (V'_α e V'_β) no domínio $\alpha\beta$. Neste caso, como o que se deseja é um sistema equilibrado, uma alternativa para definição destas variáveis é utilizar a tensão de linha V_{AB} amostrada, que é a tensão que serve como referência para este sistema (tensão da rede monofásica). Multiplica-se por $\sqrt{2}/2$ e desfasa-se de 30° e 120° , resultando desta operação, respectivamente V'_α e V'_β . O apêndice B apresenta um detalhamento maior desta transformação.

Já as correntes de compensações no domínio $\alpha\beta$ são definidas por 2.3.5.

$$\begin{bmatrix} V'_\alpha \\ V'_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_{AB} \\ V'_{BC} \\ V'_{CA} \end{bmatrix} \quad (2.3.5)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha CP} \\ i_{\beta CP} \end{bmatrix} = \frac{1}{(V_\alpha'^2 + V_\beta'^2)} \begin{bmatrix} V'_\alpha & -V'_\beta \\ V'_\beta & V'_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix}$$

A corrente de compensação que deve ser imposta na fase 'C' do GI pelo CEP é i_{CCP} que, transformada para o sistema abc, resulta em.

$$i_{CCP} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot i_{\alpha CP} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_{\beta CP} \right) \quad (2.3.6)$$

De acordo com o que foi dito anteriormente, o CEP monofásico acumula parte da energia gerada, levando ao aumento da tensão no "link" CC, sendo esta uma situação indesejada de trabalho. Na figura 2.3.3 apresentam-se os fluxos de potências ativa no sistema

Numa situação de pior caso, não existe carga conectada ao GI e toda a potência ativa produzida pelo GI deve ser entregue à rede monofásica. A potência ativa média total gerada, supondo o sistema

equilibrado, é dada pela equação 2.3.7. Como $V_{Arms} = \frac{V_{ABrms}}{\sqrt{3}}$

$$\overline{P}_g = 3.V_{Arms} \cdot i_{ASrms} \cdot \cos(\phi) \quad (2.3.7)$$

$$\overline{P}_g = \sqrt{3}.V_{ABrms} \cdot i_{ASrms} \cdot \cos(\phi)$$

Onde ϕ representa o ângulo entre V_A e i_{AS} .

Já a potência ativa média enviada à rede monofásica é dada pela equação 2.3.8.

$$\overline{P}_S = V_{ABrms} \cdot i_{monrms} \cdot \cos(\delta) \quad (2.3.8)$$

E δ representa o ângulo entre V_{AB} e i_{mon} .

A potência ativa média absorvida pelo CEP é apresentada na equação 2.3.9.

$$\overline{P}_{con} = V_{CArms} \cdot i_{Cconrms} \cdot \cos(\alpha) \quad (2.3.9)$$

Sendo α o ângulo entre V_{CA} e i_{Ccon} .

Na ausência de cargas, $i_{Ccon} = i_{CCP}$.

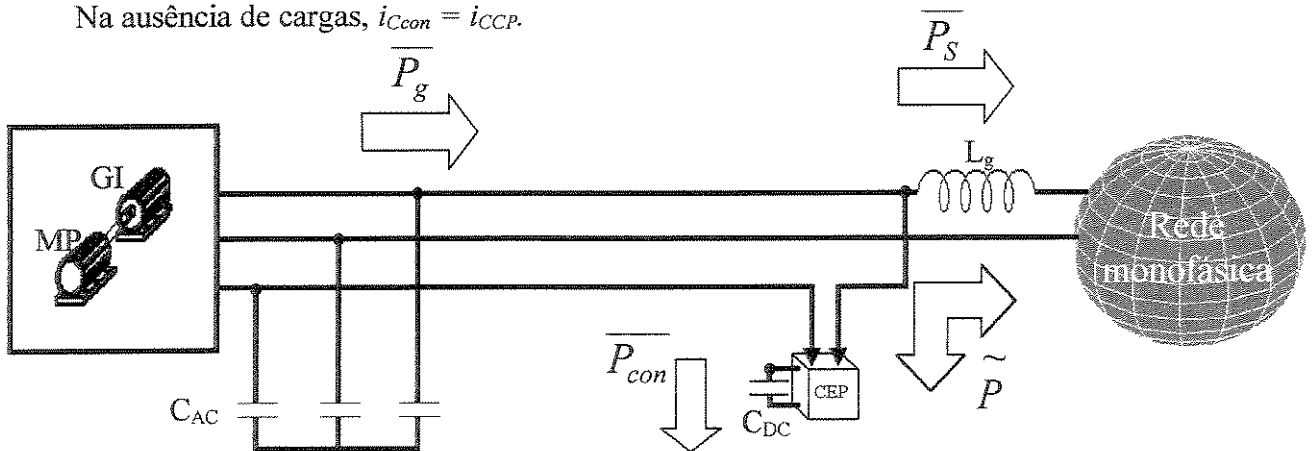


Figura 2.3.3. Fluxo de potência no sistema monofásico.

Sabe-se que o conversor não deve acumular energia. Assim, a potência ativa média gerada deve ser igual à potência ativa média enviada para a rede monofásica. Tal situação de trabalho, sem consumo de potência ativa média no CEP monofásico, pode ser analisada em termos de α e ϕ .

$$\overline{P}_{con} = 0 \text{ se } \alpha = \pm 90^\circ \quad (2.3.10)$$

Como, em termos de valores rms, tem-se: $i_{AS_{rms}} = i_{mon_{rms}}$

$$\overline{P}_g = \overline{P}_s \quad (2.3.11)$$

$$\sqrt{3} \cdot V_{AB_{rms}} \cdot i_{AS_{rms}} \cdot \cos(\phi) = V_{AB_{rms}} \cdot i_{mon_{rms}} \cdot \cos(\delta) \quad (2.3.12)$$

$$\delta = \cos^{-1}(\sqrt{3} \cdot \cos(\phi)) \quad (2.3.13)$$

Para que a expressão 2.3.13 possua solução real é preciso que:

$$\sqrt{3} \cdot \cos(\phi) \leq 1 \quad (2.3.14)$$

Resolvendo a equação 2.3.14 tem-se a faixa de valores de valores possíveis para ϕ .

$$\phi \geq 55^\circ \text{ ou } \phi \leq -55^\circ \quad (2.3.15)$$

Como as equações 2.3.10 e 2.3.15 devem ser satisfeitas, a máquina possui duas únicas situações de trabalho.

Assim, após esta análise, encontram-se dois valores para α ($\alpha = \pm 90^\circ$) e dois valores para ϕ . Na primeira situação, com $\alpha = -90^\circ$ e de acordo com o diagrama da figura 2.3.4, chega-se a $\phi = -60^\circ$. Isto, por sua vez, faz com que a máquina de indução trabalhe com gerador.

Esta combinação de ângulos é única que permite que não haja acúmulo de energia no CEP. Em qualquer outro caso haveria fluxo de potência ativa média por ele.

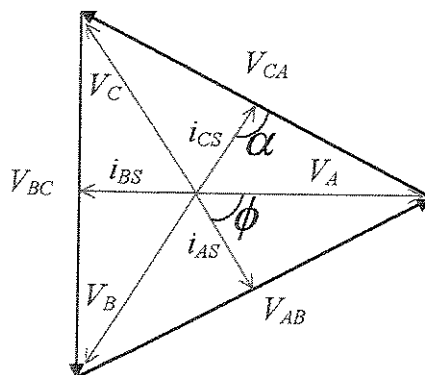


Figura 2.3.4. Triângulo de correntes e tensões do GI modo gerador.

Na segunda situação, $\alpha = 90^\circ$ obtém-se do diagrama da figura 2.3.5 um valor de $\phi = 120^\circ$. Com isso, a máquina torna-se motor, o que não é desejado.

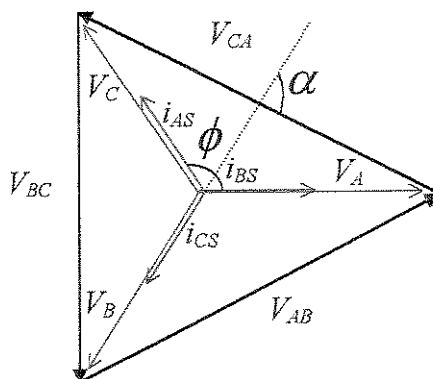


Figura 2.3.5. Triângulo de correntes e tensões do GI modo motor.

De acordo com o mostrado, a operação como motor é descartada e a operação como gerador só seria possível com aquelas restrições para os ângulos α e ϕ . Como a teoria da potência instantânea não coloca qualquer restrição de fase na obtenção da corrente de compensação, não é possível ter potência ativa média nula no conversor monofásico e equilibrar a máquina para qualquer situação de operação utilizando o CEP monofásico. No capítulo seguinte são apresentadas simulações que confirmam isto.

2.3.b CEP trifásico e conexão direta à rede monofásica

No caso trifásico, define-se uma corrente i_{CCP} semelhante à definição anterior. Na presença de carga, a corrente que deve circular na fase 'C' do GI continuará sendo i_{CCP} , mas a que deve ser imposta no ramo 'C' do conversor será definida de acordo com a equação 2.3.16.

$$i_{Ccon} = i_{CCP} - i_{CL} \quad (2.3.16)$$

Onde i_{CL} é a corrente que circula na fase 'C' da carga.

Com isso, continua-se impondo sobre a fase 'C' do GI uma corrente que o equilibre, idêntica ao caso com CEP monofásico.

Para calcular as correntes nos outros ramos do CEP garantindo um fluxo zero de potência ativa média por ele, utiliza-se do seguinte procedimento: determina-se a potência ativa instantânea consumida

pele CEP, de acordo com a equação 2.3.17.

$$P_{con} = V_{AB} \cdot i_{Acon} - V_{BC} \cdot i_{Ccon} \quad (2.3.17)$$

Através de um filtro passa-baixa, remove-se o valor oscilante de p_{con} , sendo que o nível médio resultante será comparado com zero e o erro integrado, de forma que seja nula a potência média que circula pelo CEP em regime permanente. Na presença deste erro, multiplica-se o mesmo pela forma de tensão V_{AB} definindo-se assim a corrente da fase 'B' i_{Bcon} necessária para retirar do CEP o montante de potência que entra pela fase 'C'. Após este cálculo, adiciona-se i_{Bcon} a i_{Ccon} , troca-se o sinal desta operação e define-se a corrente i_{Acon} .

Na prática, o acúmulo de potência no CEP pode ser verificado pelo aumento da tensão no barramento CC. Na figura 2.3.6 é apresentado um diagrama circuitual que realiza o procedimento mencionado.

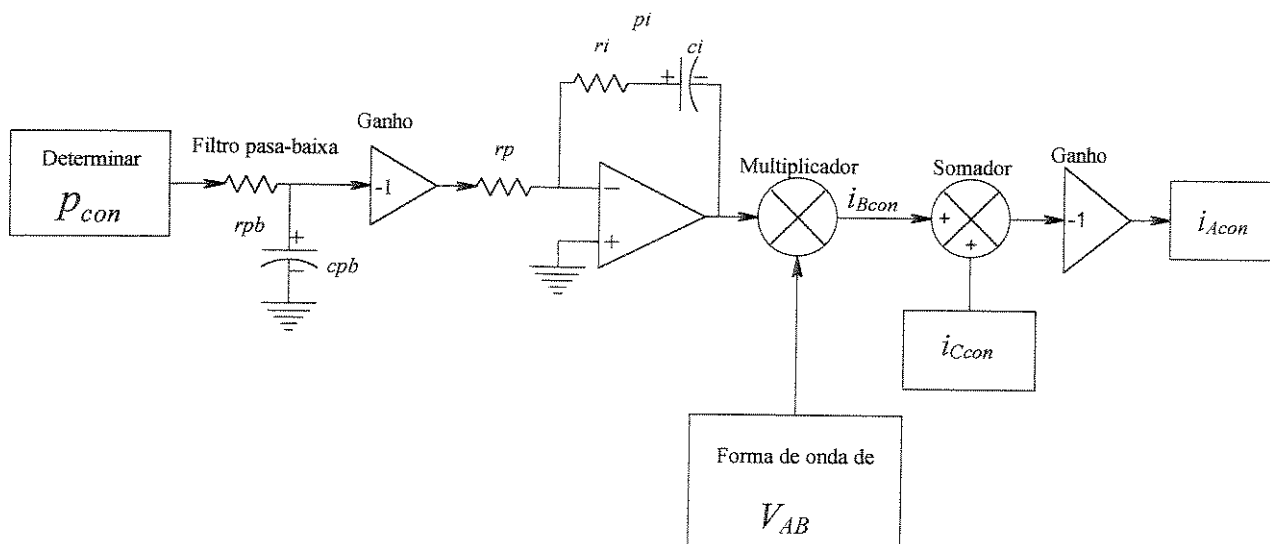


Figura 2.3.6. Definição das correntes do CEP trifásico.

A figura 2.3.7 apresenta um diagrama que contém o fluxo de potência do CEP trifásico com isso, é possível analisar sua vantagem quando comparado ao CEP monofásico.

Em seguida, são apresentados os algoritmos de cálculo que sintetizam o que foi descrito anteriormente.

A rotina principal faz a leitura das variáveis necessárias à implementação do controle, a inicialização do DSP, a defasagem da tensão V_{AB} , a transformação do abc para o $\alpha\beta$ das tensões e a chamada da sub-rotina de compensação (figura 2.3.8).

Para a rotina de compensação faz-se: cálculo de P e Q , alteração do vetor V_{def30° e V_{def120° , cálculo da corrente compensada na fase 'C' do GI e chamada da sub-rotina de referência de corrente (figura 2.3.9).

A rotina de referência de corrente define: as correntes sintetizadas pelo CEP trifásico e seus limites máximos de trabalho, figura 2.3.10. As rotinas de inicialização são responsáveis pela inicialização do DSP isto é, permitem o adequado funcionamento do DSP.

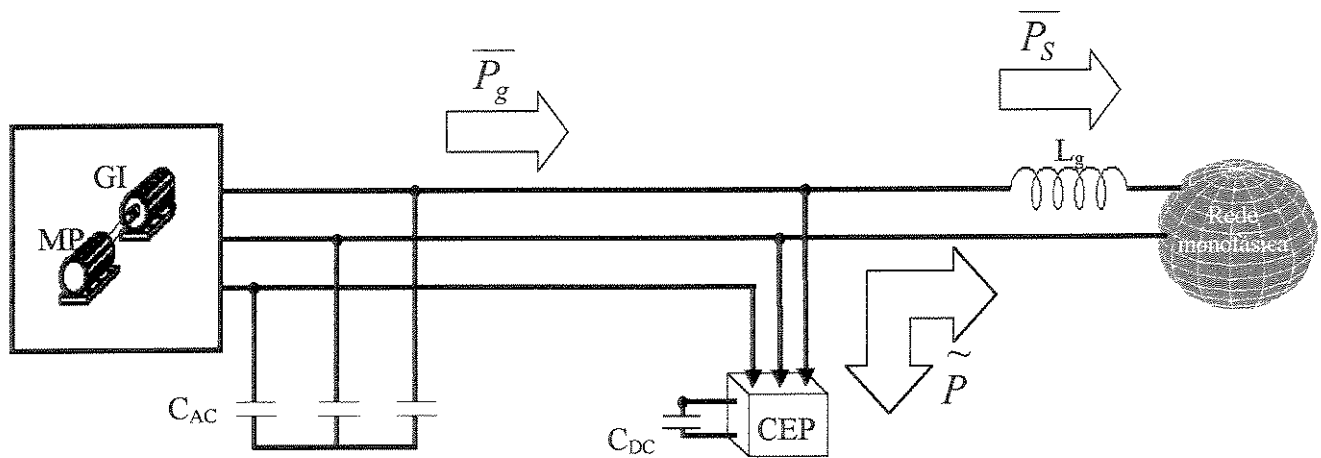


Figura 2.3.7. Fluxo de potência no sistema trifásico.

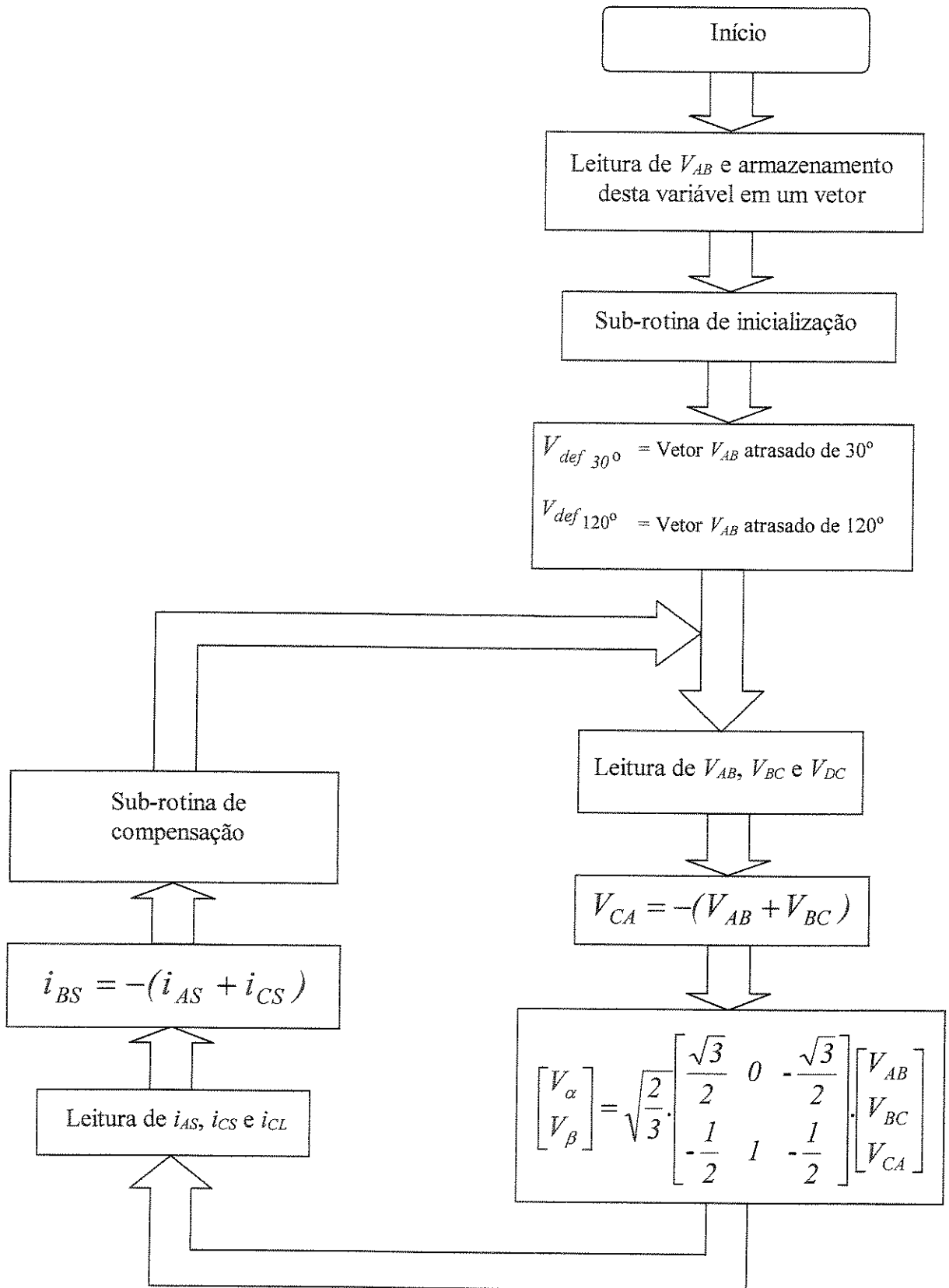


Figura 2.3.8. Rotina principal.

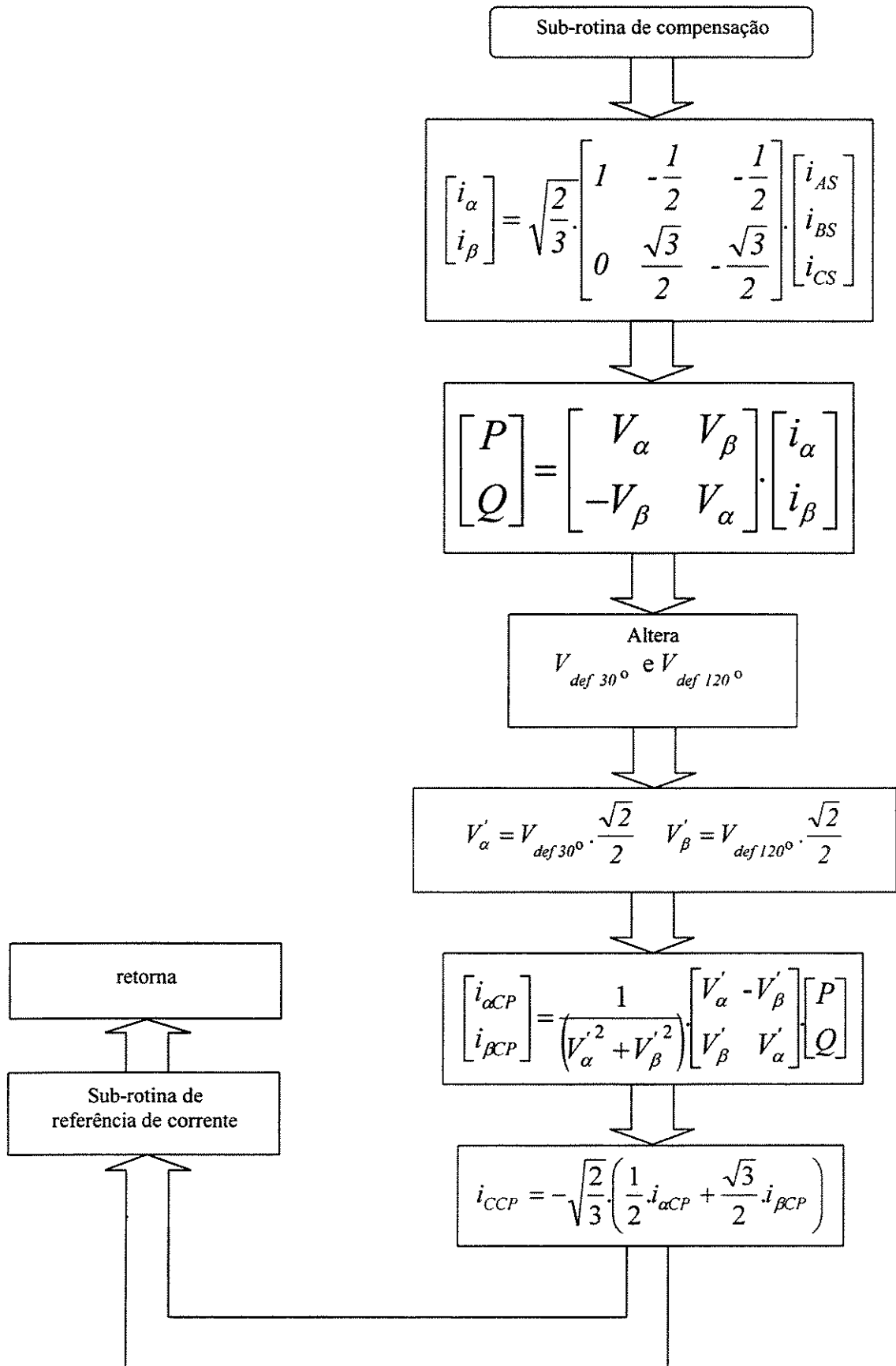


Figura 2.3.9. Rotina de compensação.

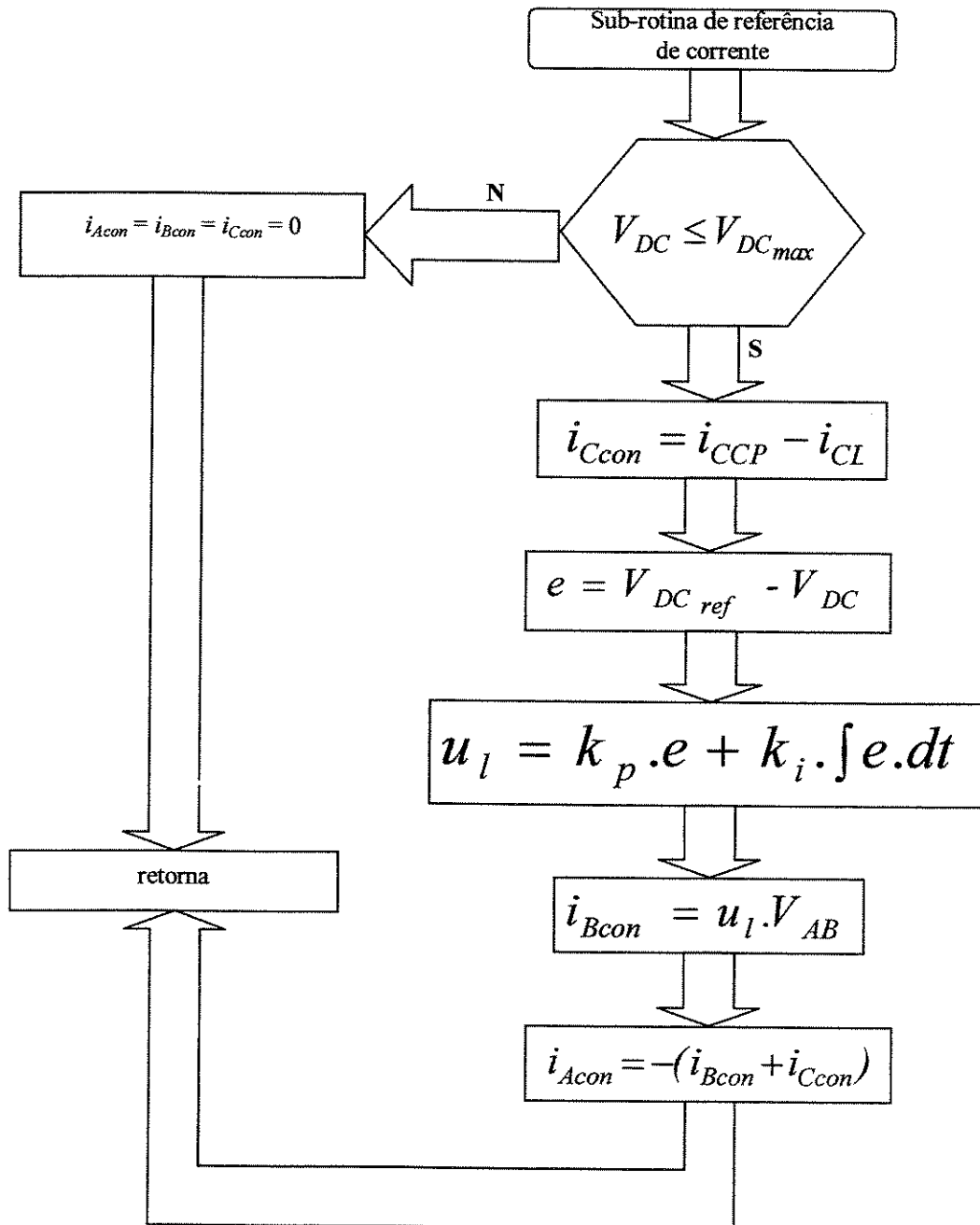


Figura 2.3.10. Rotina de referência de corrente.

2.3.c CEP monofásico e trifásico conexão não direta à rede monofásica

Nesta estrutura existem dois conversores, o CEP trifásico é responsável pela imposição da frequência de trabalho do GI e das tensões de linha.

O CEP monofásico funciona, com um controle por histerese, de modo que o excesso de energia acumulado no “link” CC seja enviada à rede monofásico. Um controlador pi gera um erro que é multiplicado pela forma de onda de V_{AB} gerando assim, as referências para o controle por histerese (figura 2.3.11).

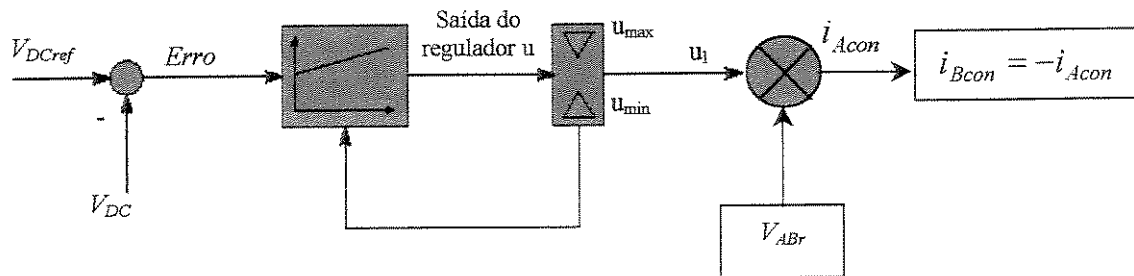


Figura 2.3.11. Definição das correntes do CEP.

O excesso de energia ativa é enviada à rede monofásica se a carga não for capaz de absorvê-la. Para cargas de maior porte, onde o GI sozinho não é capaz de fornecer toda a energia necessária para alimentá-la, a rede através dos conversores fornecerá o excedente. É apresentado na figura 2.3.12 o fluxo de potência entre GI e rede monofásica.

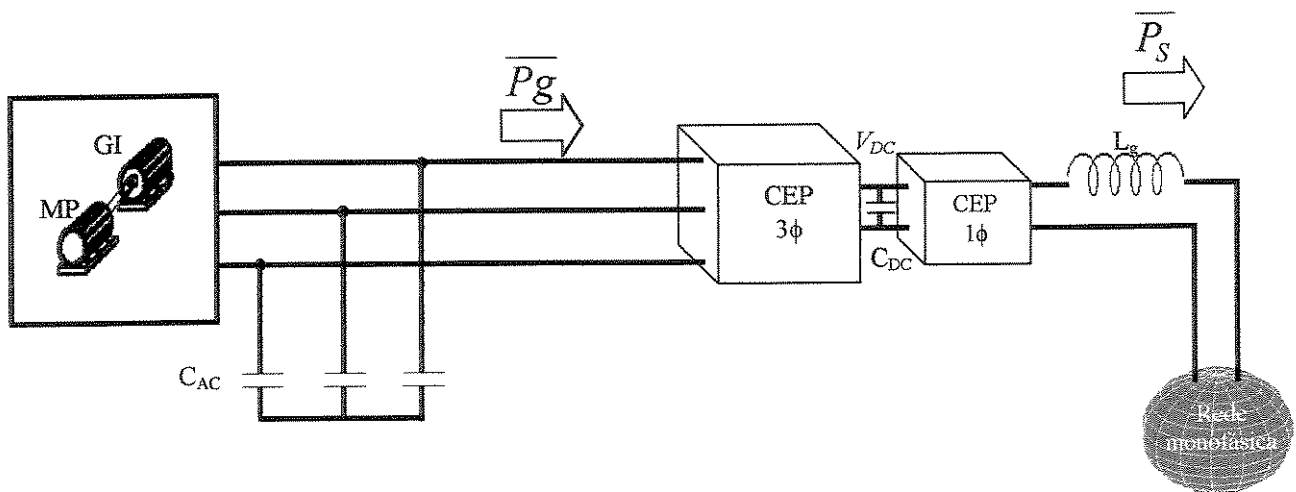


Figura 2.3.12. O fluxo de potência no sistema.

Na figura 2.3.13 é visto o algoritmo de controle para comando do conversor monofásico. O conversor trifásico é autônomo, ele opera com modulação PWM, frequência fundamental constante (60 Hz) e índice de modulação fixo.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

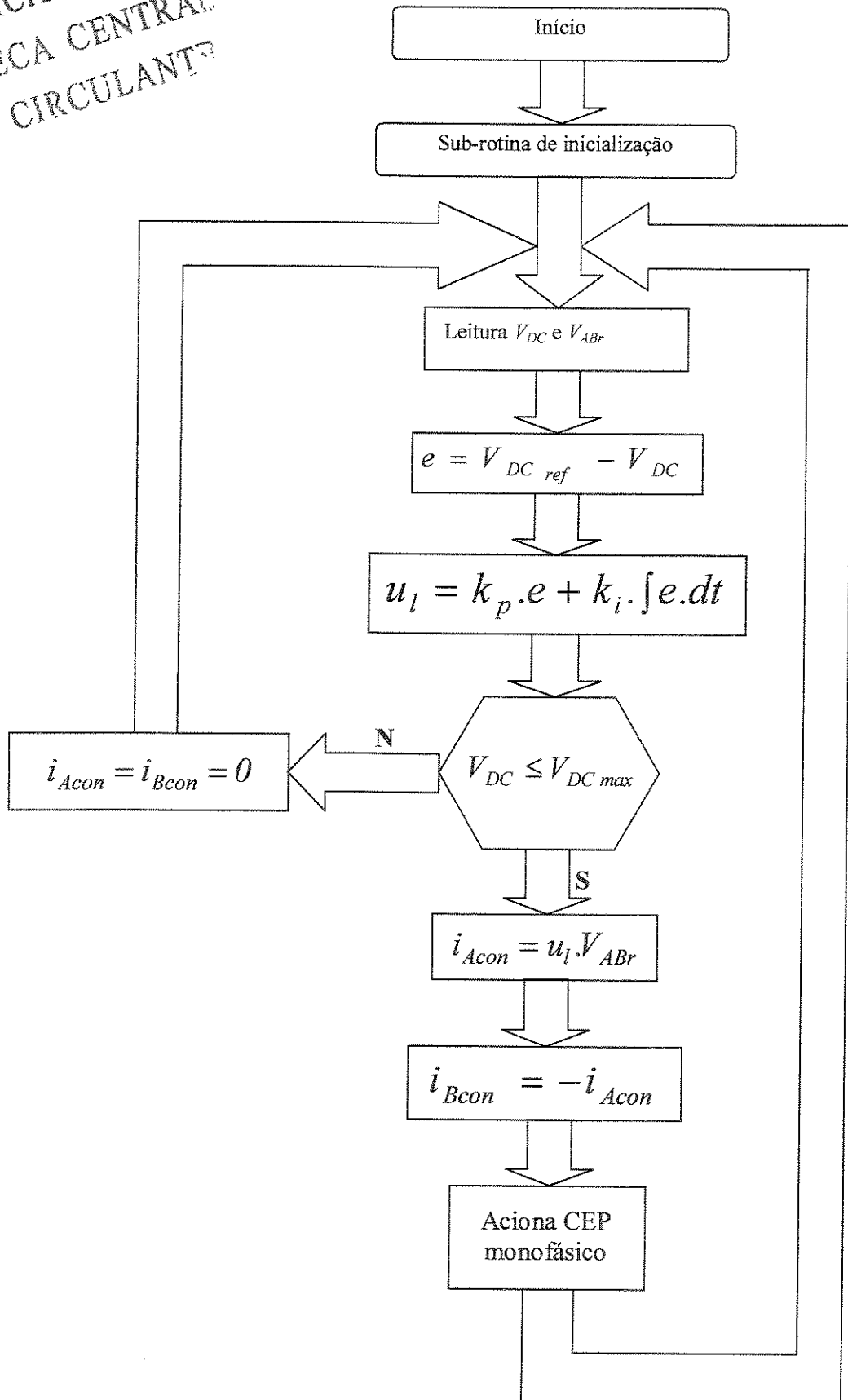


Figura 2.3.13. Rotina principal.

O algoritmo contém rotina de inicialização do DSP, leitura das variáveis necessárias a implementação do controle e definição das correntes do CEP monofásico.

UNICAMP

BIBLIOTECA CENTRAL

SEÇÃO CIRCULANTE

2.4. Conclusões

Neste capítulo, foram apresentadas algumas possibilidades para implementação do sistema: uma monofásica e outra trifásica com conexão direta entre GI e rede monofásica e uma que tem isolamento entre rede e GI.

Em seguida, foram mostradas algumas propriedades das estruturas com conexão direta ao barramento monofásico, assim como foi feita uma análise da estrutura isolada.

As variáveis monitoradas pelo controle foram definidas, tornando-se possível a implementação do controle digital. O equacionamento para determinação das correntes do CEP nos sistema com conexão direta, não importando se o sistema está frente a carregamentos ou não, também foi apresentado.

RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

A conexão de um GI a uma rede monofásica alimentando diferentes tipos de cargas foi estudada preliminarmente com o auxílio do simulador de circuitos elétricos Pspice®.

São simuladas situações com cargas de diferentes tipos (ativas, reativas, lineares, não-lineares, balanceadas e não balanceadas) verificando o funcionamento do sistema.

Os capacitores C_{AC} são de 37 μF e são modelados com uma resistência em série. L_g é a indutância no ponto de acoplamento da rede monofásica, com valor de 2 mH.

