

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

*Projeto de um Conversor Estático para Sistemas Fotovoltaicos*

**Rafaelle Pinto do Rêgo**

**Orientador: Prof. Dr. Maurício Beltrão de Rossiter Corrêa**

Campina Grande - PB  
Maio de 2010

# Projeto de um Conversor Estático para Sistemas Fotovoltaicos

Rafaelle Pinto do Rêgo

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica como  
parte dos requisitos para obtenção do título de  
Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Beltrão de  
Rossiter Corrêa

Campina Grande - PB  
Maio de 2010

# Projeto de um Conversor Estático para Sistemas Fotovoltaicos

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica como  
parte dos requisitos para obtenção do título de  
Engenheiro Eletricista.

Rafaelle Pinto do Rêgo  
aluno

Maurício Beltrão de Rossiter Corrêa, Dr., UFCG  
Orientador

Alexandre Cunha Oliveira, Dr., UFCG  
Componente da Banca

Campina Grande - PB  
Maio de 2010



# Agradecimentos

A Deus, que é o autor e consumidor da minha história, por ter me dado força e sabedoria durante toda a trajetória da minha vida. Pelo seu Amor incondicional, obrigado, Pai!

A minha mãe, Soraia Dias Monteiro, que não poupou esforços para garantir a mim uma educação de qualidade, pelo carinho e amor que sempre foram fundamentais em todos os momentos da minha vida. Mainha, sem dúvidas o seu exemplo é o que me dá forças para chegar cada vez mais longe.

Aos meus irmãos Pietrus, Felipe, Marquinhos, Tiago e Nathália que sempre acreditaram no meu potencial e são participantes de mais esta vitória. A minha avó Ivelise, e as minhas tias Fátima, Isaura (*in memoriam*), Ivânia e Sônia pelo carinho e conforto nos momentos difíceis, fazendo-me acreditar no futuro. A Ivna Melo, pelo amor, carinho e companheirismo.

Ao Professor Maurício Beltrão de Rossiter Corrêa, pela orientação, ajuda e conhecimento partilhado.

A coordenação, professores e funcionários da Universidade Federal de Campina Grande, em especial os que compõem o Departamento de Engenharia Elétrica, por terem contribuído para a minha formação acadêmica.

Aos “companheiros de moradia” Elmer Ubaldo, Henri Malzac, Oscar Labatti e Victor Moura pelo constante incentivo e por tornarem minha temporada em Campina Grande mais proveitosa.

Aos vários amigos e colegas de curso que ganhei na UFCG, especialmente Abinadabe Andrade, Ângelo Vinícius, Antonio Alberto (“Iola”), Antonio de Paula, Antônio Isaac, Bernard Gouveia, Edgard Luiz, Elíbia Colaço, Euller Lima, Felipe Nóbrega, Flávio Schuler, Frederico Camurça, Huno Costa, Júlio César (“Gúlio”), Luiz Gianini, Paulo de Tarso, Rodrigo Komatsu (“Japa”) e Saulo Lima pela amizade e disposição em ajudar, pelas noites em claro e “leites” compartilhados, muito obrigado, sem vocês eu não teria chegado aqui. Enfim vencemos, agora somos Engenheiros Eletricistas!

A todos os meus familiares e amigos que sempre acreditaram que eu me tornaria um Engenheiro. Os meus agradecimentos pelo apoio, força nos momentos de fraqueza e por sempre estarem presentes na hora certa.

*Dedico este trabalho ao meu pai Joaquim (in memoriam), que mesmo na sua ausência me deu forças para chegar até aqui, e a minha mãe Soraia que sempre acreditou no meu esforço dedicando a sua vida e sacrificando alguns sonhos por amor e dedicação a mim e a meus irmãos.*

# Sumário

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
Glossário	xiii
<b>1 Introdução Geral</b>	<b>1</b>
<b>2 Gerador Fotovoltaico</b>	<b>3</b>
2.1 Energia Solar - Visão Geral . . . . .	3
2.2 Estudo do Gerador Fotovoltaico . . . . .	6
2.3 Método de Busca do Ponto de Máxima Potência . . . . .	10
2.3.1 Método da Condutância Incremental . . . . .	10
2.3.2 Método Perturba e Observa . . . . .	12
2.3.3 INC X P&O . . . . .	13
<b>3 Conversor CC-CA</b>	<b>17</b>
3.1 Conversor Boost . . . . .	18
3.1.1 Características de Funcionamento - Boost . . . . .	18
3.1.2 Conexão Gerador/Boost . . . . .	19
3.2 Conversor Push-Pull . . . . .	25
3.2.1 Características de Funcionamento - Push-Pull . . . . .	26
3.2.2 Conexão Gerador/Push-Pull . . . . .	27
3.3 Inversor Monofásico . . . . .	32
3.3.1 Princípio de Funcionamento . . . . .	32
3.3.2 Projeto do Inversor . . . . .	33
3.3.3 Conexão Gerador/Conversor CC-CA/Carga Isolada . . . . .	39
<b>4 Considerações Finais</b>	<b>43</b>
4.1 Trabalhos Futuros . . . . .	44
<b>A Código Fonte C++ da Classe PvPanel.h</b>	<b>45</b>
<b>B Utilização de Blocos DLL no PSIM 6.0</b>	<b>55</b>





# Lista de Figuras

2.1	Módulos fotovoltaicos . . . . .	4
2.2	Associação de módulos fotovoltaicos . . . . .	4
2.3	Domicílio beneficiado com o sistema fotovoltaico. . . . .	6
2.4	Modelo matemático de uma célula fotovoltaica. . . . .	6
2.5	Curvas característica de um painel fotovoltaico. . . . .	8
2.6	Curvas V-I para diferentes níveis de insolação e temperatura. . . . .	9
2.7	Regiões de operação do painel. . . . .	10
2.8	Algoritmo do método da Condutância Incremental. . . . .	12
2.9	Evolução do processo de busca do MPP (INC). . . . .	13
2.10	Algoritmo do método Perturba e Observa. . . . .	14
2.11	Resposta dinâmica dos algoritmos de MPPT para insolação variável. . . . .	15
3.1	Diagrama esquemático do conversor Boost. . . . .	18
3.2	Etapas de funcionamento do conversor boost. . . . .	19
3.3	Diferentes modos de condução do conversor boost. . . . .	20
3.4	Simulação do conversor boost projetado. . . . .	22
3.5	Diagrama esquemático da montagem Gerador/Boost. . . . .	23
3.6	Algoritmo MPPT-INC aplicado ao conversor boost. . . . .	23
3.7	Simulação sistema Gerador/Boost. . . . .	24
3.8	Diagrama esquemático do conversor Push-Pull alimentado por corrente. . . . .	25
3.9	Etapas de funcionamento do conversor push-pull. . . . .	26
3.10	Simulação do conversor push-pull projetado. . . . .	28
3.11	Diagrama esquemático da montagem Gerador/Push-Pull. . . . .	29
3.12	Simulação do sistema Gerador/Push-Pull. . . . .	30
3.13	Resposta dinâmica do algoritmo de MPPT aplicado ao push-pull. . . . .	31
3.14	Diagrama esquemático do circuito de amortecimento das chaves e diodos. . . . .	31
3.15	Diagrama esquemático do inversor em ponte completa. . . . .	33
3.16	Modulação por Largura de Pulsos Senoidal. . . . .	34
3.17	Tensão e Corrente de saída do inversor projetado. . . . .	36
3.18	Diagrama esquemático do inversor em ponte completa com filtro LC. . . . .	37
3.19	Diagrama de Bode para o filtro LC. . . . .	39
3.20	Tensão e Corrente de saída do inversor com o filtro projetado. . . . .	40
3.21	Diagrama esquemático da montagem Gerador/Conversor CC-CA/Carga Isolada. . . . .	41
3.22	Curvas de tensão e corrente do Sistema Gerador/Conversor/Carga RL. . . . .	41

---

3.23	Curvas de potência do Sistema Gerador/Conversor/Carga RL. . . . .	42
B.1	Bloco DLL com três entradas e três saídas. . . . .	56
B.2	Menu de seleção do Dev C++. . . . .	58
B.3	Menu de projetos do Dev C++. . . . .	58
B.4	Implementação do painel fotovoltaico no PSIM. . . . .	59

# Lista de Tabelas

2.1	Análise comparativa entre as simulações e os valores nominais do painel. . . . .	14
3.1	Dados do gerador fotovoltaico que será utilizado (Kyocera KC130TM). . . . .	20
3.2	Ondulação da corrente de entrada e tensão de saída do conversor boost. . . . .	22
3.3	Ondulação da corrente de entrada e tensão de saída do push-pull. . . . .	29
3.4	Limites de harmônicas injetadas na rede em aplicações de geração distribuída (para tensões de 120V a 69kV). . . . .	35



# Glossário

ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
API	- <i>Application Programming Interface</i>
DLL	- <i>Dynamic-Link Library</i>
GTZ	- <i>Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit</i>
INC	- <i>Incremental Conductance</i>
MME	- Ministério de Minas e Energia
MPP	- <i>Maximum Power Point</i>
MPPT	- <i>Maximum Power Point Tracking</i>
P&O	- Perturba e Observa
PWM	- <i>Pulse Width Modulation</i>
RMS	- <i>Root-Mean-Square</i>
SIGFI	- Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes
THD	- <i>Total Harmonic Distortion</i>



# Capítulo 1

## Introdução Geral

A busca de fontes alternativas de energia tem levado vários países a investirem na reestruturação de seus parques energéticos. As questões ambientais, principalmente no que se refere aos impactos causados pelas formas tradicionais de geração, têm levado, também, a uma procura por fontes de energia mais limpas e menos agressoras ao meio ambiente.

O consumo de energia elétrica nos últimos anos tem crescido bastante, fazendo com que governos do mundo inteiro busquem novas estratégias de abastecimento energético a curto e longo prazos. Tais estratégias visam a implantação do modelo de geração distribuída, já que o modelo centralizado não atende ao constante crescimento do consumo energético. Assim, a geração distribuída propõe a instalação de pequenos parques energéticos mais próximos dos consumidores, o que leva a uma diminuição do fluxo de potência nas linhas de transmissão e/ou distribuição.

A preocupação com o aumento do consumo e as questões ambientais tem justificado um projeto mais rigoroso quanto às novas alternativas de fornecimento de energia. É nesse contexto que as fontes renováveis de energia têm aumentado a sua importância. O uso de fontes alternativas não se limita mais a comunidades isoladas, que haviam sido o seu objetivo inicial. Aplicações efetivas de fontes alternativas de energia, como a energia solar fotovoltaica, energia de biomassa, pequenas centrais hidrelétricas, energia eólica, etc, estão sendo utilizadas para fortalecer as centrais energéticas já existentes, mas também são direcionadas às comunidades isoladas, principalmente para aquelas que se encontram afastadas da rede convencional de energia elétrica.

Neste trabalho a energia solar fotovoltaica é utilizada como fonte de energia primária para o abastecimento de uma carga isolada, ou seja, um usuário instalado em uma região onde não há acesso a rede de distribuição de energia elétrica.

Os sistemas fotovoltaicos são responsáveis por converter a energia luminosa em energia

elétrica, tais sistemas são compostos principalmente pelos painéis fotovoltaicos, que são placas semicondutoras responsáveis por esta conversão. Como uma alternativa de otimizar o funcionamento do sistema e obter o aproveitamento máximo dos painéis fotovoltaicos, estudou-se algoritmos de busca do ponto de máxima potência dos painéis que levam estes a fornecer o máximo de energia possível em uma determinada condição de operação.

Um componente fundamental em sistemas de geração fotovoltaica são os conversores, responsáveis pelo condicionamento e processamento da energia gerada pelos painéis solares. Aplicações de sistemas fotovoltaicos requerem conversores CC-CA, uma vez que estes sistemas fornecem uma tensão de saída da ordem de 60V em corrente contínua. Este trabalho propõe um projeto de um conversor CC-CA que implementa o algoritmo de MPPT e produz uma tensão eficaz de saída de 220V a uma frequência de 60Hz. O conversor CC-CA projetado é composto por um conversor CC-CC elevador em cascata com um inversor monofásico.

O Capítulo 2 do texto traz um estudo do gerador fotovoltaico - o qual objetiva dar uma visão geral do uso da energia solar no Brasil e no mundo, apresentar os princípios físicos e modelo matemático do painel, a aplicação dos algoritmos de MPPT bem como os resultados obtidos em simulação.

O Capítulo 3 subdivide-se em duas partes: Conversor Elevador e Inversor de Frequência. Este corresponde inicialmente ao estudo do conversor Boost, que é o conversor elevador típico estudado nos cursos de Eletrônica de Potência, sendo substituído pelo conversor Push-Pull alimentado em corrente, que dentre algumas vantagens apresenta um transformador de isolamento. O conversor elevador é o responsável por implementar o MPPT. A segunda parte deste capítulo contém um estudo do inversor monofásico que faz a conversão CC-CA de fato, além disso técnicas de controle de tensão e redução de componentes harmônicas são também estudadas neste capítulo.

Por fim o Capítulo 4 apresenta as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.



# Capítulo 2

## Gerador Fotovoltaico

O Sol é uma fonte permanente, silenciosa, limpa, gratuita e sobretudo abundante de energia. Anualmente o Sol fornece  $1,5 \times 10^{18}$  kWh de energia para a atmosfera terrestre. Equivalente a 10 mil vezes o consumo mundial neste período. A energia solar pode ser usada de forma direta e indireta. Na forma indireta está relacionada à energia eólica, hidráulica e conversão micro-biológica de matérias orgânicas em combustíveis líquidos. O uso direto se refere ao aquecimento de água, secagem de produtos agrícolas e geração de energia elétrica.

Neste capítulo será dada uma visão geral do uso da energia solar ressaltando sua aplicabilidade, princípios físicos, bem como o modelo matemático que descreve o comportamento das células solares, técnicas de controle do fluxo de potência dos painéis fotovoltaicos, afim de mantê-los operando fornecendo a máxima potência.

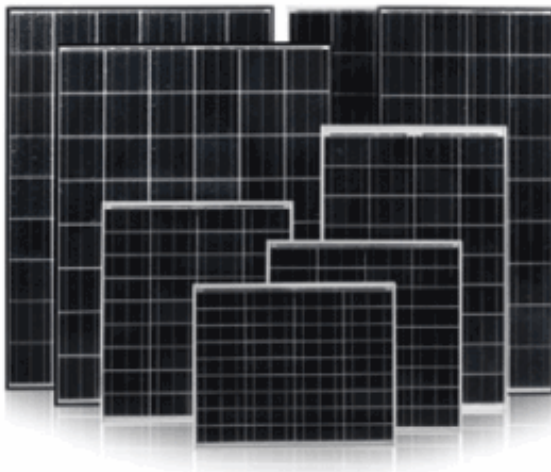
Neste texto, o termo gerador fotovoltaico é empregado para referenciar indistintamente uma única célula, um módulo ou uma matriz fotovoltaica.

### 2.1 Energia Solar - Visão Geral

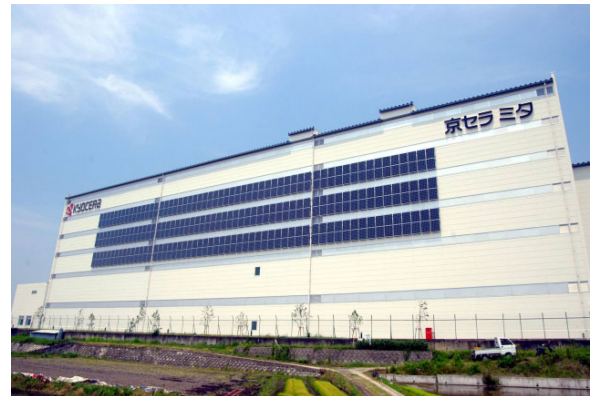
A energia proveniente do Sol é responsável por todas as formas de vida no planeta, a radiação gama proveniente desta energia está sendo continuamente irradiada pela superfície do Sol atingindo a Terra em poucos minutos após serem emitidas. Num dia claro a potência luminosa disponibilizada é de, aproximadamente  $1000W/m^2$ .

Devido a sua posição geográfica, o Brasil possui um potencial energético solar em torno de 2500MW [2], cinco vezes maior que o dos Estados Unidos e muito maior que a maioria dos países do primeiro mundo. Dessa forma, pode-se afirmar que grandes são as possibilidades de aproveitamento da energia solar no Brasil, seja térmica ou fotovoltaica.

Neste trabalho a fonte de energia utilizada é proveniente do efeito fotovoltaico, que consiste na conversão de energia luminosa em energia elétrica sem nenhum estágio intermediário. A conversão direta de luz em eletricidade é feita pelos módulos (ou painéis) fotovoltaicos. A célula fotovoltaica comporta-se como uma bateria de baixa tensão (em torno de 0,6V) que é continuamente carregada devido à radiação solar. A eficiência da célula depende do material e do processo de fabricação que a constitui, este rendimento está entre 3 e 25%. Entende-se por rendimento/eficiência do módulo a relação potência elétrica gerada e a potência incidente da radiação, que comercialmente é cerca de 10%.



*Fig. 2.1: Módulos fotovoltaicos*



*Fig. 2.2: Associação de módulos fotovoltaicos*

A Alemanha é considerado o país com o mais bem sucedido mecanismo de incentivo às fontes renováveis de energia. O programa *Renewable Energy Sources Act* [13], que teve início em 1991, é chave para esse título. Em 2004 houve um aumento de aproximadamente 100% da potência fotovoltaica instalada, que ao final de 2005 estava em cerca de 1,5GWp (GigaWatt pico) conectados à rede elétrica pública.

O programa alemão obriga a concessionária da rede a comprar toda a eletricidade gerada pelas fontes renováveis, pagando ao produtor independente uma tarifa-prêmio por cada kWh gerado, que é superior à tarifa convencional. Os recursos destas tarifas-prêmio são obtidos através de um acréscimo da tarifa convencional de todos os consumidores e são depositados num fundo, utilizado para reembolsar os produtores independentes. O programa visa facilitar o

desenvolvimento sustentável do suprimento de energia, controlar o aquecimento global, proteger o meio ambiente e pelo menos dobrar o suprimento de energia renovável até 2010.

O Programa Solar Brasileiro [12] é inspirado na experiência da Alemanha. Ele segue os pontos positivos do programa alemão adaptando à realidade brasileira. Na Alemanha todos os consumidores finais dividem o custo do programa, no Brasil a proposta exclui os consumidores de baixa renda dos custos. O programa visa instalar 1000MWp em 10 anos. Com base no consumo residencial total de 2006 (72.062.231MWh de acordo com dados do Ministério de Minas e Energia - MME) tal proposta seria vantajosa.

Além disso o Brasil conta com outros programas e parcerias que incentivam o uso de fontes alternativas de energia. A Lei 10.438/2002 obriga as concessionárias a atender todos os moradores em sua área de concessão. Em 2006, cerca de 1,5 milhões de residências não tinham acesso à energia elétrica (principalmente no Norte e Nordeste). Pois muitas dessas residências estão em áreas de difícil acesso e com poucos habitantes, ou são áreas de proteção ambiental, onde as fontes renováveis de energia são as únicas opções (viáveis) de eletrificação. O MME estima que só na Amazônia serão necessários 120 mil sistemas fotovoltaicos residenciais e algo em torno de 3000 minirredes com geração solar, para atender cerca de 330 mil residências. Em 2005 a Eletrobras iniciou uma cooperação técnica com a GTZ (*Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit*) [14].

O Programa Luz para Todos, coordenado pelo MME com participação da Eletrobras e outras empresas, tem o objetivo de levar energia elétrica para 10 milhões de pessoas na zona rural. A Resolução da ANEEL Nº 83 - 20/09/2004, especifica os Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes (SIGFI). Os SIGFIs são responsáveis pelo abastecimento elétrico das residências, que é obtido gratuitamente e inclui a instalação de três pontos de luz e duas tomadas em cada residência.

As principais vantagens dos painéis solares são a inexistência de partes móveis, a lentidão da degradação das células solares, flexibilidade na associação série/paralelo dos módulos desde alguns Watts até MW, simplicidade de uso e manutenção. Além disso os painéis solares podem ser instalados em regiões isoladas sem a necessidade de linhas de transmissão. Contudo o custo destes painéis ainda é muito elevado e sua aplicação limitada. A eletrônica de potência tem sido peça fundamental na diversificação do aproveitamento da energia solar. As células solares são constituídas de materiais semicondutores, que assim como as baterias, utilizam materiais ácidos e metais pesados em seu processo de fabricação. Estes resíduos podem causar graves problemas ambientais se não forem eliminados corretamente [15].

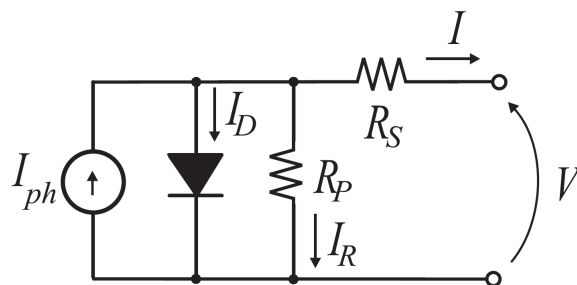


*Fig. 2.3: Domicílio beneficiado com o sistema fotovoltaico.*

## 2.2 Estudo do Gerador Fotovoltaico

Um painel fotovoltaico é formado por um conjunto de células solares, constituídas por quartzo e silício ( $SiO_2$ ), um material semicondutor. Quando a luz incide sobre a célula (absorção de fótons) e atravessa a junção p-n, são produzidos elétrons livres, capazes de cruzar a junção p-n passando para a região n. Devido à concentração de elétrons no lado n da junção, e uma ausência destes no lado p, forma-se um campo elétrico interno na região de cargas espaciais. Tem-se portanto uma força eletromotriz fotovoltaica devido a este campo, capaz de iniciar o processo de condução de corrente elétrica. Cada célula pode gerar uma potência em torno de 1,0W. Para se obter níveis mais elevados de potência pode-se associar diversas células em série e/ou paralelo, formando os painéis fotovoltaicos. Atualmente são utilizados três tipos tecnologias para a produção de células fotovoltaicas: silício monocristalino, policristalino e amorfo.

Com base em estudos teóricos e nas considerações feitas, o circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica é apresentado na Figura 2.4.



*Fig. 2.4: Modelo matemático de uma célula fotovoltaica.*

A fonte de corrente  $I_{ph}$  representa a corrente gerada pela incidência de luz sob a superfície da célula, como a célula é um material semiconductor de junção p-n, a mesma se comportará como um diodo que é atravessado por uma corrente  $I_D$ , a qual depende da tensão nos terminais da célula. Esta possui um elemento de perdas parasitas  $R_P$ , que provoca a circulação de uma corrente de fuga, e outro de perdas por condução  $R_S$ . Aplicando a lei de Kirchhoff ao circuito da Figura 2.4, tem-se:

$$I = I_{ph} - I_D - I_R \quad (2.1)$$

Substituindo as devidas equações em (2.1), obtém-se:

$$I = I_{ph} - I_O \left[ \exp \left( \frac{V + R_S I}{m V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_S I}{R_P} \quad (2.2)$$

onde  $I_O$  é a corrente de saturação reversa do diodo que é constante a uma dada temperatura, a constante  $m$  é o fator de idealidade do diodo (que varia entre 1 e 2) e  $V_T$  é a tensão térmica, que é dada por  $V_T = kT/q$ , onde  $k$  é a constante de Boltzmann ( $k = 1,3806504 \times 10^{-23} J/K$ ),  $T$  é a temperatura medida em Kelvin, e  $q$  é a carga do elétron ( $q = 1,6021765 \times 10^{-19} C$ ).

A equação (2.2) descreve o comportamento elétrico de uma única célula, no entanto, um painel fotovoltaico é constituído de um arranjo série-paralelo de células, formando assim uma matriz composta  $N_S \times N_P$ , que corresponde ao número de células em série e paralelo respectivamente. Dessa forma (2.2) é estendida para (2.3).

$$I = N_P I_{ph} - N_P I_O \left[ \exp \left( \frac{V + \frac{N_S}{N_P} R_S I}{N_S m V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + \frac{N_S}{N_P} R_S I}{\frac{N_S}{N_P} R_P} \quad (2.3)$$

Para se obter as características V-I e V-P do painel é necessário resolver a equação (2.3) para todos os valores possíveis de  $V$  do painel. Sabe-se portanto, que a tensão terminal do painel varia entre 0 (zero), que é a tensão na condição de curto-circuito, e  $V_{oc}$ , que é a tensão de circuito aberto. Conseqüentemente, a corrente terminal do painel varia de 0 (zero), corrente na condição de circuito aberto, a  $I_{sc}$ , que é a corrente de curto-circuito.

Dessa forma a corrente terminal na condição de curto-circuito é obtida fazendo  $V = 0$  em (2.3).

$$I = N_P I_{ph} = I_{sc} \quad (2.4)$$

Analogamente, a tensão terminal na condição de circuito aberto é obtida fazendo  $I = 0$  em (2.3).

$$V = mV_T \ln \left( 1 + \frac{I_{ph}}{I_o} \right) = V_{oc} \quad (2.5)$$

Então pode-se utilizar um método numérico para traçar as curvas características do painel. Neste trabalho optou-se por utilizar um caso especial do método de *Newton-Raphson*, que através de um processo iterativo encontra os zeros da função desejada (2.3). O equacionamento do método é mostrado nas equações (2.6) e (2.7), no qual deseja-se encontrar a raiz de  $f(I)$ .

$$f(I) = N_P I_{ph} - N_P I_O \left[ \exp \left( \frac{V + \frac{N_S}{N_P} R_S I}{N_S m V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + \frac{N_S}{N_P} R_S I}{\frac{N_S}{N_P} R_P} - I = 0 \quad (2.6)$$

$$I^{k+1} = I^k - \frac{f(I^k)}{f'(I^k)} \quad (2.7)$$

Com base no que foi apresentado, foi desenvolvida uma rotina em C++ para obter as curvas características V-I e V-P do painel. Na Figura 2.5 são apresentadas estas curvas, em destaque o ponto de máxima potência (MPP - *Maximum Power Point*).

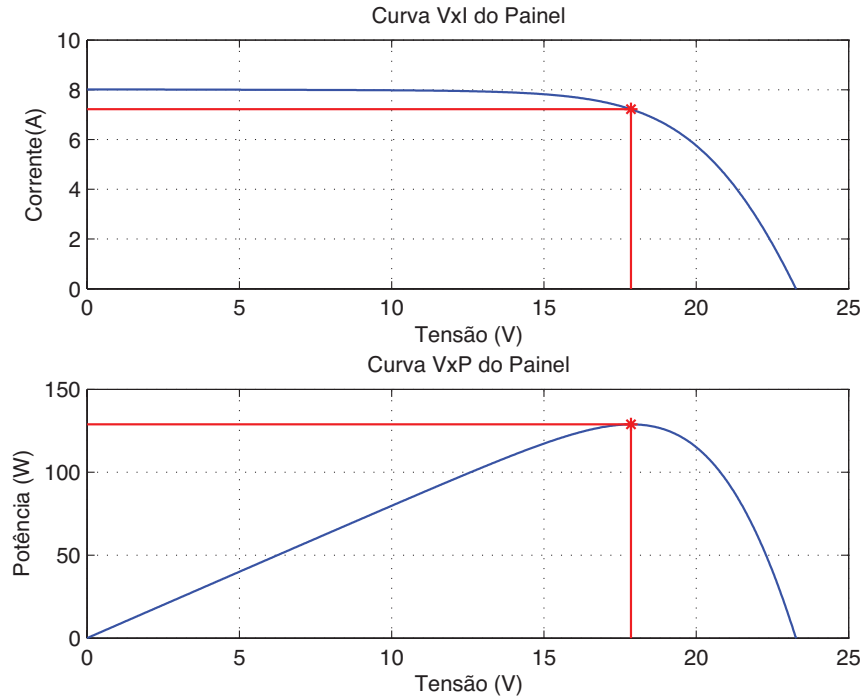
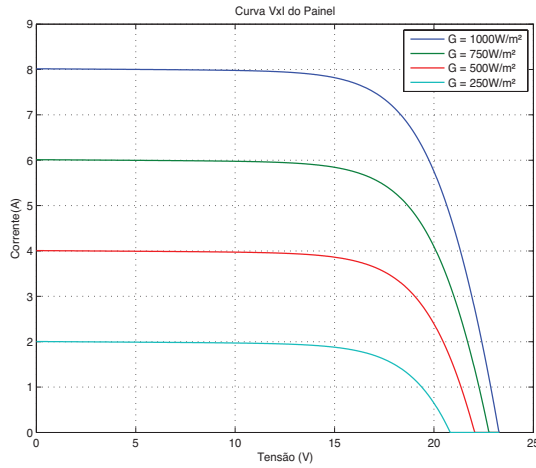


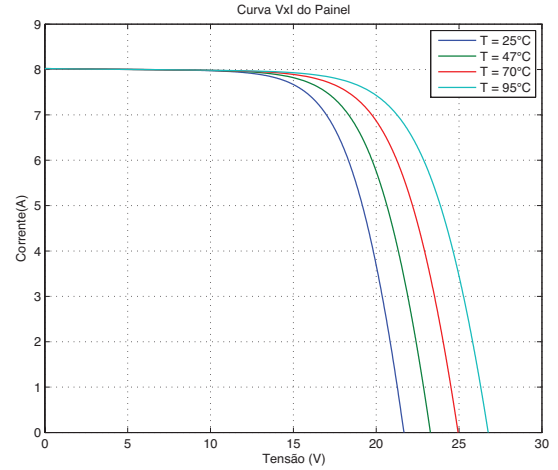
Fig. 2.5: Curvas característica de um painel fotovoltaico.

A temperatura  $T$  e o nível de insolação  $G$  são os parâmetros que influenciam no comportamento do gerador. Os valores de referência para estas grandezas são:  $G_{ref} = 1000W/m^2$  e

$T_{ref} = 298,16K$ . Para observar a influência destas grandezas, foram traçadas as curvas V-I do painel para diferentes níveis de insolação e temperatura, os resultados obtidos são apresentados na Figura 2.6.



(a) Influência da insolação.



(b) Influência da temperatura.

Fig. 2.6: Curvas V-I para diferentes níveis de insolação e temperatura.