As potências ativas instantâneas P_g (gerada), P_{con} (CEP), P_L (carga), P_S (injetada ou absorvida da rede monofásica), e as potências reativas instantâneas Q_g (entre as fases do GI), Q_L (entre as fases da carga), e Q_{con} (entre as fases de conexão do CEP), são utilizadas de forma a verificar o comportamento do GI frente às várias situações de trabalho. A magnitude da grandeza Q é obtida pelo produto vetorial de tensão por corrente e é melhor esclarecida no apêndice C.

Nas simulações os valores médios das potências são obtidos por meio de filtros passa-baixas, o que explica as oscilações residuais nos sinais mostrados. Outro ponto a ser salientado é que os valores médios de potência plotados partem de valores pequenos devido às condições iniciais nulas utilizadas na simulação.

3.1. Gerador Conectado Diretamente ao Barramento Monofásico sem CEP

3.1.a Sem carga

Na análise desse tipo de conexão, figura 3.1.1, são verificados os comportamentos tanto das

correntes como das tensões de linha do GI. Do ponto de vista da operação equilibrada do GI, a simples conexão a uma rede monofásica não é o melhor caminho pois, embora em termos de defasagem das tensões e correntes do GI não exista um grande problema, em relação às amplitudes das mesmas pode-se observar um grande desbalanço (figura 3.1.2) [15].

Já a corrente injetada na rede monofásica possui um formato aproximadamente senoidal cuja distorção é decorrência da saturação do GI, (presente no modelo) que introduz pequenas 3ª e 5ª harmônica comparada com a fundamental (figura 3.1.2).

Na figura 3.1.3 é visualizado que P_g e P_S são idênticas (as curvas estão superpostas) resultando nos mesmos valores instantâneos e médios. Se o valor de $\overline{P_S}$ é positivo, toda a potência ativa média gerada é entregue à rede monofásica. Caso este valor fosse negativo, à rede estaria enviando energia para a máquina e nestas condições o GI seria motorizado.

A potência reativa gerada indica a presença de componentes instantânea e média na seção do GI. A quantidade referente à potência reativa média existe porque os capacitores C_{AC} estão ligeiramente sobre dimensionados. Já o elevado valor da potência reativa oscilante é devido a conexão direta do GI à rede monofásica (figura 3.1.3).

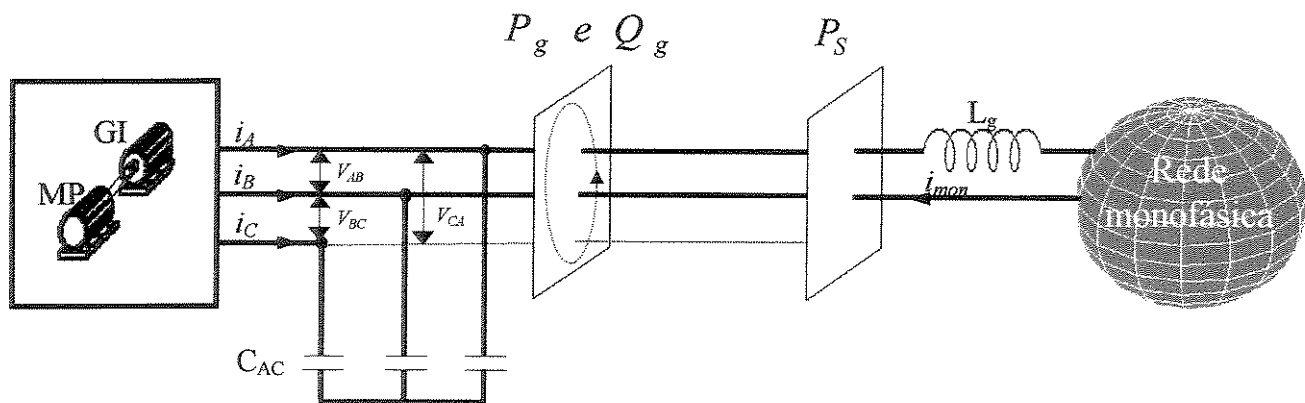


Figura 3.1.1. Variáveis analisadas no sistema sem carga.

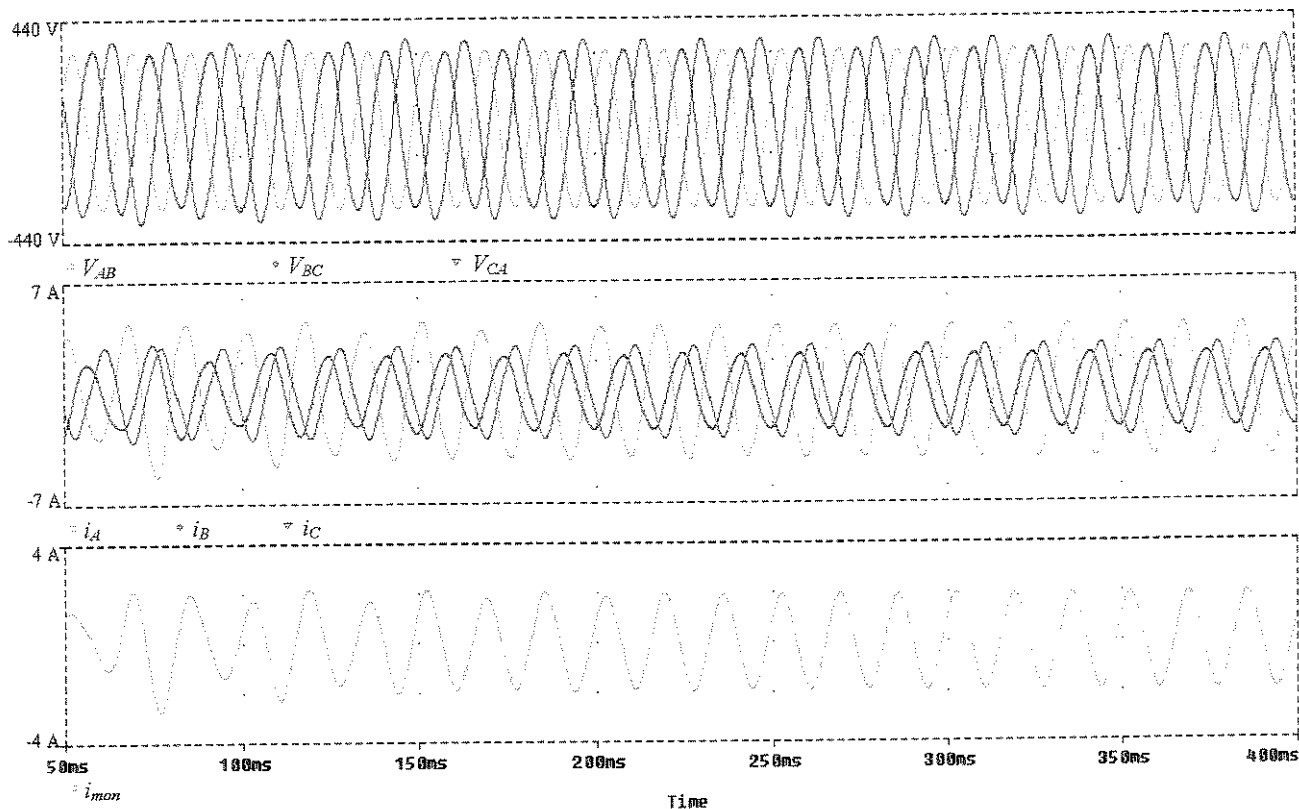


Figura 3.1.2. Tensões e correntes de linha do GI e corrente na rede monofásica.

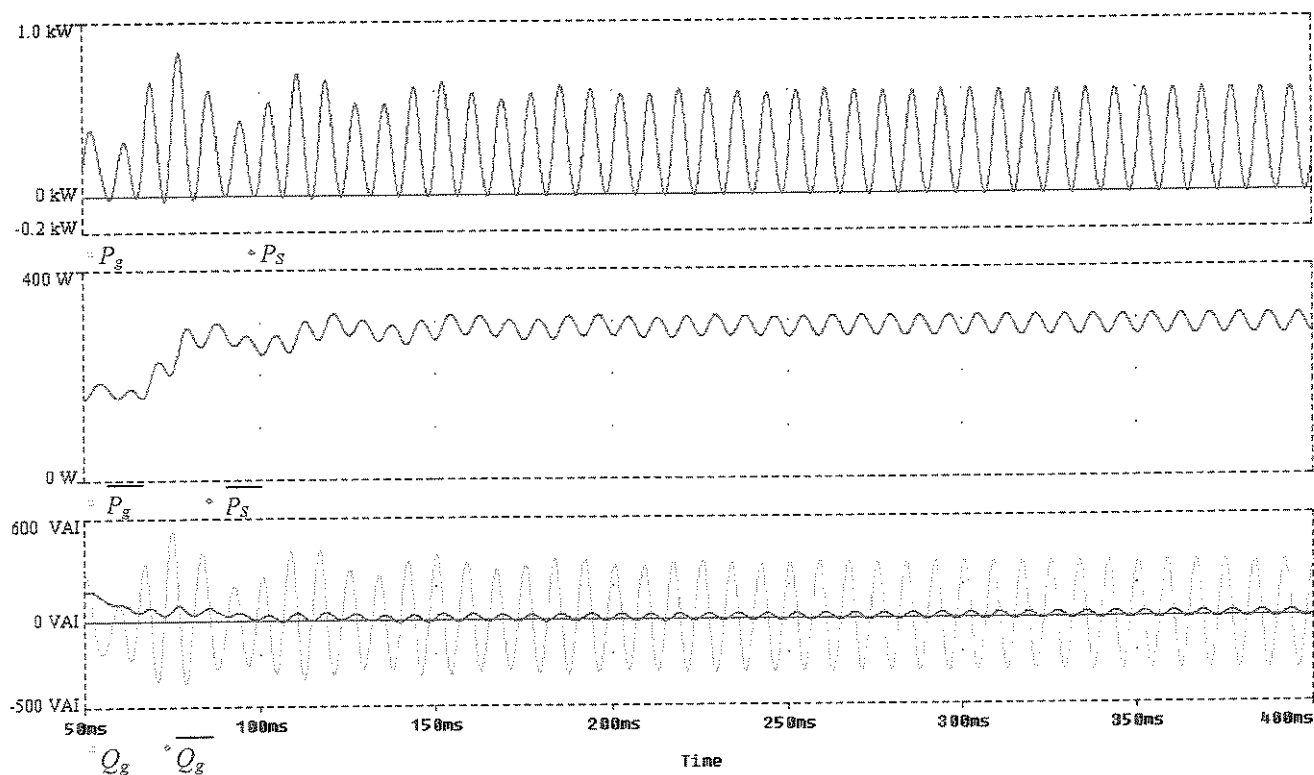


Figura 3.1.3. Potências ativa e reativa com valores instantâneos e médios.

3.1.b Com carga resistiva equilibrada

Neste item, uma carga trifásica equilibrada e resistiva é conectada ao conjunto, conforme a figura 3.1.4. Enquanto não estiver presente no sistema, o comportamento é semelhante ao do item 3.1.a. Após sua inserção, a mesma colabora para proporcionar um melhor balanceamento nas tensões e correntes do GI. Este equilíbrio se torna bastante efetivo se a potência ativa média produzida pelo GI for praticamente toda enviada à carga trifásica [15].

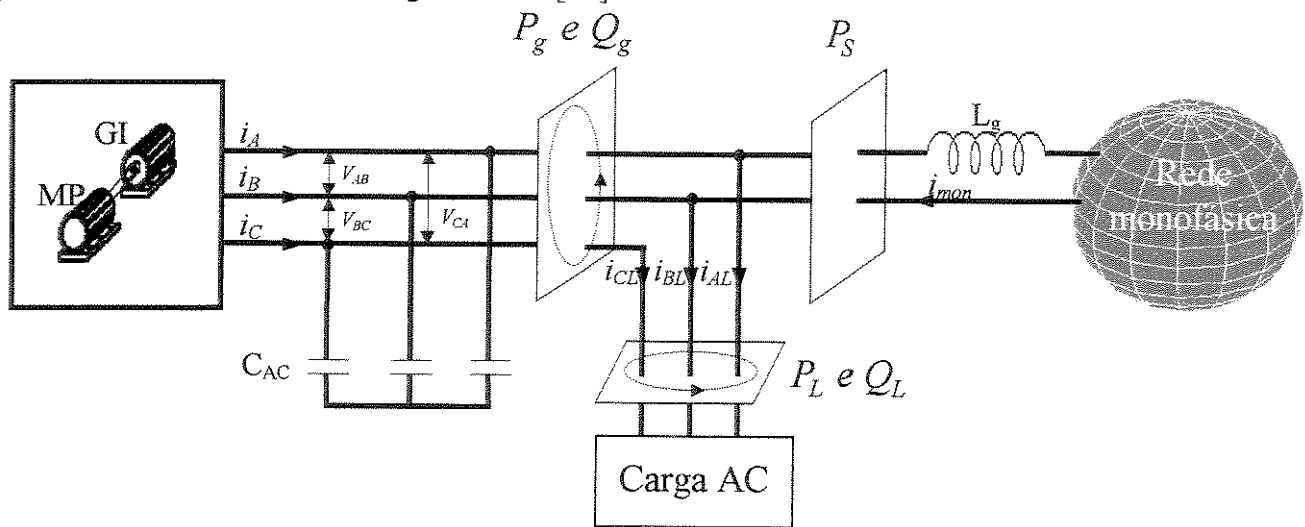


Figura 3.1.4. Variáveis analisadas no sistema com carga trifásica.

Como mostra a figura 3.1.5, a carga trifásica é conectada por volta de 100 ms e, após alguns ciclos de rede, o sistema apresenta-se com as tensões e correntes no GI balanceadas. Esta figura apresenta ainda as correntes de carga com um comportamento balanceado tanto em módulo quanto em fase. A potência da carga é equivalente a 115% do que é gerado, sendo que a rede monofásica contribui com apenas 15% do montante total para alimentar carga.

A corrente injetada na rede monofásica apresenta diminuição em sua amplitude e em sua fase ocorre um giro de 180° . Isto significa que a rede, que anteriormente absorvia potência ativa do GI, agora fornece parte da energia para alimentar a carga.

As potências ativa gerada, na fonte e na carga, em termos de seus valores instantâneos e médios, são mostradas na figura 3.1.6. Devido à absorção de energia da rede monofásica, o valor médio da

potência ativa da rede torna-se negativo. Isso confirma que o GI e rede trabalham em cogeração.

A potência reativa média, no barramento do GI, é resultante do sobre dimensionamento dos capacitores de excitação e, a potência reativa oscilante gerada é minimizada devido à característica equilibrada da carga. Para a carga, tanto sua potência reativa instantânea quanto a potência reativa média apresentam-se nulas devido à sua característica resistiva e equilibrada (figura 3.1.6).

Nas figuras 3.1.7. e 3.1.8 ocorre uma situação semelhante à das figuras 3.1.5 e 3.1.6. A carga é equilibrada mas consome pouca energia não sendo capaz de equilibrar o sistema. Todas as considerações anteriores relacionadas tanto a potência ativa quanto a reativa são válidas para esta situação.

Devido a carga consumir uma quantidade de energia inferior à quantidade gerada, a rede monofásica não está atuando como fonte de energia e sim como receptor. Nesta situação, a potência da carga é equivalente a 33% do que é gerado, já a rede monofásica absorve os 67% restantes.

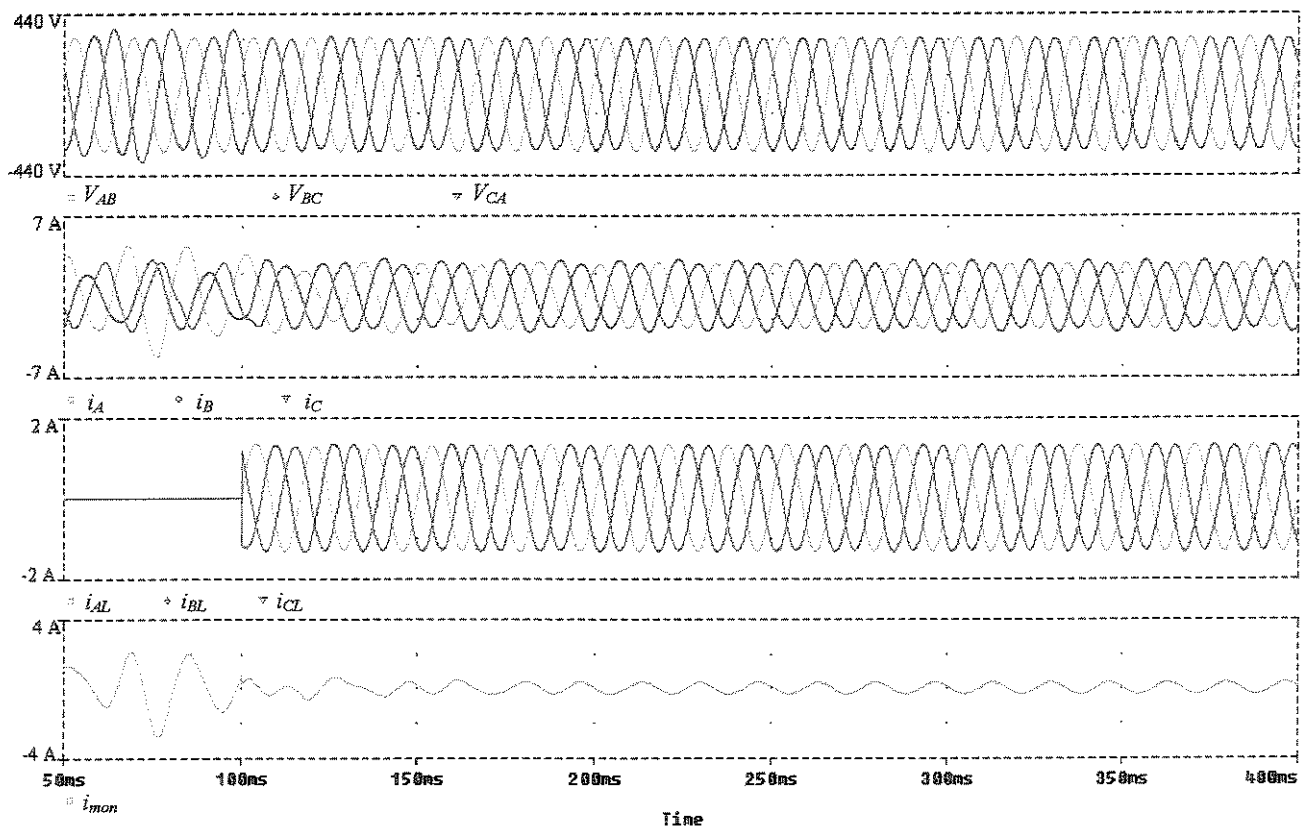


Figura 3.1.5. Tensões e correntes de linha do GI, correntes na carga trifásica e corrente na rede monofásica.

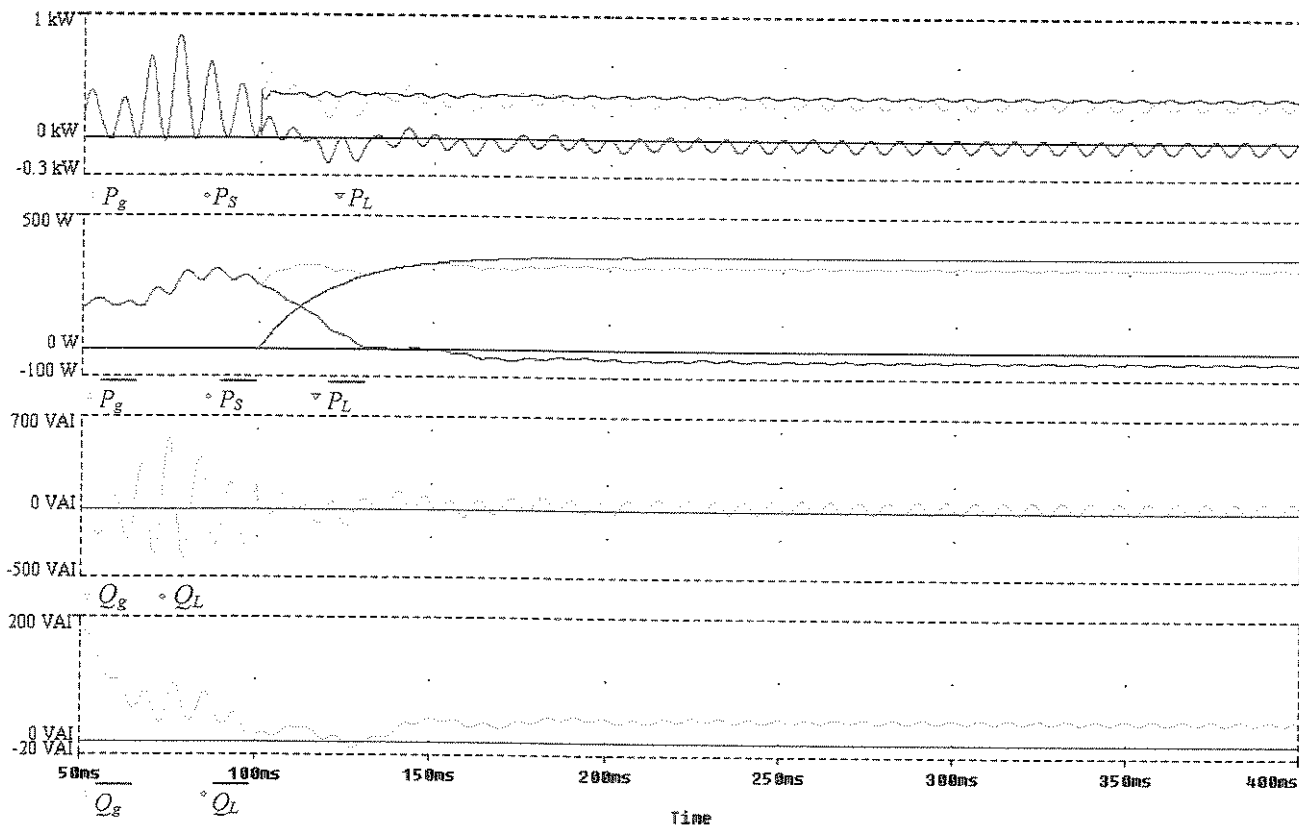


Figura 3.1.6. Potências ativa e reativa com valores instantâneos e médios.

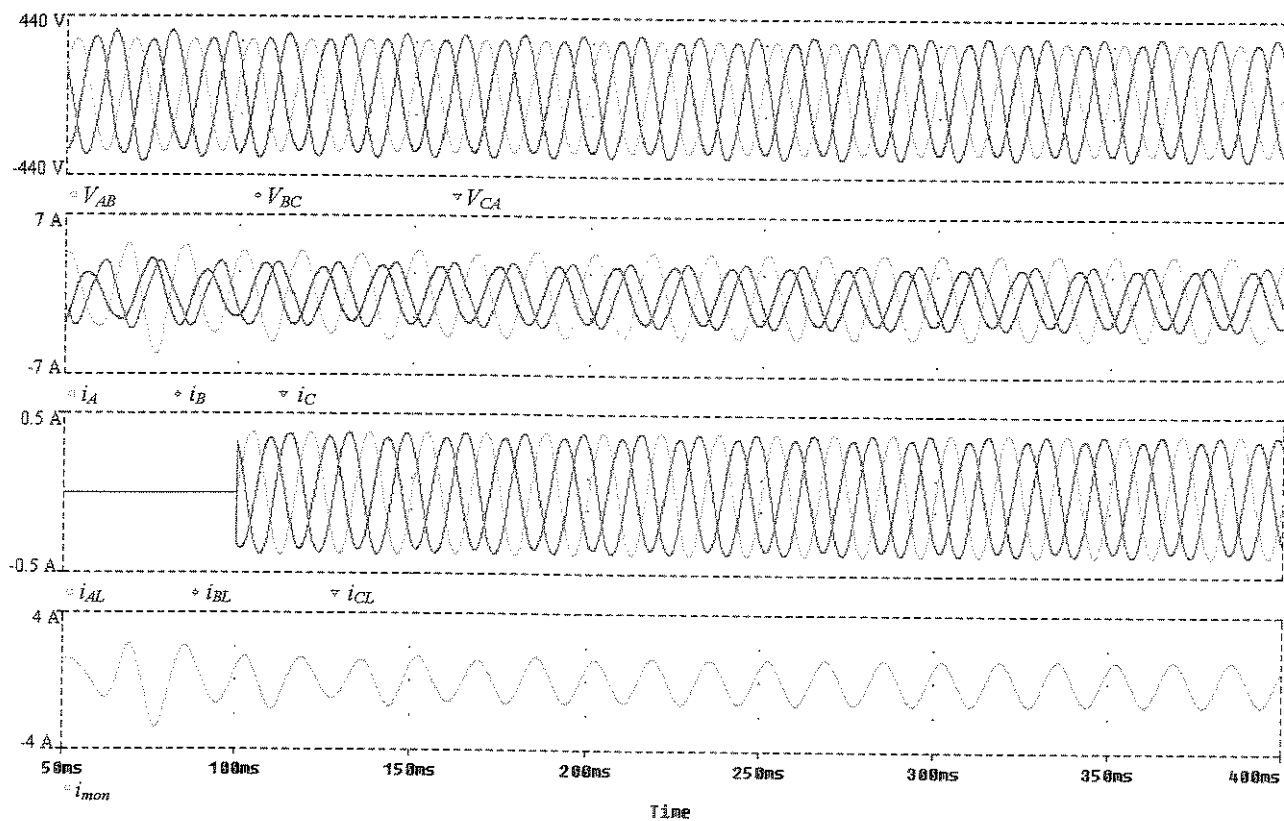


Figura 3.1.7. Tensões e correntes de linha do GI, correntes na carga trifásica e corrente na rede monofásica.

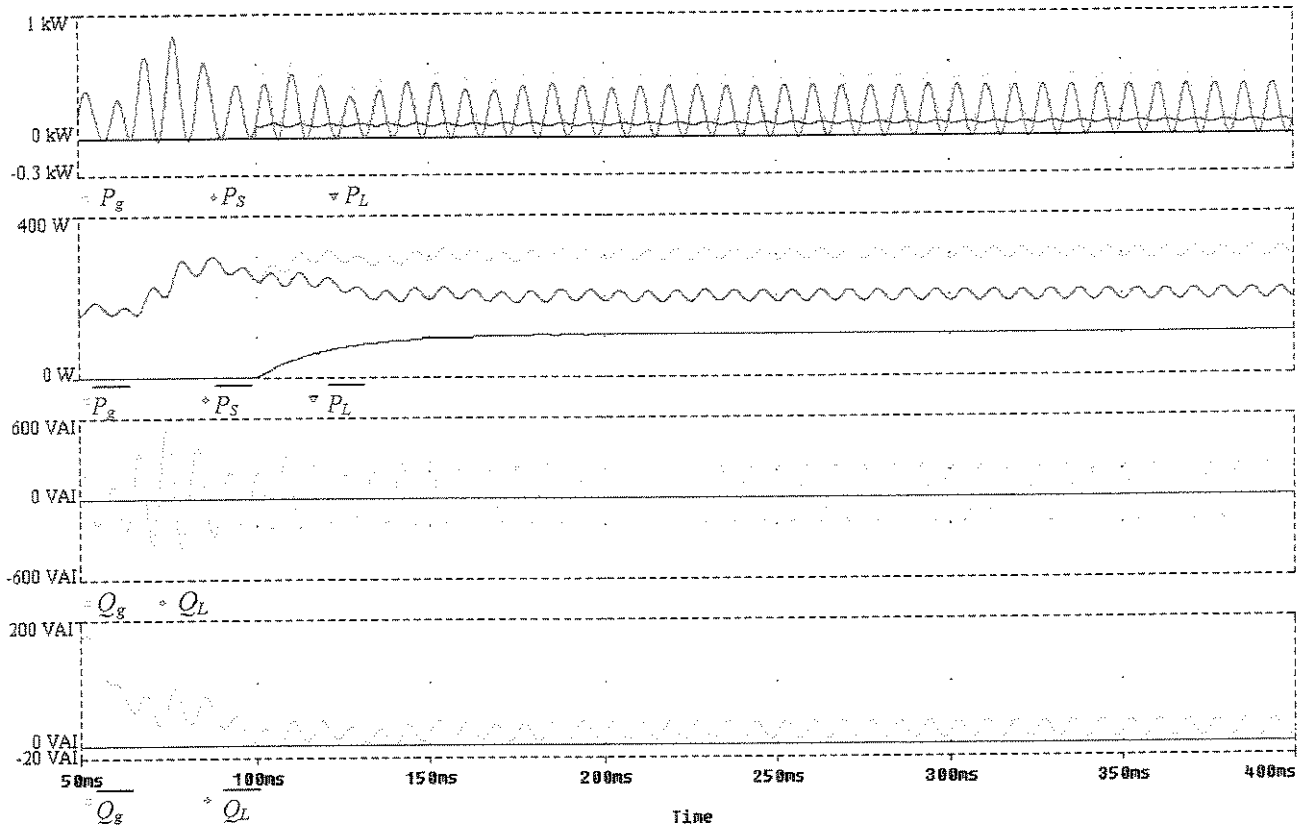


Figura 3.1.8. Potências ativa e reativa com valores instantâneos e médios.

3.1.c Com carga resistiva desequilibrada

Em outra situação, modificou-se o tipo de carga conectada ao GI, passando-se a ter uma carga resistiva desequilibrada a qual produzirá distúrbios mais ou menos acentuados dependendo do desbalanço entre as resistências da carga. Nesta situação, mesmo se fosse consumida toda potência gerada, não haveria equilíbrio de tensões e correntes no GI, como mostra a figura 3.1.9.

Para o desequilíbrio imposto pela carga não foram observadas diferenças significativas nas potências ativas em relação aos resultados apresentados para carga equilibrada (figura 3.1.10).

A potência reativa média continua existindo entre as fases do GI, de acordo com o que foi apresentado no item anterior. Devido à característica desequilibrada da carga, a componente oscilante da potência reativa gerada volta a ser significativa quando comparada à situação de carga equilibrada que consome praticamente toda a energia produzida pelo GI. Já a presença das potências reativa instantânea e média entre os terminais da carga é devido ao desbalanço entre as fases da carga (figura 3.1.10).

Agora, a potência da carga (inserida em 100 ms) é equivalente a 40% do que é gerado, já a rede monofásica absorve 60% do que é gerado pelo GI.

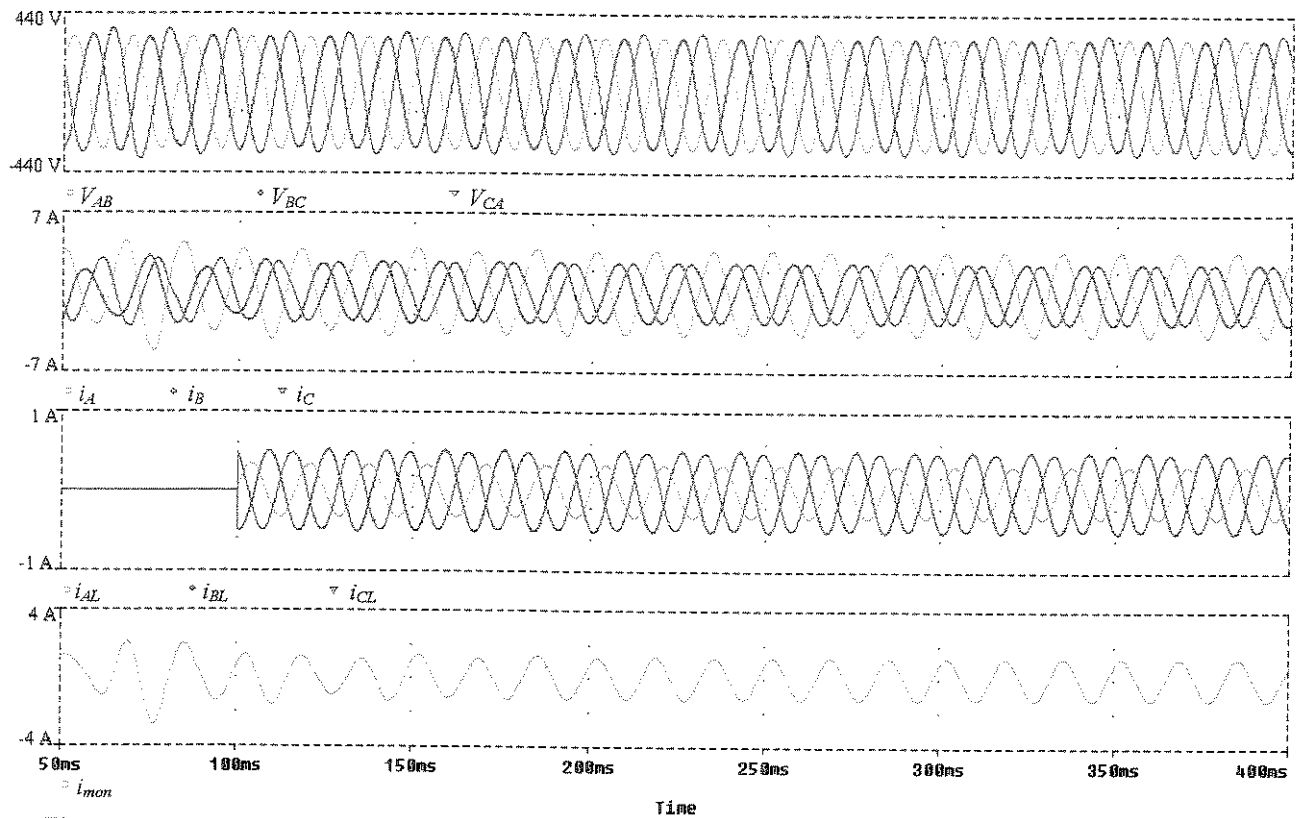


Figura 3.1.9. Tensões e correntes de linha do GI, correntes na carga trifásica e corrente na rede monofásica.

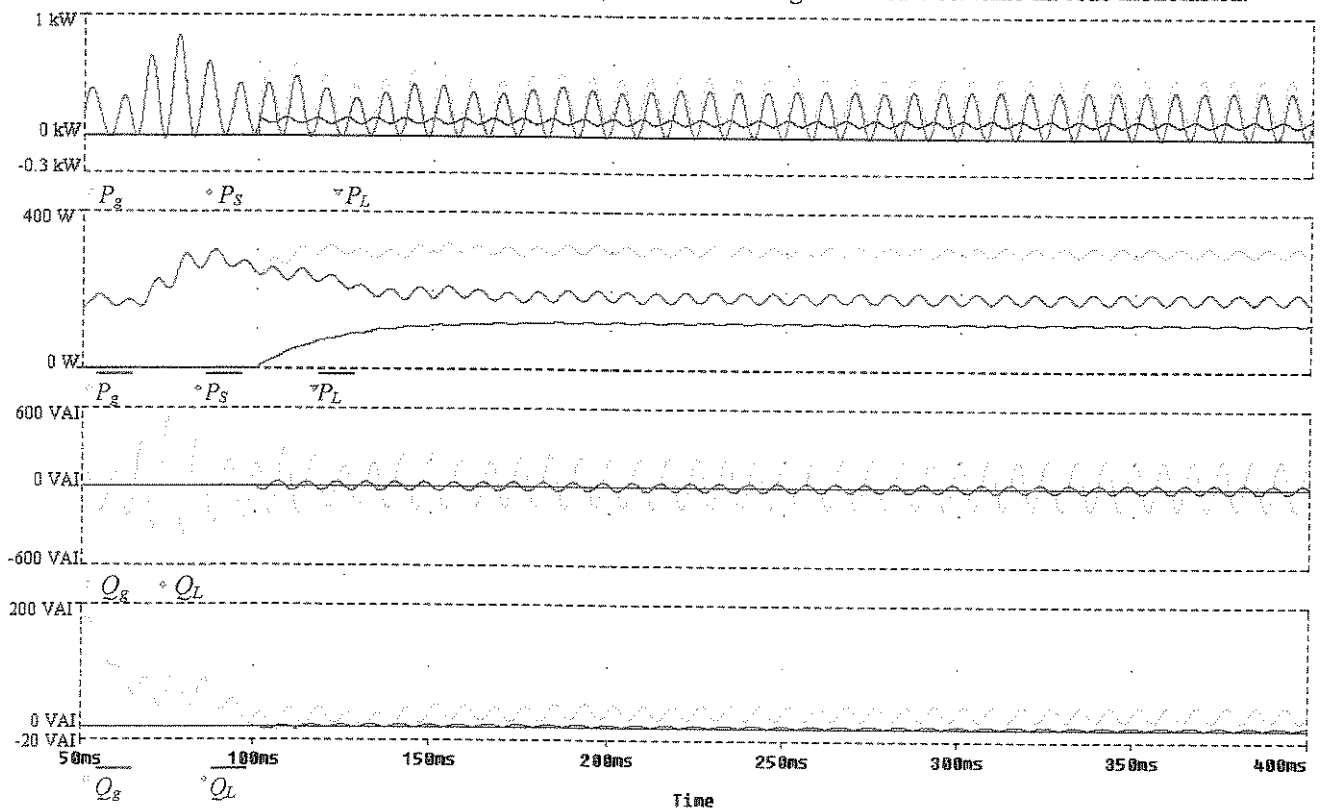


Figura 3.1.10. Potências ativa e reativa com valores instantâneos e médios.

3.2. Gerador Conectado ao Barramento Monofásico com CEP Monofásico

3.2.a Sem carga

O CEP é introduzido no conjunto de acordo com a figura 3.2.1, no qual inicialmente não existe nenhum tipo de carga ligada ao sistema. A inserção do CEP monofásico (figura 3.2.2) é capaz de corrigir praticamente todos os desbalanços tanto nas tensões de linha como nas correntes do GI. Com relação à corrente injetada na rede monofásica, seu comportamento é senoidal [15].

A figura 3.2.3, apresenta as mesmas formas de ondas analisadas no decorrer deste texto, mas agora é possível visualizar novas situações: a primeira é que, após a entrada em funcionamento do CEP monofásico (100ms), o GI deixa de fornecer potência ativa oscilante indicando que se consegue equilibrar completamente o GI. A segunda é que toda a potência reativa oscilante no barramento do GI é compensada pelo CEP, existindo somente uma pequena quantidade de reativos devido à presença dos capacitores de excitação. Outra diferença em relação as simulações anteriores é o fato de se observar uma oscilação na potência gerada. Isto é devido à presença do controlador *pi* no sistema, cujo ajuste leva a tal comportamento sub-amortecido.

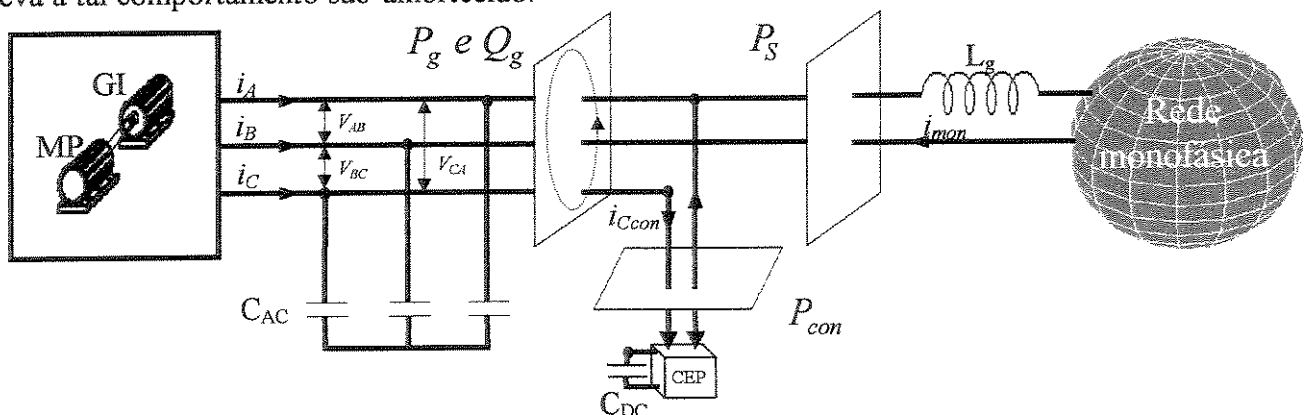


Figura 3.2.1. Variáveis analisadas no sistema com CEP monofásico e sem carga.

Conforme foi visto anteriormente, para que não ocorra acúmulo de energia no CEP, a operação do sistema é possível apenas em situações muito específicas em termos de defasagens entre as tensões e correntes do GI. Deste modo sua aplicação, numa situação com uma carga genérica conectada ao GI, apresenta o comportamento desejado de equilíbrio, como mostrado neste exemplo em que não há carga.

No entanto, haveria um armazenamento de potência ativa no CEP, o que na prática, inviabiliza a sua implementação.

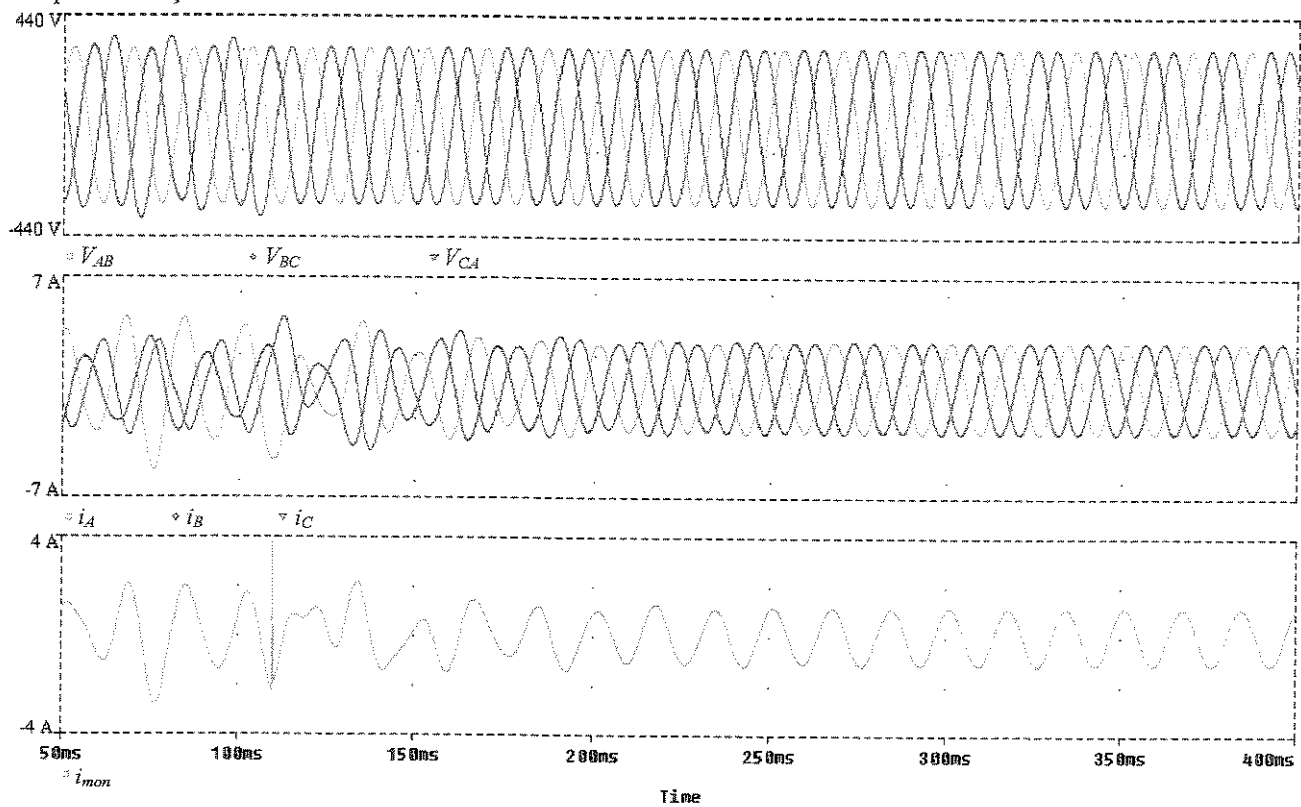


Figura 3.2.2. Tensões e correntes de linha do GI e corrente na rede monofásica.

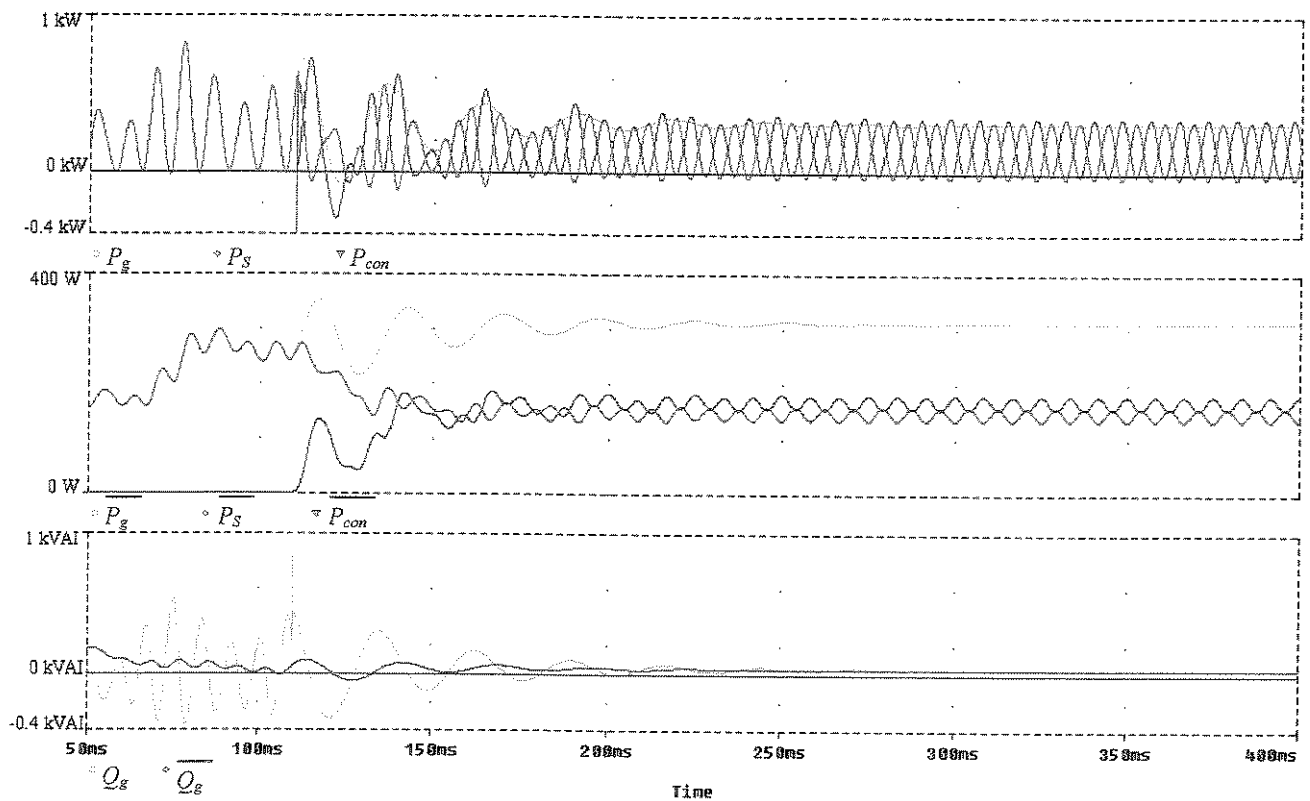


Figura 3.2.3. Potências ativa e reativa com valores instantâneos e médios.

3.3. Gerador Conectado ao Barramento Monofásico com CEP Trifásico

3.3.a Sem carga

Foi adicionado um conversor trifásico com o intuito de equilibrar o sistema como mostrado na figura 3.3.1. Essa estrutura apresenta uma diferença em relação à estrutura monofásica em termos das variáveis a serem amostradas. Nesta nova situação, necessita-se da leitura da corrente presente na fase 'C' da carga, i_{CL} , e da tensão no barramento CC conversor, V_{DC} , para que seja feito o cálculo das correntes de cada ramo do conversor. Com o controle de V_{DC} é possível evitar o acúmulo energia no CEP (em C_{DC}). No restante, procede-se como descrito no capítulo 2 para balancear a operação do GI [15].

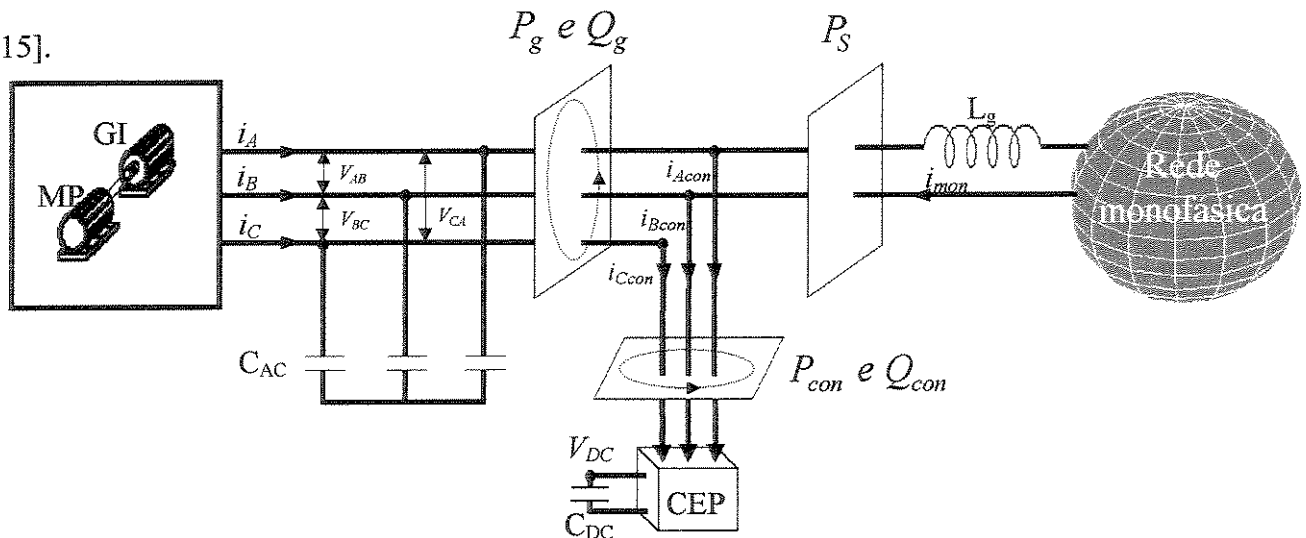


Figura 3.3.1. Variáveis analisadas no sistema com CEP trifásico e sem carga.

Para um caso em que não há carga conectada ao GI, na figura 3.3.2 observa-se o equilíbrio tanto em amplitude quanto em defasagem nas tensões e nas correntes do GI. Quanto à corrente injetada na rede monofásica, a mesma não é perfeitamente senoidal devido ao circuito que determina as correntes na simulação e que não elimina totalmente as ondulações do sinal da potência ativa média utilizado para definição das correntes do CEP trifásico.

É possível ver na figura 3.3.3 que a máquina fornece somente potência ativa média sendo que a parte oscilante desta grandeza é fornecida pelo CEP. Já a potência reativa oscilante presente anteriormente no barramento do GI é agora fornecida pelo CEP trifásico. A potência reativa média no

barramento do GI continua existindo devido ao dimensionamento de C_{AC} . Há também uma quantidade de energia reativa média presente no barramento do conversor proveniente do GI e rede monofásica.

Esta estrutura, em simulação, apresentou-se muito eficiente pois com apenas um conversor eletrônico possibilita equilibrar as tensões e correntes vistas pelo GI. Porém na simulação, não foram consideradas distorções que poderiam existir.

Durante os ensaios experimentais, observou-se uma grande distorção nas correntes I_G como também, desbalanços em V_G no GI. Esta situação, torna inviável a utilização do algoritmo de controle baseado na teoria da potência instantânea.

Devido a estes problemas, optou-se por utilizar um sistema isolado com um CEP trifásico para definir frequência e tensão de trabalho para o GI e um CEP monofásico para realizar o balanço energético entre o GI e a rede monofásica. Se a potência que a carga solicitar for inferior à produzida pelo GI parte da energia gerada será enviada à rede monofásica caso contrário o excedente que a carga solicitar será absorvido da própria rede.

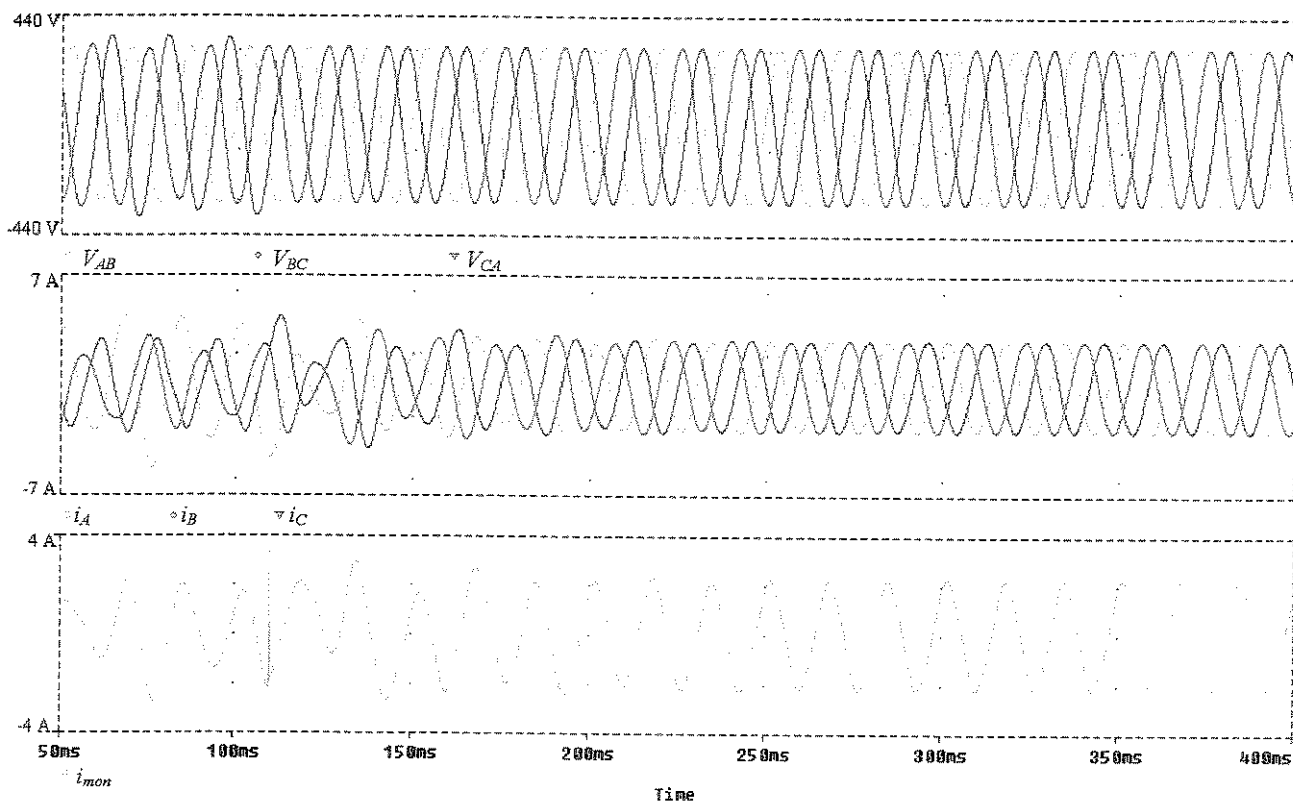


Figura 3.3.2. Tensões e correntes de linha do GI e corrente na rede monofásica.

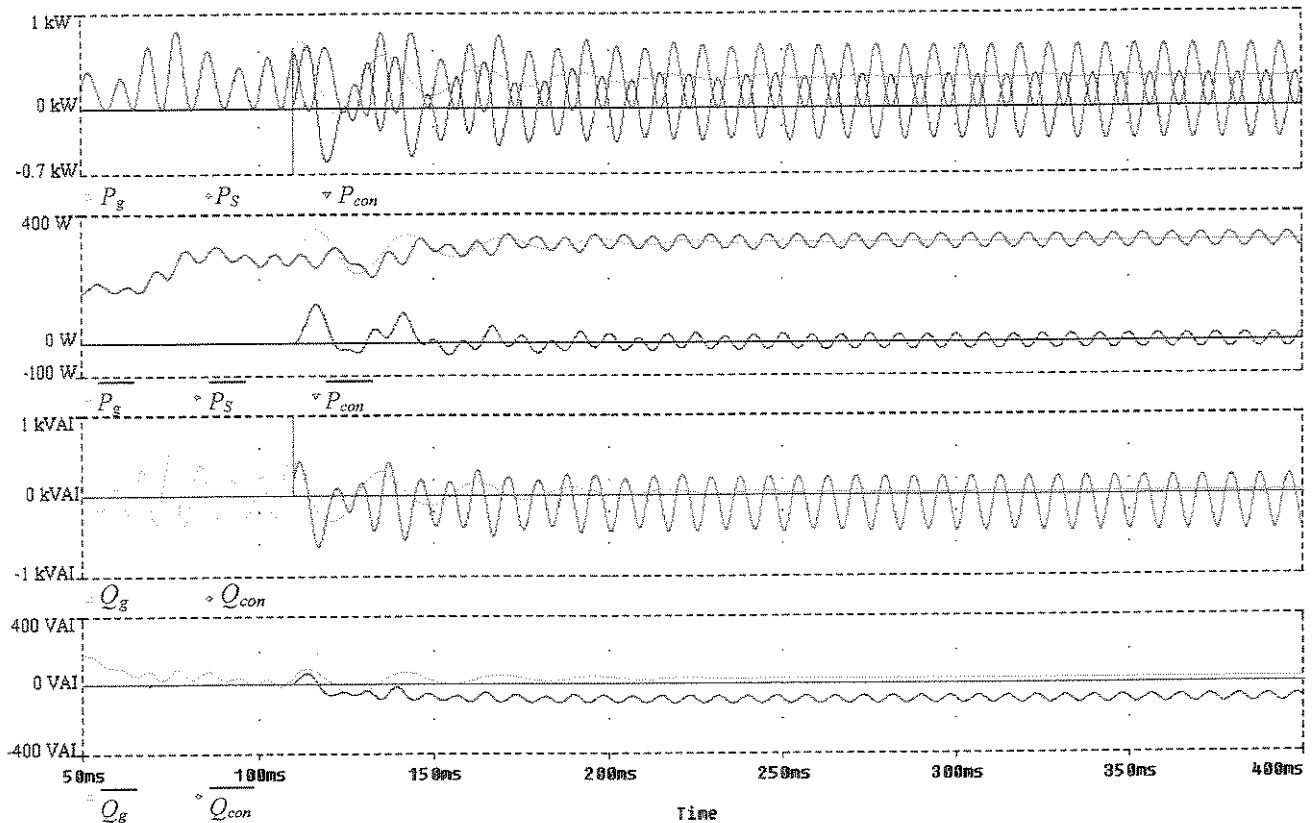


Figura 3.3.3. Potências ativa e reativa com valores instantâneos e médios.

3.4. Gerador sem Conexão Direta com o Barramento Monofásico, com CEP Monofásico e Trifásico

3.4.a Sem carga

A introdução de um conjunto de CEP's conforme figura 3.4.1, proporciona uma excelente compensação tanto em termos de I_G quanto de V_G com a desvantagem de possuir dois conversores. Neste caso, a tensão nos terminais do GI é imposta pelo inversor trifásico, a partir da tensão presente em seu barramento CC.

Na figura 3.4.2 são apresentadas as tensões nos terminais do GI bem como suas correntes de linha. Como a estrutura de controle é baseada na tensão V_{DC} , esta também é apresentada nesta figura.

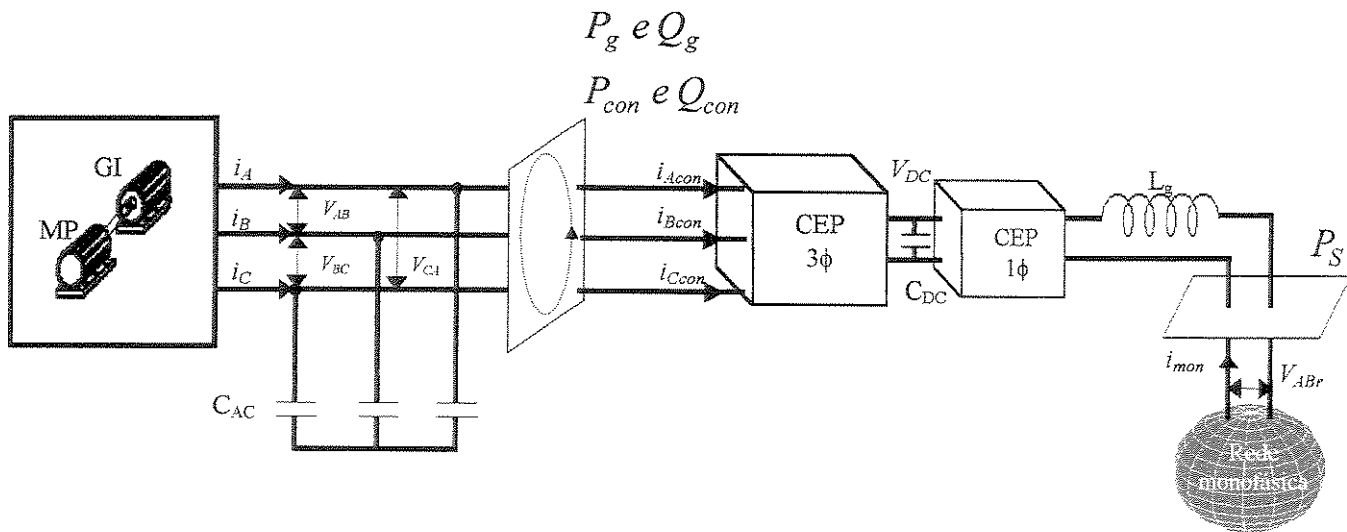


Figura 3.4.1. Variáveis analisadas no sistema com CEP trifásico e monofásico e isolado sem carga.

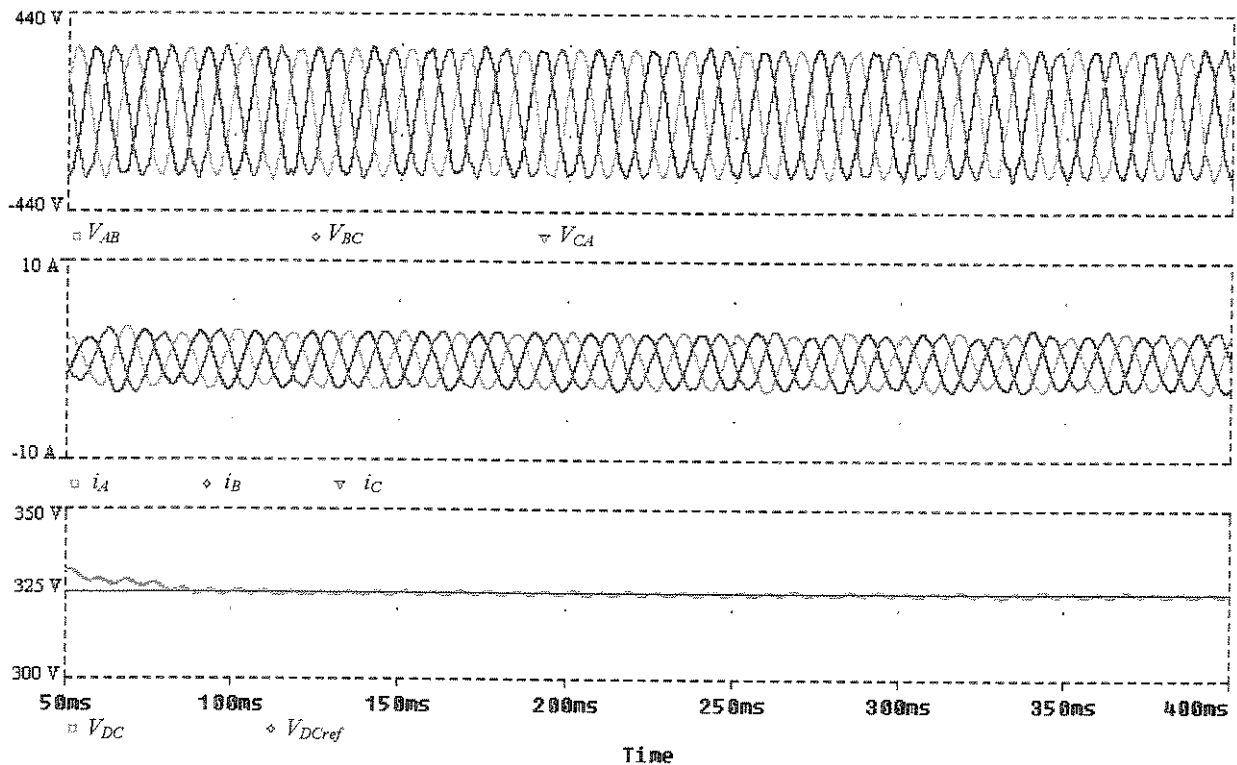


Figura 3.4.2. Tensões e correntes de linha do GI, tensão amostrada e tensão de referência no barramento CC.

Na figura 3.4.3, é apresentada a corrente injetada na rede monofásica. Ela possui uma forma senoidal somado à ondulação determinada pelo controlador por histerese. Na mesma figura, são plotados os valores médios tanto de potência ativa quanto de potência reativa.

A potência reativa não é nula na seção do gerador e do conversor pois os capacitores de excitação estão sobre dimensionados.

Já a potência ativa produzida pelo GI é toda enviada à rede monofásica.

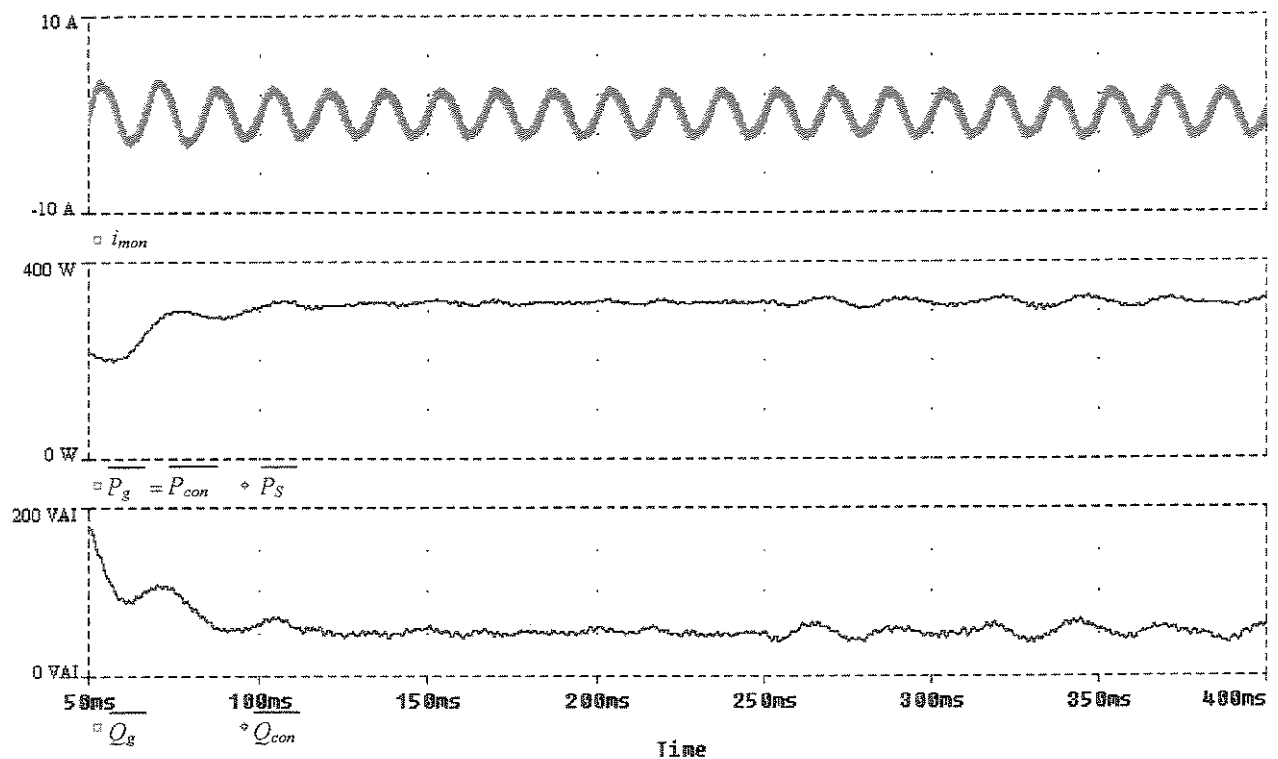


Figura 3.4.3. Corrente na rede monofásica e potências ativa e reativa média.

3.4.b Com carga equilibrada trifásica resistiva

Como no item 3.1.b, tem-se aqui uma carga equilibrada resistiva conectada ao sistema como mostra figura 3.4.4.

Tem-se aqui uma carga equilibrada resistiva conectada ao sistema. Com isso, é possível observar o desempenho do CEP trifásico frente a esta nova situação (figura 3.4.5).

Após a inserção da carga (em 100 ms), os CEP's ainda equilibram tanto as correntes quanto as tensões da máquina. Já para a corrente i_{mon} , observa-se uma redução de amplitude devido ao consumo da carga (figura 3.4.6).

O excedente da potência ativa é sempre enviado à rede. Com isso, não há acúmulo de energia no conversor, o que é esperado devido à estratégia de controle utilizada. Como o CEP trifásico impõe três tensões senoidais e equilibradas a máquina fornece somente potência ativa média (figura 3.4.6).

Agora, a potência da carga é equivalente a 15% do que é gerado, já a rede monofásica absorve os 85% restantes.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

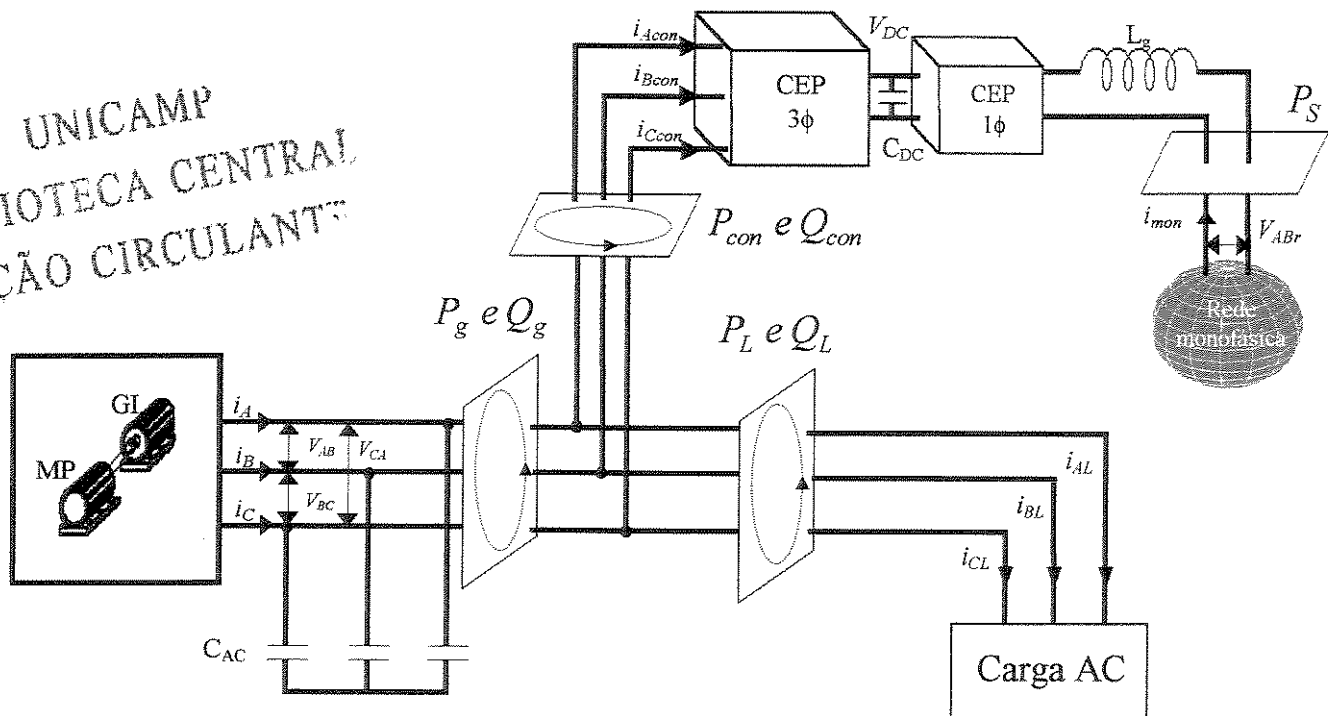


Figura 3.4.4. Variáveis analisadas no sistema com CEP trifásico e monofásico e isolado com carga trifásica.