A partir das figuras 2.6(a) e 2.6(b) pode-se observar que a corrente do painel é afetada principalmente pela insolação, enquanto que a tensão é influenciada principalmente pela temperatura. Podemos reforçar estas afirmações observando as equações (2.8) e (2.9), que descrevem matematicamente tais alterações:

$$I_{ph} = I_{ph\,ref} \frac{G}{G_{ref}} \quad (2.8)$$

$$I_O = I_{O\,ref} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right) \exp \left[ \frac{q\varepsilon}{m/2} \left( \frac{1}{V_{T\,ref}} - \frac{1}{V_T} \right) \right] \quad (2.9)$$

onde  $\varepsilon$  é a banda de energia do silício ( $\varepsilon = 1,12eV$ ) e  $m/N_S < 2$ .

Como a insolação tem uma dinâmica de variação muito mais rápida que a temperatura, é preferível regular a tensão do painel, pois os requisitos de dinâmica do sistema de controle serão menores.

## 2.3 Método de Busca do Ponto de Máxima Potência

Após levantar as características do painel é necessário controlar o fluxo de potência deste. Em geral deseja-se que o painel forneça o máximo de energia possível, isto é, que ele opere no seu Ponto de Máxima Potência (MPP). Existem vários algoritmos de busca do MPP, chamados *MPP Trackers* (MPPT). Eles são divididos em dois grupos: os métodos heurísticos, que não são baseados em modelos matemáticos específicos, e os métodos cujo conhecimento do gerador e carga é utilizado de modo a localizar o MPP mais rápido. Além destes, existem outros métodos utilizando lógica fuzzy e redes neurais [6].

### 2.3.1 Método da Condutância Incremental

O método escolhido inicialmente foi o da Condutância Incremental (INC) [6]. Este consiste em encontrar a resistência do ponto de máxima potência,  $R_{mpp} = V_{mpp}/I_{mpp}$ . No entanto percebe-se que um painel solar apresenta uma característica não-linear, na qual possui basicamente duas regiões: uma região em que o painel se comporta como fonte de corrente e outra como fonte de tensão, e entre elas está o MPP. A Figura 2.7 ilustra este comportamento.

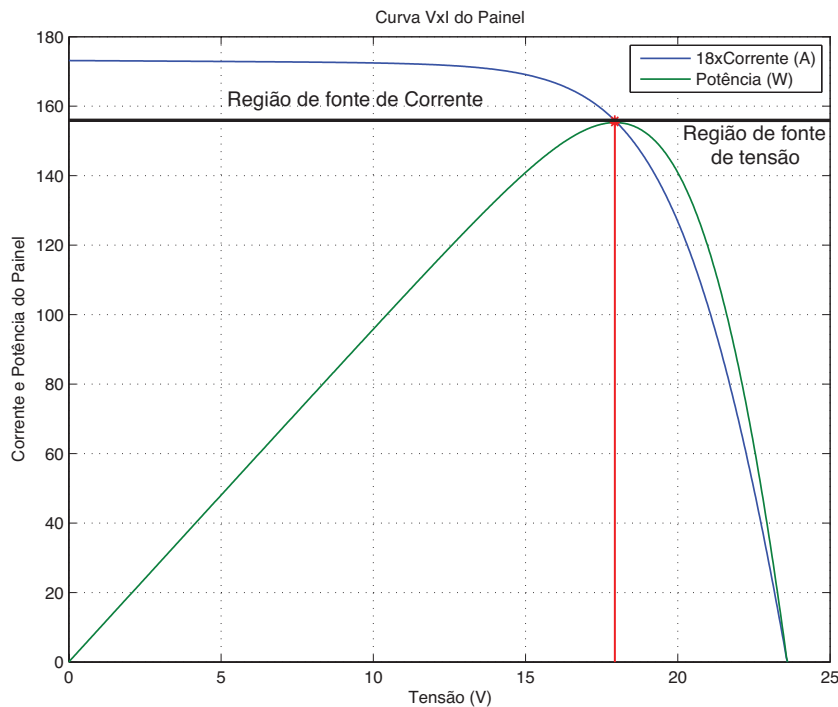


Fig. 2.7: Regiões de operação do painel.



A idéia básica para a busca do MPP do painel está relacionada com as diferentes regiões de operação [6]:

$$\begin{cases} -\infty < r/r_s < -1, & \text{painel como fonte de tensao} \\ r/r_s = -1, & \text{painel no MPP} \\ -1 < r/r_s < 0, & \text{painel como fonte de corrente} \end{cases} \quad (2.10)$$

onde,  $r = v_{sa}/i_{sa}$  é a resistência instantânea do painel, e  $r_s = dv_{sa}/di_{sa}$  é a resistência incremental. Somando-se 1 a todos os termos da equação (2.10) tem-se:

$$\begin{cases} -\infty < M < 0, & \text{painel como fonte de tensao} \\ M = 0, & \text{painel no MPP} \\ 0 < M < 1, & \text{painel como fonte de corrente} \end{cases} \quad (2.11)$$

sabendo que,  $M = 1 + r/r_s$ , então,

$$M = 1 + \frac{V}{I} \frac{dI}{dV}. \quad (2.12)$$

Fazendo uso do conjunto de equações apresentadas [6] e do modelo discutido por (Vitorino [8]), foi proposto um algoritmo de INC simplificado que reduz o número de condições a serem testadas, acelerando processamento do método. Então, com base nestas informações, construiu-se o fluxograma da Figura 2.8 para o algoritmo proposto.

Para a implementação deste algoritmo foi desenvolvido um programa na linguagem C++ que resolve a equação geral do painel (2.3) produzindo uma saída gráfica no MATLAB®. O programa é composto por um programa principal (*main\_mpptinc.cpp*) e uma biblioteca (um par de arquivos *.h* e *.cpp* Apêndice A) chamada *PvPanel.h*, que possui várias funções lógicas e aritméticas direcionada a sistemas fotovoltaicos, de maneira que se tenha um arcabouço (*framework*) de funções (API) a fim de facilitar futuras implementações. Na Figura 2.9 tem-se uma ilustração do processo de busca do MPP utilizando o algoritmo apresentado na Figura 2.8, durante a busca observa-se que o painel parte da condição de curto-circuito chegando até o MPP. Neste caso utilizou-se  $G = 1000W/m^2$  e  $T = 25^\circ C$ , obtendo-se no MPP:  $I_{mpp} = 7,20A$ ,  $V_{mpp} = 17,1V$  e  $P_{max} = 123,14W$ . É importante ressaltar que o ponto encontrado é o mesmo pertencente a curva característica da Figura 2.5, e aproximadamente igual ao fornecido pelo manual do painel [10].

Lee et al. [6] apresentam um Algoritmo de Condutância Incremental Avançado com passo variável, que consiste em produzir um incremento/decremento de tensão proporcional a sua distância do MPP.

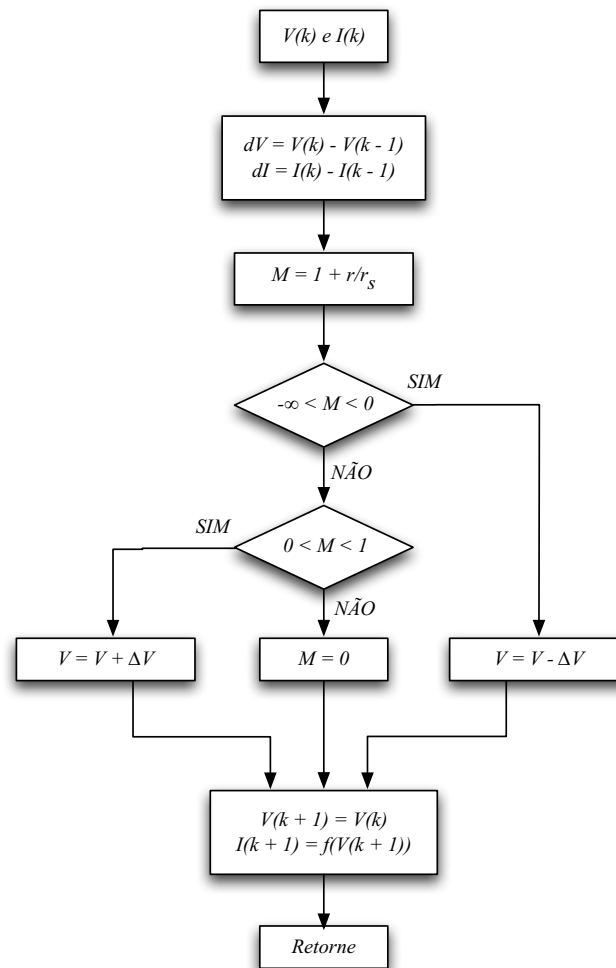


Fig. 2.8: Algoritmo do método da Condutância Incremental.

### 2.3.2 Método Perturba e Observa

Uma outra alternativa para a busca do MPP é o método que introduz o conceito de Perturba e Observa (P&O). A maioria dos esquemas de controle utilizam o método P&O devido a sua fácil implementação. Entretanto, este método apresenta um inevitável problema de oscilação, uma vez que este sempre está incrementando ou decrementando a tensão. Jiang et al. [4] apresentam um método P&O utilizando uma comparação em três pontos, determinando, assim, a tendência do processo de busca, acelerando o processo.

Na Figura 2.10 tem-se um fluxograma de um método P&O simples. O MPPT incrementa ou decrementa continuamente a tensão do painel, se uma dada perturbação leva a um aumento da potência do painel, então a perturbação seguinte é gerada na mesma direção da anterior.

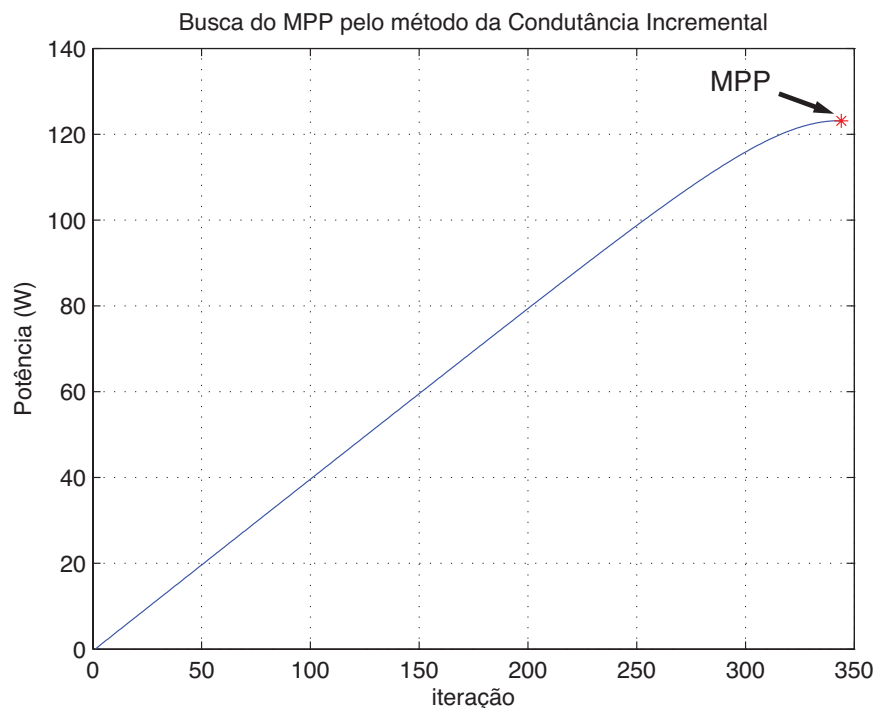


Fig. 2.9: Evolução do processo de busca do MPP (INC).

Por outro lado, se a perturbação realizada leva a uma diminuição da potência, a perturbação posterior é feita na direção oposta da anterior.

A evolução do processo de busca do MPP é análogo ao apresentado na seção 2.3.1 (Figura 2.9).

### 2.3.3 INC X P&O

A fim de avaliar/verificar a eficácia de ambos os algoritmos, foram realizados novos testes nos quais, dado que se inicia o processo de busca pelo MPP o nível de insolação  $G$  é variável. O gráfico da evolução do processo de busca pelo MPP para ambos os algoritmos estão nas figuras 2.11(a) e 2.11(b), onde o nível de insolação assume os valores 1000, 500, 1000, 1500, 1000, 300, 1000  $W/m^2$  respectivamente.

Pode-se dizer que ambos os métodos são de fato eficazes, uma vez que os MPPs encontrados em todas as situações pertencem à curva V-I do painel. Com base na Figura 2.11 percebe-se que o algoritmo P&O encontra o MPP mais rapidamente que o INC, além de ser um método mais simples e intuitivo, conseqüentemente mais fácil de implementar. Contudo, o P&O apresenta uma constante oscilação em torno do MPP o que limita a sua precisão, devido ao seu constante

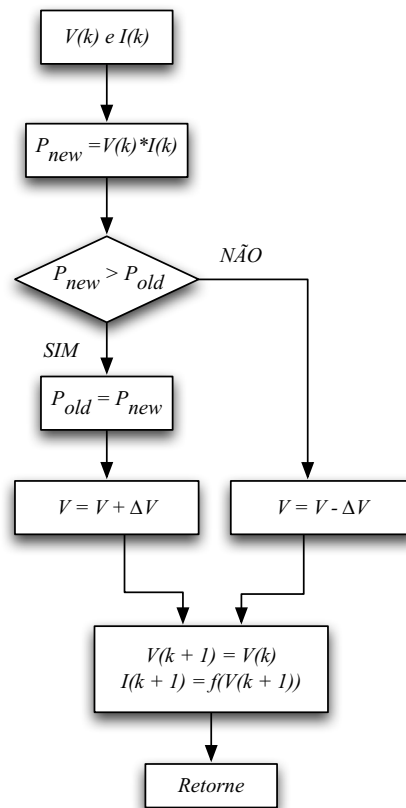


Fig. 2.10: Algoritmo do método Perturba e Observa.

incremento/decremento. Neste trabalho será dado maior foco à precisão e estabilidade do MPP, por isso será utilizado o algoritmo de Condutância Incremental proposto.

A Tabela 2.1 apresenta um resumo dos dados obtidos das simulações realizadas.

$G = 1000W/m^2$ $T = 25C$	INC	P&O	Nominal
$I_{mpp}$ (A)	7,20	7,20	7,39
$V_{mpp}$ (V)	17,1	17,1	17,6
$P_{max}$ (W)	123,14	123,14	130 (+10%/-5%)

Tab. 2.1: Análise comparativa entre as simulações e os valores nominais do painel.

Para uma aplicação real deseja-se que o painel fotovoltaico forneça o máximo de energia que é possível, logo, é necessário que haja um dispositivo que force o mesmo a operar no MPP,

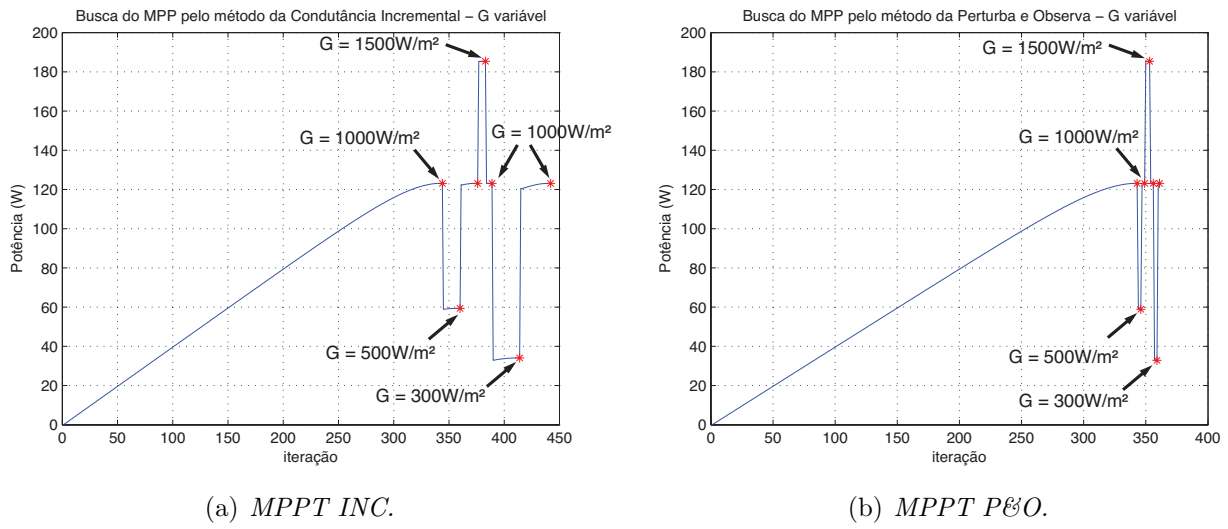


Fig. 2.11: Resposta dinâmica dos algoritmos de MPPT para insolação variável.

isso porque o ponto de operação do painel depende do fluxo de potência demandado pela carga conectada a ele. Assim, o gerador fotovoltaico será conectado a um conversor CC-CC que irá forçar a operação no MPP e elevar a tensão para um nível aceitável de trabalho.



# Capítulo 3

## Conversor CC-CA

Após garantir que o gerador fotovoltaico esteja operando em seu MPP, é necessário fazer o devido processamento da energia fornecida pelo gerador permitindo assim a conexão a uma carga em corrente alternada.

O conversor CC-CA discutido neste capítulo possui dois estágios principais, elevação da tensão de entrada e a conversão em corrente alternada. Sendo necessário o estudo de dois conversores típicos em Eletrônica de Potência: o Conversor CC-CC Elevador e o Inversor de Frequência. O arranjo em cascata destes configura uma topologia que possibilita utilização do painel fotovoltaico como fonte de abastecimento de energia elétrica em regiões isoladas, onde o acesso a energia elétrica por meio de uma rede de distribuição convencional tem um custo proibitivo.

### Conversor Elevador

Devido a baixa tensão de saída do painel faz-se necessária a sua elevação para que seja possível a conexão com a rede elétrica. A fim de evitar a associação de vários painéis em série, o que aumentaria consideravelmente o custo e o volume do sistema, utiliza-se um Conversor CC-CC Elevador.

Os conversores CC-CC convencionais, também conhecidos como choppers, permitem a obtenção de uma tensão contínua, no primeiro quadrante, isto é  $V > 0$  e  $I > 0$ . Estes tipos de conversores têm sido muito usados no controle de motores de tração em automóveis elétricos, ônibus elétricos, metrô, etc.

Nesta seção dois conversores típicos serão discutidos: o Conversor Boost e o Conversor Push-Pull.

### 3.1 Conversor Boost

O conversor Boost é chamado elevador de tensão por sempre apresentar a tensão de saída maior ou igual a tensão de entrada. Sua característica principal é a presença de uma indutância  $L$  em série com a fonte de alimentação, fazendo com que esta tenha um comportamento de fonte de corrente, logo, a carga deve se comportar como fonte de tensão. Um diagrama esquemático do conversor Boost é mostrado na Figura 3.1.

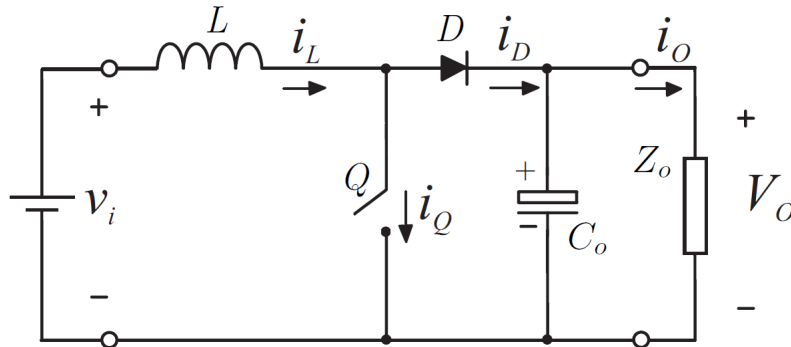


Fig. 3.1: Diagrama esquemático do conversor Boost.

#### 3.1.1 Características de Funcionamento - Boost

A operação deste conversor pode ser dividida em duas etapas. A primeira se dá inicialmente quando a chave  $Q$  está conduzindo (Figura 3.2(a)). Com a chave fechada, o diodo  $D$  é polarizado reversamente, isolando a fonte da carga. Neste momento a fonte  $v_i$  fornece energia ao indutor  $L$ , e carga  $Z_o$  passa a ser alimentada pela energia armazenada no capacitor  $C_o$  - energia esta que foi armazenada no estágio anterior de chaveamento. A segunda etapa se inicia quando a chave bloqueia o fluxo de corrente pela mesma (Figura 3.2(b)). Estando a chave aberta, a energia armazenada anteriormente no indutor é fornecida ao capacitor e à carga.

A relação entre o período em que a chave está fechada e período total de chaveamento é chamado ciclo de trabalho  $q$ . Este parâmetro é responsável por controlar o ganho do conversor. O ciclo de trabalho está sempre entre 0 e 1, e independente do seu valor, a tensão de saída será sempre maior ou igual a tensão de entrada.

O ganho do conversor boost [3] é dado por:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - q} \quad (3.1)$$

onde  $q = t_f/T$ , sendo  $t_f$  o tempo em que a chave está fechada,  $T$  o período total de chaveamento,



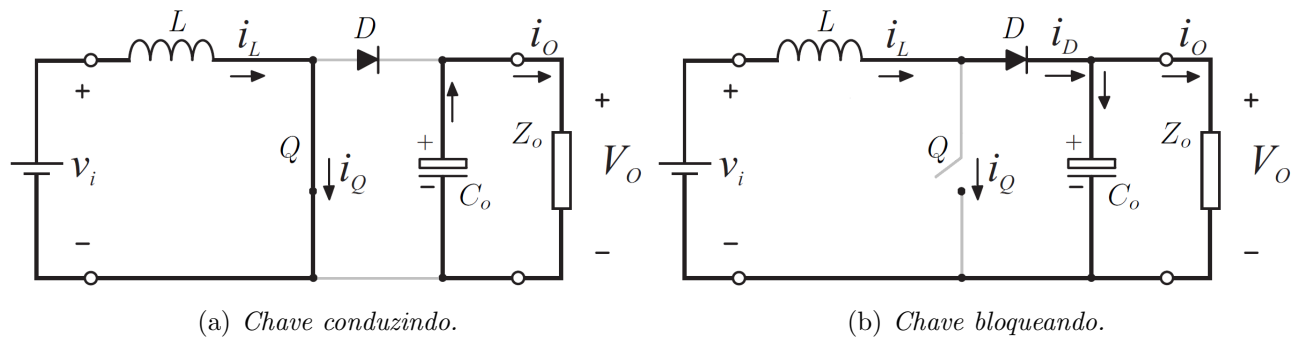


Fig. 3.2: Etapas de funcionamento do conversor boost.

$V_i$  e  $V_o$  as tensões médias de entrada e saída respectivamente.

O conversor boost apresenta três modos de condução, são eles:

- Modo de Condução Contínua;
- Modo de Condução Crítica;
- Modo de Condução Descontínua.

No modo de condução contínua, a corrente na fonte (indutor) é sempre contínua em todo o período de operação do conversor; no modo de condução crítica a corrente no indutor de entrada se anula exatamente no final do período de chaveamento; e o modo descontínuo ocorre quando a corrente no indutor de entrada se anula durante o tempo em que a chave está aberta. Na Figura 3.3 tem-se os diferentes modos de condução do conversor boost.

Neste trabalho será adotado o modo de condução contínua, pois os outros modos apresentam oscilações elevadas de corrente e, conseqüentemente, ocorrem oscilações na potência fornecida pelo painel solar. Neste sentido deseja-se que o painel se comporte como uma fonte CC com potência aproximadamente constante (tensão e corrente constantes).

### 3.1.2 Conexão Gerador/Boost

Para que seja possível a conexão do gerador ao conversor boost é necessário especificar os parâmetros de projeto do conversor, em seguida fazer a validação do conversor projetado, e somente então realizar a simulação do conversor conectado ao gerador.

#### Projeto do Conversor Boost

Para este trabalho determinou-se que a carga a ser abastecida pelo gerador seria de aproximadamente 1200Wp. Assumindo também que o gerador estará operando na região em torno

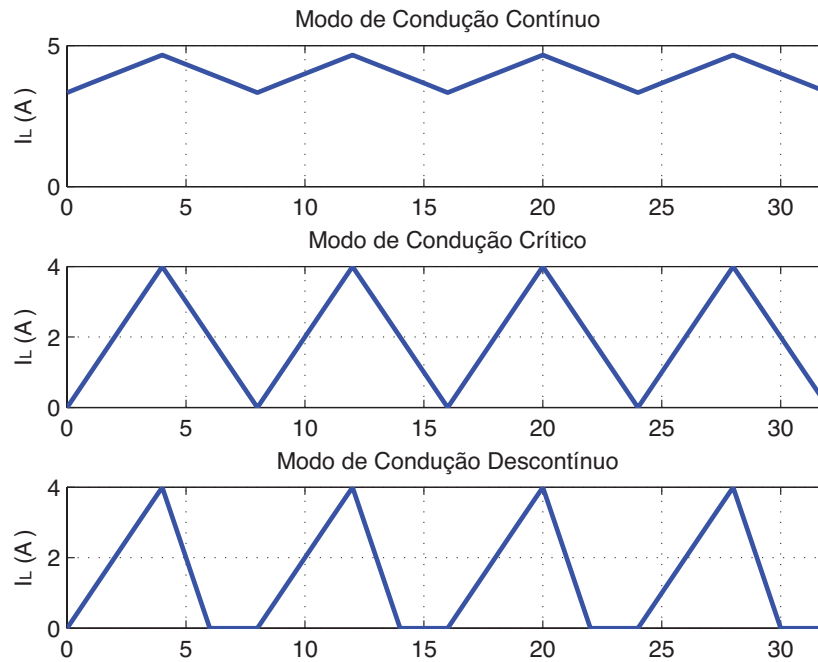


Fig. 3.3: Diferentes modos de condução do conversor boost.

do MPP, tal suposição será explicada mais adiante. Então, o gerador a ser utilizado apresenta as características de operação contidas na Tabela 3.1.

$G = 1000W/m^2$ $T = 25C$	
$I_{mpp}$ (A)	18,03
$V_{mpp}$ (V)	68,30
$P_{max}$ (W)	1231,18
$R_{mpp}$ ( $\Omega$ )	3,79
$I_{sc}$ (A)	20,05
$V_{oc}$ (V)	89,26

Tab. 3.1: Dados do gerador fotovoltaico que será utilizado (Kyocera KC130TM).

Para este conversor foram estabelecidos os seguintes critérios:

- frequência de chaveamento de  $f = 50kHz$ ;
- tensão média de saída  $V_o = 3V_i$ ;
- ondulação da corrente de entrada  $\Delta I_L = 10\%I_L$ ;

- ondulação da tensão de saída  $\Delta V_C = 5\%V_o$ .

Assumindo que os valores de  $V_{mpp}$  e  $I_{mpp}$  sejam os valores médios de tensão e corrente de entrada do conversor, tem-se que a tensão e corrente média de saída do conversor serão  $V_o = 204,90V$  e  $I_o = 6,01A$ , respectivamente.

Os valores de  $L$  e  $C_o$  são dados por [3]:

$$\Delta I_L = \frac{V_i q}{Lf} \quad (3.2)$$

$$\Delta V_C = \frac{qI_o}{fC_o} \quad (3.3)$$

logo,  $L = 505,19\mu H$  e  $C_o = 7,82\mu F$ .

Para validar os cálculos de projeto, o conversor da Figura 3.1 foi simulado utilizando o software PSIM (versão 6.0). Vale a pena ressaltar que, para esta simulação, todos componentes do circuito são não-ideais a fim de se ter resultados os mais próximos da realidade.

A Figura 3.4 apresenta os resultados da simulação para o conversor projetado.

### Simulação do Gerador/Boost

A conexão do gerador fotovoltaico ao conversor é mostrada na Figura 3.5.

Para a simulação do gerador conectado ao conversor é necessário fazer algumas considerações. Como visto na seção 2.3, é desejável que o gerador forneça o máximo de potência possível, isto é, que ele opere em torno do MPP.

Quando a carga conectada ao conversor é conhecida, torna-se possível determinar o ciclo de trabalho correspondente para que o conversor trabalhe no MPP do gerador através da equação (3.4). No entanto, quando não se conhece a natureza da carga, ou se esta for variável, este trabalho torna-se impraticável. Para contornar este problema, pode-se aplicar um algoritmo de MPPT visto na seção 2.3 ao conversor boost.

$$R_{mpp} = R_{in} = R_o(1 - q)^2 \quad (3.4)$$

Então, a partir da medição de tensão e corrente do painel, varia-se o ciclo de trabalho do período de chaveamento do conversor. Análogo à Figura 2.8 é construído o fluxograma da Figura 3.6 que mostra a aplicação do MPPT-INC ao conversor boost.

A Figura 3.7 apresenta os resultados da simulação para o sistema Gerador-Boost.

Os valores das ondulações da corrente de entrada e tensão de saída do conversor simulado são mostrados na Tabela 3.2.