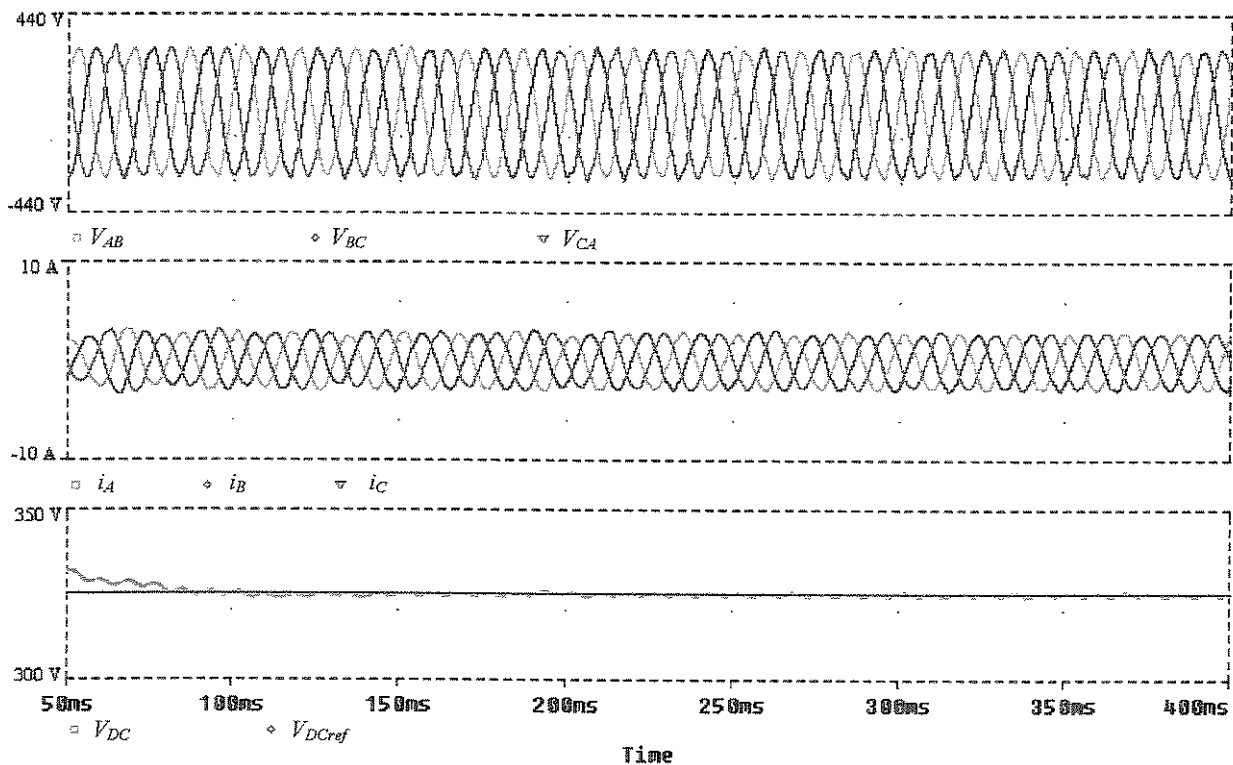


Figura 3.4.5. Tensões e correntes de linha do GI, tensão amostrada e tensão de referência no barramento CC.

A potência reativa média no barramento do GI e também no conversor, é devido ao dimensionamento de C_{AC} . Na carga, os reativos são nulos devido ser resistiva e equilibrada.

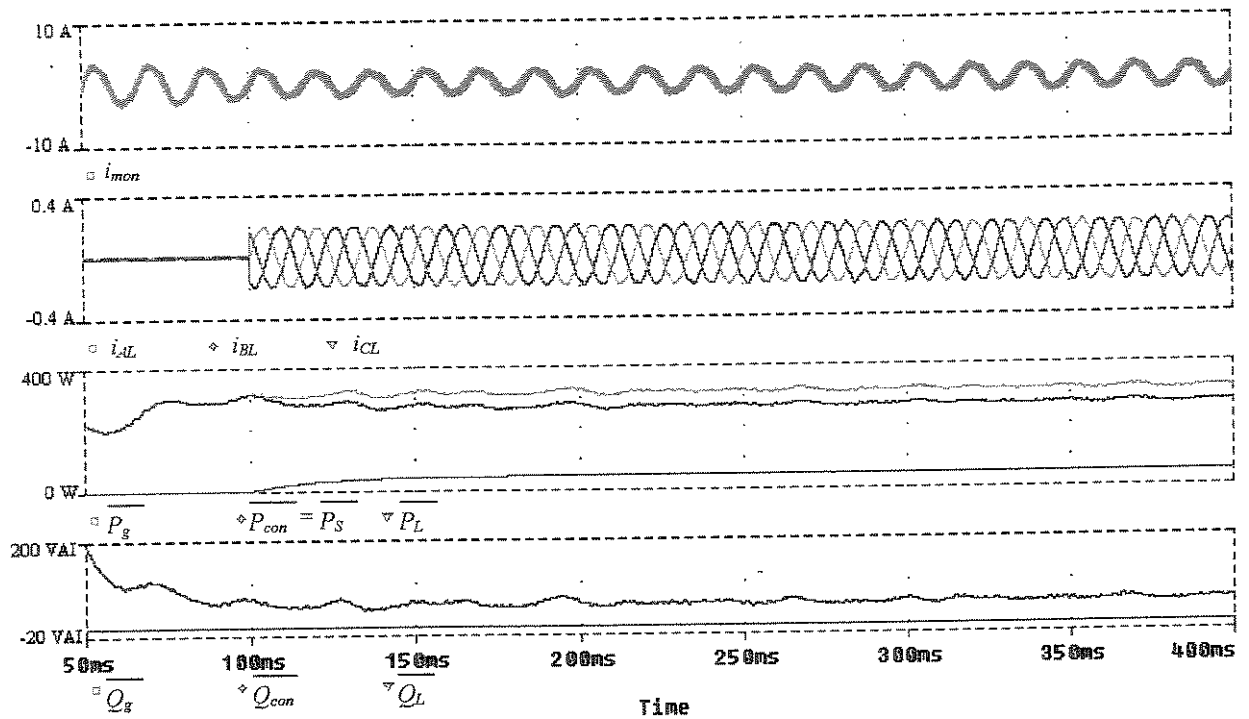


Figura 3.4.6. Corrente na rede monofásica, na carga e potências ativa e reativa média.

3.4.c Com carga monofásica resistiva

A figura 3.4.7 apresenta uma nova configuração do circuito. Em 3.4.8 e 3.4.9 tem-se as mesmas formas de onda que vem sendo analisadas neste capítulo, a única diferença é que, além da carga ser monofásica, sua potência ativa é maior do que a gerada. Todo o excesso de potência é fornecido pela rede monofásica.

A potência média no conversor aqui também tem valor nulo. Com respeito às potências ativas, os comentários são os mesmos do item anterior (figura 3.4.9).

A potência reativa oscilante presente nos terminais do GI é agora fornecida pelo CEP. Já o valor médio desta grandeza é devido C_{AC} (figura 3.4.9).

Quando a carga trifásica é conectada em 100 ms, há um afundamento na tensão do barramento CC. Isso ocorre pois naquele momento, parte da energia é fornecida pelo CEP.

A potência da carga é 2,5 vezes a potência produzida pelo GI sendo que a rede contribui com 1,5 vezes a potência do GI dessa forma, é possível alimentar a carga.

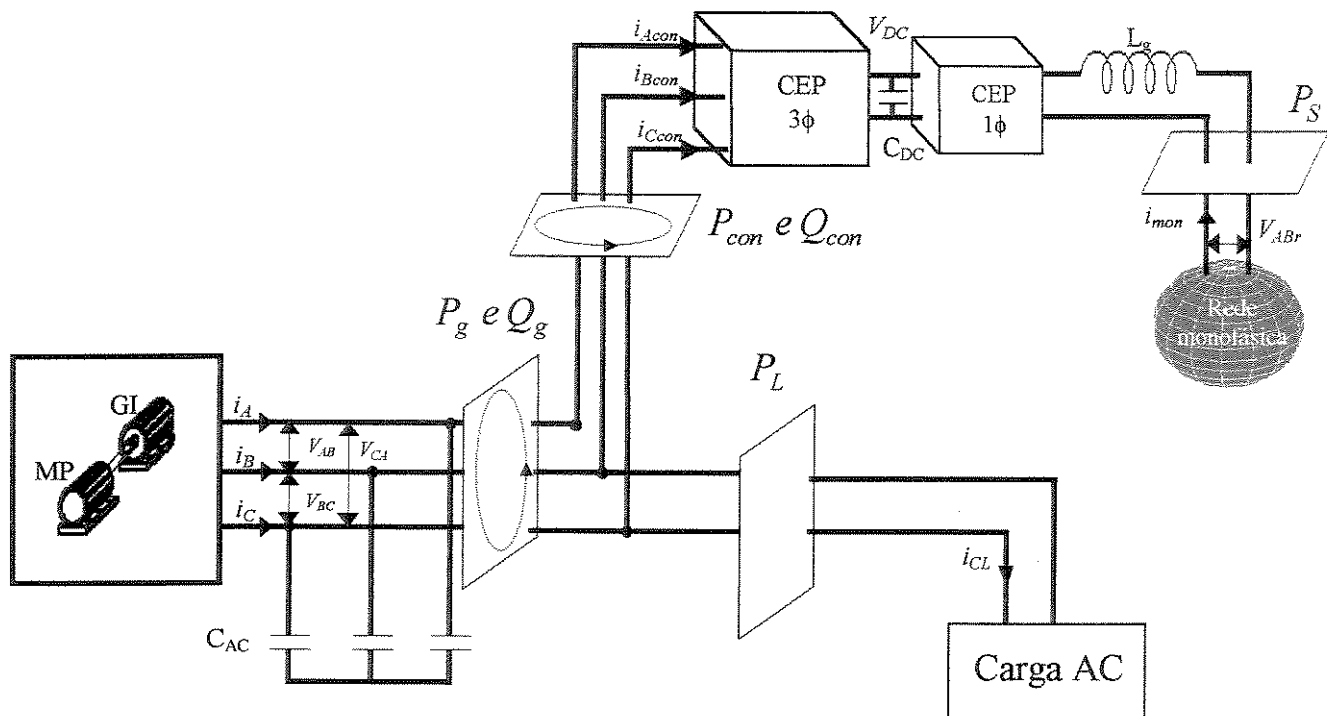


Figura 3.4.7. Variáveis analisadas no sistema com CEP trifásico e monofásico e isolado com carga monofásica.

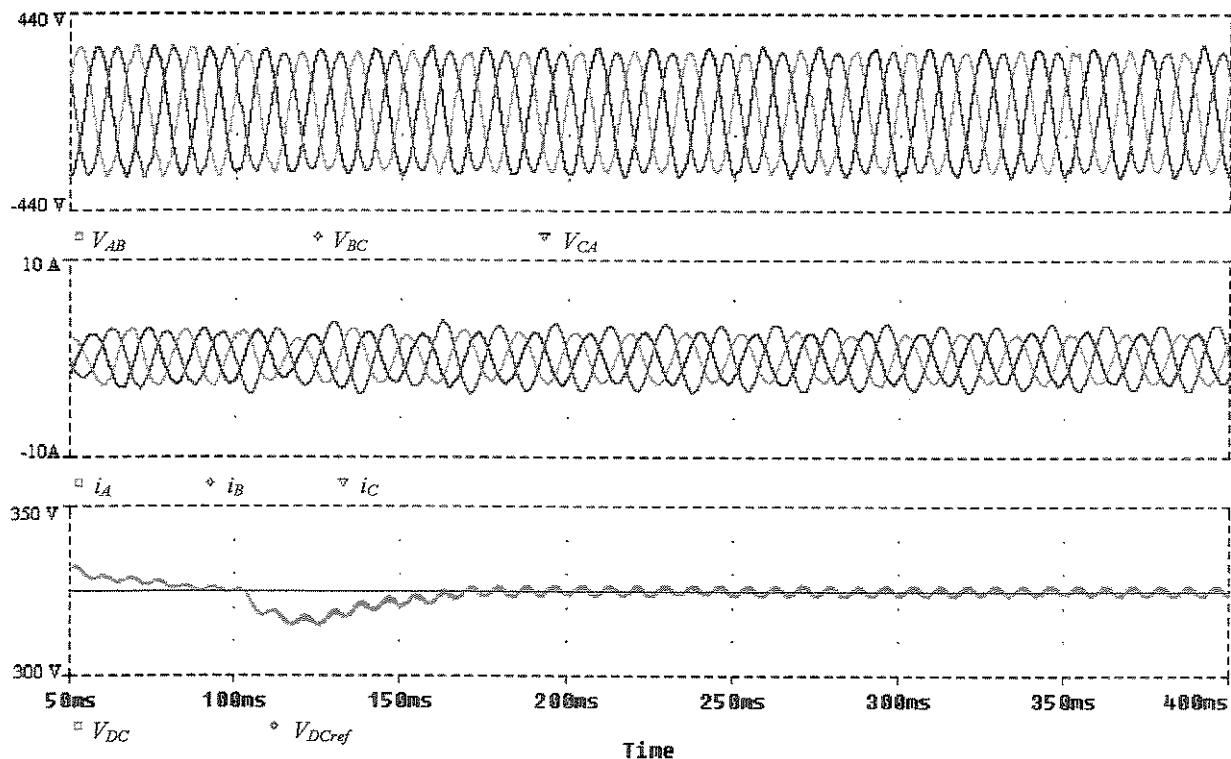


Figura 3.4.8. Tensões e correntes de linha do GI, tensão amostrada e tensão de referência no barramento CC.

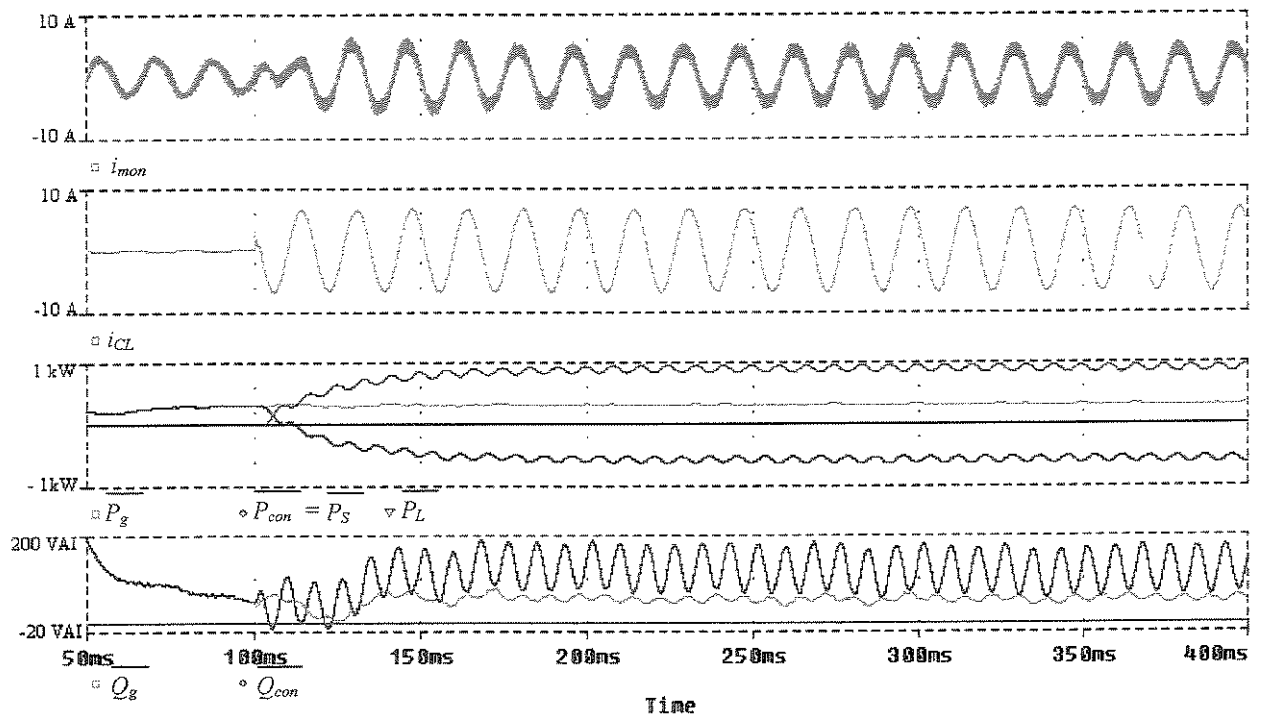


Figura 3.4.9. Corrente na rede monofásica, na carga e potências ativa e reativa média.

3.4.d Com carga reativa trifásica

Neste item tem-se as mesmas conexões da figura 3.4.4, a diferença é que a carga trifásica é composta por um conjunto RL em cada ramo.

Assim, tanto tensões como correntes do GI são balanceadas pelo CEP, mesmo quando é conectada uma carga reativa ao sistema (figura 3.4.10).

Com respeito às potências ativa, o CEP fornece a componente oscilante e a máquina a componente média. Isso comprova a capacidade de compensação do CEP (figura 3.4.11) pois o sistema torna-se balanceado.

A potência reativa oscilante presente nos terminais do GI é agora fornecida pelo CEP. Já o valor médio desta grandeza é devido a C_{AC} . Na carga, os reativos são supridos pelo CEP (figura 3.4.11).

Novamente ocorre a conexão de uma carga em 100 ms, a carga drena 61% da potência do GI e a rede absorve 39% do que o GI produz.

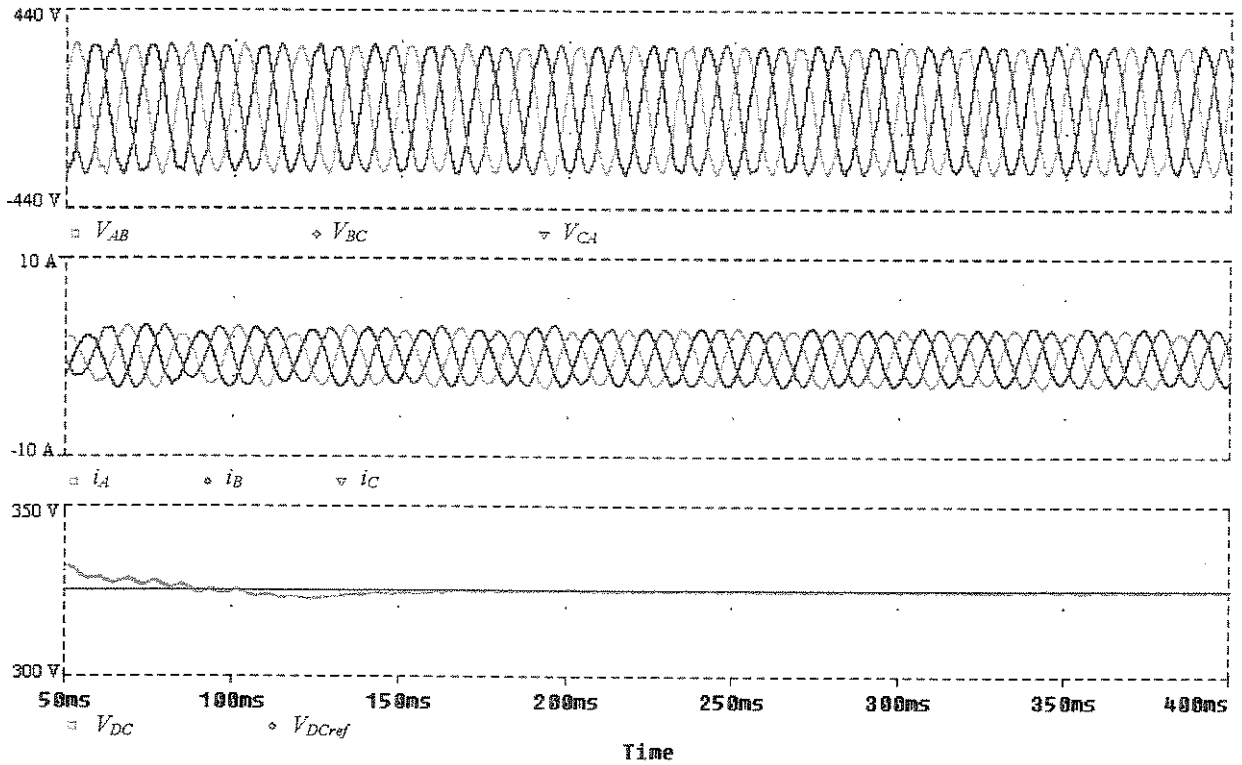


Figura 3.4.10. Tensões e correntes de linha do GI, tensão amostrada e tensão de referência no barramento CC.

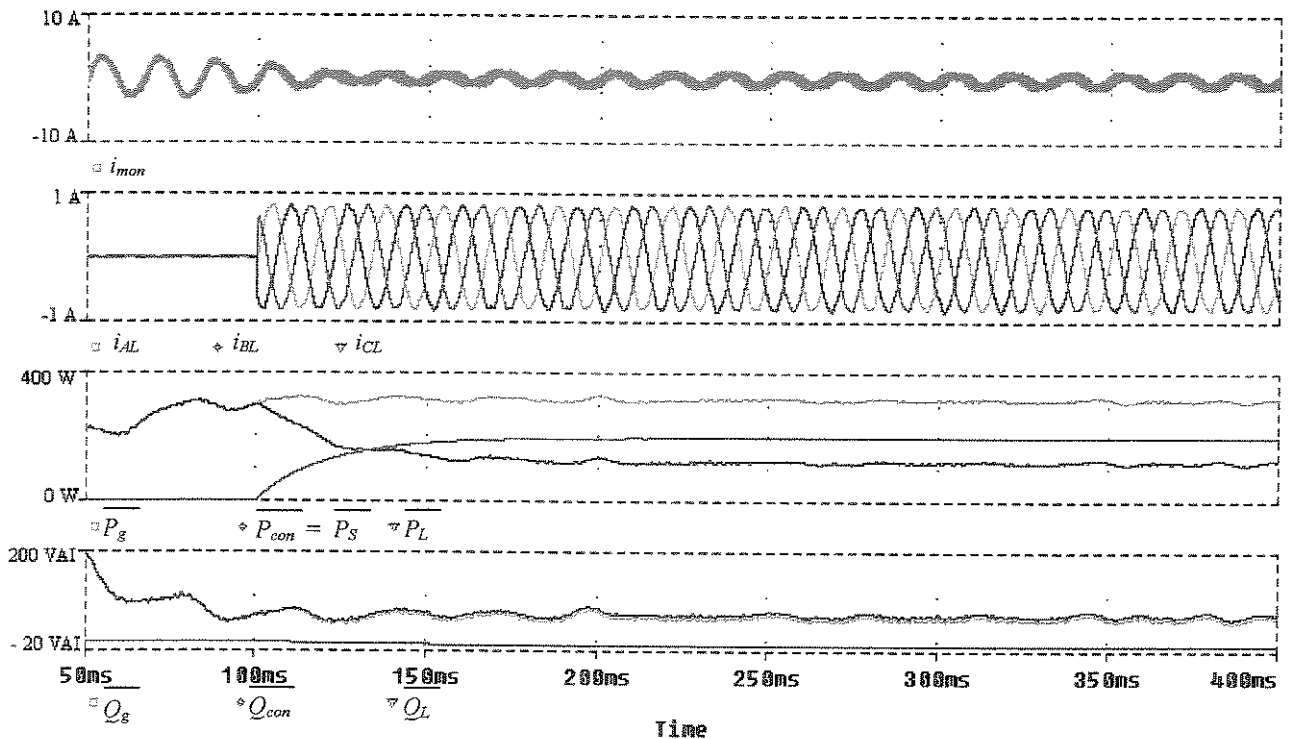


Figura 3.4.11. Corrente na rede monofásica, na carga e potências ativa e reativa média.

3.4.e Com carga trifásica não-linear

Aqui o CEP trifásico está frente a uma carga não-linear. Isso não é problema para balancear o GI, como também para a corrente presente na rede monofásica.

A corrente solicitada pela carga é bastante distorcida, existindo também uma distorção na tensão do barramento trifásico, devido a passagem desta corrente pela impedância do circuito.

A figura 3.4.12 apresenta a conexão da carga não-linear junto aos CEP's, enquanto que 3.4.13 e 3.4.14 mostram as formas de ondas referentes à carga, máquina e rede monofásica.

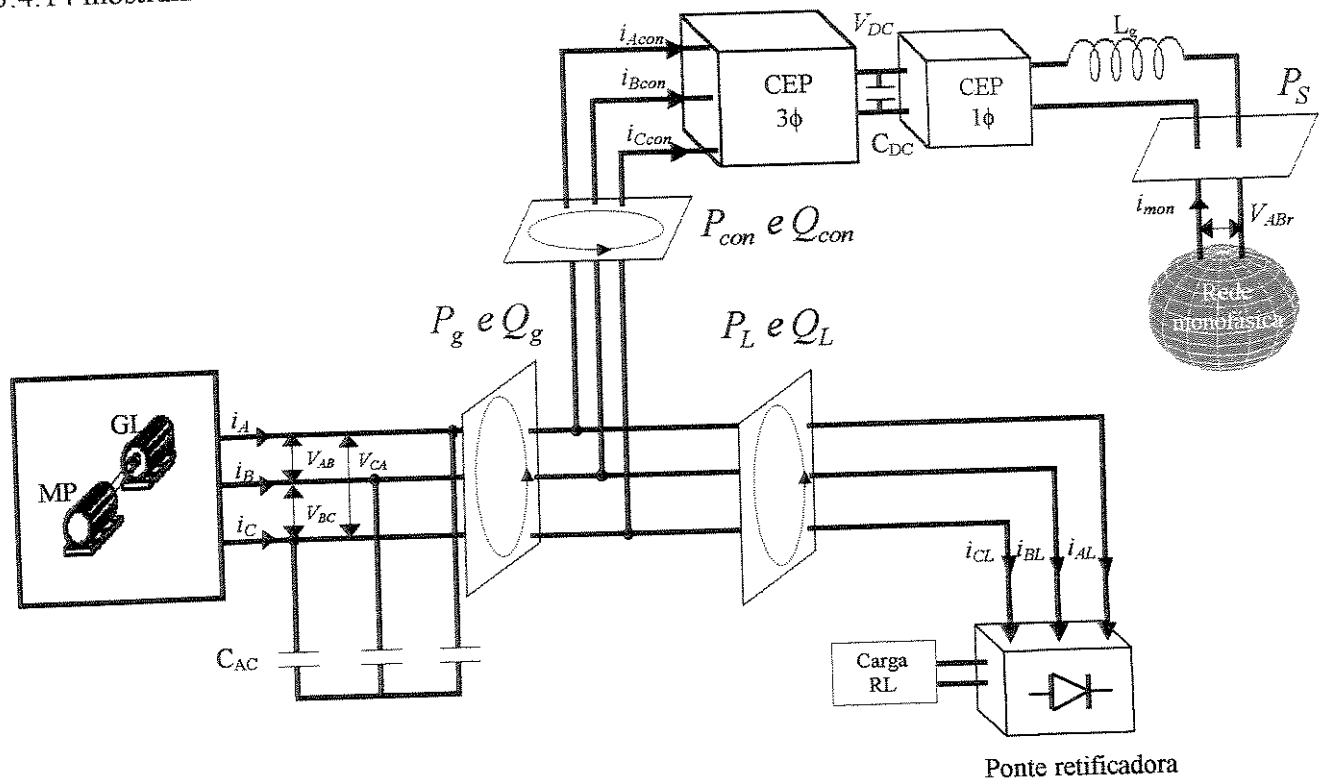


Figura 3.4.12. Variáveis analisadas no sistema com CEP trifásico e monofásico e isolado com carga não-linear.

A potência ativa oscilante é fornecida toda pelo CEP sendo que para a máquina resta fornecer o valor médio. A carga possui valor de potência inferior à gerada com isso o excedente é enviado à rede (figura 3.4.14).

Na conexão de uma carga em 100 ms, a carga drena 73% da potência do GI e a rede absorve 27% do que o GI produz.

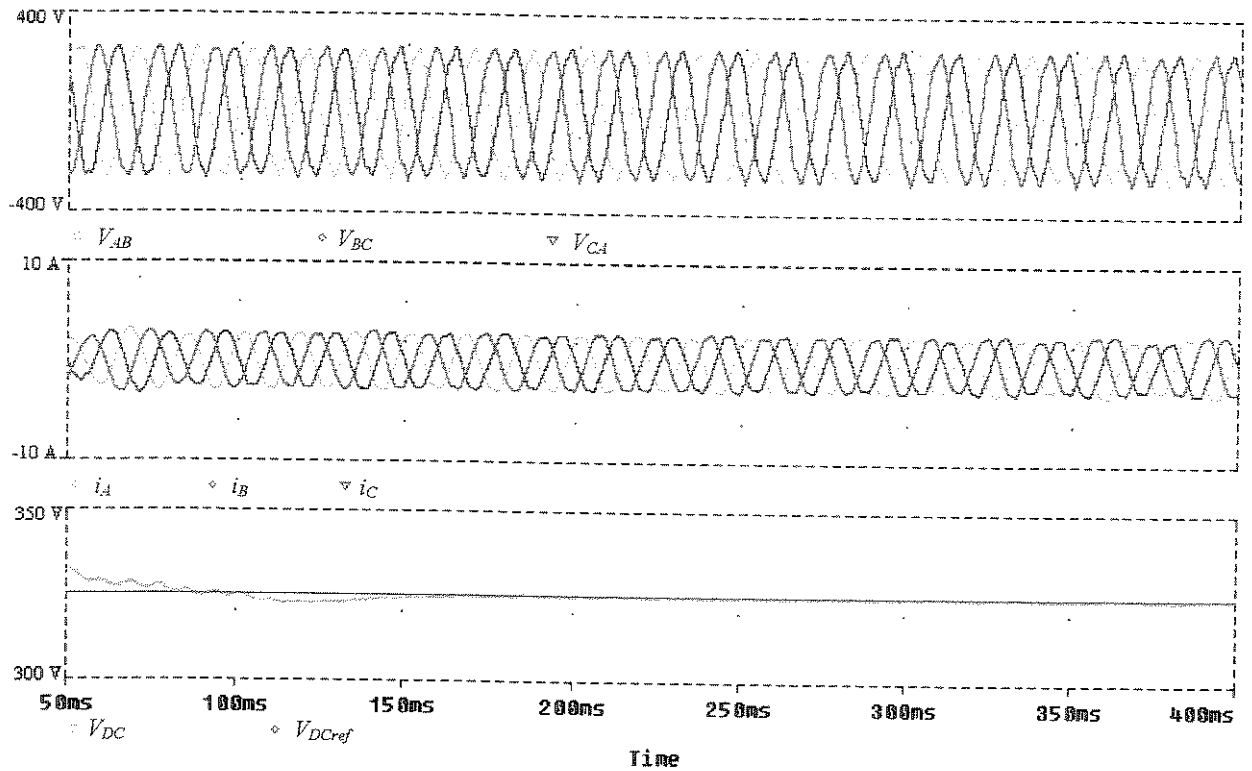


Figura 3.4.13. Tensões e correntes de linha do GI, tensão amostrada e tensão de referência no barramento CC.

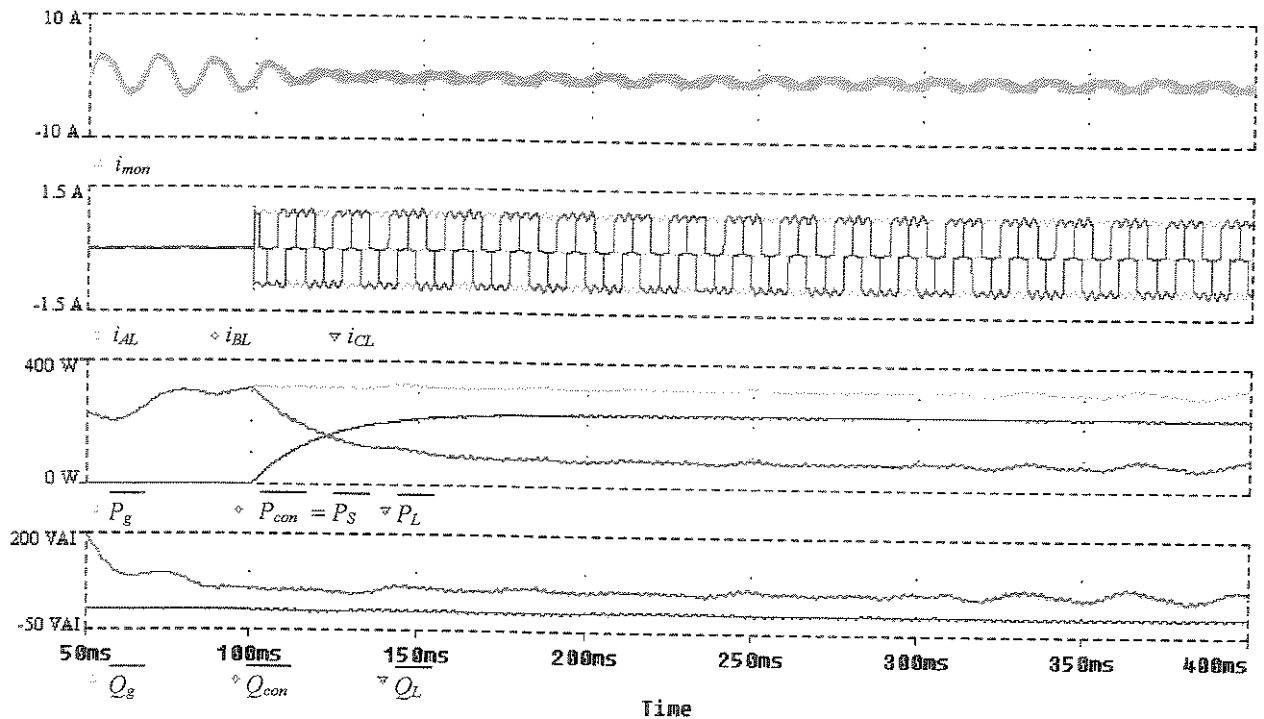


Figura 3.4.14. Corrente na rede monofásica, na carga e potências ativa e reativa média.

O apêndice G apresenta um esclarecimento para a simulação dos vários sistema isolado apresentado.

3.5. Conclusões

Neste capítulo foram apresentadas as simulações da conexão direta entre GI e rede monofásica.

A conexão direta com CEP monofásico apresenta alguns problemas que podem ser vistos em simulação. Esta estrutura promove o balanceamento da variáveis elétricas do GI através do acúmulo de energia no barramento CC, situação esta indesejada.

Na conexão direta com CEP trifásico não apresenta nenhum, empecilho mas sua implementação prática mostra-se inadequada na presença de distorções, como será mostrado nos resultados experimentais. Isso se deve ao modelo utilizado para representar o GI que não foi capaz de representar adequadamente todas as não-linearidades do sistema.

No sistema isolado, tem-se a utilização de um número maior de conversores mas apresenta resultados satisfatórios do ponto de vista de permitir uma operação equilibrada para o GI.

CONTROLADORES DIGITAIS

Desde a sua introdução na década de 1980, o custo dos microcontroladores caiu da casa das centenas de US dólares para algo em torno de 15 US dólares. A capacidade de processamento de tais circuitos foi ampliada de 5 MIPS para cerca de 2000 MIPS. A integração de memória RAM, de portas de comunicação de dados, de contadores, de conversores A/D e D/A e de outros periféricos internos à pastilha tornou possível a aplicação a uma extensa gama de processos e produtos industriais [16].

O controle de máquinas elétricas através de conversores eletrônicos de potência é uma das aplicações que se beneficiam da capacidade de processamento numérico dos circuitos integrados dedicados ao processamento digital de sinais. Os recursos disponíveis permitem, por exemplo, a implementação do controle de máquinas sem sensores, no qual a velocidade e a posição do rotor da máquina é conhecida em tempo real a partir do conhecimento das tensões e correntes de estator da máquina. Os microcontroladores e os DSPs tornam também possível a implementação do controle vetorial de máquinas de indução por orientação de campo, o qual requer um intenso processamento matemático. O emprego das modernas técnicas de controle de máquinas, suportado pela capacidade de processamento numérico, propicia redução de custos, boa confiabilidade e otimização de desempenho.