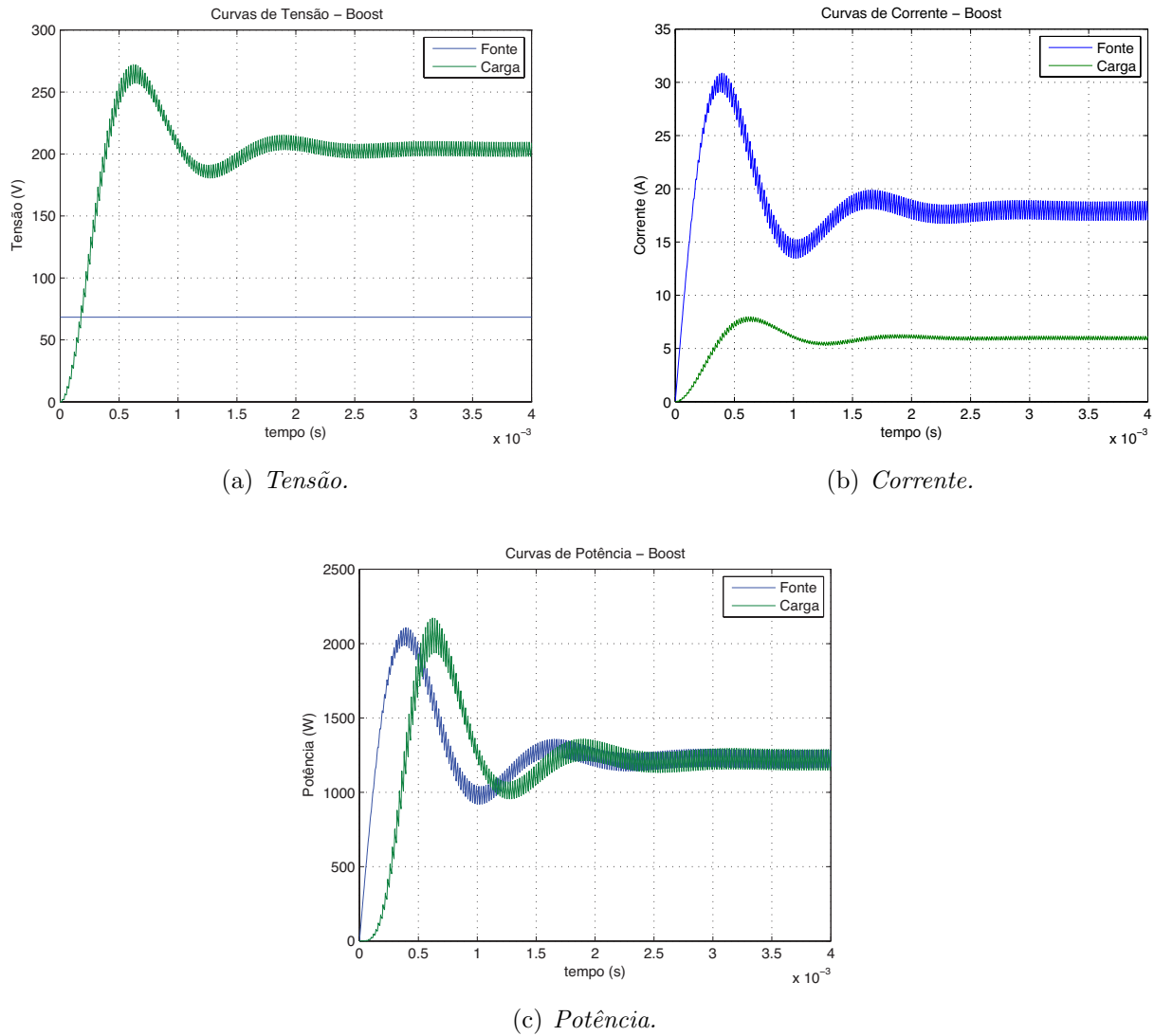


Fig. 3.4: Simulação do conversor boost projetado.

$G = 1000W/m^2$ $T = 25C$	projeto	simulação
$\Delta I_L$	$10\%I_L$	$10,08\%I_L$
$\Delta V_C$	$5\%V_o$	$6,08\%V_o$

Tab. 3.2: Ondulação da corrente de entrada e tensão de saída do conversor boost.

Com base na Figura 3.7 e nos dados da Tabela 3.2 pode-se afirmar que o projeto do conversor foi satisfatório, uma vez que os resultados obtidos são próximos dos desejados. Nota-se que para o projeto do conversor foi considerado um gerador fotovoltaico ideal operando no MPP. Contudo, na Figura 3.4 não foi possível simular um gerador com tensão e corrente constantes,

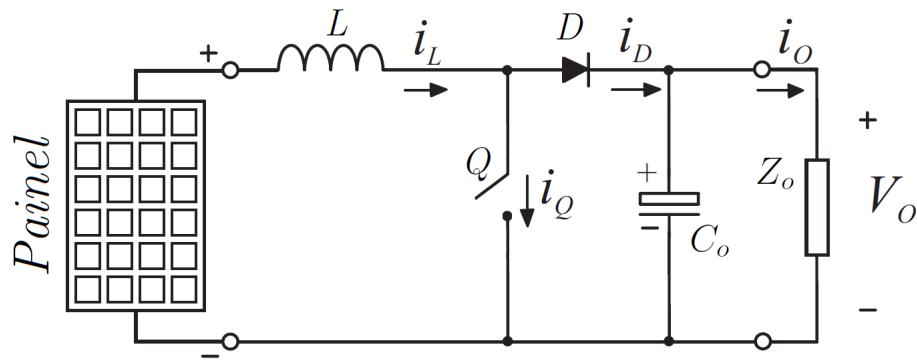


Fig. 3.5: Diagrama esquemático da montagem Gerador/Boost.

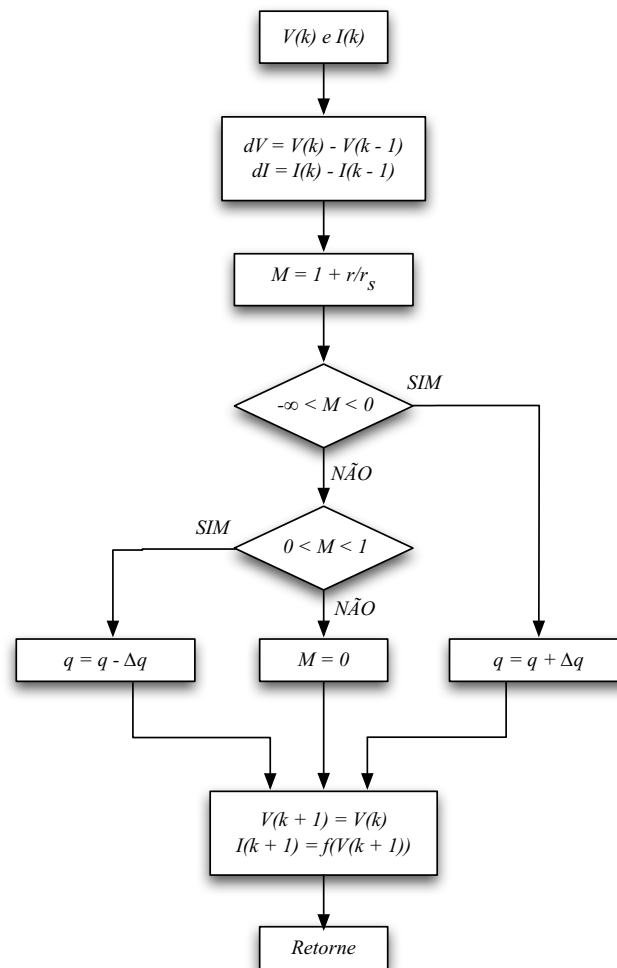


Fig. 3.6: Algoritmo MPPT-INC aplicado ao conversor boost.

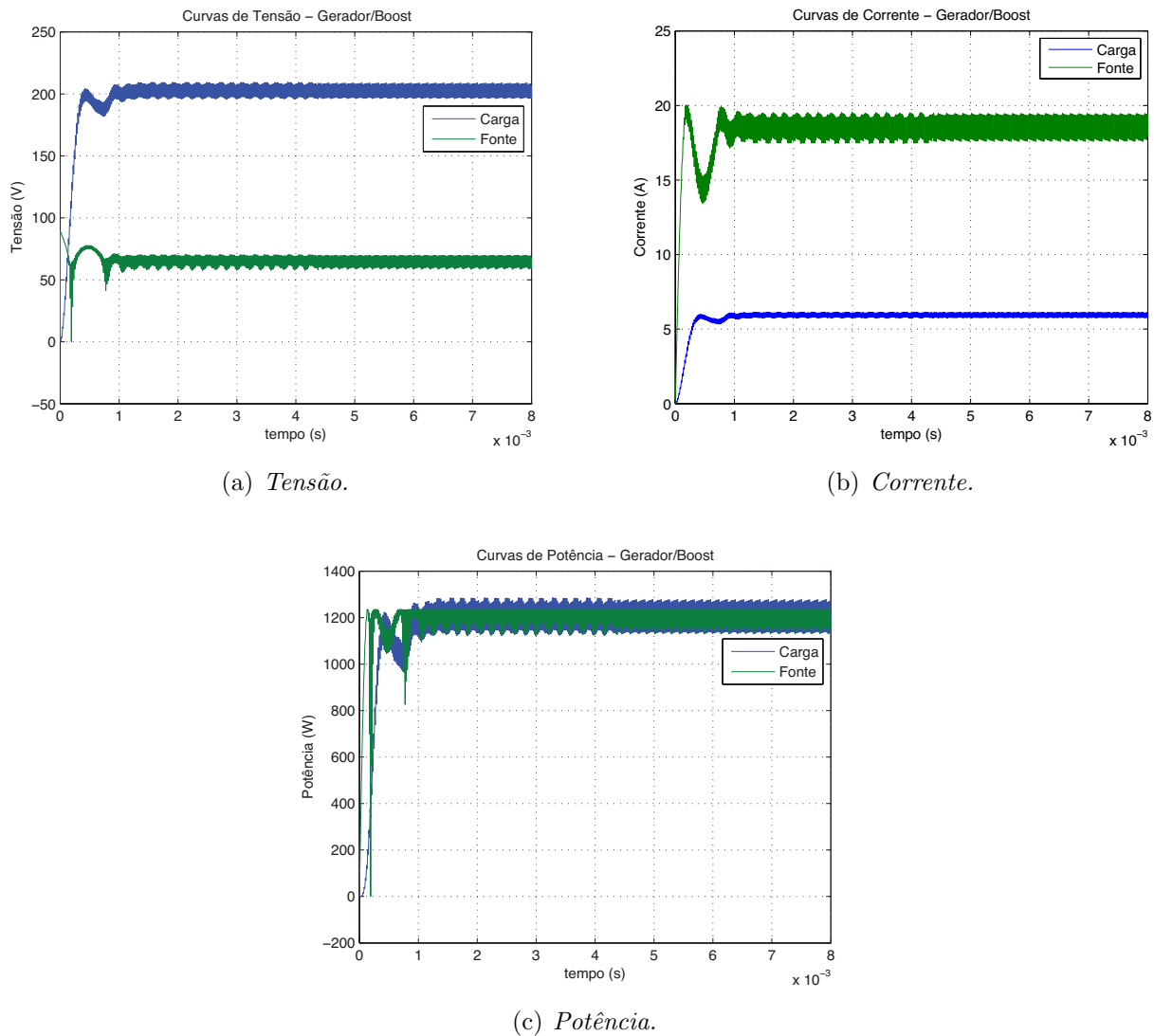


Fig. 3.7: Simulação sistema Gerador/Boost.

levando o conversor a pontos de operação diferentes da curva V-I do painel.

Para que fosse possível utilizar o painel fotovoltaico e o algoritmo de MPPT no ambiente PSIM é necessário criar duas DLL's. As DLL's são blocos compilados (C/C++) que podem ser agregados à simulação. Utilizando a biblioteca *PvPanel.h* e o *main\_mppptinc.cpp* foi possível criar dois blocos que pudessem ser importados pelo PSIM permitindo assim a flexibilidade e ampliação de recursos da ferramenta. Com a DDL *Painel\_DLL.dll* tem-se um novo elemento de circuito a ser utilizado no software.

## 3.2 Conversor Push-Pull

O conversor discutido anteriormente (seção 3.1) apresenta bons resultados quanto a conexão com o gerador fotovoltaico e rastreamento do ponto de máxima potência. Contudo, para aplicações de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, o conversor Boost é inadequado por ser não-isolado. A utilização de conversores isolados proporcionam uma maior segurança contra choques elétricos, permitindo a limpeza e manutenção do painel sem necessidade de desligamento.

Para contornar este problema é possível adicionar um transformador na saída do sistema. No entanto, devido a baixa frequência da rede, este transformador teria um grande volume, o que elevaria o custo do sistema. O uso de conversores CC-CC isolados facilita a obtenção de ganho elevado, através da relação de espiras do transformador, sobretudo volume reduzido por operarem em altas frequências.

Com base no que foi exposto foi adotado o conversor Push-Pull alimentado por corrente [5]. Esta topologia possui baixo estresse de corrente nas chaves, uma vez que a corrente se divide por ambas as chaves. O Push-Pull pode apresentar um rendimento menor que o conversor Boost, devido a possibilidade de saturação do núcleo do transformador. Esta limitação é devidamente tratada por (Hartmann [7]).

A Figura 3.8 mostra o diagrama esquemático do conversor Push-Pull que será utilizado.

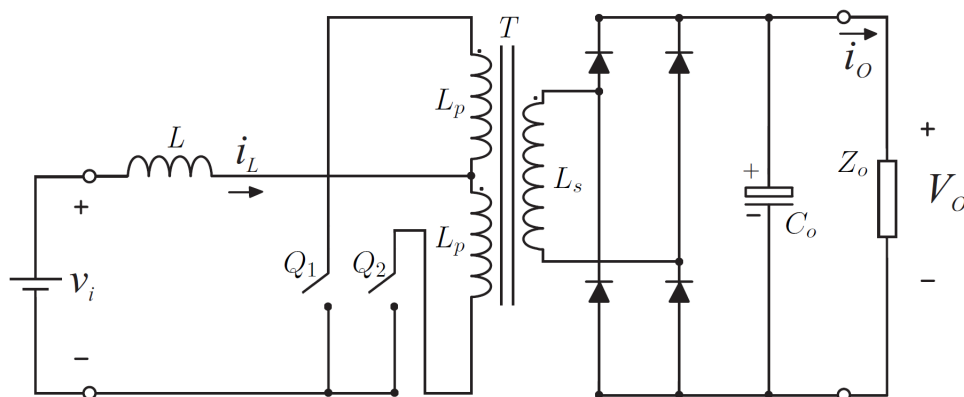


Fig. 3.8: Diagrama esquemático do conversor Push-Pull alimentado por corrente.

Da mesma forma que para o conversor Boost; são apresentados as características de funcionamento, projeto e simulação. Estes passos serão discutidos em linhas gerais para o conversor push-pull.

### 3.2.1 Características de Funcionamento - Push-Pull

Como visto na Figura 3.8 o Push-Pull possui duas chaves,  $Q_1$  e  $Q_2$ , e a operação deste conversor é dada pelos estados destas. Como este conversor é do tipo fonte de corrente, espera-se que o fluxo de corrente no indutor  $L$  não seja interrompido pela abertura de ambas as chaves. Então é possível dividir o funcionamento do Push-Pull em três etapas, mostradas na Figura 3.9.

A primeira etapa é caracterizada por ambas as chaves estarem conduzindo, (Figura 3.9(b)) isolando a fonte da carga. Com isso a fonte transfere energia para o indutor ao mesmo tempo que o capacitor  $C_o$  alimenta a carga. Observa-se que o fato de ambas as chaves estarem conduzindo o fluxo magnético resultante no primário do transformador  $T$  é nulo, fazendo com que a tensão no secundário também se anule. A segunda etapa se inicia com a abertura da chave  $Q_2$  (Figura 3.9(c)), fazendo com que a tensão no secundário de  $T$  seja diferente de zero e a fonte passe a fornecer energia à carga e carregar o capacitor através deste. Em seguida  $Q_2$  é fechada novamente, voltando à primeira etapa até que  $Q_1$  seja aberta (Figura 3.9(d)), configurando um comportamento análogo à segunda etapa.