Muitos dos sistemas digitais de controle de máquinas compreendem as funções representativas da resposta do sistema (funções de transferência), o sistema controlado, a CPU e seus periféricos, sensores de sinal do sistema controlado e conversores de dados A/D e D/A. A taxa de amostragem dos

sinais do sistema tipicamente é entre 10 a 20 vezes a maior frequência da banda do sistema sob controle. Normalmente, aplicações de controle de máquinas com alto desempenho requerem processadores com capacidade entre 8 a 20 MIPS [16].

Além das tarefas de controle, o sistema de controle digital, baseado em um processador com capacidade suficiente, pode incorporar outras funções como: a geração direta dos sinais de comando dos diversos interruptores presentes nos conversores de potência; a proteção do sistema controlado; o diagnóstico de defeitos; a filtragem de dados e a comunicação remota. Alguns microcontroladores e DSP's dispõem dos recursos computacionais necessários para desempenhar todo o complexo conjunto de operações matemáticas requeridas pelas tarefas de controle em intervalos de microsegundos.

4.1. O TMS320F240

O DSP modelo TMS320F240 da "Texas Instruments" é um dispositivo de 16 bits, que realiza processamento em ponto fixo, e é otimizado para aplicação em controle de máquinas elétricas [16].

Este circuito integrado incorpora um processador com capacidade de 20 MIPS, dois conversores A/D de 10 bits, com máximo tempo de conversão de 6,6 μ s e circuitos de controle dedicados ao gerenciamento de eventos [17].

O conjunto de aquisição de dados é composto por dois multiplexador 8/1 (oito entradas analógicas para uma saída), dois S/H, dois conversores A/D propriamente dito e dois registradores de dados com FIFO de dois níveis cada um. Com isso, o tempo necessário para se ter o dado disponível no barramento interno ao "chip" é menor que 10 μ s (figura 4.1.1) [17].

O sistema utilizado incorpora uma placa de avaliação que é composta de duas memórias SARAMs de 128 K x 8-bits, banco de leds, banco de chaves, conversor D/A e o DSP propriamente dito.

O conjunto todo é composto, além da placa de avaliação, do emulador XDS510PP, o "software" montador de programas "code composer" e fonte de alimentação (figura 4.1.2).

Assim, a capacidade de processamento do DSP TMS320F240 torna-o uma ferramenta adequada para aplicação no controle do sistema de geração proposto [18].

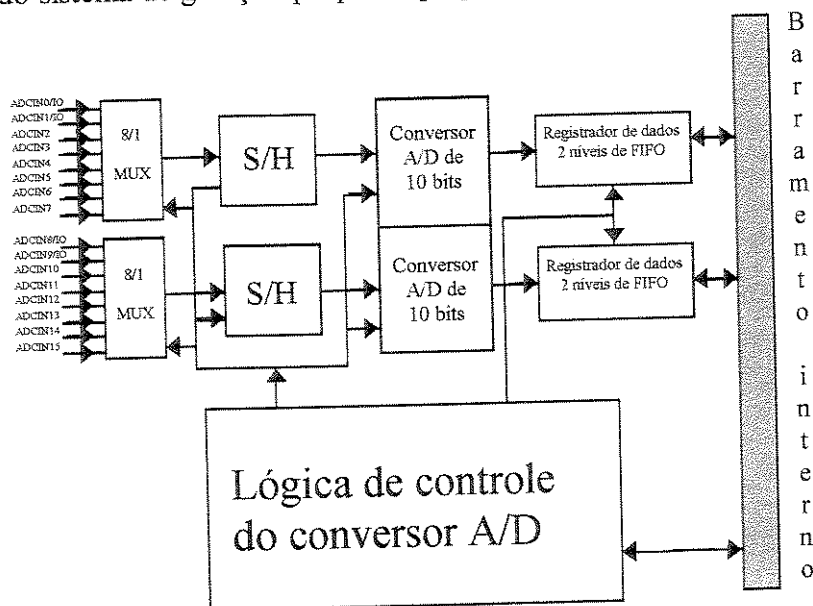


Figura 4.1.1. Sistema de conversão A/D.

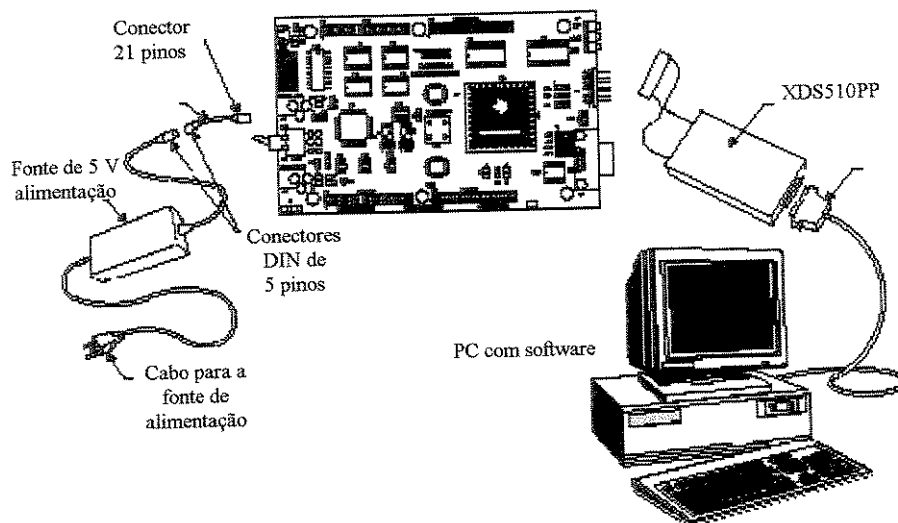


Figura 4.1.2. Sistema do DSP.

4.2. Leitura de Dados

Para implementação dos sistemas propostos nos capítulos 2 e 3, é necessária a leitura da tensão de linha da rede monofásica e da tensão acumulada no capacitor do “link” CC. Para isso ser possível é preciso escalonar as variáveis para que as mesmas possam ser utilizadas no “software”. O processo

completo de aquisição é apresentado na figura 4.2.1.

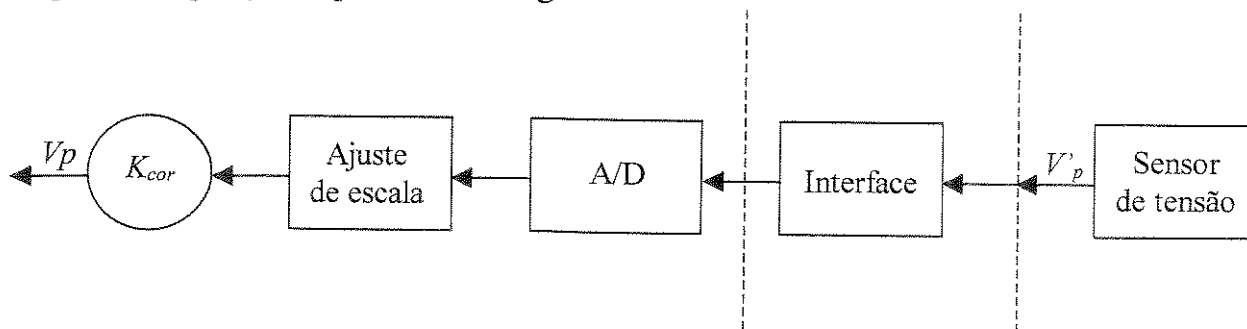


Figura 4.2.1. Escalonamento das variáveis.

Neste tipo de aplicação, os sensores podem medir tanto sinais positivos quanto negativos. Entretanto, estes sinais necessitam estar entre 0 e 5 V (com valor médio de 2,5 V) ao serem aplicados ao conversor A/D. Assim, esta interface condiciona os sinais medidos pelos sensores na tensão de trabalho do A/D [19]. Os circuitos para interfaceamento são apresentados no apêndice D.

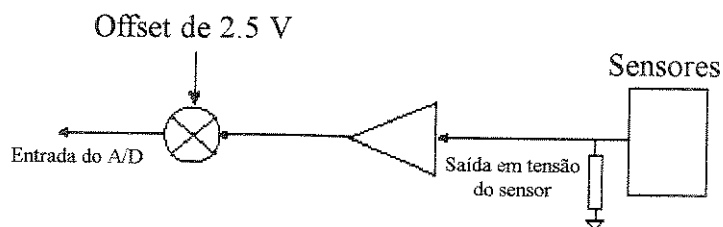


Figura 4.2.2. Condicionamento do sinal.

Após o sinal ser digitalizado, o mesmo possui um “offset” de 2,5 V que é removido por “software”, obtendo-se dessa forma um valor inteiro (sinalizado) da variável medida. Por valor sinalizado entende-se que esta variável possui tanto valores positivos quanto negativos para representá-la, figura 4.2.2.

Qualquer uma das variáveis amostradas necessitam ser expressas em valores *pu* e então convertidas para um formato que possibilite a realização de operações matemáticas. O formato adotado é o 4.12, no qual os 4 primeiros bits são usados para representar a parte inteira e os 12 seguintes, a parte fracionária [19].

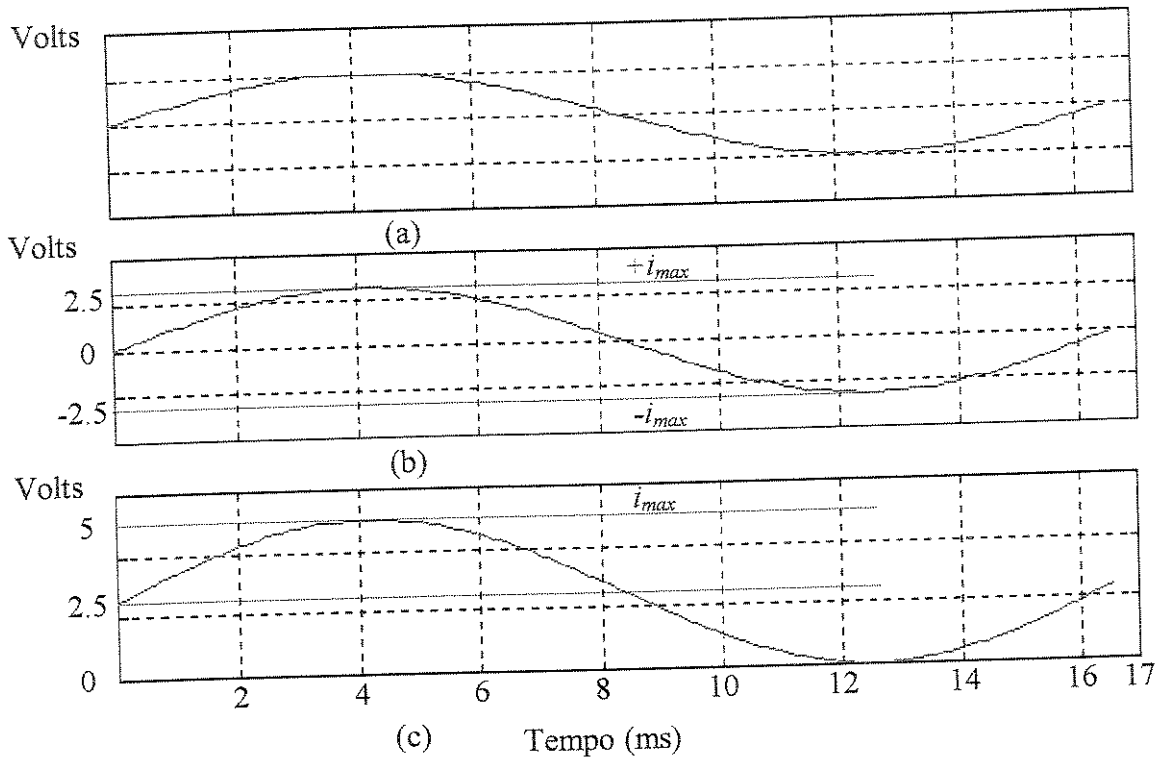


Figura 4.2.3. Condicionamento seguido pela variável amostrada.

A figura 4.2.3 mostra três situações da amostragem de uma das correntes. Em (a) tem-se a variável externa ao DSP, em (b) existe uma interface que escalona a medida entre -2,5 V e 2,5 V e em (c) já está no formato possível para que o DSP possa trabalhar

A representação, em *pu*, é definida pela razão entre i_b e i_{max} . Onde i_b é o valor de pico da corrente de placa da máquina e a corrente i_{max} é o valor de pico da máxima corrente que poderá circular no sistema em estudo.

$$K_{cor} = \frac{2^{12}}{\left(\frac{2^{10} \cdot i_b}{i_{max}} \right)} = \frac{4096}{512 \cdot i_b} \cdot i_{max} \quad (4.1)$$

A conversão para o formato *pu* é apresentada na equação 4.1, a qual define a constante K_{cor} , 2^{12} representa o formato no qual se trabalha e 2^{10} o formato do A/D. Esta constante multiplica as variáveis

digitalizadas para transformá-las no formato desejado. O apêndice E apresenta um maior esclarecimento sobre a utilização dos formatos empregados.

Como mencionado anteriormente, esta constante tem duas funções: uma é a transformação para pu da variável e a outra é transformá-la para o formato 4.12 [19].

4.3. Conclusões

Devido a necessidade de conhecimento do sistema digital fez-se um pequeno esclarecimento do seu funcionamento e como é feita a leitura das variáveis. Para esta leitura, são utilizados circuitos de interfaceamento que escalona e desloca os sinais de maneira a compatibilizá-los com as interfaces de entrada do DSP.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A verificação dos resultados de simulação apresentados no capítulo 3 é feita neste capítulo, sendo apresentadas diversas situações: o sistema trabalhando como "boost", situação necessária para carregamento do capacitor presente no "link" CC; sistema alimentando carga resistiva monofásica ou trifásica; carga não linear (retificador trifásico não controlado alimentando uma carga RC) e partida de um motor de indução com 66% da potência nominal do GI.

O não funcionamento da estratégia de controle proposta para o sistema com CEP trifásico e conexão direta à rede monofásica também é mostrado neste item, devido à incapacidade da teoria de potência instantânea trabalhar em sistemas desequilibrado e com tensões distorcidas.

As características da máquina de indução estão no apêndice A.

5.1. Gerador sem Conexão com o Barramento Monofásico com CEP's Trifásico e monofásico

5.1.a "Boost"

Para inicializar o sistema da figura 3.4.1, necessita-se carregar o capacitor presente no barramento CC. Para isto, o CEP monofásico é acionado de forma a absorver energia da rede monofásica até a tensão desejada. Com isso, até é possível acionar o GI como motor através do conversor trifásico que está conectado ao mesmo barramento CC já mencionado. Na figura 5.1.1, é apresentado o fluxo de potência necessário para carregar C_{DC} .

Na figura 5.1.2, são apresentadas formas de onda do conversor monofásico funcionado como

retificador PWM com fator de potência unitário, operando no modo, "boost", alimentando uma carga no "link" CC, a tensão V_{DC} está no valor desejado e a corrente que é absorvida da rede monofásica apresenta forma senoidal.

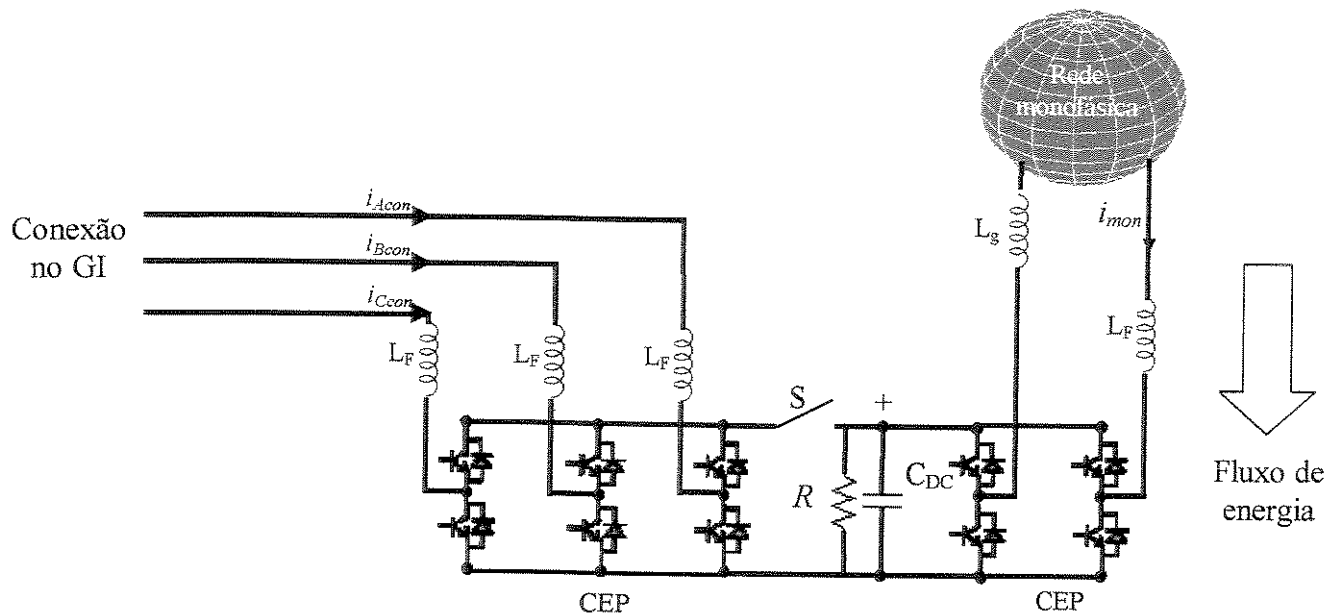


Figura 5.1.1. Carga do capacitor C_{DC} na configuração 'boost'.

Ao observar i_{mon} e V_{Abr} , nota-se que ambas estão em fase. Por convenção, a rede monofásica está enviando energia ao barramento CC.

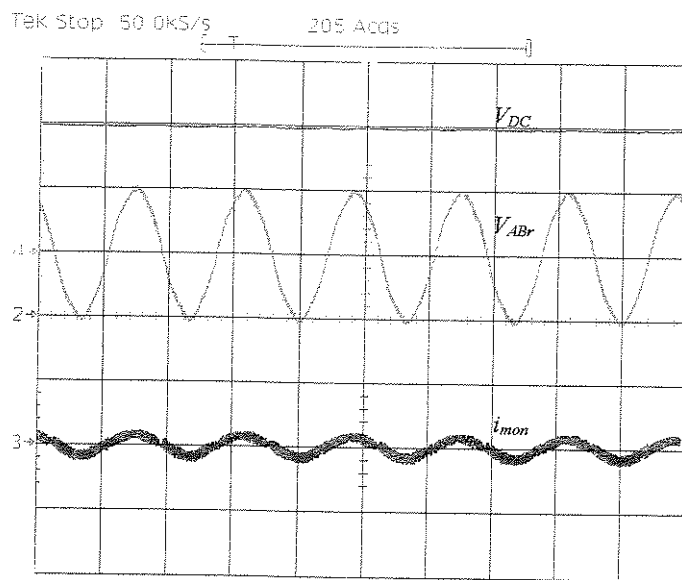


Figura 5.1.2. Tensão CC, tensão e corrente na rede monofásica antes da partida da máquina de indução.
Vertical: Ch2 100 V/div.; Ch3 5 A/div.; Ch4 250 V/div.
Horizontal: 10 ms/div.

Nesta figura, é possível notar um “ripple” em alta frequência tanto na corrente quanto na tensão V_{ABr} . A presença desta alta frequência é explicada pois está se utilizando controle por histerese para comando das chaves.

A figura 5.1.3 apresenta as mesmas formas de onda da figura 5.1.2 com a diferença de que é apresentada a partida da máquina de indução como motor. É possível observar que o sistema consegue suprir a energia necessária ao acionamento através da rede monofásica.

Há também, um afundamento na tensão V_{DC} indicando que parte da potência necessária para acelerar o motor é absorvida do barramento CC. O controle atua no sentido de recuperar a energia acumulada em C_{DC} , como pode-se concluir observando aumento transitório da corrente.

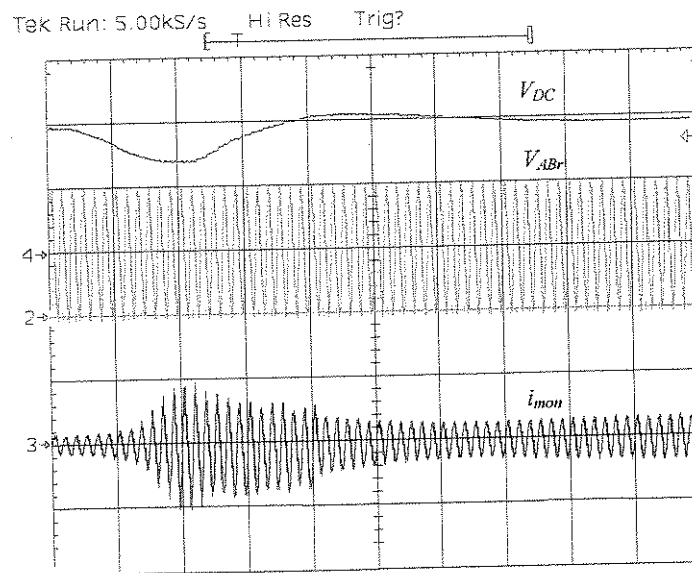


Figura 5.1.3. Tensão CC, tensão e corrente na rede monofásica na partida da máquina de indução.
Vertical: Ch2 100 V/div.; Ch3 5 A/div.; Ch4 250 V/div.
Horizontal: 100 ms/div.

Após a partida, figura 5.1.4, a tensão CC está estabilizada e i_{mon} assume um valor superior ao da figura 5.1.2, uma vez que se está alimentando também o motor.

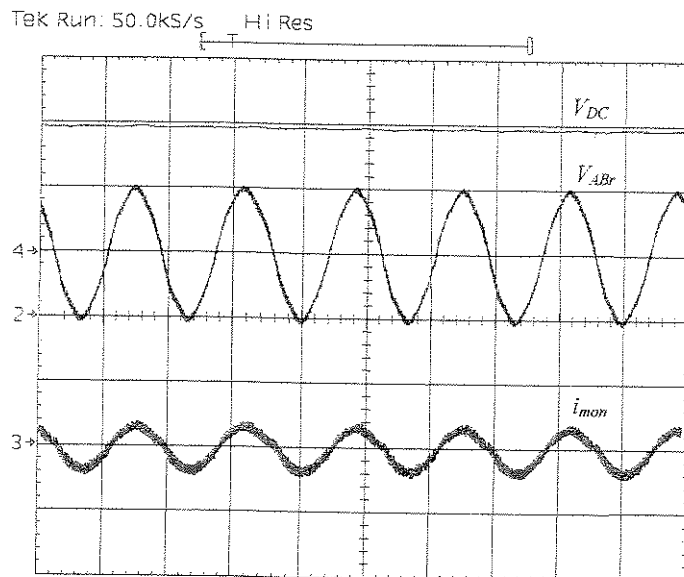


Figura 5.1.4. Tensão CC, tensão e corrente na rede monofásica acionando o motor.
 Vertical: Ch2 100 V/div.; Ch3 5 A/div.; Ch4 250 V/div.
 Horizontal: 10 ms/div.

5.1.b Sem carga

Os procedimentos utilizados na obtenção dos resultados experimentais foram os seguintes: aciona-se o DSP, aumenta-se a tensão da rede monofásica à qual o CEP monofásico está conectado. Atingindo um limiar mínimo de tensão de entrada, o DSP passa a gerar sinais para o comando das chaves, até carregar o “link” CC com a tensão de trabalho. Em seguida, aciona-se o conversor trifásico e a máquina de indução é acionada (como motor, se estiver abaixo da velocidade síncrona). O próximo passo é aumentar a velocidade do motor CC (que representa a turbina num sistema real). A partir de 1800 rpm a máquina de indução começa a trabalhar como GI.

Na figura 5.1.5 são apresentadas a tensão regulada no barramento CC, a tensão e a corrente na rede monofásica. Como ambas estão defasadas 180° (por convenção), está sendo enviada a energia produzida pelo GI para a rede monofásica.

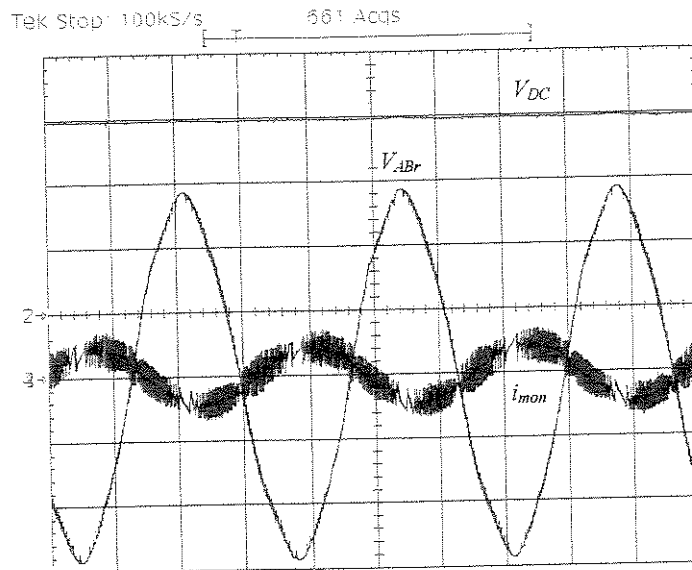


Figura 5.1.5. Tensão CC, tensão e corrente na rede monofásica.
Vertical: Ch2 100 V/div.; Ch3 2 A/div.; Ch4 100 V/div.
Horizontal: 5 ms/div.

Na figura 5.1.6, apresentam-se as correntes de linha do GI, incluindo a componente de magnetização, as quais estão defasadas 120° entre si, mas possuem um pequeno desbalanço em termos de amplitude, que não se justifica pela carga conectada (que é simétrica e equilibrada).

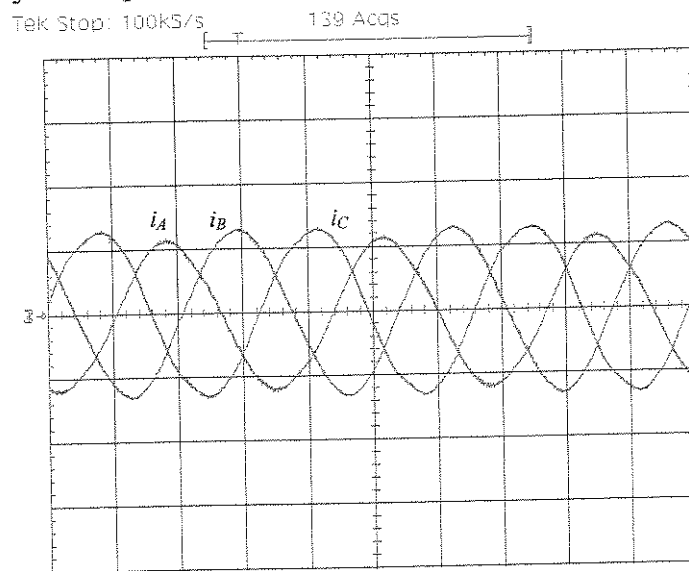


Figura 5.1.6. Correntes fornecidas pelo gerador de indução.
Vertical: Ch2 = Ch3 = Ch4 2 A/div.
Horizontal: 5 ms/div.

Observa-se, pela amplitude do sinal de corrente injetado na rede, que grande parte da potência gerada está sendo consumida internamente ao sistema. De fato, o GI está suprindo as perdas nos

inversores trifásico e monofásico.

No caso da figura 5.1.5 a potência entregue à rede é de aproximadamente 140 W.

5.1.c Carga trifásica

Na situação mostrada na figura 5.1.7, é colocada uma carga trifásica de 300 W desequilibrada (conforme figura 3.4.4) sendo possível ver que tanto a corrente monofásica quanto tensão da rede estão em fase. Por convenção, isto indica que o gerador não consegue, sozinho, suprir carga. Parte da energia é recebida da rede, com isso, o GI e a rede monofásica operam em situação de co-geração para alimentá-la.

Na figura 5.1.8, novamente é analisada a performance do controle no momento de conexão da carga trifásica resistiva (desequilibrada).

Inicialmente, o sistema está entregando energia à rede. Quando a carga é inserida, como sua potência é superior à gerada, o déficit energético é proveniente da rede monofásica.

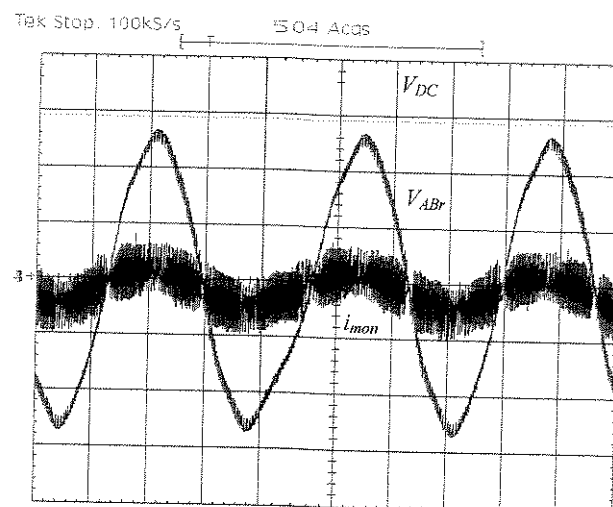


Figura 5.1.7. Tensão CC, tensão e corrente na rede monofásica.
 Vertical: Ch1 1 A/div.; Ch3 100 V/div.; Ch4 100 V/div.
 Horizontal: 5ms/div.

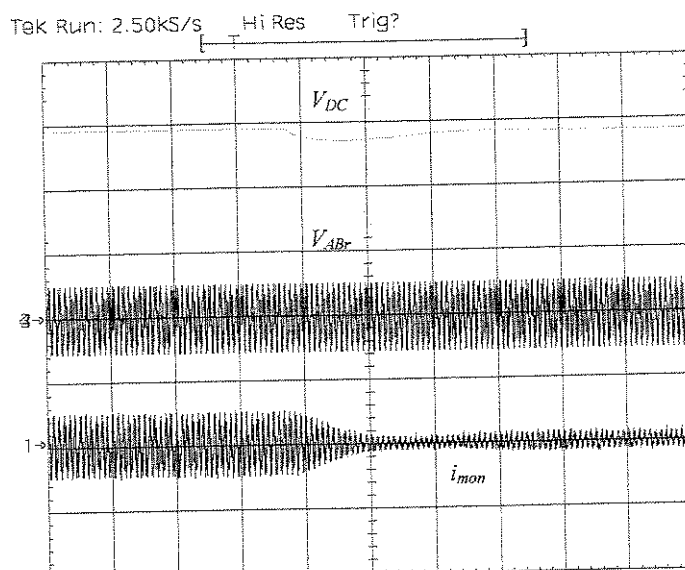


Figura 5.1.8. Tensão CC, tensão e corrente na rede monofásica na partida da carga.
 Vertical: Ch1 2 A/div.; Ch3 100 V/div.; Ch4 500 V/div.
 Horizontal: 200 ms/div.

5.1.d Carga CA monofásica

A título de comprovação da afirmação de que este tipo de sistema o GI forneceria não é capaz de equilibrar as correntes, são apresentadas na figura 5.1.9 as correntes fornecidas pela máquina quando uma carga monofásica de 160 W é conectada aos terminais do GI.

Como esperado, elas possuem formato e defasagem próximos do ideal no entanto, suas amplitudes são diferentes. Nestas medidas incluem-se as componentes de magnetização.

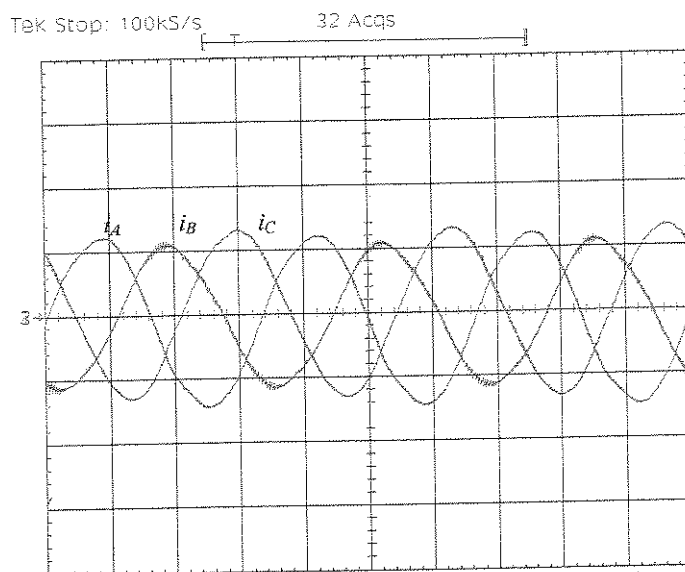


Figura 5.1.9. Correntes fornecidas pelo gerador de indução.
 Horizontal: Ch1=Ch2=Ch3 1 A/div.
 Vertical: 5ms/div.

5.1.e Carga não-linear

Nesta situação, uma carga não linear é conectada nos terminais do GI e o controle atua de forma a enviar à rede monofásica uma corrente senoidal, mesmo se a carga solicitar uma corrente totalmente distorcida (figura 3.4.4). É possível notar que tensão e corrente da rede monofásica estão defasadas de 180° mostrando que o excesso de energia é enviado a rede monofásica, figura 5.1.10.

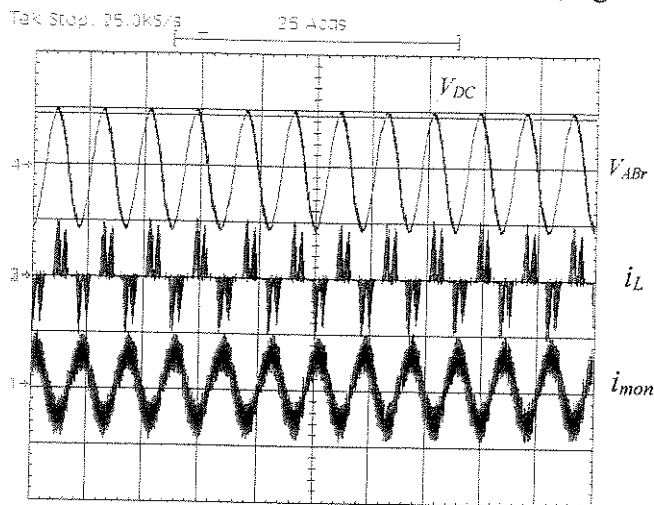


Figura 5.1.10. Tensão CC, tensão e corrente na rede monofásica e corrente na carga.
Vertical: Ch1=Ch2 1 A/div.; Ch3 100 V/div.; Ch4 250 V/div.
Horizontal: 20 ms/div.

Na figura 5.1.11 pode-se visualizar à medida que vai aumentando a corrente de carga a corrente que é enviada a rede monofásica vai diminuindo.

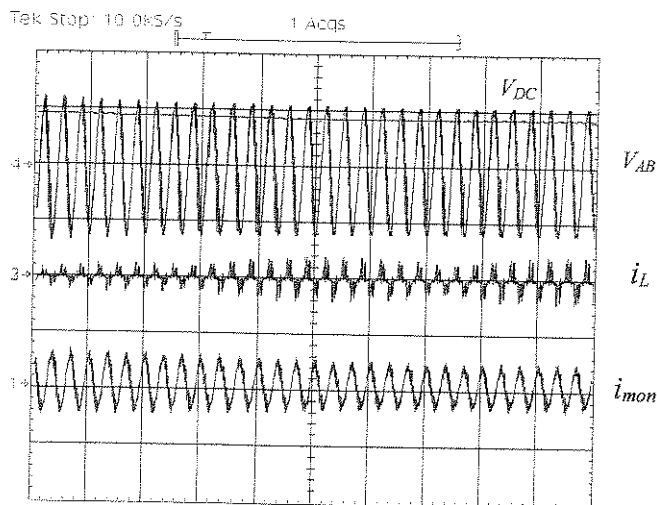


Figura 5.1.11. Tensão CC, tensão nos terminais do GI, corrente de carga e corrente na rede monofásica.
Vertical: Ch1=Ch2 2 A/div.; Ch3 100 V/div.; Ch4 250 V/div.
Horizontal: 50 ms/div.

A distorção na tensão nos terminais do GI aumenta, bem como ocorre uma ligeira diminuição em

sua amplitude devido à crescente queda de tensão nas indutâncias de saída do inversor trifásico.

5.1.f Partida de um motor de indução

Para esta situação é realizada a partida de uma máquina de indução com potência de 66% da potência nominal do GI.

No momento da partida absorve-se potência tanto do barramento CC quanto do GI e da rede monofásica. Nota-se que após a partida o sistema continua absorvendo energia da rede, embora em quantidade bastante reduzida.

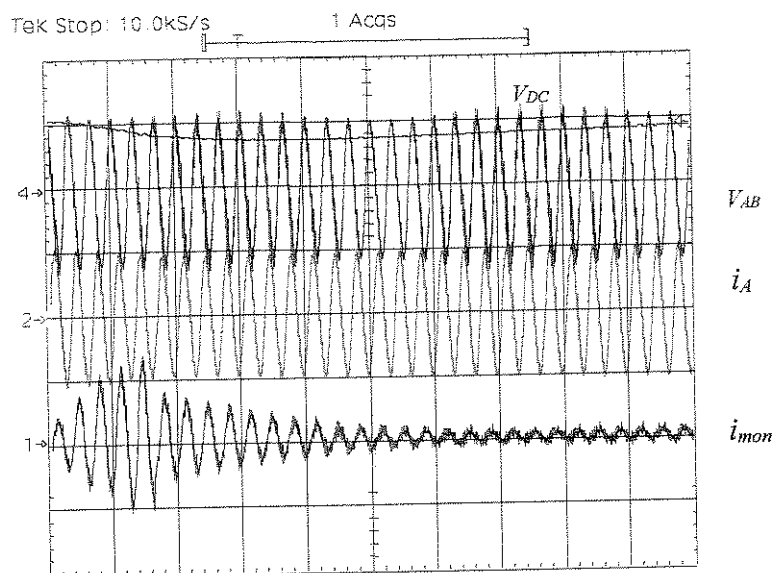


Figura 5.1.12. Tensão CC, tensão e corrente no GI e corrente na rede monofásica.
Vertical: Ch1 = Ch2 2 A/div.; Ch3 100 V/div.; Ch4 250 V/div.
Horizontal: 50 ms/div.

5.2. Gerador Conectado ao Barramento Monofásico com CEP Trifásico

Na montagem experimental do circuito da figura 3.3.1, pode-se visualizar a tensão e a corrente fornecida pelo GI. As tensões são desequilibradas (figura 5.2.1), enquanto as correntes, são distorcidas e desequilibradas (figura 5.2.2).

Utilizando estas formas de onda e o algoritmo de cálculo definido no capítulo 2, não foi possível gerar as referências adequadas ao bom funcionamento do sistema, como se esperava a partir das

simulações. Por esta razão as investigações neste sentido foram deixadas para a continuidade prevista deste trabalho.

A análise espectral das correntes fornecidas pelo GI mostra que além das 3^a e 5^a existem outras harmônicas que contribuem com a não possibilidade de emprego da teoria da potência instantânea para controlar um único CEP trifásico com o GI diretamente conectado ao barramento monofásico. A figura 5.2.3 apresenta os espectros de uma das correntes fornecidas pelo GI como também, uma das tensões terminais do GI.

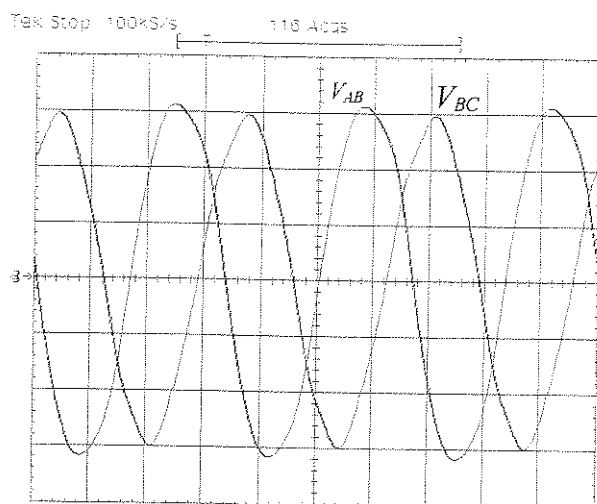


Figura 5.2.1. Tensões de linha nos terminais do GI.
Vertical: Ch1 = Ch2 100 V/div.
Horizontal: 5 ms/div.

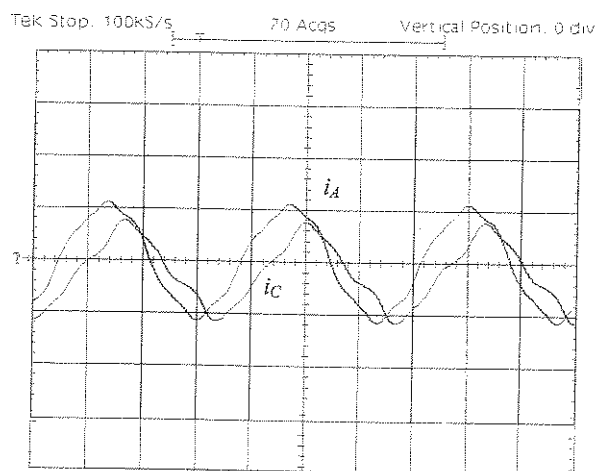


Figura 5.2.2. Correntes de linha do GI.
Vertical: Ch1 = Ch2 2 A/div.
Horizontal: 5 ms/div.

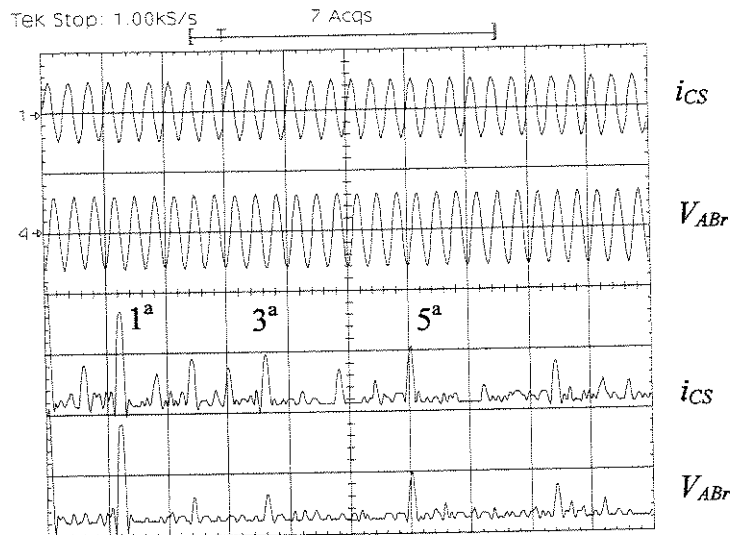


Figura 5.2.3. Corrente e tensão de linha do GI, análise no tempo e espectro.
 Vertical: Ch1 5 A/div., Ch4 500 V/div.; MT2 = MT3 40 db/div.
 Horizontal: Ch1 = Ch4 50 ms/div.; MT2 = MT4 50 Hz/div.

5.3. Conclusões

Neste capítulo, foram apresentados os resultados experimentais para o sistema com conexão com a rede monofásica através do barramento CC. O controle empregado foi capaz de atuar satisfatoriamente tanto em regime quanto em situações de transitórios, corrigindo a tensão no barramento CC e controlando o fluxo de potência no sistema.

Foram apresentadas situações com carga resistiva trifásica e monofásica, com carga não-linear, carga reativa, incluindo a partida de uma máquina de indução com cerca de 66 % da potência nominal do GI. Em todos os casos o desempenho foi satisfatório.

Também foi verificada a incapacidade do CEP trifásico, com conexão direta com a rede monofásica, de balancear o sistema. Isto ocorre devido às distorções presentes nas formas de onda, o que não permite que se obtenha bons resultados quando utiliza-se a estratégia de controle proposta no capítulo 2, baseada na teoria de potência instantânea.

CONCLUSÃO

A proposta deste trabalho foi conectar o GI a uma rede monofásica de forma simples e eficaz. Sabendo-se que, apesar de seu baixo custo, o GI tipicamente apresenta baixa regulação de tensão, causada não só pela queda de tensão nas impedâncias de rotor e estator, mas principalmente pela variação da frequência estatórica, o que restringe fortemente a aplicação desta máquina como gerador, foi proposta a utilização de conversores eletrônicos de potência para controlar o fluxo de potência e manter constante a tensão e a frequência do GI.

Para testar as expectativas apresentadas durante este trabalho, simulou-se um GI conectado a um barramento monofásico. As configurações simuladas foram: sem o CEP, com conexão direta e com CEP monofásico, com conexão direta e com CEP trifásico e um sistema isolado com CEP's monofásico e trifásico.

Sem o CEP e com qualquer tipo de carregamento, não há forma do conjunto se auto compensar. Quando colocou-se carga, duas situações foram geradas: se a carga for equilibrada e toda a potência gerada for consumida, automaticamente ocorre o balanceamento tanto nas correntes de linha como nas tensões do GI. Caso contrário, não há balanceamento das variáveis elétricas do GI. Se a carga for desequilibrada, não há forma deste sistema se ajustar sem algum tipo de controle externo. Obviamente o GI fica submetido a torques pulsantes.

Como forma de solucionar este problema, utilizou-se da teoria da potência como método de cálculo para gerar uma corrente que tornasse o conjunto equilibrado.

Duas direções poderiam ser tomadas, uma utilizaria um CEP monofásico e outra um CEP

trifásico. A primeira, como demonstrado, possuía o empecilho de armazenar energia no CEP. A solução para eliminar este acúmulo energético dependeria do ângulo entre as tensões e correntes de linha da máquina.

A outra solução foi um CEP trifásico que, junto com a restrição de não acumular energia tornaria possível a operação adequada do sistema. No momento da implementação, verificou-se que os CEP's não eram capazes de compensarem o sistema devido à grande distorção harmônica presente tanto nas tensões quanto nas correntes.

Como alternativa optou-se por um sistema isolado que possui a dois conversores um trifásico que definia tensões e frequência de trabalho para o GI e outro monofásico, com controle em corrente, para realizar o balanço de potência através da monitoração da tensão do barramento CC.

Esta idéia foi aplicada em vários tipos de carregamento: ativos, reativos, lineares, não-lineares, balanceadas e não-balanceadas.

Em quase todas situações o CEP foi capaz de corrigir as variáveis elétricas de forma muito eficaz e entregar uma energia de boa qualidade tanto para o barramento trifásico quanto para a rede monofásica.

Na implementação experimental fez-se também a partida de um motor de indução de grande porte relativo, que comprovou a robustez e boa performance do controle frente a esta situação extrema.

Assim apresentou-se neste trabalho uma solução para conectar GI ao barramento monofásico com baixo custo, principalmente devido à não necessidade de regulação de velocidade do GI e sem maiores dificuldades para a implementação do sistema.

Uma importante seqüência deste trabalho seria a implementação de uma nova estratégia de controle para o sistema com CEP trifásico e conectado diretamente ao barramento monofásico o que minimizaria o custo total [6].

MODELAGEM E PARÂMETROS DO GI

O GI (figura A.1) é representado através de um modelo trifásico a três condutores, sendo que as grandezas que representam o rotor são referidas a um sistema de três eixos estacionários localizados no estator, $\alpha\beta\gamma$. O mesmo pode ser feito em relação ao estator [4-5].

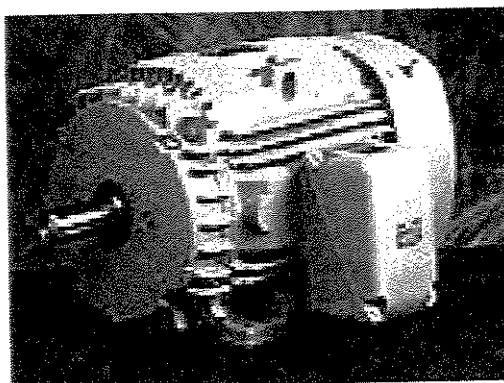


Figura A.1. Máquina de indução

A utilização deste tipo de representação permite: utilização de um circuito equivalente com o mesmo número de terminais da máquina; a simulação da máquina junto a programas com representação circuital; as grandezas do estator não são afetadas pela transformação $\alpha\beta\gamma$; o modelo apresenta precisão matemática satisfatória. Este circuito pode ser colocado em sistemas com desequilíbrios elétricos, desde que em circuitos trifásicos a três condutores [20-21].

O modelo da máquina de indução, referido ao sistema de eixos estacionários, é desenvolvido a partir das seguintes considerações: as grandezas do rotor são referidas ao estator, não há saturação magnética na máquina, a FMM do estator e o fluxo do entreferro não apresentam componentes harmônicas espaciais, as perdas magnética e mecânicas são desprezadas e a máquina é trifásica a três condutores.

Pela última afirmação, pode-se verificar o seguinte equacionamento:

$$i_{as} + i_{bs} + i_{cs} = 0 \quad (\text{A.1})$$

$$i'_{ar} + i'_{br} + i'_{cr} = 0 \quad (\text{A.2})$$

Onde a equação A.1 apresenta as correntes de linha do GI e a equação A.2, as correntes de linha do rotor, referidas ao estator.

Para o equacionamento dinâmico, as grandezas são escritas em termos de seus valores instantâneos para as fases abc do estator e rotor. Sua dedução pode ser encontrada em [21

$$\begin{bmatrix} v_{abcs}^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{abcs}^a \end{bmatrix} + \frac{d \begin{bmatrix} \lambda_{abcs}^a \end{bmatrix}}{dt} \quad (\text{A.3})$$

$$\begin{bmatrix} v'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R'_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i'_{abcr} \end{bmatrix} + \frac{d \begin{bmatrix} \lambda'_{abcr} \end{bmatrix}}{dt} \quad (\text{A.4})$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs}^a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{abcs}^a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{sr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i'_{abcr} \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

$$\begin{bmatrix} \lambda'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L'_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i'_{abcr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{sr} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} i_{abcs}^a \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

$\begin{bmatrix} v_{abcs}^a \end{bmatrix}$, $\begin{bmatrix} i_{abcs}^a \end{bmatrix}$ e $\begin{bmatrix} \lambda_{abcs}^a \end{bmatrix}$ são os respectivos vetores de tensão, corrente e fluxo concatenado nos enrolamentos das fases do estator.

$\begin{bmatrix} v'_{abcr} \end{bmatrix}$, $\begin{bmatrix} i'_{abcr} \end{bmatrix}$ e $\begin{bmatrix} \lambda'_{abcr} \end{bmatrix}$ são os respectivos vetores de tensão, corrente e fluxo concatenado nos enrolamentos das fases do rotor, referidos ao estator.

$\begin{bmatrix} R_s \end{bmatrix}$ e $\begin{bmatrix} L_s \end{bmatrix}$ são as matrizes das resistências de estator e das indutâncias próprias do estator, respectivamente.

$\begin{bmatrix} R'_r \end{bmatrix}$ e $\begin{bmatrix} L'_r \end{bmatrix}$ são as respectivas matrizes das resistências de rotor e das indutâncias próprias do rotor, referidas ao estator.

$\begin{bmatrix} L_{sr} \end{bmatrix}$ é a matriz das indutâncias mútuas entre os enrolamentos das fases do rotor e do estator.

As posições espaciais dos eixos $\alpha\beta\gamma$ da referência estacionária são coincidentes com as posições espaciais dos eixos magnéticos dos enrolamentos estatóricos das fase abc para cada par de pólos.

Para transformar as equações do rotor e estator utilizam-se as seguintes matrizes de transformações, equações A.7 e A.8 [21].

$$[f_{\alpha\beta\gamma}] = [K_{\alpha}^a] \cdot [f_{abc}] \quad (\text{A.7})$$

$$[f_{abc}] = [K_{\alpha}^a]^{-1} \cdot [f_{\alpha\beta\gamma}] \quad (\text{A.8})$$

$[f_{\alpha\beta\gamma}]$ são grandezas referidas ao sistema de eixos $\alpha\beta\gamma$.

$[f_{abc}]$ são grandezas escritas em termos da fases abc do estator e do rotor no sistema abc.

$[K_{\alpha}^a]$ é a matriz de transformação do sistema de referência abc para o sistema $\alpha\beta\gamma$, a qual pode ser dividida em uma matriz $[K_{\alpha s}^a]$, para o estator e uma matriz $[K_{\alpha r}^a]$ para o rotor. Conforme equações A.9 e A.10.

$[K_{\alpha}^a]^{-1}$ é a matriz de transformação do sistema $\alpha\beta\gamma$ para o abc, a qual pode também ser dividida em duas partes uma para o estator e outra para o rotor, conforme explicação anterior.

$$[K_{\alpha s}^a] = \text{diag}[1 \ 1 \ 1] \quad (\text{A.9})$$

$$[K_{\alpha r}^a] = \begin{bmatrix} \cos\theta_r + \frac{1}{2} & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} & \cos\theta_r + \frac{1}{2} & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{2} & \cos\theta_r + \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{A.10})$$

A constante θ é a posição angular elétrica do rotor em radianos.

Outra coisa importante a ser notada é que a transformação $\alpha\beta\gamma$ não afeta as grandezas que foram transformadas no estator e sua notação será modificada apenas pela retirada do subscrito 'a'. As novas equações para a máquina são [21]:

$$[v_{abcs}] = r_s [i_{abcs}] + \frac{d[\lambda_{abcs}]}{dt} \quad (\text{A.11})$$

$$0 = r_r' [i'_{\alpha\beta\gamma r}] + \frac{d[\lambda'_{\alpha\beta\gamma r}]}{dt} + \frac{\omega_r}{\sqrt{3}} [\lambda_{\alpha x}] \quad (\text{A.12})$$

$$[\lambda_{abcs}] = (L_{ls} + M) [i_{abcs}] + M [i'_{\alpha\beta\gamma r}] \quad (\text{A.13})$$

$$[\lambda'_{\alpha\beta\gamma r}] = (L'_{lr} + M) [i'_{\alpha\beta\gamma r}] + M [i_{abcs}] \quad (\text{A.14})$$

$$[\lambda_{\alpha x}] = \begin{bmatrix} (\lambda'_{\beta r} - \lambda'_{\gamma r}) \\ (\lambda'_{\gamma r} - \lambda'_{\alpha r}) \\ (\lambda'_{\alpha r} - \lambda'_{\beta r}) \end{bmatrix} \quad (\text{A.15})$$

$$T_{mec} = \sqrt{3} \left(\frac{p}{2} \right) M (i_{as} i'_{\gamma r} - i_{cs} i'_{\alpha r}) \quad (\text{A.16})$$

$[v_{abcs}]$, $[i_{abcs}]$ e $[\lambda_{abcs}]$ são os respectivos vetores de tensão, corrente e fluxo concatenado nos enrolamentos do estator, na referência $\alpha\beta\gamma$.

$[i'_{\alpha\beta\gamma r}]$ e $[\lambda'_{\alpha\beta\gamma r}]$ são os respectivos vetores de corrente e fluxo concatenado nos enrolamentos do rotor, referidos ao estator, na referência $\alpha\beta\gamma$.

$[\lambda_{\alpha x}]$ é o vetor de diferenças de fluxos, resultante da transformação $\alpha\beta\gamma$.

L_{ls} e L'_{lr} são as indutâncias de dispersão dos enrolamentos do estator e do rotor referidas ao estator, respectivamente.

$i'_{\alpha r}$ é a corrente de linha do rotor para a fase 'A' no eixo α .

i'_{γ} é a corrente de linha do rotor para a fase 'C' no eixo γ .

M é a indutância de magnetização do entreferro.

T_{mec} é o torque no eixo da máquina.

r_s e r'_r são respectivamente resistências por fase do estator e rotor referida ao estator.

Para descrever o comportamento mecânico utiliza-se a equação A.17.

$$T_{mec} = \left(\frac{2}{p}\right)J \frac{d\omega_r}{dt} + \left(\frac{2}{p}\right)B_m \omega_r + T_L \quad (A.17)$$

ω_r é a velocidade angular elétrica do eixo do rotor.

p é o número de pólos do GI.

J é a constante de inércia do rotor em kg.m^2 .

B_m é a constante de atrito rotacional em $\text{kg.m}^2/\text{s}$.

T_L é o conjugado de carga em N.m.

Assim, o modelo da máquina é representado pelas equações A.11 a A.17.

Os parâmetros da máquina utilizada nas simulações e ensaios estão na tabela 4.1. Os valores de reatância são para 60 Hz.

Tabela A.1

Resistência de estator (r_s)	4,4 Ω
Resistência do rotor (r_r)	5,02 Ω
Reatância de dispersão do estator (X_s)	5,9 Ω
Reatância de dispersão do rotor (X_r)	5,9 Ω
Reatância mútua (X_m) ($2.\pi.60.M$)	70,53 Ω
Resistência de perdas mecânicas e elétricas (R_m)	582 Ω
Potência nominal	$\frac{1}{2}$ CV
Número de pólos (p)	4
Inércia do rotor (J)	0,0006 kg.m^2

DEFINIÇÃO DAS TENSÕES EQUILIBRADAS

Neste item é apresentado um detalhamento em relação à determinação das tensões equilibradas usadas no algoritmo de controle. Como afirmado no capítulo 2, deve-se atrasar a tensão V_{AB} em 30° e em 120° e, de posse dos sinais defasados, multiplicá-los por $\frac{\sqrt{2}}{2}$, obtendo-se deste modo V'_α e V'_β .

A figura B.1 apresenta os sinais de tensões entre fase V_{AB} , V_{BC} e V_{CA} . Estes sinais foram amostradas num sistema que emulava três tensões equilibradas e defasadas em 120°

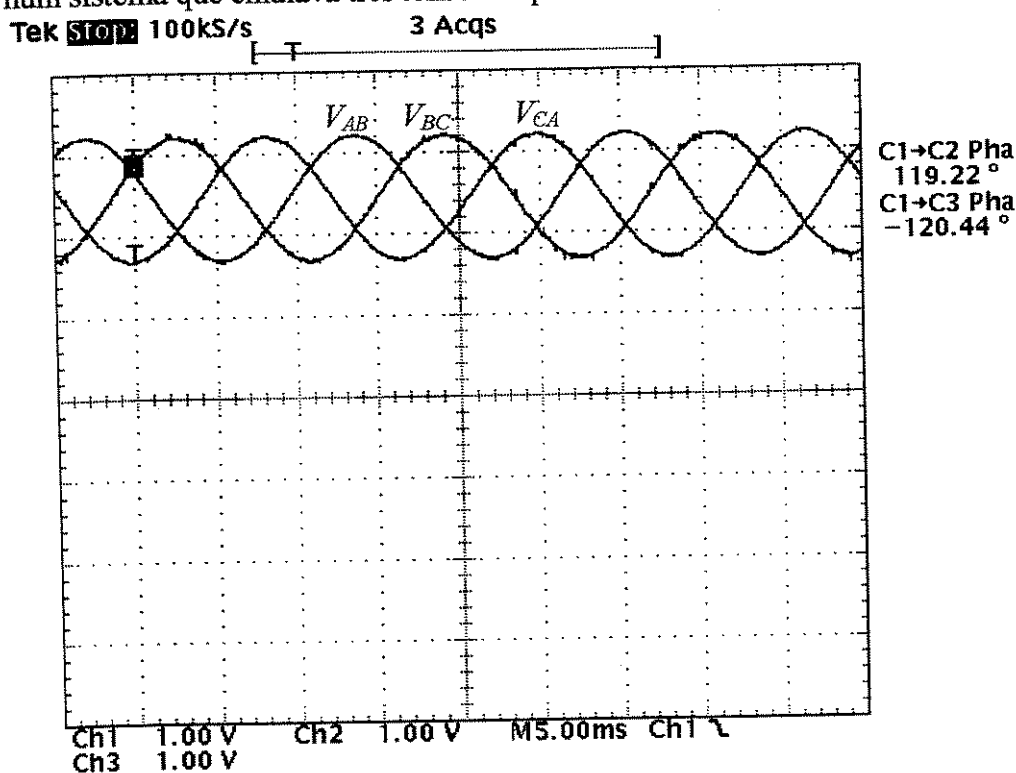


Figura B.1. Tensões equilibradas no sistema abc.

Os sinais possuem um valor CC, o qual é necessário porque o conversor A/D do DSP lê somente valores entre 0 e 5 V.

As tensões V_α e V_β são calculadas de acordo com a equação 2.3.2, a partir do sistema

equilibrado da figura B.1.

A figura B.2 mostra as tensões V_{AB} , V'_α e V'_β na primeira parte do gráfico e, na segunda, V_{AB} , V_α e V_β . Dessa forma é possível mostrar que obtém-se os mesmos resultados a partir de uma simples operação algébrica.

Como vantagem dessa estratégia de cálculo é possível citar a sua simplicidade para implementação no DSP e maior rapidez quando comparada às equações necessárias para gerá-las. Tal equacionamento usaria as séries de senos e cossenos que geram os três sinais de tensão defasados de 120° V_{AB} , V_{BC} , V_{CA} e a posterior a transformação de três para dois eixos.

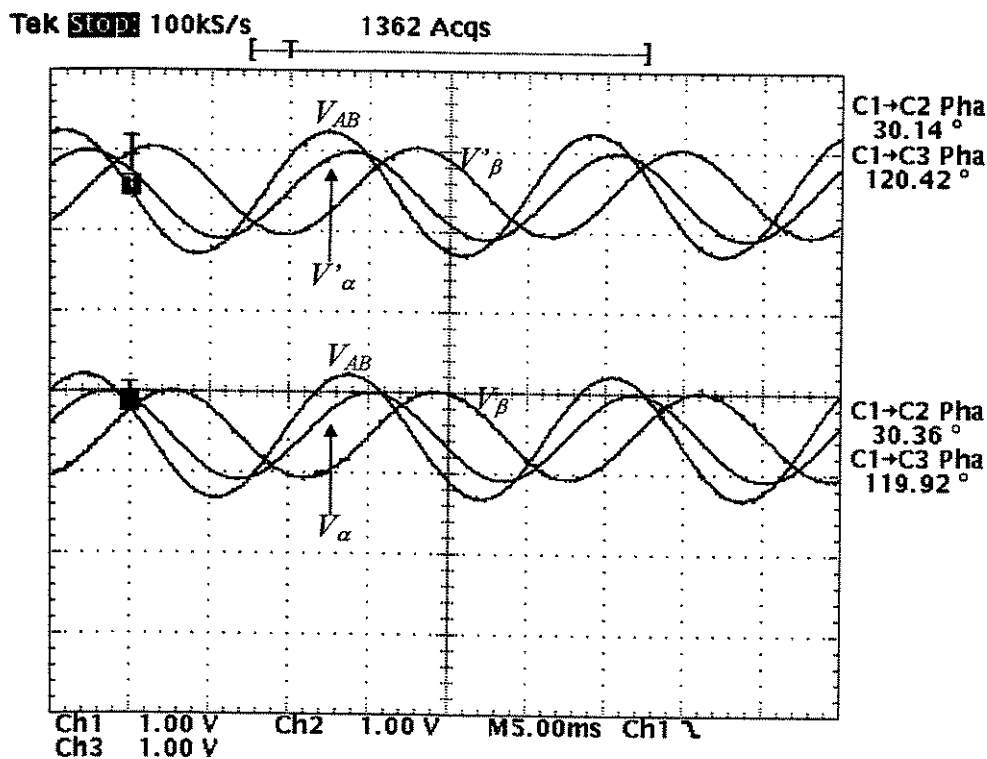


Figura B.2. Tensões equilibradas no sistema $\alpha\beta$.

DEFINIÇÕES DE POTÊNCIA

A potência ativa instantânea é definida pela equação C.1 e utiliza o produto escalar de vetores. Como está se trabalhando em um sistema sem componentes de seqüência zero, tanto nas correntes quanto nas tensões, é possível definir tensões e correntes de acordo com as equações C.2 e C.3 [6-7].

$$P = V \cdot i \text{ ou } P = V_A \cdot i_A + V_B \cdot i_B + V_C \cdot i_C \quad (\text{C.1})$$

$$V_A + V_B + V_C = 0 \quad (\text{C.2})$$

$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad (\text{C.3})$$

Dessa forma, a equação C.1 pode ser redefinida de acordo com a equação C.4 em um sistema de dois eixos $\alpha\beta$ [8-9].

$$P = V_\alpha \cdot i_\alpha + V_\beta \cdot i_\beta \quad (\text{C.4})$$

Para o vetor de potência reativa define-se o produto vetorial entre tensões e correntes onde sua magnitude é definida como a potência reativa, equação C.5 [10-11].

$$Q = V \times i \quad (\text{C.5})$$

Para o mesmo circuito trifásico sem componentes de seqüência zero tanto nas correntes como nas tensões e em um sistema de dois eixos $\alpha\beta$, o vetor de potência reativa é definido pela equação C.6.

$$Q = V_\alpha \cdot i_\beta - V_\beta \cdot i_\alpha \quad (\text{C.6})$$

CIRCUITOS UTILIZADOS

O circuito da figura D.1 tem como função somar um “offset” de 2,5 V para que os sinais amostrados (V_{DC} e V_{ABr}) possam estar disponíveis “on chip”.

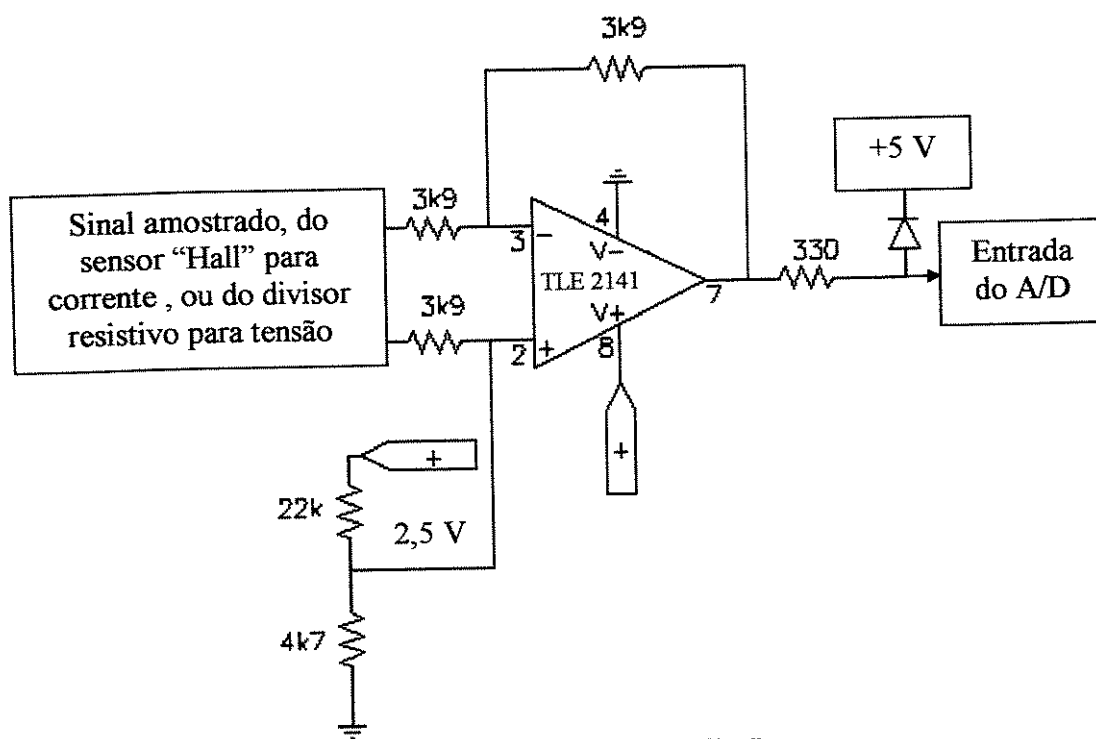


Figura D.1. Circuito de “offset”.

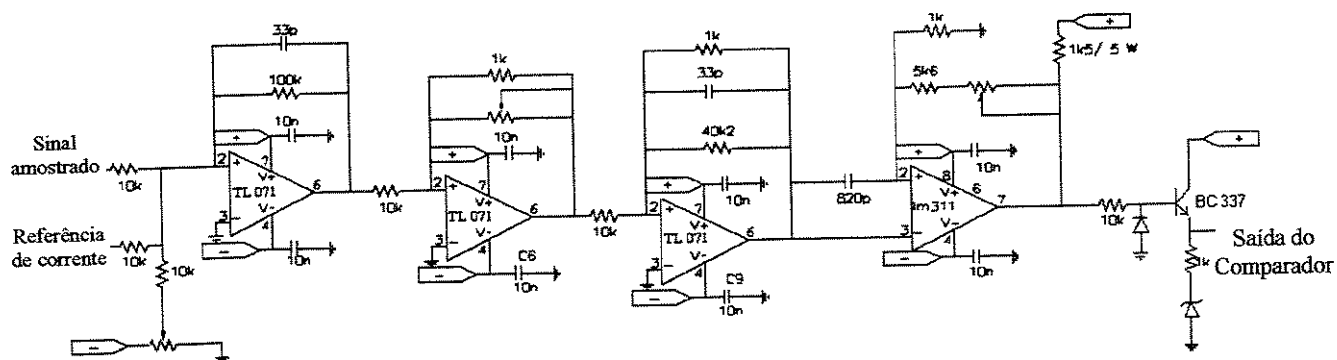


Figura D.2. Circuito do comparador com histerese.

Já o circuito da figura D.2 realiza a comparação com histerese e sua saída é usada para o comando do CEP monofásico. Foi utilizado para as correntes i_{Acon} e i_{Bcon} .

O circuito mostrado na figura D.3 separa cada bit vindo do comparador referente a i_{Acon} e i_{Bcon} .

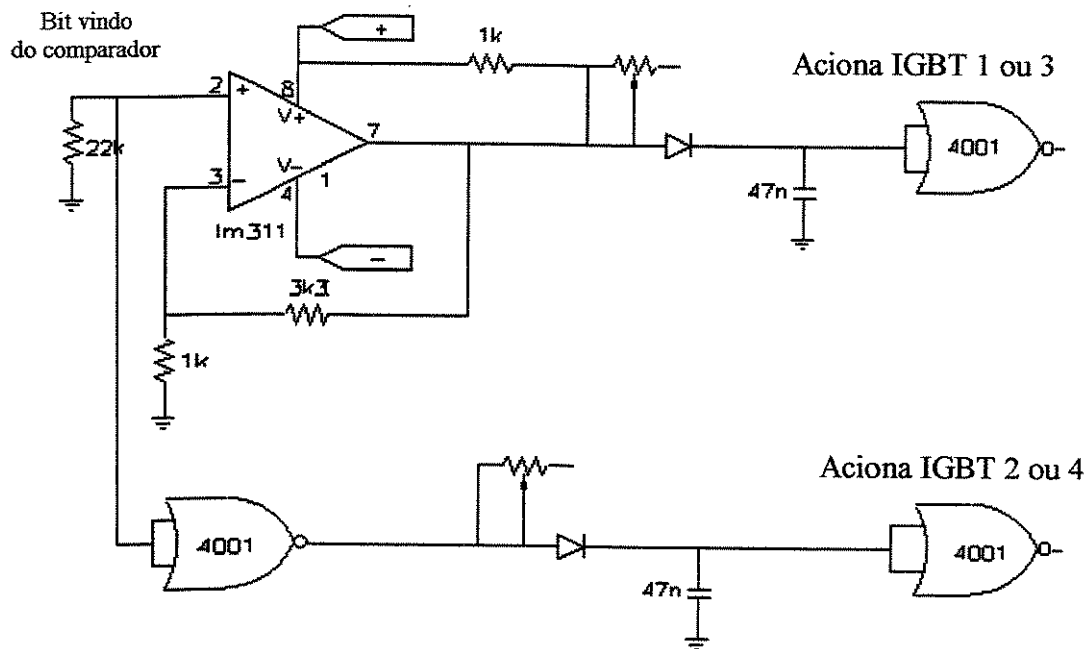


Figura D.3. Circuito de tempo morto.

FORMATO DAS VARIÁVEIS E VALORES BASE

As variáveis medidas são referidas a valores base. Os valores base por sua vez, são definidos de acordo com as equações E.1, E.2. Estes valores apresentados nestas equações são utilizados para definição dos valores *pu* do sistema.

$$i_b = \sqrt{2} \cdot i_n \quad (E.1)$$

$$V_b = \sqrt{2} \cdot V_n \quad (E.2)$$

O formato das variáveis, na maioria das aplicações de controle de máquinas, é o 4.12, que dedica 4 bits para o valor inteiro e 12 para o valor fracionário. Este formato é representado por uma resolução de [19]:

$$\frac{1}{2^{12}} = 0,00024414 \quad (E.3)$$

Nestas aplicações, a maioria das variáveis de controle nunca são maiores do que quatro vezes os valores nominais de placa. Neste exemplo que segue, as variáveis estão numa faixa entre [-8;8] (figura E.1) mostra-se que o conjunto tem precisão suficiente para realizar aquisição, mesmo quando as variáveis não estejam em regime permanente [19].