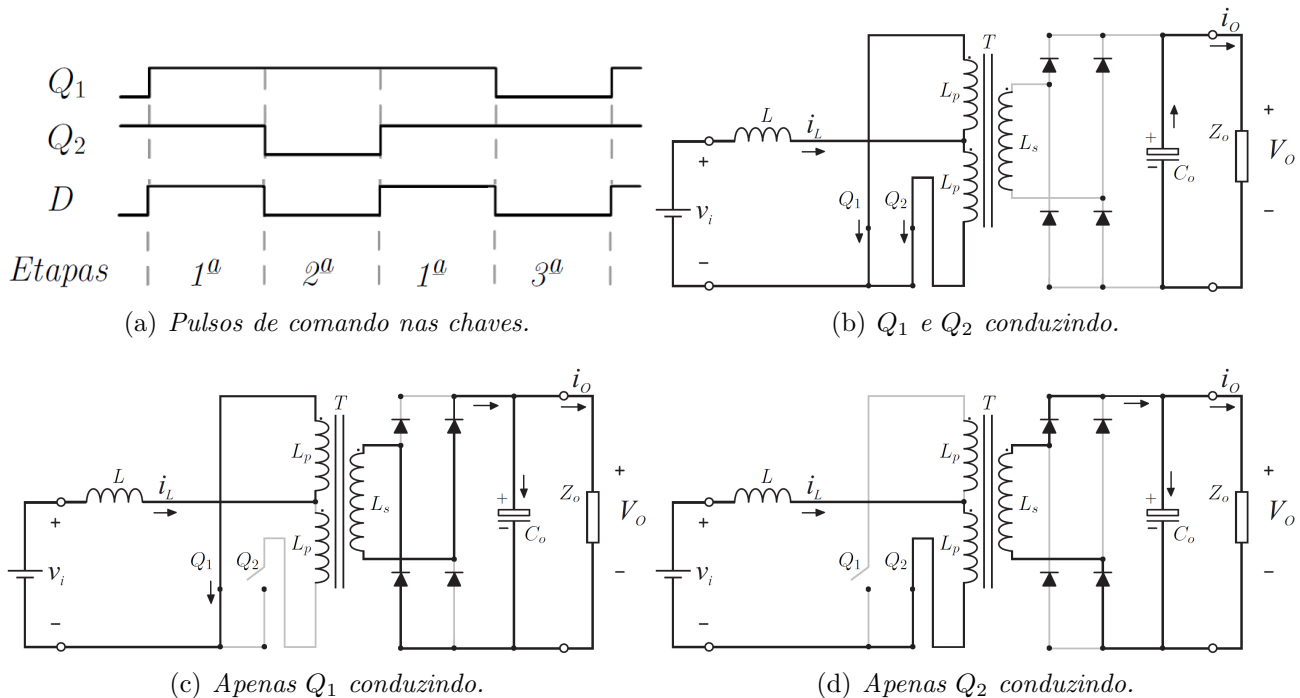


Fig. 3.9: Etapas de funcionamento do conversor push-pull.

Nota-se que diferente do conversor boost, o push-pull tem o ciclo de trabalho resultante  $D$  dado pela combinação dos pulsos de comando de cada uma das chaves (Figura 3.9(a)).



Logo, a frequência do pulso PWM  $D$  é o dobro da apresentada por cada uma das chaves individualmente. O ciclo de trabalho  $D$  pode ser dado por:

$$D = 2q - 1 \quad (3.5)$$

onde  $q$  é o ciclo de trabalho de uma chave. Ressaltando que para a operação correta deste conversor ambas as chaves não devem estar abertas ao mesmo tempo ( $0,5 < q < 1$ ).

De acordo com (Hartmann [7]), o ganho do conversor push-pull é dado por:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{n(1 - D)} \quad (3.6)$$

onde  $n = N_p/N_s$  é a relação de espiras do transformador, sendo  $N_p$  o número de espiras do primário e  $N_s$  do secundário.

### 3.2.2 Conexão Gerador/Push-Pull

Da mesma forma que foi projetado para o boost, será apresentando procedimento análogo para o push-pull.

#### Projeto do Conversor Push-Pull

Com o painel operando na sua região de máxima potência (Tabela 3.1), foram estabelecidos os seguintes requisitos:

- frequência de chaveamento de  $f = 50kHz$  para cada chave (resultando em uma frequência do pulso de PWM (D) de 100kHz);
- tensão média de saída  $V_o = 400V$ ;
- relação de espiras  $N_p/N_s = 1/4$ ;
- ondulação da corrente de entrada  $\Delta I_L = 5\%I_L$ ;
- ondulação da tensão de saída  $\Delta V_C = 5\%V_o$ .

Os valores de  $L$  e  $C_o$  são dados por [7]:

$$\Delta I_L = \frac{V_i T_q}{2L} \left( 1 - \frac{V_i}{nV_o} \right) \quad (3.7)$$

$$\Delta V_C = \frac{I_o T_q}{2C_o} \left( 1 - \frac{V_i}{nV_o} \right) \quad (3.8)$$

logo,  $L = 246,46\mu H$  e  $C_o = 475,5nF$ .

Da mesma forma que foi feito para o conversor boost, foi realizada uma simulação do push-pull projetado utilizando uma fonte de tensão independente como gerador. A Figura 3.10 mostra as curvas de tensão, corrente e potência no tempo para o conversor projetado.

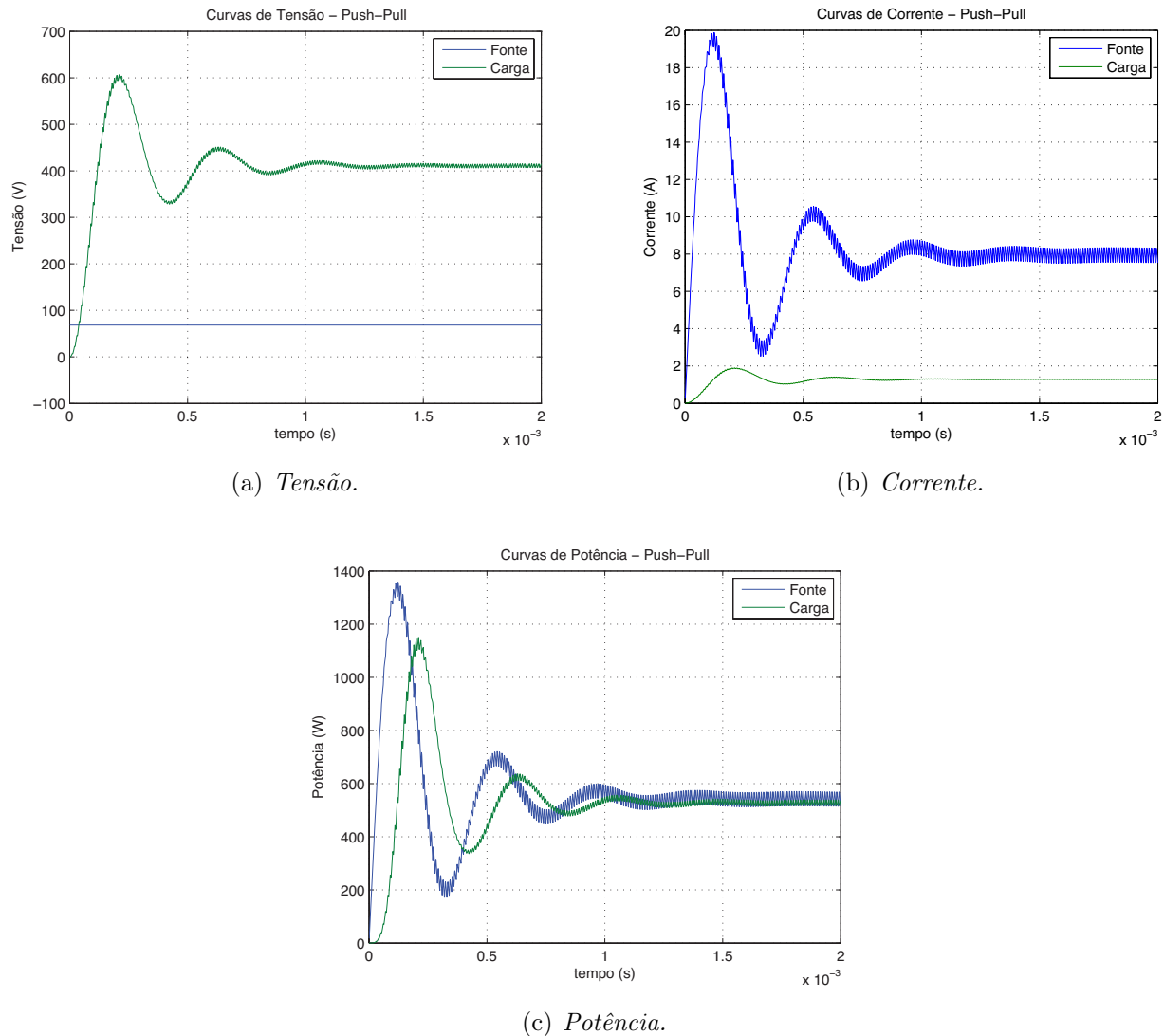


Fig. 3.10: Simulação do conversor push-pull projetado.

### Simulação do Gerador/Push-Pull

Com base no projeto realizado, é feita a simulação do painel fotovoltaico conectado ao conversor. Neste caso o algoritmo de MPPT da Figura 3.6 é também utilizado como lógica de PWM deste conversor.

Na Figura 3.11 tem-se o esquema elétrico final do estágio de elevação da tensão do painel.

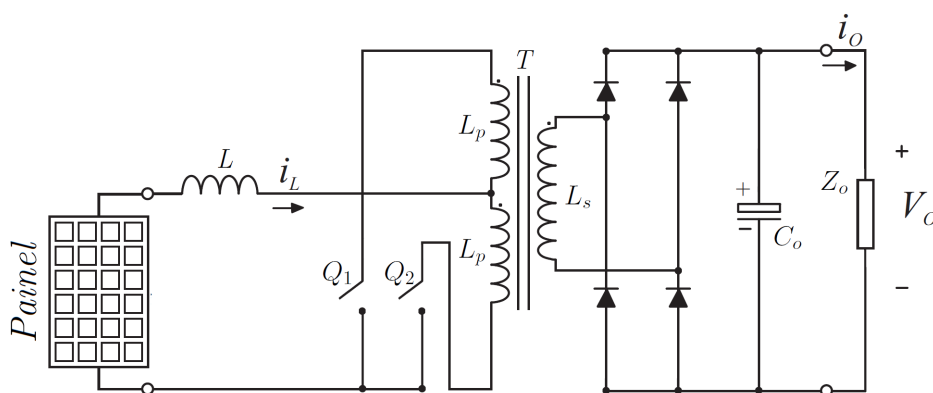


Fig. 3.11: Diagrama esquemático da montagem Gerador/ Push-Pull.

A Tabela 3.3 e Figura 3.12 mostram os resultados da simulação do sistema Gerador/ Push-Pull.

$G = 1000W/m^2$ $T = 25C$	projeto	simulação
$\Delta I_L$	$5\%I_L$	$6,72\%I_L$
$\Delta V_C$	$5\%V_o$	$6,51\%V_o$

Tab. 3.3: Ondulação da corrente de entrada e tensão de saída do push-pull.

### Resposta dinâmica do MPPT aplicado ao conversor

De maneira análoga a realizada na seção 2.3.3, o algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT-INC) é posto à prova para o caso do conversor conectado ao gerador fotovoltaico.

Com o objetivo de verificar a eficácia, e a eficiência do algoritmo são estudadas duas situações distintas: variação do nível de insolação e variação da carga conectada ao conversor.

As figuras 3.13(a) e 3.13(b) mostram os resultados obtidos para tais situações.

Pode-se observar que o algoritmo de condutância incremental apresentou resultados satisfatórios. No caso da variação da insolação percebe-se que em menos de 0,3ms o conversor encontra o MPP do painel, e no caso da variação de carga, observa-se que o painel mesmo sob o efeito de inserção de cargas se mantém fornecendo potência máxima.

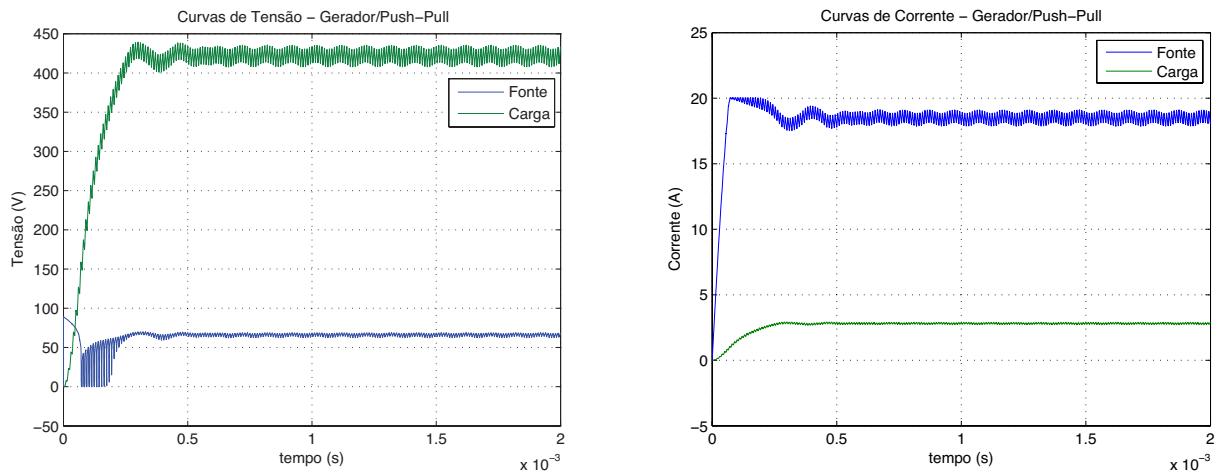
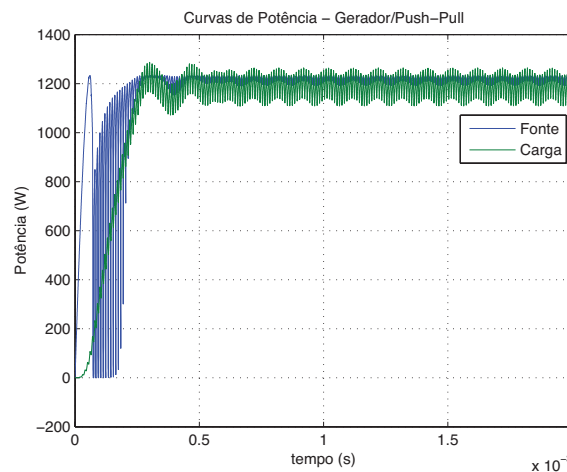
(a) *Tensão.*(b) *Corrente.*(c) *Potência.*

Fig. 3.12: Simulação do sistema Gerador/Push-Pull.

### Considerações quanto a eficiência do push-pull

No tocante à eficiência do Push-Pull observa-se que este apresenta um rendimento menor do que o apresentado pelo conversor boost. De acordo com as simulações realizadas o push-pull apresentou um rendimento médio de 97,05% enquanto que o boost obteve 98,99%. Porém o uso do conversor boost não é adequado pelas razões já apresentadas no início desta seção, além deste ter um ganho real baixo. Na literatura é possível encontrar soluções utilizando boosts em paralelo.

Além da saturação do núcleo já mencionada, outro ponto que contribui para o aumento das perdas no push-pull é a elevação da tensão de saída. Isto acontece devido aos circuitos de

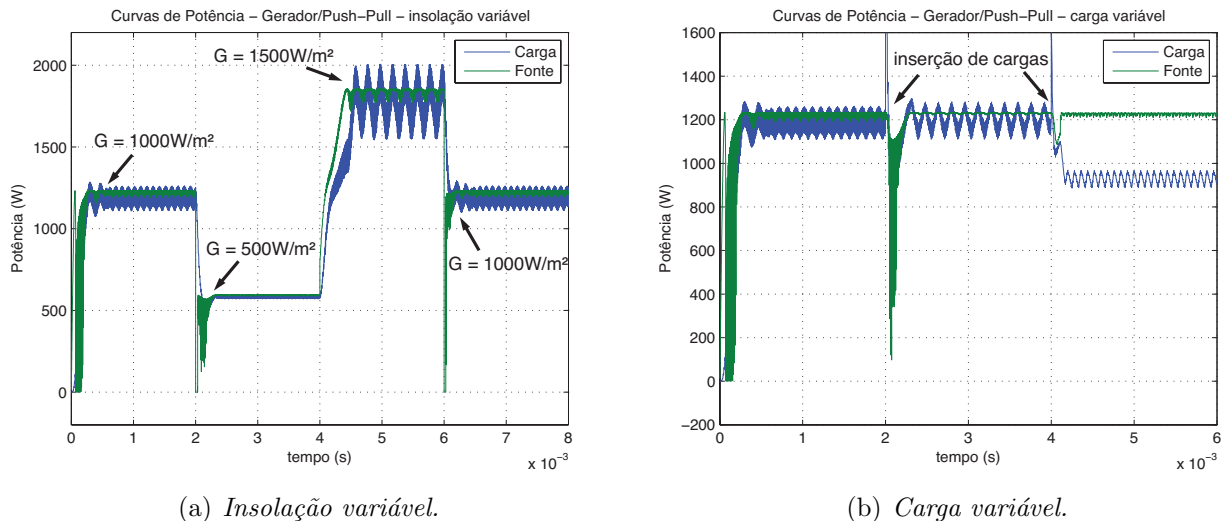


Fig. 3.13: Resposta dinâmica do algoritmo de MPPT aplicado ao push-pull.

amortecimento (*snubbers*) utilizados nas chaves e diodos, estes são responsáveis por proteger tais dispositivos contra picos de sobretensão no momento do chaveamento. Este circuito é composto por um resistor e um capacitor em paralelo com o dispositivo a ser protegido (Figura 3.14).

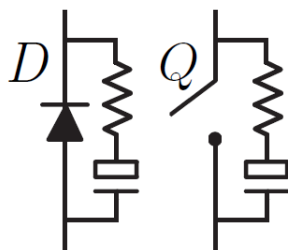


Fig. 3.14: Diagrama esquemático do circuito de amortecimento das chaves e diodos.

Quando as chaves e os diodos são bloqueados, o capacitor é carregado através da resistência em série. Os capacitores dos diodos se carregam com a tensão de saída  $V_o$ , enquanto que os capacitores das chaves se carregam com o reflexo desta no primário  $2nV_o$ . Durante a condução destes a energia dos capacitores é descarregada sobre a resistência através das chaves ou diodos. Então, quanto maior for a tensão de saída, maior será a energia acumulada nos capacitores dos *snubbers*, levando a maiores perdas por chaveamento.

Tal situação é facilmente observada na Figura 3.13(a). Quando  $G = 500\text{W}/\text{m}^2$  a tensão de saída é mais baixa (300V) e o conversor apresenta um rendimento médio de 99,58%. Da mesma forma quando  $G = 1500\text{W}/\text{m}^2$  acarreta em uma tensão de saída mais elevada (500V), levando

a um rendimento médio de 96,24%. Algumas técnicas de otimização do conversor push-pull são vistas em [7] e [8].

## Inversor de Frequência

Uma vez que a tensão no barramento CC foi elevada e o gerador encontra-se operando em seu MPP, é necessário fazer a conversão CC-CA de maneira que possibilite o conversor alimentar uma carga em corrente alternada. Tal conversão é feita por um inversor de frequência, ou simplesmente inversor. Nesta seção será abordado o uso do inversor monofásico para alimentação de uma carga isolada.

### 3.3 Inversor Monofásico

Os inversores convertem uma tensão de entrada CC em uma tensão de saída CA simétrica com amplitude e frequência desejadas. A tensão de saída pode ser fixa ou variável em uma frequência também fixa ou variável. Para este trabalho deseja-se obter uma tensão de saída senoidal (220V rms) com frequência fixa (60Hz).

Para o caso estudado cuja a tensão de entrada é fixa, (painel como uma fonte chaveada) o ganho do inversor é variado utilizando um controle de modulação por largura de pulso (PWM) dentro do inversor.

A forma de onda da tensão de saída do inversor nem sempre é senoidal, contendo uma série de componentes harmônicas. Existem, na literatura, várias técnicas/configurações de chaveamento para a redução destas componentes. Contudo, nesta aplicação, a redução de componentes harmônicas será realizada por meio de filtros passivos.

#### 3.3.1 Princípio de Funcionamento

Como segundo estágio do conversor escolheu-se o inversor monofásico em ponte completa. Na Figura 3.15 tem-se o diagrama esquemático da configuração básica deste inversor.

Este inversor possui quatro chaves que realizam as operações de condução e bloqueio aos pares. Quando  $Q_1$  e  $Q_4$  conduzem, a tensão de entrada  $v_s$  é aplicada diretamente à carga, enquanto  $Q_2$  e  $Q_3$  conduzem, a tensão aplicada sobre a carga é invertida,  $-v_s$ . Para uma carga puramente resistiva o mesmo acontece com a corrente terminal.

Quando a carga é indutiva, no momento de comutação das chaves (abertura de  $Q_1$  e  $Q_4$ , por exemplo) a circulação de corrente não é bloqueada instantaneamente, logo, a corrente reativa

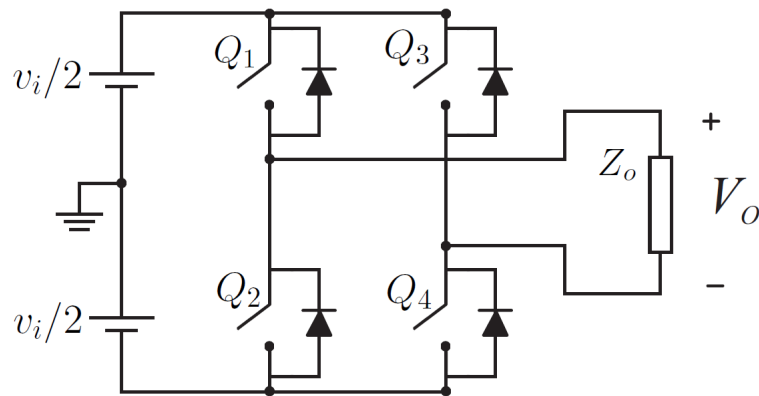


Fig. 3.15: Diagrama esquemático do inversor em ponte completa.

da carga é obrigada a circular através dos diodos (diodos de *roda-livre*, ou de *realimentação*) das chaves  $Q_2$  e  $Q_3$  e da fonte. Esta fase é chamada de *recuperação*, pois a energia é devolvida para a fonte. A condução dos diodos se encerra quando a corrente de carga se anula.

A tensão eficaz de saída para este inversor é dada pela equação (3.9).

$$V_o = \sqrt{\frac{4}{T} \int_0^T v_s^2 dt} = v_s \quad (3.9)$$

Observa-se que a tensão reversa máxima em cada chave é a mesma para inversores meia-ponte e ponte completa. A escolha do inversor em ponte completa, no lugar do inversor em meia-ponte, foi devido ao fato de que os em ponte completa apresentam a componente fundamental de tensão duas vezes maior que a do inversor em meia-ponte, além de uma potência de saída quatro vezes maior.

### 3.3.2 Projeto do Inversor

Nesta seção será abordado o projeto do inversor que será conectado ao conversor elevador, bem como o controle de tensão e filtragem.

#### Modulação por Largura de Pulsos

O controle de tensão de saída de inversores é fundamental para manutenção da tensão e frequência constantes na carga. Os métodos mais eficientes para isso empregam a modulação por largura de pulso (PWM). Dessa forma o método para o controle do nível de tensão é empregado utilizando Modulação por Largura de Pulsos Senoidal (PWM senoidal).

Neste método a largura de cada pulso é variada segundo a amplitude de uma onda senoidal. Os sinais de comando são gerados comparando a onda senoidal (modulante/referência) com a

uma onda triangular (portadora). A frequência da modulante determina a frequência de saída do inversor, e a sua amplitude controla a tensão eficaz de saída através do índice de modulação  $m_a$ . Os sinais de referência, portadora e comando encontram-se na Figura 3.16.

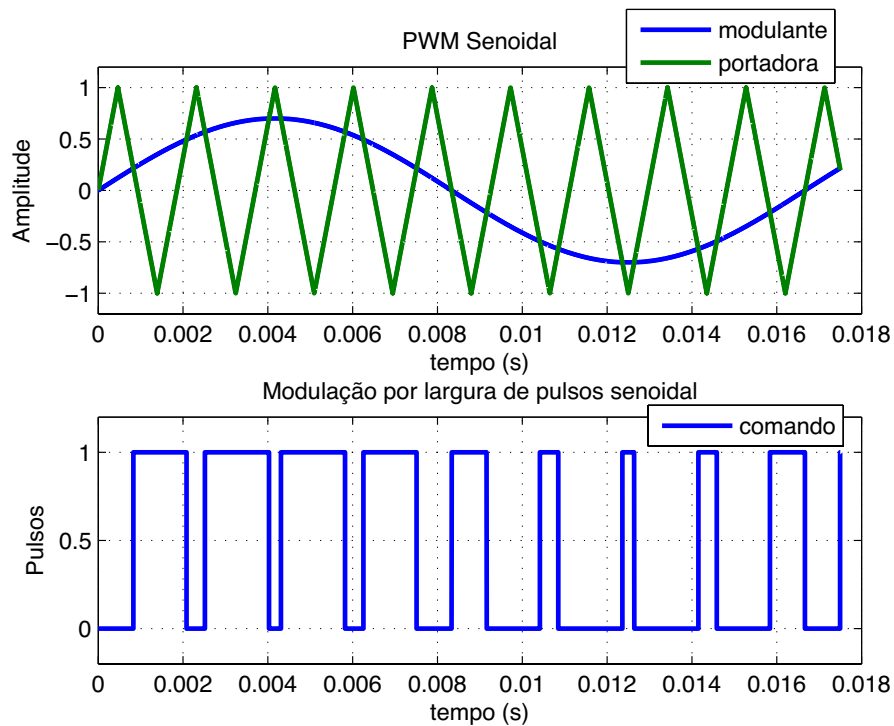


Fig. 3.16: Modulação por Largura de Pulsos Senoidal.

O índice de modulação e a razão da frequência de modulação são dados pelas equações (3.10) e (3.11) respectivamente.

$$m_a = \frac{A_r}{A_c} \quad (3.10)$$

$$m_f = \frac{f_c}{f_r} \quad (3.11)$$

onde  $A_r$  e  $f_r$  são a amplitude máxima e frequência do sinal referência,  $A_c$  e  $f_c$  correspondem às grandezas da portadora.

Esta técnica produz harmônicos de alta frequência em torno da frequência de chaveamento e seus múltiplos. De qualquer maneira os harmônicos de ordem mais alta podem ser filtrados facilmente.

A amplitude da componente fundamental é dada por:



$$V_{o1} = m_a(v_s) \quad (3.12)$$

nota-se que o PWM senoidal produz uma relação linear entre tensão de entrada e a amplitude da componente fundamental.

### Requisitos

O inversor projetado visa alimentar uma carga CA de aproximadamente 1kW, com tensão de saída eficaz 220V e frequência fixa de 60Hz. A frequência da portadora que implementa o PWM senoidal é de 10kHz. O projeto deste inversor é baseado nos limites de harmônicos de corrente para sistemas de geração distribuída definidos em [*Standart for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems* 2003] com base em [*Recommended Pratices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems* 1992]. A Tabela 3.4 traz os limites de harmônicos de corrente injetados na rede por sistemas de geração conectados à rede.

Ordem	$h < 11$	$11 < h < 17$	$17 < h < 23$	$23 < h < 35$	$h > 35$	Total
Magnitude	4%	2%	1.5%	0.6%	0.3%	5%

Tab. 3.4: Limites de harmônicas injetadas na rede em aplicações de geração distribuída (para tensões de 120V a 69kV).

Como a frequência da portadora 10kHz, e a da rede 60Hz, tem-se  $h = 167$ , logo, o Fator de Distorção Harmônico Individual (FH) da corrente na carga deve ser de 0,3% e a Distorção Harmônica Total (THD) 5%.

O FH mede a contribuição individual dos harmônicos de um sinal, e é dado segundo:

$$FH_n = \frac{V_n}{V_1} \quad (3.13)$$

onde  $V_1$  é o valor RMS da componente fundamental e  $V_n$  o valor RMS da n-ésima harmônica do sinal.

O THD é a medida do quão próxima é a forma de onda de sua componente fundamental, e é definida como:

$$THD = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=2,3,\dots} V_n^2} \quad (3.14)$$

### Simulação do Inversor Projetado

Com base nos requisitos estabelecidos na seção anterior realizou-se a simulação do inversor da Figura 3.15 conectado a uma carga RL. Nas figuras 3.17(a) e 3.17(c) tem-se a tensão e a corrente de saída e as suas respectivas componentes fundamentais no domínio do tempo, enquanto que nas figuras 3.17(b) e 3.17(d), os espectros de frequência das componentes harmônicas das grandezas mencionadas.