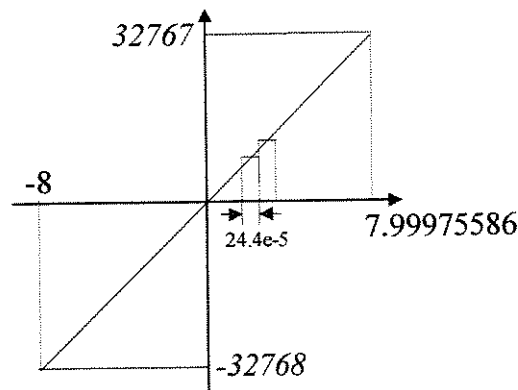


Figura E.1. Formato referente a [-8;8].

A seguir são feitas algumas considerações e operações com um formato genérico $x.y$. Dessa forma, é possível encontrar diversos formatos para representar qualquer conjunto de variáveis.

O formato numérico $x.y$ utiliza x bits para a parte inteira e y bits para a parte fracionária. A resolução deste tipo de formato é 2^{-y} . Se z é o valor em *pu* para ser implementado a variável em questão no formato $x.y$ é $z.2^{-y}$.

Um problema que é comum quando trabalha-se com este tipo de formato é quando adicionam-se dois valores que podem causar “overflow”. Uma solução é utilizar a parte alta do acumulador e “setar” o bit de saturação ou trabalhar com valores que nunca extrapolem o máximo “range”. Esta segunda aplicação poderá ser usada se as variáveis não excederem a metade do máximo valor representado em $x.y$ e o resultado desta operação pode ainda ser representado em $x.y$ [19].

Em multiplicações, o resultado da operação é representado em 32 bits no acumulador. Para o resultado estar disponível para trabalho, é necessário deslocar o resultado de x bits para a esquerda ou y bits para a direita. A figura E.2 apresenta duas variáveis no formato $x.y$ de 16 bits que serão multiplicadas entre si. O resultado desta multiplicação no formato $x.y$ é representado em cinza no acumulador, sendo ambas as soluções descritas abaixo [19].

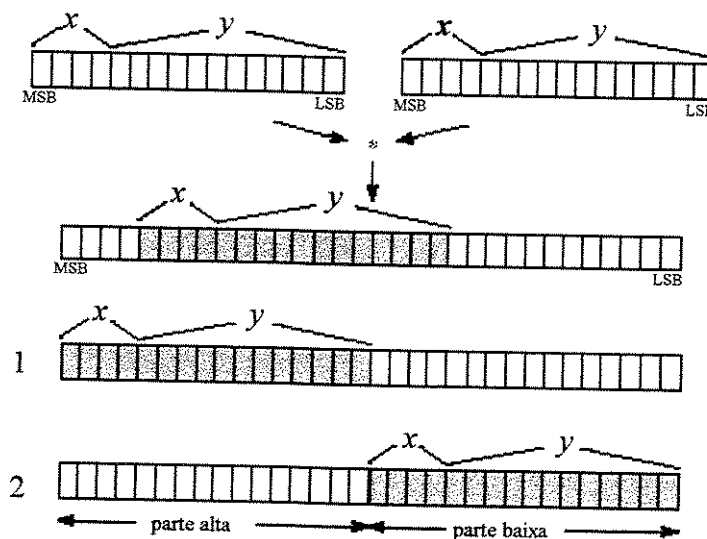


Figura E.2. Formato da palavra.

PROGRAMA EM LINGUAGEM ASSEMBLER

O programa listado neste anexo foi desenvolvido com base no algoritmo proposto no capítulo 2. Ele é dividido em várias etapas ou arquivos: O primeiro é um arquivo de inicialização do DSP chamado de arquivo Ricardoinic.asm; o segundo é o arquivo f240regs.h, que é um arquivo de cabeçalho que contém os registradores dos periférico e funções para uso geral; o terceiro é o arquivo Ricardo.cmd, que agrupa os códigos nas seções residentes na memória; o quarto é um arquivo gel, que cria funções auto inicializáveis quando é executado (o que ocorre quando o “code composer” é inicializado) e o último arquivo é o Ricardo.asm que é programa propriamente dito.

Arquivo de inicialização.

```

*****
;File Name:          Ricardoinic.asm
;Target System:     C24x Evaluation Board
;
;Description:       Arquivo de inicialização do DSP
;
;Revision:          1.00
;
*****
;-----
; Main program variables
;-----
        .bss      GPR0,1
;-----
; Vector address declarations
;-----
        .sect    ".vectors"

RSVECT      B   START           ;Reset Vector
INT1        B   PHANTOM         ;Interrupt Level 1
INT2        B   PHANTOM         ;Interrupt Level 2
INT3        B   PHANTOM         ;Interrupt Level 3
INT4        B   PHANTOM         ;Interrupt Level 4
INT5        B   PHANTOM         ;Interrupt Level 5
INT6        B   PHANTOM         ;Interrupt Level 6
RESERVED    B   PHANTOM         ;Reserved
SW_INT8     B   PHANTOM         ;User S/W Interrupt
SW_INT9     B   PHANTOM         ;User S/W Interrupt

```



```

SW_INT10      B PHANTOM      ;User S/W Interrupt
SW_INT11      B PHANTOM      ;User S/W Interrupt
SW_INT12      B PHANTOM      ;User S/W Interrupt
SW_INT13      B PHANTOM      ;User S/W Interrupt
SW_INT14      B PHANTOM      ;User S/W Interrupt
SW_INT15      B PHANTOM      ;User S/W Interrupt
SW_INT16      B PHANTOM      ;User S/W Interrupt
TRAP          B PHANTOM      ;Trap vector
NMINT         B PHANTOM      ;Non-maskable Interrupt
EMU_TRAP      B PHANTOM      ;Emulator Trap
SW_INT20      B PHANTOM      ;User S/W Interrupt
SW_INT21      B PHANTOM      ;User S/W Interrupt
SW_INT22      B PHANTOM      ;User S/W Interrupt
SW_INT23      B PHANTOM      ;User S/W Interrupt

```

```

;=====
; MAIN CODE - starts here
;=====

```

```

        .text
        NOP
START:  SETC  INTM      ;Disable interrupts
        SPLK #0002h,IMR ;Mask all core interrupts except INT2
        LACC  IFR      ;Read Interrupt flags
        SACL  IFR      ;Clear all interrupt flags
        CLRC  SXM      ;Clear Sign Extension Mode
        CLRC  OVM      ;Reset Overflow Mode
        CLRC  CNF      ;Config Block B0 to pPROGRAM mem

```

```

;-----
; Set clock
;-----

```

```

        LDP  #00E0h      ;DP for addresses 7000h-707Fh
        SPLK #00BBh,CKCR1 ;CLKIN(OSC)=10MHz,CPUCLK=20MHz
        SPLK #00C3h,CKCR0 ;CLKMD=PLL Enable,SYSClk=CPUCLK/2
        SPLK #40C0h,SYSCR ;CLKOUT=CPUCLK

```

```

        SPLK #006Fh, WDCR ;Disable WD if VCCP=5V (JP5 in pos. 2-3)
        KICK_DOG          ;Reset Watchdog
        LDP  #0000h      ;DP=0 data page ADC register
        SPLK #4h,GPR0    ;set wait state generator for: Program space, 0 wait states
        OUT  GPR0,WSGR   ;Data space, 0 wait states, I/O space, 1 wait state
        LDP  #225        ;DP=225 data page ADC register
        SPLK #0F0eh,OCRA ;Set input A/D(1,8e9) and output IOPA0(track/hold S&H), and
                          ; TICMP/TIPWM E PWM7/CMP7 until ;PWM9/CMP9

```

Arquivo de registradores.

```

*****
;File Name:          f240regs.h
;
;Description:        F240 Header file containing all peripheral register
                    declarations as well as other useful definitions.
;
;Revision:           1.00
*****

```

```

;On Chip Periperal Register Definitions (All registers mapped into data
;space unless otherwise noted)

```

```

;C2xx Core Registers

```

```

IMR           .set    0004h           ;Interrupt Mask Register
GREG          .set    0005h           ;Global memory allocation Register
IFR           .set    0006h           ;Interrupt Flag Register

```

```

;System Module Registers

```

```

SYSCR        .set    07018h          ;System Module Control Register
SYSSR        .set    0701Ah          ;System Module Status Register
SYSIVR       .set    0701Eh          ;System Interrupt Vector Register

```

```

;Watch-Dog(WD) / Real Time Int(RTI) / Phase Lock Loop(PLL) Registers

```

```

RTICNTR      .set    07021h          ;RTI Counter Register
WDCNTR       .set    07023h          ;WD Counter Register
WDKEY        .set    07025h          ;WD Key Register
RTICR        .set    07027h          ;RTI Control Register
WDCR         .set    07029h          ;WD Control Register
CKCR0        .set    0702Bh          ;Clock Control Register 0
CKCR1        .set    0702Dh          ;Clock Control Register 1

```

```

;Analog-to-Digital Converter(ADC) registers

```

```

ADCTRL1      .set    07032h          ;ADC Control Register 1
ADCTRL2      .set    07034h          ;ADC Control Register 2
ADCFIFO1     .set    07036h          ;ADC Data Register FIFO1
ADCFIFO2     .set    07038h          ;ADC Data Register FIFO2

```

```

;Serial Peripheral Interface (SPI) Registers

```

```

SPICCR       .set    07040h          ;SPI Configuration Control Register
SPICTL       .set    07041h          ;SPI Operation Control Register
SPISTS       .set    07042h          ;SPI Status Register
SPIBRR       .set    07044h          ;SPI Baud Rate Register
SPIEMU       .set    07046h          ;SPI Emulation buffer Register
SPIBUF       .set    07047h          ;SPI Serial Input Buffer Register
SPIDAT       .set    07049h          ;SPI Serial Data Register
SPIPC1       .set    0704Dh          ;SPI Port Control Register 1
SPIPC2       .set    0704Eh          ;SPI Port Control Register 2
SPIPRI       .set    0704Fh          ;SPI Priority control Register

```

```

;Serial Communications Interface (SCI) Registers

```

```

SCICCR       .set    07050h          ;SCI Communication Control Register
SCICTL1      .set    07051h          ;SCI Control Register 1
SCIHBAUD     .set    07052h          ;SCI Baud Select register, high bits
SCILBAUD     .set    07053h          ;SCI Baud Select register, high bits
SCICTL2      .set    07054h          ;SCI Control Register 2
SCIRXST      .set    07055h          ;SCI Receive Status Register
SCIRXEMU     .set    07056h          ;SCI Emulation data buffer Register
SCIRXBUF     .set    07057h          ;SCI Receiver data buffer Register
SCITXBUF     .set    07059h          ;SCI Transmit data buffer Register
SCIPC2       .set    0705Eh          ;SCI Port Control Register 2

```

```

SCIPRI                .set    0705Fh                ;SCI Priority Control Register

;External Interrupt Registers
;-----
XINT1                 .set    07070h                ;Interrupt 1 Control Register
NMI                   .set    07072h                ;Non-maskable Interrupt Control Register
XINT2                 .set    07078h                ;Interrupt 2 Control Register
XINT3                 .set    0707Ah                ;Interrupt 3 Control Register

;Digital I/O
;-----
OCRA                  .set    07090h                ;Output Control Reg A
OCRB                  .set    07092h                ;Output Control Reg B
PADATDIR              .set    07098h                ;I/O port A Data & Direction reg.
PBDATDIR              .set    0709Ah                ;I/O port B Data & Direction reg.
PCDATDIR              .set    0709Ch                ;I/O port C Data & Direction reg.

;General Purpose Timer Registers - Event Manager (EV)
;-----
GPTCON                .set    7400h                 ;General Purpose Timer Control Register
T1CNT                 .set    7401h                 ;GP Timer 1 Counter Register
T1CMPR                .set    7402h                 ;GP Timer 1 Compare Register
T1PR                  .set    7403h                 ;GP Timer 1 Period Register
T1CON                 .set    7404h                 ;GP Timer 1 Control Register
T2CNT                 .set    7405h                 ;GP Timer 2 Counter Register
T2CMPR                .set    7406h                 ;GP Timer 2 Compare Register
T2PR                  .set    7407h                 ;GP Timer 2 Period Register
T2CON                 .set    7408h                 ;GP Timer 2 Control Register
T3CNT                 .set    7409h                 ;GP Timer 3 Counter Register
T3CMPR                .set    740Ah                 ;GP Timer 3 Compare Register
T3PR                  .set    740Bh                 ;GP Timer 3 Period Register
T3CON                 .set    740Ch                 ;GP Timer 3 Control Register

;Full & Simple Compare Unit Registers - Event Manager (EV)
;-----
COMCON                .set    7411h                 ;Compare Control Register
ACTR                  .set    7413h                 ;Full Compare Action Control Register
SACTR                 .set    7414h                 ;Simple Compare Action Control Register
DBTCON                .set    7415h                 ;Dead-band Timer Control Register
CMPR1                 .set    7417h                 ;Full Compare Unit 1 Compare Register
CMPR2                 .set    7418h                 ;Full Compare Unit 2 Compare Register
CMPR3                 .set    7419h                 ;Full Compare Unit 3 Compare Register
SCMPR1                .set    741Ah                 ;Simple Compare Unit 1 Compare Register
SCMPR2                .set    741Bh                 ;Simple Compare Unit 2 Compare Register
SCMPR3                .set    741Ch                 ;Simple Compare Unit 3 Compare Register

;Capture & QEP Registers - Event Manager (EV)
;-----
CAPCON                .set    7420h                 ;Capture Control Register
CAPFIFO               .set    7422h                 ;Capture FIFO Status Register
CAP1FIFO              .set    7423h                 ;Capture 1 Two-level deep FIFO Register
CAP2FIFO              .set    7424h                 ;Capture 2 Two-level deep FIFO Register
CAP3FIFO              .set    7425h                 ;Capture 3 Two-level deep FIFO Register
CAP4FIFO              .set    7426h                 ;Capture 4 Two-level deep FIFO Register

;Interrupt Registers - Event Manager (EV)
;-----
EVIMRA                .set    742Ch                 ;EV Interrupt Mask Register A
EVIMRB                .set    742Dh                 ;EV Interrupt Mask Register B

```

```

EVIMRC      .set    742Eh      ;EV Interrupt Mask Register C
EVIFRA      .set    742Fh      ;EV Interrupt Flag Register A
EVIFRB      .set    7430h      ;EV Interrupt Flag Register B
EVIFRC      .set    7431h      ;EV Interrupt Flag Register C
EVIVRA      .set    7432h      ;EV Interrupt Vector Register A
EVIVRB      .set    7433h      ;EV Interrupt Vector Register B
EVIVRC      .set    7434h      ;EV Interrupt Vector Register C

```

```

;Flash Module Registers (mapped into Program space)

```

```

;-----
SEG_CTR     .set    0h          ;Flash Segment Control Register
WADRS      .set    2h          ;Flash Write Address Register
WDATA      .set    3h          ;Flash Write Data Register

```

```

;Wait State Generator Registers (mapped into I/O space)

```

```

;-----
WSGR       .set    0FFFFh     ;Wait State Generator Register

```

```

;-----
; Constant Definitions
;-----

```

```

;Data Memory Boundary Addresses

```

```

;-----
B0_SADDR   .set    00200h     ;Block B0 start address
B0_EADDR   .set    002FFh     ;Block B0 end address
B1_SADDR   .set    00300h     ;Block B1 start address
B1_EADDR   .set    003FFh     ;Block B1 end address
B2_SADDR   .set    00060h     ;Block B2 start address
B2_EADDR   .set    0007Fh     ;Block B2 end address
XDATA_SADDR .set    08000h     ;External Data Space start address
XDATA_EADDR .set    09FFFh     ;External Data Space end address

```

```

;Bit codes for Test Bit instruction (BIT)

```

```

;-----
BIT15     .set    0000h     ;Bit Code for 15
BIT14     .set    0001h     ;Bit Code for 14
BIT13     .set    0002h     ;Bit Code for 13
BIT12     .set    0003h     ;Bit Code for 12
BIT11     .set    0004h     ;Bit Code for 11
BIT10     .set    0005h     ;Bit Code for 10
BIT9      .set    0006h     ;Bit Code for 9
BIT8      .set    0007h     ;Bit Code for 8
BIT7      .set    0008h     ;Bit Code for 7
BIT6      .set    0009h     ;Bit Code for 6
BIT5      .set    000Ah     ;Bit Code for 5
BIT4      .set    000Bh     ;Bit Code for 4
BIT3      .set    000Ch     ;Bit Code for 3
BIT2      .set    000Dh     ;Bit Code for 2
BIT1      .set    000Eh     ;Bit Code for 1
BIT0      .set    000Fh     ;Bit Code for 0

```

```

;Bit masks used by the SBIT0 & SBIT1 Macros

```

```

;-----
B15_MSK   .set    8000h     ;Bit Mask for 15
B14_MSK   .set    4000h     ;Bit Mask for 14
B13_MSK   .set    2000h     ;Bit Mask for 13
B12_MSK   .set    1000h     ;Bit Mask for 12
B11_MSK   .set    0800h     ;Bit Mask for 11
B10_MSK   .set    0400h     ;Bit Mask for 10

```

```

B9_MSK      .set    0200h      ;Bit Mask for 9
B8_MSK      .set    0100h      ;Bit Mask for 8
B7_MSK      .set    0080h      ;Bit Mask for 7
B6_MSK      .set    0040h      ;Bit Mask for 6
B5_MSK      .set    0020h      ;Bit Mask for 5
B4_MSK      .set    0010h      ;Bit Mask for 4
B3_MSK      .set    0008h      ;Bit Mask for 3
B2_MSK      .set    0004h      ;Bit Mask for 2
B1_MSK      .set    0002h      ;Bit Mask for 1
B0_MSK      .set    0001h      ;Bit Mask for 0

```

```

; M A C R O - Definitions

```

```

SBIT0      .macro  DMA, MASK      ;Clear bit Macro
            LACC  DMA
            AND   #(0FFFFh-MASK)
            SACL  DMA
            .endm

```

```

SBIT1      .macro  DMA, MASK      ;Set bit Macro
            LACC  DMA
            OR   #(MASK)
            SACL  DMA
            .endm

```

```

KICK_DOG   .macro
            LDP   #00E0h          ;Watchdog reset macro
            SPLK  #05555h, WDKEY  ;DP-->7000h-707Fh
            SPLK  #0AAAAh, WDKEY  ;WDCNTR is enabled to be reset by next AAh
            LDP   #0h             ;WDCNTR is reset
            .endm                ;DP-->0000h-007Fh

```

Arquivo cmd.

```

/*****
/*File Name:      Ricardo.cmd
/*
/*Target System:  C24x Evaluation Board
/*
/*Description:    A basic linker command file for the 'F240 device
/*
/*                This file is used by the linker to determine where
/*                certain sections of code should reside in memory
/*
/* Revision:      1.00
*****/

```

```

/*-----*/
/*LINKER COMMAND FILE - MEMORY SPECIFICATION for the F240*****
/*-----*/
MEMORY
{
    PAGE 0 : VECs      : origin =          0h , length = 040h      /* VECTORS */
                PROG   : origin =          40h , length = 0FFC0h   /* PROGRAM */

```

```

PAGE 1 : MMRS      : origin =      0h , length = 060h      /* MMRS */
/*B2              : origin =     0060h , length = 0100h*/ /* DARAM */
B0                : origin =     0060h , length = 001fh /* DARAM */
B1                : origin =     0300h , length = 0100h /* DARAM */
DATA              : origin =     8000h , length = 8000h /* XDM */
}

/*-----*/
/* SECTIONS ALLOCATION-----*/
/*-----*/
SECTIONS
{
.vectors          : { } > VECS   PAGE 0 /* Interrupt vector table */
.reset            : { } > VECS   PAGE 0 /* Reset code */
.start            : { } > PROG   PAGE 0 /* Code */
.text             : { } > PROG   PAGE 0 /* Code */
.data             : { } > PROG   PAGE 0 /* Initialization data tables */
.mmrs             : { } > MMRS   PAGE 1 /* Memory mapped registers */
.bss              : { } > B0     PAGE 1 /* Block B2 */
/*.blk0           : { } > B0     PAGE 1*/ /* Block B0 */
/*.blk1           : { } > B1     PAGE 1*/ /* Block B1 */
/*.blk2           : { } > B2     PAGE 1*/ /* Block B2 */
/*.blk3           : { } > DATA  PAGE 1*/ /* External data memory */
}

```

Arquivo gel.

```

/* This GEL file is loaded on the command line of Code Composer-----
* The StartUp() function is called every time you start-----
* Code Composer. You can customize this function to-----
* initialize wait states or to perform other initialization-----
*/

```

```

StartUp()
{

```

```

/*GEL_Reset()*/

```

```

dialog Ricardo()
{

```

```

GEL_Halt();
GEL_Reset();
GEL_ProjectLoad("c:\\composer\\tutorial\\Ricardo.MAK");
GEL_ProjectRebuildAll();
GEL_Load("c:\\composer\\tutorial\\Ricardo.OUT");
GEL_Run();
}

```

```

dialog LoadCriaJanela()
{

```

```

GEL_TargetTextOut(0x20,1,10,0);
}

```

Arquivo principal.

```

*****
; File Name:      Ricardo.asm
;

```

```

; Target System:      C24x Evaluation Board

; Autores:           Ricardo Q. Machado
;                   Edson A. Vendrusculo
;
; Revision:          01/08/2000
;*****
;                   .include          f240regs.h
;                   .copy             "C:\Composer\tutorial\Ricinic.asm"
;-----
; I/O Mapped EVM Registers
;-----
LEDS          .set    000Ch           ;LEDs Register
DAC0          .set    0000h           ;DAC Channel 0 Register
DAC1          .set    0001h           ;DAC Channel 1 Register
DAC2          .set    0002h           ;DAC Channel 2 Register
DAC3          .set    0003h           ;DAC Channel 3 Register
DAC_UPDATE   .set    0004h           ;DAC UPDATE Register
OFFSET       .set    0800h           ;OUTPUT OFFSET
VMAX         .set    1400h           ;
VMIN         .set    0EC00h         ;
;-----
LDP #225      ;DP=225 DATA PAGE ADC REGISTER
SPLK #0F0Eh,OCRA ;SET INPUT AD(1,8 e 9) and TICMP/TIPWM, PWM7/CMP7 until
;PWM9/CMP9
;-----
LDP #224      ;DP=224 DATA PAGE FOR ADC REGISTERS
SPLK #9924h,ADCTRL1 ;SET AD1 and AD2, CHANNELS ADCIN2 and ADCIN10
SPLK #3h,ADCTRL2  ;SET AD1 and AD2
;-----
;MAIN PROGRAM VARIABLES
;-----
.bss D,1      ;output adjust
.bss D1,1     ;output adjust
.bss D2,1     ;output adjust
.bss D3,1     ;output adjust
.bss Vr,1     ;voltage measure from single utility grid
.bss VDC,1    ;voltage measure from link DC
.bss TEMP,1   ;temporary variable
.bss FA,1     ;temporary variable
.bss FB,1     ;temporary variable
.bss FC,1     ;temporary variable
.bss IACON,1  ;current compensation
.bss IBCON,1  ;current compensation
.bss EPI,1    ;pi regulator error
.bss Y,1      ;pi
.bss XIQ,1    ;pi
.bss UPI,1    ;pi
.bss VQR,1    ;pi
.bss ELPI,1   ;pi
.bss VOFFr,1  ;offset
.bss VOFFDC,1 ;offset
.bss VDCr,1   ;reference voltage
.bss KI,1     ;integral component
.bss KP,1     ;proporcional component
.bss KCOR,1   ;relation coefficient
.text
B INI

```

```

;SUBROUTINE DEFINITION

```

```

;PROTECTION

```

```

MZERO

```

```

        SPLK #0000h,IACON
        SPLK #0000h,IBCON
        RET

```

```

;MACRO DEFINITION

```

```

;READ

```

```

INPUT    .macro

```

```

;AD1 SINAL

```

```

;INPUT IN 10.6 FORMAT

```

```

        LDP #224
        LACC 36h,10           ;IF BIT IS ZERO DATA READ
        LDP #0h              ;FROM AD1 and LOAD IN ACC
        SACH TEMP
        LACL TEMP
        AND #3FFh
        SUB #512
        SACL FA
        SPLK #19B9h,TEMP
        SPM 3                 ;TRANS. 10.6F TO 4.12F
        PRODUTO FA,TEMP      ;FACTOR IN 8.8F
        SFR
        SFR
        SACL FA              ;4.12F FORMAT
        SPM 0

```

```

;AD1 SINAL

```

```

;INPUT IN 10.6 FORMAT

```

```

        LDP #224
        LACC 38h,10           ;IF BIT IS ZERO DATA READ
        LDP #0h              ;FROM AD1 and LOAD IN ACC
        SACH TEMP
        LACL TEMP
        AND #3FFh
        SUB #512
        SACL FC
        SPLK #19B9h,TEMP
        SPM 3                 ;TRANS. 10.6F TO 4.12F
        PRODUTO FC,TEMP      ;FACTOR IN 8.8F
        SFR
        SFR
        SACL FC              ;4.12F FORMAT 4.12
        SPM 0
        .endm

```

```

;OFFSET

```

```

OFFVV    .macro

```

```

        LDP #224
        SPLK #9948h,ADCTRL1
        SPLK #9949h,ADCTRL1
        WT_VDC_Vr1

```

```

INPUT

```



```

        SPLK      #0100h,TEMP
        PRODUTO   FA,TEMP
        SACH      FB,4
        LACL      FB
        ADD       VOFFDC
        SACL      VOFFDC
        SPLK      #0100h,TEMP
        PRODUTO   FC,TEMP
        SACH      FB,4
        LACL      FB
        ADD       VOFFr
        SACL      VOFFr
    .endm
;-----
;OUTPUT DATA
;-----
OUTPUT    macro  VARIAVEL,D,ONDE
        LDP      #0h
        LACL     VARIAVEL
        SUB      D
        SACL     VARIAVEL
        SPLK     #027Ch,TEMP
        PRODUTO  VARIAVEL,TEMP          ;4.12F FORMAT
        SACH     TEMP,4
        LACL     TEMP
        ADD      #OFFSET
        SACL     TEMP
        OUT     TEMP,ONDE
    .endm
;-----
;MULTIPLICATION
;-----
PRODUTO    .macro  FPROD1,FPROD2
        LDP      #0h
        LT       FPROD1
        MPY     FPROD2
        PAC
    .endm
;-----
;WAIT
;-----
;LOAD INTO BIT TC(STATUS1) THE VALUE FROM BIT ADCEOC/AD - IT IS A
;STATUS BIT IF BIT IS 1 CONVERSION DON'T END, COMEBACK TO LOOPX
WT_VDC_Vr  .macro
        LDP      #224
        LACC     32h
LOOP4:     BIT    0032h,8
        NOP
        BCND    LOOP4,TC
    .endm
WT_VDC_Vr1 .macro
        LDP      #224
        LACC     32h
LOOP5:     BIT    0032h,8
        NOP
        BCND    LOOP5,TC
    .endm
;-----
;END MACROS

```

```

;MAIN PROGRAM

```

```

        .text
INI:
        LDP    #0h
        SPLK   #30,D1
        SPLK   #-20,D2
        SPLK   #-20,D3
        SPLK   #0000h,EPI
        SPLK   #0000h,XIQ
        SPLK   #0000h,UPI
        SPLK   #0000h,VQR
        SPLK   #0000h,ELPI
        SPLK   #0000h,IACON
        SPLK   #0000h,IBCON
        SPLK   #0000h,VOFFr
        SPLK   #0000h,VOFFDC
        SPLK   #0990h,VDC
        RPT    #15
        OFFVV
        SETC   SXM

INICIO:
        LDP    #225
        SPLK   #0101h,PADATDIR
        LDP    #0h

```

```

;READ Vdc and Vr

```

```

        LDP    #224
        SPLK   #9948h,ADCTRL1
        SPLK   #9949h,ADCTRL1
        WT_VDC_Vr
        INPUT
        LACL   FA
        SUB    VOFFDC
        ADD    #250
        SACL   VDC
        SPLK   #1333h,TEMP
        PRODUTO    VDC,TEMP
        SACH   VDC,4
        LACL   FC
        SUB    VOFFr
        ADD    #600
        SACL   Vr
        SPM    0

```

```

;PROTECTION TEST

```

```

        SPLK   #1201h,TEMP      ;ABORT VOLTAGE 350 V
        LACL   TEMP
        SUB    VDC              ;ACC=350-VDC
        BCND   PP0,GEQ         ;BRANCH IF ACC>=0
        CALL   MZERO
        OUTPUT IACON,D1,DAC1    ;SET OUTPUT VARIABLE
        OUTPUT IBCON,D2,DAC2    ;WITH ZERO
        OUT    Vr,DAC_UPDATE
        B      INICIO

```

;COMPESATION CURRENTS CALCULUS

PP0:

```

SPLK #0cdch,TEMP ;PI INPUT VOLTAGE 250 V
LACC TEMP
SUB VDC ;ACC=311-VDC
BCND PP1,LEQ ;BRANCH IF ACC<=0
SPLK #0000h,IACON
B PP2

```

PP1:

```

SPLK #1000h,VDCr ;LOAD ACC WITH VDC
LACC VDCr ;DC LINK VOLTAGE 311 V
SUB VDC
SACL EPI
LACC XIQ,12
SPLK #5100h,KP
LT EPI
MPY KP
APAC
SACH UPI,4 ;UPI=KP*FA
BIT UPI,0 ;TEST IF IS NEGATIVE
BCND UPIMAGZEROQ,NTC
LACC #VMIN
SUB UPI
BCND NEG_SATQ,GT ;IF UPI<VMIN BRANCH TO SATURATE
LACC UPI
B LIMITERQ

```

NEG_SATQ

```

LACC #VMIN ;SET ACC TO NEG SATURATION VMIN
B LIMITERQ

```

UPIMAGZEROQ

```

LACC #VMAX
SUB UPI
BCND POS_SATQ,LT ;IF UPI>VMAX BRANCH TO SATURATE
LACC UPI ;VALUE OF UPI IS VALID
B LIMITERQ

```

POS_SATQ

```

LACC #VMAX ;SET ACC TO POS SATURATION

```

LIMITERQ

```

SACL VQR ;AT THIS POINT:VMIN<VQR<VMAX
SUB UPI
SACL ELPI
SPLK #4100h,KCOR
LT ELPI
MPY KCOR
PAC
SPLK #000Ah,KI
LT EPI
MPY KI
APAC
ADD XIQ,12
SACH XIQ,4
LACC #VMAX
SUB XIQ
BCND SAT1,LT
B JI

```

SAT1:

```

SPLK #1400h,XIQ
B J

```

```

J1:      LACC #VMIN
        SUB      XIQ
        BCND SAT2,GT
        B       J

SAT2:   SPLK #0EC00h,XIQ

J:      LT      VQR
        MPY    Vr
        PAC
        SACH IACON,4

PP2:   LACL IACON
        NEG
        ADD #20
        SACL IBCON

```

```

;OUTPUT VARIABLES

```

```

PP3:   ;SPLK #0h,VDC
        ;SPLK #0h,IBCON
        ;SPLK #0h,Vr
        OUTPUT IACON,D1,DAC1
        OUTPUT IBCON,D2,DAC2
        OUTPUT VQR,D3,DAC3
        OUT    Vr,DAC_UPDATE
        LDP    #225
        SPLK #0100h,PADATDIR
        B     INICIO

```

```

; I S R - PHANTOM

```

```

; Description:   Dummy ISR, used to trap spurious interrupts.

```

```

; Modifies:     Nothing

```

```

; Last Update:  01 AUG 2000

```

```

PHANTOM KICK_DOG          ;Resets WD counter

        B     PHANTOM

```

CIRCUITOS DO PSPICE

Neste apêndice são apresentados os circuitos implementados no simulador Pspice[®]. O modelo da máquina de indução é melhor esclarecido na referência [21].

A figura G.1 apresenta as conexões entre o CEP trifásico, o GI e o modelo empregado para representar os capacitores de excitação.

Na figura G.2, apresenta-se o controle PWM que utiliza uma onda triangular como portadora em 20 kHz e três senoides defasadas 120°. Estes sinais são comparados de tal forma a produzir os pulsos necessários aos IGBT's.

O modelo CEP trifásico é composto 6 IGBT's e 6 diodos de retorno. Os IGBT's são representado por uma chave bidirecional e um diodo em série de tal forma que exista circulação de corrente em um único sentido, figura G.2.

O controle por histerese e o regulador pi são mostrados na figura G.3. O regulador pi zera o erro de tensão no "link" CC enquanto o controle por histerese gera os pulsos necessários ao CEP monofásico, figura G.3.

Semelhante ao CEP trifásico, o CEP monofásico possui 4 IGBT's e 4 diodos de retorno, figura G.4. Em ambos os CEP's existem indutores nos pontos de conexão entre os CEP's e o restante do circuito de potência.

Na figura G.5, há as transformações alfa beta de corrente e de tensões para o GI, transformações alfa beta de correntes para o CEP trifásico, cálculos de potência ativa e reativa para o GI e CEP trifásico e determinação da potência ativa injetada ou absorvida da rede monofásica.

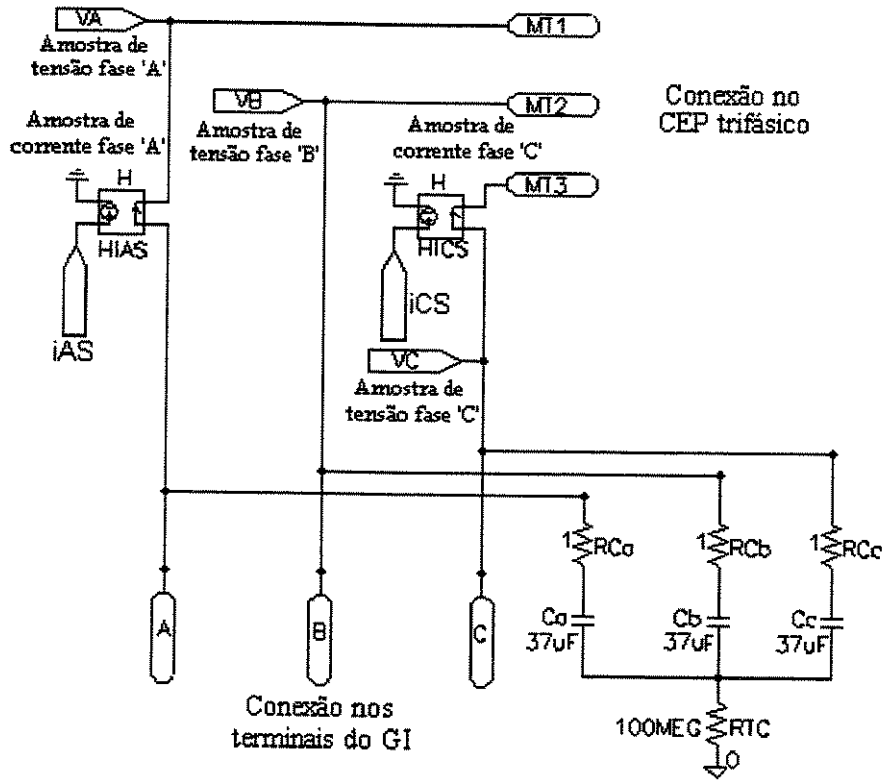


Figura G.1. Circuito de conexão GI e CEP trifásico.