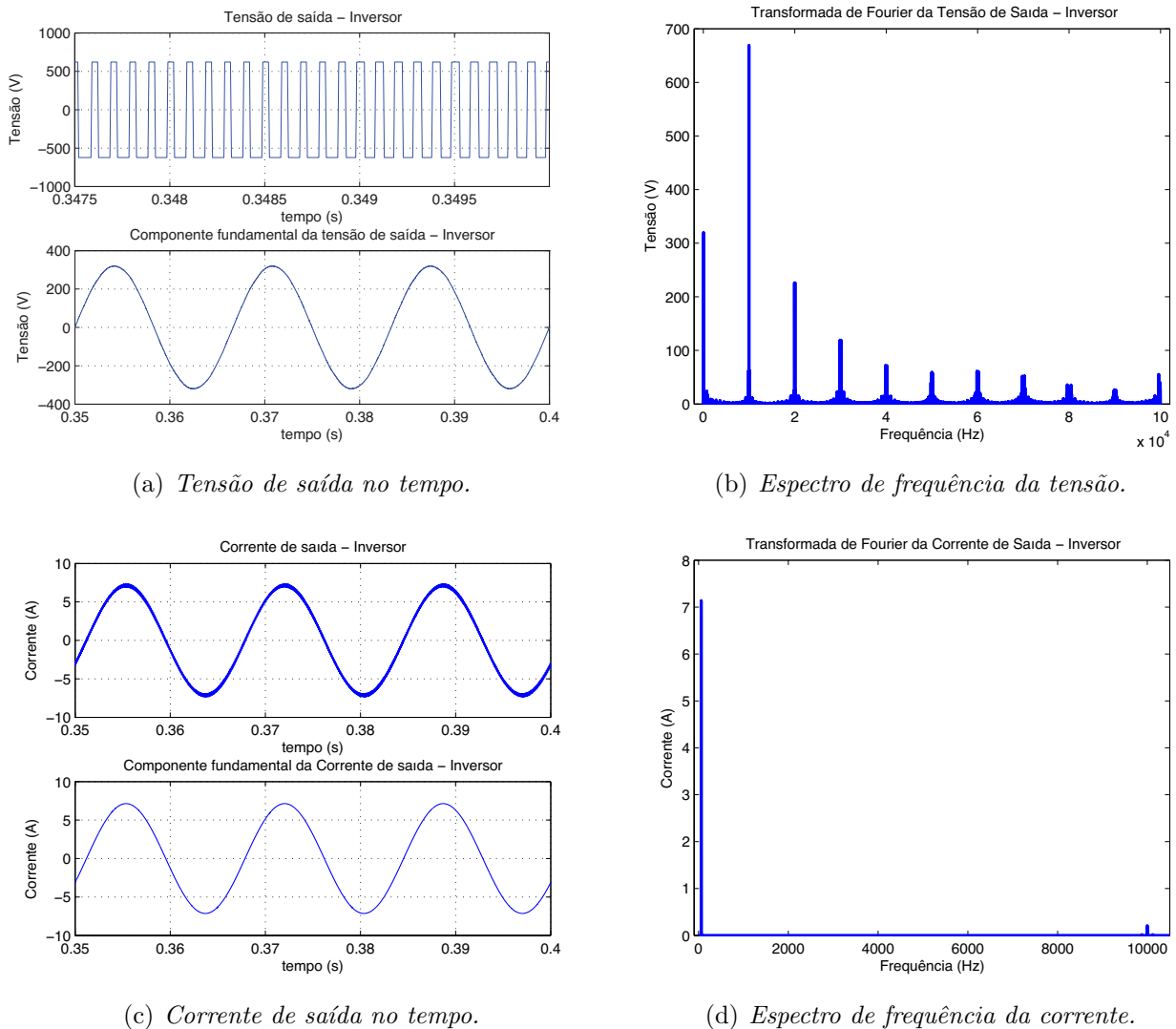


Fig. 3.17: Tensão e Corrente de saída do inversor projetado.

Observa-se que a tensão de saída possui uma forma quadrada, levando o inversor a não atender todos os requisitos estabelecidos anteriormente. No entanto a Figura 3.17(a) mostra que a componente fundamental da tensão apresenta um valor eficaz de 220V a uma frequência

de 60Hz. A Figura 3.17(b) confirma o que foi discutido quanto à aplicação do PWM senoidal, mostrando que as componentes de alta frequência surgem como múltiplas da frequência de comutação. Além disso este inversor apresentou em sua corrente de carga um THD de 3,1%, concentrada principalmente na componente de 10kHz ( $h = 167$ ), com uma distorção individual de 2,98% da fundamental. Embora o THD esteja em conformidade com o critério estabelecido, a componente de 10kHz ultrapassa o limite estabelecido da Tabela 3.4, para que este inversor atenda a todos os requisitos estabelecidos, é necessário que haja um estágio de filtragem das componentes harmônicas.

### Filtro LC

Para atenuar as componentes harmônicas é necessário adicionar um filtro no estágio de saída do inversor, no caso deste inversor será utilizado um filtro passa-baixa, uma vez que este deve reter as altas frequências, permitindo que apenas as baixas frequências “passem”. Existem na literatura de Teoria de Circuitos Elétricos várias configurações destes filtros, o filtro-RC e o filtro-LR são os exemplos mais conhecidos.

No projeto de circuitos inversores, os circuitos comumente utilizados para a redução de harmônicos são [1]: o filtro-C, o filtro-CL ou o filtro-CLC.

A escolha do filtro é baseada no compromisso entre o custo e tamanho dos componentes e a atenuação de harmônicos. O filtro utilizado será o filtro-LC apresentado na saída do inversor da Figura 3.18.

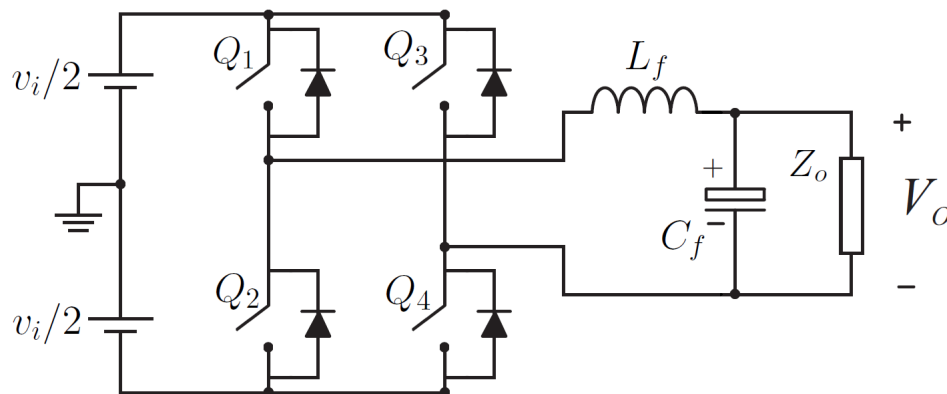


Fig. 3.18: Diagrama esquemático do inversor em ponte completa com filtro LC.

Para o projeto do filtro deve-se considerar a resposta em frequência do mesmo segundo a função de transferência da tensão de saída do inversor para a tensão sobre a carga.

$$H(\omega) = \frac{1}{1 - \omega^2 L_f C_f} \quad (3.15)$$

Recomenda-se [9] que a frequência de ressonância,  $\omega_{res}$  esteja dentro do intervalo de frequências dado por

$$10\omega_r \leq \omega_{res} \leq 0,5\omega_c \quad (3.16)$$

Estando  $\omega_{res}$  neste intervalo dificulta a excitação dos modos oscilatórios do filtro pela interação com os harmônicos de alta frequência gerados pelo inversor ou com os harmônicos de baixa ordem possivelmente presentes na rede. Além disso, o fator de atenuação do filtro nas altas frequências é muito mais forte.

Sabendo que para o filtro-LC  $\omega_{res}$  é dado por

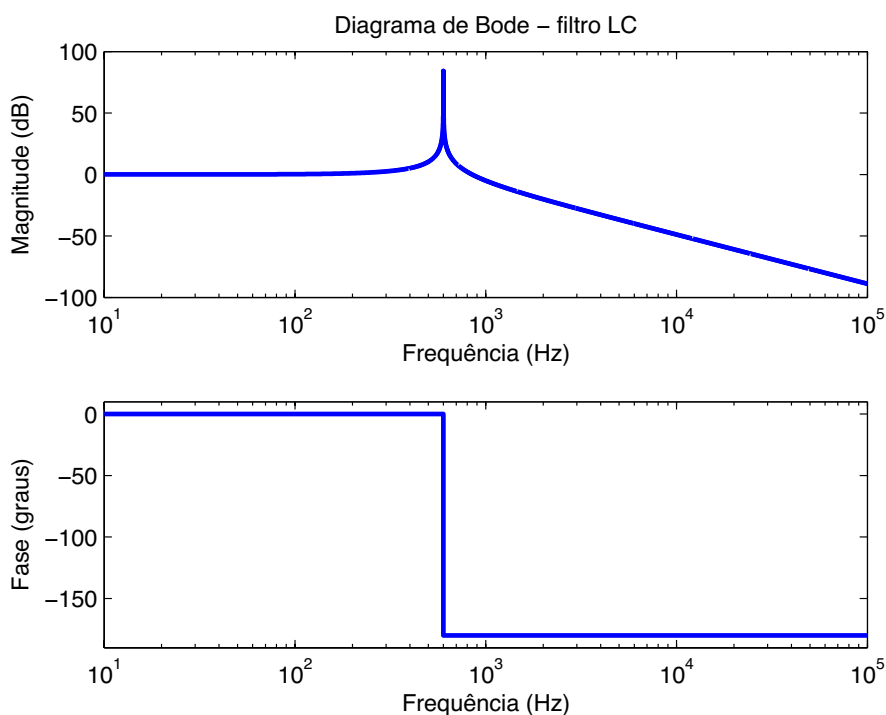
$$\omega_{res} = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}} \quad (3.17)$$

segundo a equação (3.16), sabe-se que (fazendo a conversão de rad/s para Hertz)  $600Hz \leq f_{res} \leq 5kHz$ . Logo, com o objetivo de trazer o pico de ressonância o mais próximo possível de  $f_r$ , determinou-se que  $f_{res} = 600Hz$ . Fazendo  $L_f = C_f$ , obtém-se  $L_f = 265,26\mu H$  e  $C_f = 265,26\mu F$ .

A resposta em frequência do filtro projetado é dada na Figura 3.19. No diagrama de Bode nota-se que o filtro-LC apresenta uma ressonância indesejável, mesmo assim a atenuação em altas frequências é bem maior. Antes do pico de ressonância, a tensão de saída do inversor praticamente não sofre atenuação, no entanto, após a atenuação do filtro passa para 40dB por década.

A fim de verificar a eficácia do filtro projetado, realizou-se a simulação do inversor com o filtro-LC, circuito da Figura 3.18. A Figura 3.20 mostra a tensão sobre a carga, bem como o seu espectro de frequência.

Como se pode observar, o filtro projetado eliminou quase todas as componentes harmônicas de tensão que ocorriam antes da implementação do filtro. No gráfico da Figura 3.20(b) não está claro, mas através dos dados da simulação é possível verificar que existem mais duas componentes harmônicas em 600 e 10000Hz. A corrente na carga apresentou um THD de 0,099%, sendo a componente de 600Hz ( $h = 10$ ) a mais significativa com 0,092% (ver Tabela 3.4) de magnitude. É importante ressaltar que a componente de 600Hz surge devido ao pico de ressonância do filtro (Figura 3.19), mas mesmo assim o inversor projetado atende aos requisitos de projeto, tornando-o adequado à aplicação de geração distribuída de energia.



*Fig. 3.19: Diagrama de Bode para o filtro LC.*

### 3.3.3 Conexão Gerador/Conversor CC-CA/Carga Isolada

Uma vez que o conversor CC-CA foi totalmente projetado, é preciso realizar a simulação do gerador fotovoltaico alimentando uma carga isolada através deste conversor. O diagrama esquemático da Figura 3.21 representa o circuito que será posto a prova.

A simulação realizada no PSIM apresentou os resultados explicitados na Figura 3.22.

A carga conectada na saída do conversor foi dimensionada segundo uma potência ativa de 1kW, a uma tensão eficaz de 220V e fator de potência atrasado (carga indutiva  $R_o = 39, 2\Omega$  e  $L_o = 50, 4mH$ ). A Figura 3.23 apresenta a potência gerada pela matriz fotovoltaica e a potência ativa absorvida pela carga.

Com base nos resultados apresentados percebe-se que o conversor apresentou resultados satisfatórios, uma vez que todos os critérios estabelecidos foram cumpridos. Através do correto ajuste do índice de modulação foi possível manter a tensão de saída com 220V RMS. O espectro em frequência mostra que quase não se percebe a presença de componentes harmônicas nos sinais de interesse. A corrente de saída obteve um THD de 0,8%, sendo a componente de 180Hz ( $h = 3$ ) a mais significativa, com magnitude de 0,25%, a harmônica da frequência de chaveamento do inversor (10kHz,  $h = 167$ ) apresentou uma magnitude de 0,016% da fundamental.

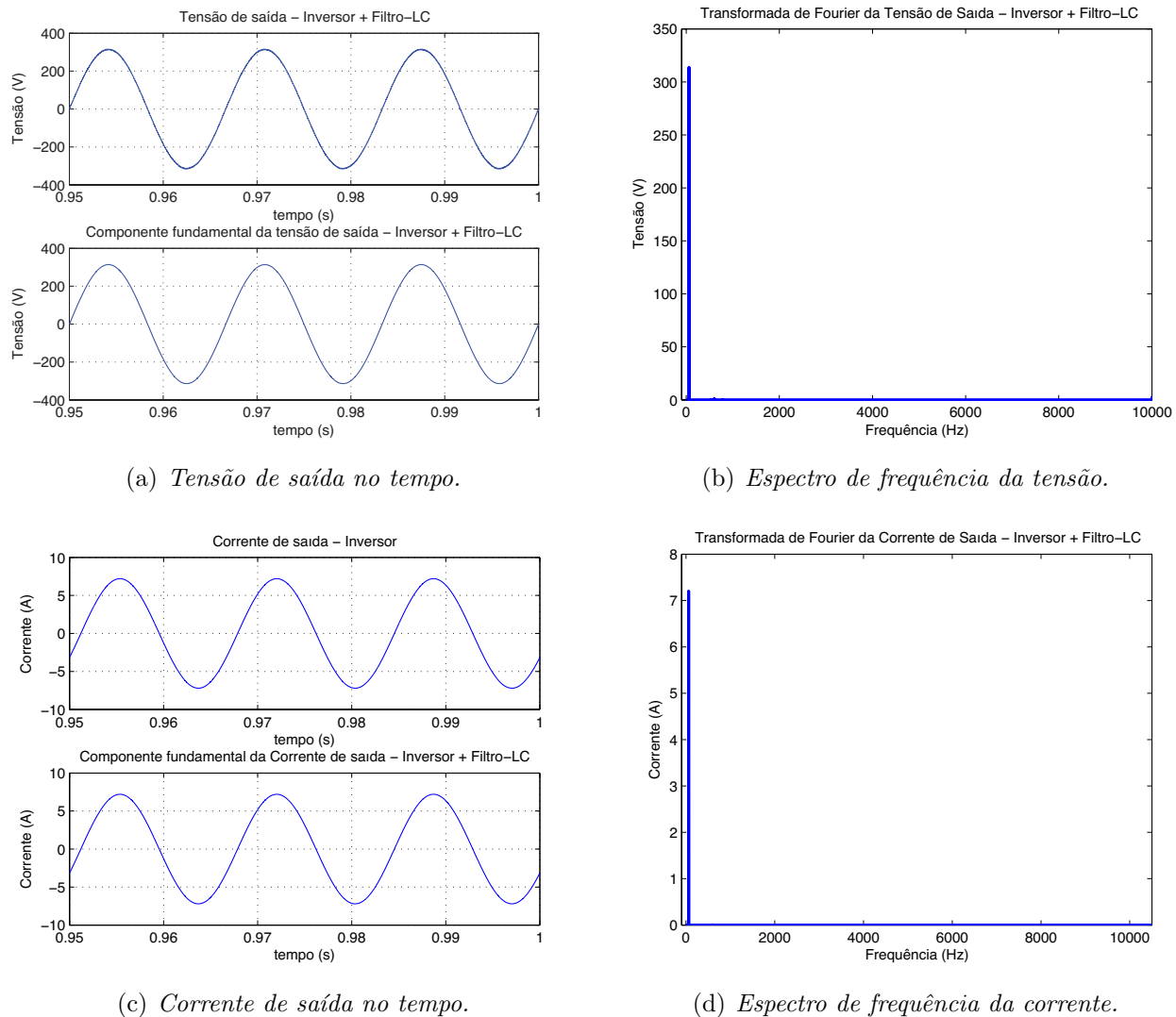


Fig. 3.20: Tensão e Corrente de saída do inversor com o filtro projetado.