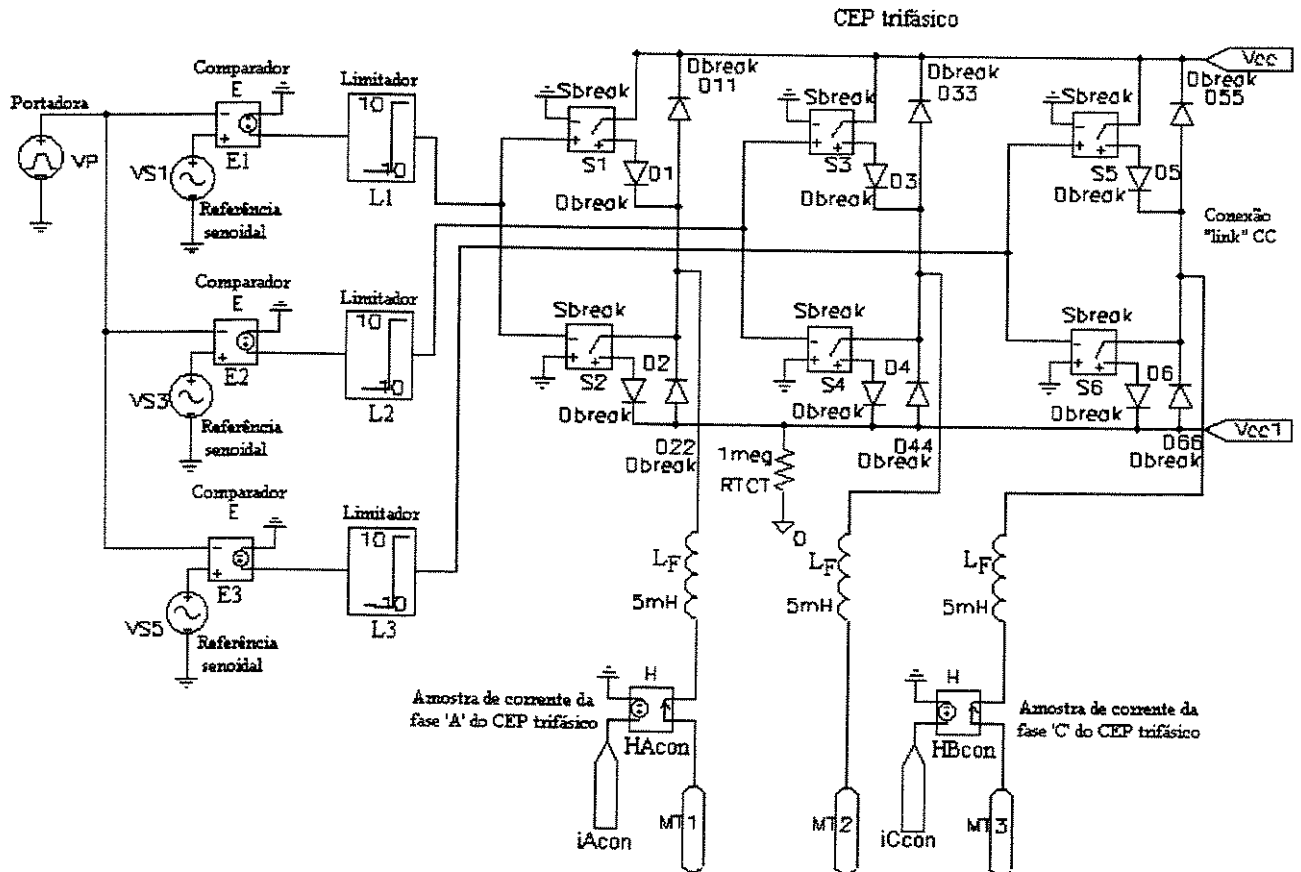


Figura G.2. CEP trifásico e controle PWM.

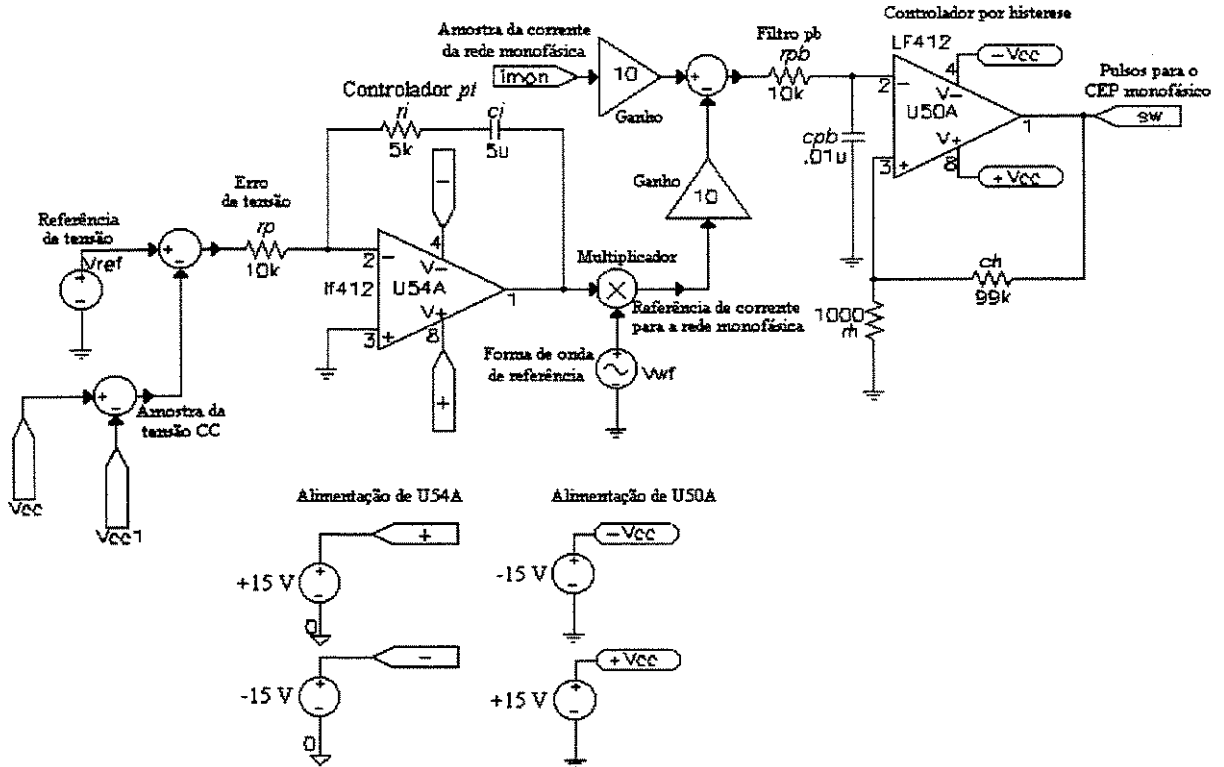


Figura G.3. Regulador pi e controle por histerese.

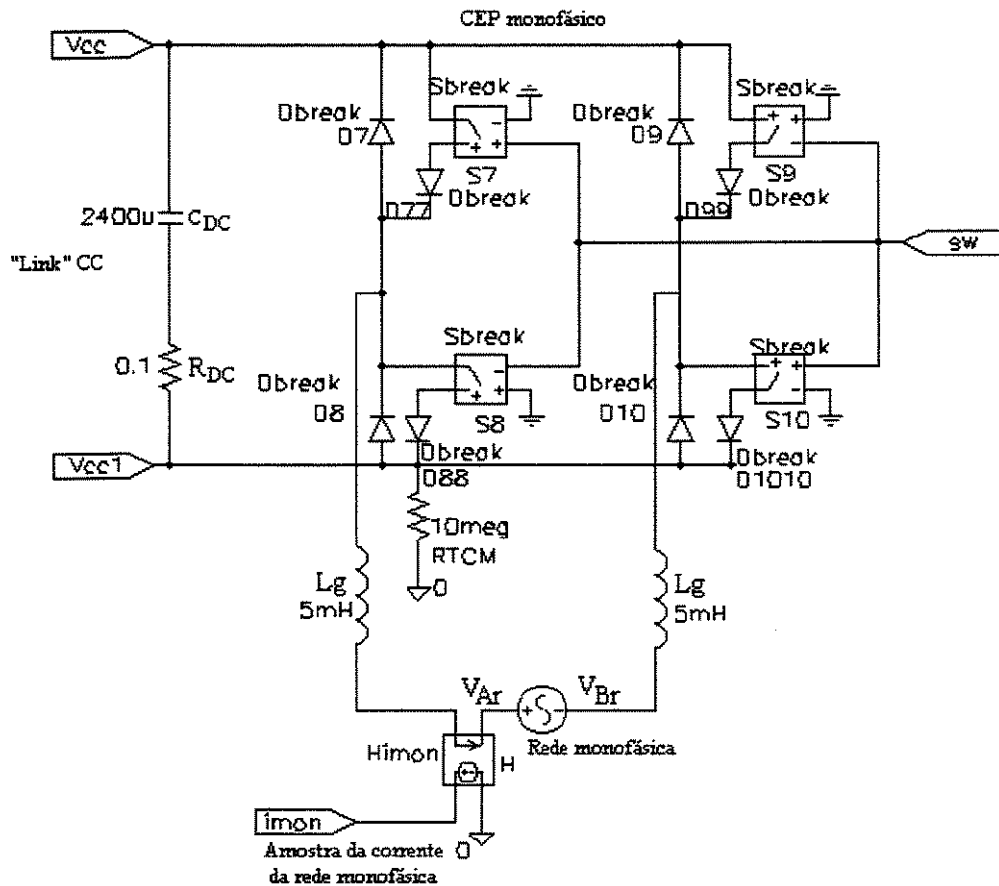


Figura G.4. CEP monofásico.

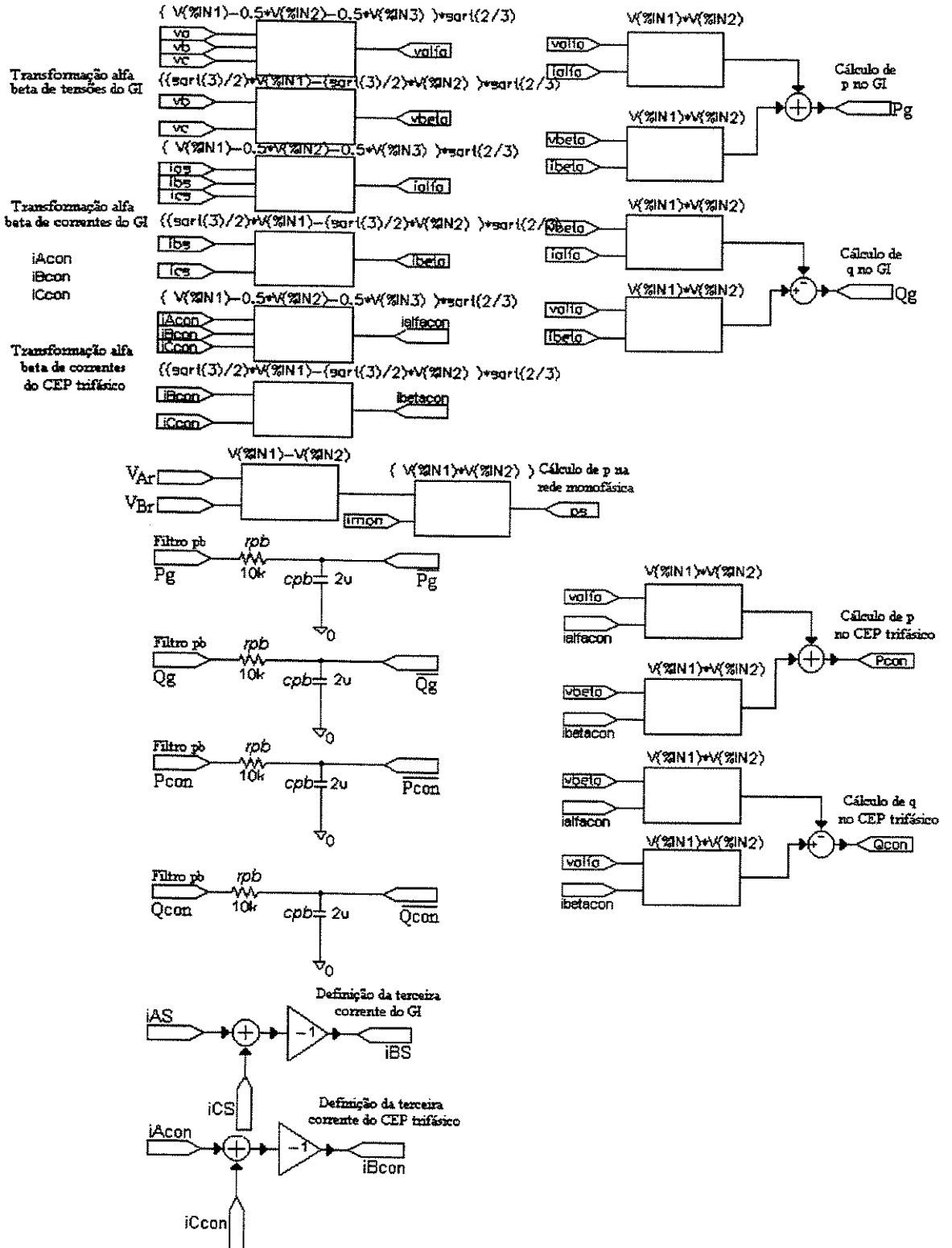


Figura G.5. Cálculos de potências ativa e reativa.

Figura		Pág.
1.1.1.	Sistema de geração de energia com gerador de indução conectado à rede monofásica através de barramento CC.	004
1.1.2.	Circuito de potência e controle para CEP monofásico.	004
1.1.3	Circuito de potência e controle para o CEP trifásico com a carga.	005
1.1.4	Circuito de potência e controle para o sistema isolado com a carga.	005
2.1.1.	Circuito de potência de um GI conectado diretamente a uma rede monofásica com carga.	008
2.1.2.	Circuito de potência e CEP monofásico com controle e sem carga.	009
2.1.3	Circuito de potência e CEP trifásico com controle e com carga.	009
2.1.4	Circuito de potência com CEP trifásico e monofásico no sistema isolado com controle e com carga.	010
2.2.1.	Configuração do circuito de potência e CEP monofásico.	011
2.2.2.	Configuração do circuito de potência e CEP trifásico.	011
2.2.3.	Configuração do circuito de potência com CEP trifásico e monofásico.	012
2.3.1.	Fasores das transformações de tensões.	013
2.3.2.	Fasores das transformações de correntes.	013
2.3.3.	Fluxo de potência no sistema monofásico.	015
2.3.4.	Triângulo de correntes e tensões do GI modo gerador.	016
2.3.5.	Triângulo de correntes e tensões do GI modo motor.	017
2.3.6.	Definição das correntes do CEP trifásico.	018
2.3.7.	Fluxo de potência no sistema trifásico.	019

2.3.8.	Rotina principal.	020
2.3.9.	Rotina de compensação.	021
2.3.10.	Rotina de referência de corrente.	022
2.3.11.	Definição das correntes do CEP.	023
2.3.12.	O fluxo de potência no sistema.	023
2.3.13.	Rotina principal.	024
3.1.1.	Variáveis analisadas no sistema sem carga.	027
3.1.2.	Tensões e correntes de linha do GI e corrente na rede monofásica.	028
3.1.3.	Potências ativa e reativa com valores instantâneos e médios.	028
3.1.4.	Variáveis analisadas no sistema com carga trifásica.	029
3.1.5.	Tensões e correntes de linha do GI, correntes na carga trifásica e corrente na rede monofásica.	030
3.1.6.	Potências ativa e reativa com valores instantâneos e médios.	031
3.1.7.	Tensões e correntes de linha do GI, correntes na carga trifásica e corrente na rede monofásica.	031
3.1.8.	Potências ativa e reativa com valores instantâneos e médios.	032
3.1.9.	Tensões e correntes de linha do GI, correntes na carga trifásica e corrente na rede monofásica.	033
3.1.10.	Potências ativa e reativa com valores instantâneos e médios.	033
3.2.1.	Variáveis analisadas no sistema com CEP monofásico e sem carga.	034
3.2.2.	Tensões e correntes de linha do GI e corrente na rede monofásica.	035
3.2.3.	Potências ativa e reativa com valores instantâneos e médios.	035
3.3.1.	Variáveis analisadas no sistema com CEP trifásico e sem carga.	036
3.3.2.	Tensões e correntes de linha do GI e corrente na rede monofásica.	037

3.3.3.	Potências ativa e reativa com valores instantâneos e médios.	038
3.4.1.	Variáveis analisadas no sistema com CEP trifásico e monofásico e isolado sem carga.	039
3.4.2.	Tensões e correntes de linha do GI, tensão amostrada e tensão de referência no barramento CC.	039
3.4.3.	Corrente na rede monofásica e potências ativa e reativa média.	040
3.4.4.	Variáveis analisadas no sistema com CEP trifásico e monofásico e isolado com carga trifásica.	041
3.4.5.	Tensões e correntes de linha do GI, tensão amostrada e tensão de referência no barramento CC.	041
3.4.6.	Correntes na rede monofásica, na carga e potências ativa e reativa média.	042
3.4.7.	Variáveis analisadas no sistema com CEP trifásico e monofásico e isolado com carga monofásica.	043
3.4.8.	Tensões e correntes de linha do GI, tensão amostrada e tensão de referência no barramento CC.	043
3.4.9.	Corrente na rede monofásica, na carga e potências ativa e reativa média.	044
3.4.10.	Tensões e correntes de linha do GI, tensão amostrada e tensão de referência no barramento CC.	045
3.4.11.	Corrente na rede monofásica, na carga e potências ativa e reativa média.	045
3.4.12.	Variáveis analisadas no sistema com CEP trifásico e monofásico e isolado com carga não-linear.	046
3.4.13.	Tensões e correntes de linha do GI, tensão amostrada e tensão de referência no barramento CC.	047
3.4.14.	Corrente na rede monofásica, na carga e potências ativa e reativa média.	047
4.1.1.	Sistema de conversão A/D.	051

4.1.2.	Sistema do DSP.	051
4.2.1.	Escalonamento das variáveis.	052
4.2.2.	Condicionamento do sinal.	052
4.2.3.	Condicionamento seguido pela variável amostrada.	053
5.1.1.	Carga do capacitor C_{DC} na configuração "boost".	056
5.1.2.	Tensão CC, tensão e corrente na rede monofásica antes da partida da máquina de indução.	056
5.1.3.	Tensão CC, tensão e corrente na rede monofásica na partida da máquina de indução.	057
5.1.4.	Tensão CC, tensão e corrente na rede monofásica acionando o motor.	058
5.1.5.	Tensão CC, tensão e corrente na rede monofásica.	059
5.1.6.	Correntes fornecidas pelo gerador de indução.	059
5.1.7.	Tensão CC, tensão e corrente na rede monofásica.	060
5.1.8.	Tensão CC, tensão e corrente na rede monofásica na partida da carga.	061
5.1.9.	Correntes fornecidas pelo gerador de indução.	061
5.1.10.	Tensão CC, tensão e corrente na rede monofásica e corrente na carga.	062
5.1.11.	Tensão CC, tensão nos terminais do GI, corrente na carga e corrente na rede monofásica.	062
5.1.12.	Tensão CC, tensão e corrente no GI e corrente na rede monofásica.	063
5.2.1.	Tensão de linha nos terminais do GI.	064
5.2.2.	Correntes de linha do GI.	064
5.2.3.	Corrente e tensão de linha do GI, análise no tempo e espectro.	065
A.1.	Máquina de indução.	068
B.1.	Tensões equilibradas no sistema abc.	073
B.2.	Tensões equilibradas no sistema $\alpha\beta$.	074

D.1.	Circuito de "offset".	076
D.2.	Circuito comparador com histerese.	076
D.3.	Circuito de tempo morto.	077
E.1.	Formato referente a $[-8;8]$.	078
E.2.	Formato da palavra.	079
G.1.	Circuito de conexão GI e CEP trifásico.	094
G.2.	CEP trifásico e controle PWM.	094
G.3.	Regulador pi e controle por histerese.	095
G.4.	CEP monofásico.	095
G.5.	Cálculos de potências ativa e reativa.	096

A	Ampère
'A'	Fase A
A,B,C	Conexão GI e banco de capacitores
abc	Sistema a três eixos
AC	Corrente alternada
ADCIN0...15	Canais do A/D
A/D	Conversor analógico digital
<i>B_m</i>	Constante de atrito rotacional
'B'	Fase B
'C'	Fase C
Ca	Capacitor da fase 'A' do banco em estrela
C _{AC}	Capacitores trifásicos conectados em estrela necessários a auto-excitação
Cb	Capacitor da fase 'B' do banco em estrela
CC	Corrente contínua
Cc	Capacitor da fase 'C' do banco em estrela
C _{DC}	Capacitor do barramento CC
CEP	Conversor eletrônico de potência
<i>ci</i>	Capacitor integral
<i>ch</i>	Capacitor do controlador por histerese
<i>cpb</i>	Capacitor do filtro passa-baixa
CPU	Unidade central de processamento
CV	Cavalo vapor
D11...66	Diodo de retorno do CEP trifásico
D7...D10	Diodos de retorno do CEP monofásico
D/A	Conversor digital analógico
db	Decibel
DSP	Processador digital de sinais
E1,2,3	Comparador
Erro	Erro de tensão em relação a referência
$[f_{abc}]$	Grandezas escritas em termos das fases abc do estator e do rotor no sistema abc
FIFO	Primeiro a entrar é o primeiro a sair
FMM	Força magneto motriz
<i>f(p_b)</i>	Filtro passa-baixa
$[f_{\alpha\beta\gamma}]$	Grandezas escritas em termos das fases sistema $\alpha\beta\gamma$
GI	Gerador de Indução
HAcon	Sensor de corrente fase 'A' do CEP trifásico
HCcon	Sensor de corrente fase 'C' do CEP trifásico
HIAS	Sensor de corrente da fase 'A'
HIBS	Sensor de corrente da fase 'B'
HICS	Sensor de corrente da fase 'C'
Himon	Sensor de corrente na rede monofásica

Hz	Hertz
i_A	Corrente na fase 'A' do GI
$\left[i'_{abcr} \right]$	Vetores de correntes de linha do rotor referidas ao estator, sistema abc
$\left[i_{abcs} \right]$	Vetores de correntes de linha do estator, sistema $\alpha\beta\gamma$
$\left[i_{abcs}^a \right]$	Vetores de correntes de linha do estator, sistema abc
i_{Acon}	Corrente no ramo 'A' do CEP
i_{AL}	Corrente no ramo 'A' da carga
i'_{ar}	Correntes de linha do rotor referida ao estator, fase 'A'
i_{ASrms}	Valor eficaz da corrente amostrada na fase 'A'
i_{AS}	Corrente amostrada na fase 'A'
i_{as}	Correntes de linha do estator, fase 'A'
i_B	Corrente na fase 'B' do GI
i_b	Corrente base
i_{Bcon}	Corrente no ramo 'B' do CEP
i_{BL}	Corrente no ramo 'B' da carga
i'_{br}	Correntes de linha do rotor referida ao estator, fase 'B'
i_{BS}	Corrente calculada com as amostrada nas fases 'A' e 'C'
i_{bs}	Correntes de linha do estator, fase 'B'
i_C	Corrente na fase 'C' do GI
i_{Ccon}	Corrente no ramo 'C' do CEP
$i_{Cconrms}$	Valor eficaz da corrente no ramo 'C' do CEP
i_{CCP}	Corrente calculada para compensar o sistema
i_{CL}	Corrente no ramo 'C' da carga
i'_{cr}	Correntes de linha do rotor referida ao estator, fase 'C'
i_{CS}	Corrente amostrada na fase 'C'
i_{cs}	Correntes de linha do estator, fase 'C'
I_G	Vetor de correntes sem as componentes de magnetização
i_{mon}	Corrente injetada na rede monofásica
i_{max}	Máxima corrente representada em 512 (2^{10}) níveis
i_{monrms}	Valor eficaz da corrente injetada na rede monofásica
i_n	Corrente nominal por fase
IO	Entrada saída
i_u	Correntes internas ao DSP i_{AS} , i_{CS} ou i_{CL}
i'_u	Correntes externas ao DSP i_{AS} , i_{CS} ou i_{CL}
i_α	Correntes transformada do domínio abc para o eixo α
$i_{\alpha CP}$	Corrente de compensação no eixo α
$i'_{\alpha r}$	Corrente de linha do rotor para a fase 'A' no eixo α .
$\left[i'_{\alpha\beta\gamma r} \right]$	Vetor de correntes do rotor referidos ao estator, no sistema $\alpha\beta\gamma$
$\left[i'_{\alpha\beta\gamma s} \right]$	Vetor de correntes do estator ao estator, no sistema $\alpha\beta\gamma$
i_β	Correntes transformada do domínio abc para o eixo β
$i_{\beta CP}$	Corrente de compensação no eixo β

$i'_{\gamma r}$	Corrente de linha do rotor para a fase 'C' no eixo γ
J	Constante de inércia do rotor
K_{cor}	Constante que transforma uma variável amostrada no formato 4.12
k_i	Constante integral
kHz	Quilohertz
kg.m^2	Quilograma metro quadrado
$\text{kg.m}^2/\text{s}$	Quilograma metro quadrado por segundo
k_p	Constante proporcional
kVAI	Quilovolt-ampère imaginário
kW	Quilowatt
$[K_{\alpha}^a]$	Matriz de transformação do sistema de referência abc para o sistema $\alpha\beta\gamma$
$[K_{\alpha}^a]^{-1}$	Matriz de transformação do sistema $\alpha\beta\gamma$ para o abc
$[K_{or}^a]$	Matriz de transformação do rotor de $\alpha\beta\gamma$ para o abc
$[K_{os}^a]$	Matriz de transformação para o estator de abc para $\alpha\beta\gamma$
L1,2,3	Limitador
L_c	Indutores para filtrar a corrente injetada na rede monofásica
L_F	Indutores de filtragem para conectar o CEP ao barramento do sistema
L_g	Indutância da rede monofásica no ponto de conexão
L'_{tr}	Indutância de dispersão dos enrolamentos do rotor referidos ao estator
L_{ts}	Indutância de dispersão dos enrolamentos do estator
LMS	Bits menos significativos
$[L'_r]$	Matriz de indutâncias próprias do rotor referidas ao estator
$[L_s]$	Matriz de indutâncias próprias do estator
$[L_{sr}]$	Matriz de indutâncias mútuas entre os enrolamentos das fases do rotor e do estator
M	Indutância de magnetização do entreferro.
mH	Milihenry
MIPS	Milhões de instruções por segundo
ms	Milissegundos
MSB	Bits mais significativos
MP	Máquina primária
MT1,2,3	Conexão GI e CEP trifásico
MUX	Multiplexador
N.m	Newton metro
P	Potência ativa instantânea
$\frac{p}{P}$	Número de pólos do GI
$\frac{P}{P}$	Potência ativa média
\tilde{P}	Potência ativa oscilante
$\frac{P_{con}}{P_{con}}$	Potência ativa instantânea no CEP
$\frac{P_{con}}{P_{con}}$	Potência ativa média acumulada no CEP
pi	Controlador proporcional integral

P_g	Potência ativa instantânea no GI
$\overline{P_g}$	Potência ativa média fornecida pelo GI
P_L	Potência ativa instantânea na carga
$\overline{P_L}$	Potência ativa média na carga
P_S	Potência ativa instantânea na rede monofásica
$\overline{P_S}$	Potência ativa média recebida ou fornecida pela rede monofásica
<i>pu</i>	Por unidade
PWM	Modulação por largura de pulso
\underline{Q}	Vetor de potência reativa instantânea
\overline{Q}	Potência reativa média
\underline{Q}_{con}	Vetor de potência reativa instantânea no barramento do CEP
\overline{Q}_{con}	Potência reativa média no barramento do CEP
\underline{Q}_L	Vetor de potência reativa instantânea na carga
\overline{Q}_L	Potência reativa média na carga
\underline{Q}_g	Vetor de potência reativa instantânea no barramento do GI
\overline{Q}_g	Potência reativa média no barramento do GI
RAM	Memória de acesso aleatório
Rca	Resistência fictícia do capacitor Ca
RCb	Resistência fictícia do capacitor Cb
RCc	Resistência fictícia do capacitor Cc
R _{DC}	Resistência fictícia do capacitor DC
<i>ri</i>	Resistência integral
<i>rh</i>	Resistência do controlador por histerese
<i>R_m</i>	Resistência de perdas mecânicas e elétricas
rms	Raiz média quadrática (valor eficaz)
<i>rp</i>	Resistência proporcional
<i>rpb</i>	Resistência do filtro passa-baixa
$[R'_r]$	Matriz de resistências do rotor referidas ao estator
<i>r_r</i>	Resistências do rotor
<i>r'_r</i>	Resistências do rotor referida ao estator
$[R_s]$	Matriz de resistências do estator
<i>r_s</i>	Resistências do estator
RTCM	Resistência de circuito aberto
RTCT	Resistência de circuito aberto
S1...6-D1...6	IGBT's do CEP trifásico
S7...10-D77...1010	IGBT's do CEP monofásico
S	Chave
SARAM	RAM de acesso único
S/H	Amostrador segurador
sw	Ponto de conexão dos disparos do CEP monofásico
<i>T_L</i>	Conjugado de carga
<i>Tmec</i>	Torque no eixo da máquina

u	Saída do regulador
u_i	Sinal integrado
u_{max}	Limite máximo do regulador
u_{min}	Limite mínimo do regulador
V	Volt
V	Tensão CC média do conversor eletrônico
V_A	Tensão entre a fases 'A' e o neutro fictício
V'_{AB}	Tensão de linha de referência as fases 'AB'
V_{AB}	Tensão de linha amostrada entre as fases 'AB'
V_{ABr}	Tensão de referência para o sistema, amostrada da rede monofásica
V_{ABrms}	Tensão entre a fases 'AB', valor rms
$\begin{bmatrix} v'_{abc} \end{bmatrix}$	Vetor de tensões das fases do rotor referidos ao estator, sistema abc
$\begin{bmatrix} v_{abcs} \end{bmatrix}$	Vetores de tensões de fase no estator, sistema $\alpha\beta\gamma$
$\begin{bmatrix} v^a_{abcs} \end{bmatrix}$	Vetores de tensões de fase no estator, sistema abc
VAI	Volt-ampère imaginário
V_{Ar}	Tensão de referência entre a fases 'A' e o neutro fictício
V_{Arms}	Tensão entre a fases 'A' e o neutro fictício, valor rms
V_B	Tensão entre a fase 'B' e o neutro fictício
V_b	Tensão base
V_{BC}	Tensão de linha amostrada entre as fases 'BC'
V'_{BC}	Tensão de linha de referência as fases 'BC'
Vcc-Vcc1	Conexão entre os barramentos CC do CEP's trifásico e monofásico
V_C	Tensão entre a fase 'C' e o neutro fictício
V_{CA}	Tensão de linha entre as fases 'CA'
V'_{CA}	Tensão de linha de referência as fases 'CA'
V_{CArms}	Valor eficaz da tensão de linha entre as fases 'CA'
V_{DC}	Tensão no barramento CC do conversor eletrônico
V_{DCmax}	Tensão máxima aplicada ao barramento CC do conversor eletrônico
V_{DCref}	Tensão de referência no barramento CC do conversor eletrônico
$V_{def 30^\circ}$	Tensão V_{AB} atrasada de 30°
$V_{def 120^\circ}$	Tensão V_{AB} atrasada de 120°
V_n	Tensão nominal por fase
V_G	Vetor de tensões de linha do GI
V_{Br}	Tensão de referência entre a fase 'B' e o neutro fictício
VP	Portadora
V_p	Tensões internas ao DSP V_{AB} , V_{CA} ou V_{DC}
V'_p	Tensões externas ao DSP V_{AB} , V_{CA} ou V_{DC}
Vref	Referência de tensão CC
Vwf	Forma de onda par as correntes do CEP monofásico
VS1,2,3	Referência senoidal
V_α	Tensão transformada do domínio abc para o eixo α

V_{α}'	Tensão equilibrada transformada do domínio abc para o eixo α
V_{β}	Tensão transformada do domínio abc para o eixo β
V_{β}'	Tensão equilibrada transformada do domínio abc para o eixo β
x	Parte inteira do formato numérico
X_m	Reatância mútua
X_r	Reatância de dispersão do rotor
X_s	Reatância de dispersão do estator
y	Parte fracionária do formato numérico
W	Watt
z	Valor <i>pu</i> da variável a ser implementada
α	Ângulo entre V_{CA} e i_{Ccon}
$\alpha\beta$	Sistema a dois eixos
$\alpha\beta\gamma$	Sistema a três eixos
δ	Ângulo entre V_{AB} e i_{mon} .
ϕ	Ângulo entre V_{AB} e i_{AS}
$[\lambda'_{abcr}]$	Vetor de fluxos concatenados nos enrolamentos do rotor referidos ao estator, sistema abc
$[\lambda_{abcs}]$	Vetor de fluxos concatenados nos enrolamentos do estator, no sistema $\alpha\beta\gamma$
$[\lambda^a_{abcs}]$	Vetor de fluxos concatenados nos enrolamentos do estator, sistema abc
$[\lambda_{\alpha\alpha}]$	Vetor de diferenças de fluxos, resultante da transformação $\alpha\beta\gamma$
$[\lambda'_{\alpha\beta\gamma r}]$	Vetor de fluxos concatenados nos enrolamentos do rotor referidos ao estator, no sistema $\alpha\beta\gamma$
μF	Microfaraday
μs	Microssegundos
θ_r	Posição angular elétrica do rotor em radianos
ω_r	Velocidade angular elétrica do eixo do rotor
Ω	Ohms

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. G. Simões, B. K. Bose and R. J. Spiegel. "Fuzzy Logic Based Variable Speed Wind Generation System". *Proceedings of XI Congresso Brasileiro de Automática (XI CBA)*, São Paulo, Brasil, pp. 323-328. 1996.
- [2] M. G. Simões, B. K. Bose and R. J. Spiegel. "Design and Performance Evaluation of a Fuzzy Logic Based Variable Speed Wind Genration System". *Proceedings of Industry Application Society Annual Meeting (31st IAS)*, San Diego, USA, pp. 349-356. 1996.
- [3] C. B. Jacobina, E. R. C. Silva, A. M. N. Lima, R. L. A. Ribeiro. "Induction Generator Static Systems with a Reduced Number of Components". *Proceedings of Industry Application Society Annual Meeting (31st IAS)*, San Diego, USA, pp. 432-439. 1996.
- [4] E. G. Marra and J. A. Pomilio. "Self-excited induction generator controlled by a VS-PWM bi-directional converter for rural applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 35, No. 4 pp. 877-883. 1999.
- [5] E. G. Marra and J. A. Pomilio. "Self-Excited induction generator controlled by a VS-PWM converter providing high power-factor current to a single-phase grid." *Proceedings of the IECON'98*, Aachen, Germany, pp. 703-708. 1998.
- [6] H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae. "Generalized Theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits." *Proceedings of the IPEC'83*, Tokyo, Japan, pp. 1375-1386. 1983.
- [7] J. L. Willems. "A new interpretation of Akagi-Nabae power components for nonsinusoidal three-phase situations." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*,

Vol. 41 No. 4 pp. 523-527. 1992.

[8] E. H. Watanabe, R. M. Stephan and M. Aredes. "New concepts of instantaneous active and reactive powers in electrical systems with generic loads." *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8 No. 2 pp. 697-703. 1993

[9] F. Z. Peng and J. S. Lai. "Reactive power and harmonic compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems." *Proceedings of the ICHQP'96*, pp. 83-89. 1992.

[10] F. Z. Peng and J. S. Lai. "Harmonic and Reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for 3-phase 4-wire systems." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 40, No. 3, pp. 1089-1095. 1997.

[11] L. S. Czarnecki. "Scattered and reactive current, voltage, and power in circuits with nonsinusoidal waveforms and their compensation." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 40, No. 3, pp. 563-567. 1991.

[12] W. A. Moncrief. "Practical application and selection of single-phase to three-phase converters." *Proceedings of IEEE/IAS Rural Electric Power Conference*, pp. D3-1/D3-9, 1996.

[13] T. F. Chan. "Effect of rotational direction on the performance of a three-phase induction generator connected to a single-phase power system." *Proceedings of the IEMDC'97*, pp. MB1-6.1-MB1-6.3. 1997.

[12] J. L. Bhattacharya and J. L. Woodward. "Excitation balancing of a self-excited induction generator for maximum power output." *IEE Proceedings*, Vol. 135, Pt. C, No. 2, pp. 88-97. 1988.

[13] M. O. Durham. and R. Ramakumar. "Power system balancers for an induction generator." *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. IA-23, No. 6, pp. 1067-1072. 1987.

[14] O. J. M. Smith. "Three-phase induction generator for single-phase line." *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. EC-2, No. 3. 1987.

[15] R. Q. Machado, E. G. Marra and J. A. Pomilio "Balanced operation of three-phase cage

- induction generation connected to single-phase utility grid." *Proceedings of the COBEP'99*, pp. 76-81. 1999.
- [16] I. Panahi, I. Mohammed and Z. Yu "DSP excel in motor-control applications." *Edn Magazine*, Eselvier-Cahners publishing, pp. 111-118, 1997.
- [17] TMS320C24x DSP "Controllers reference set. Cpu, system, and instruction set." *Texas Instruments*, 1997.
- [18] TMS320C24x DSP "Controllers reference set. Periripheral, library and specific devices." *Texas Instruments*, 1997.
- [19] Applications notes. "Implementation of a speed field orientated control of three phase AC Induction motor using TMS320F240." *Texas Instruments*, 1998.
- [20] R. Szczesny and M. A. Ronkowski. "New equivalent circuit approach to simulation of converter - induction machine associations." *Proceedings of the ECPEA'91*, pp. 4/346-4/361, 1991.
- [21] E. G. Marra, "Gerador de indução associado a inversor PWM operando com frequência constante." FEEC-UNICAMP - Campinas-SP, tese de Doutorado, 1999.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE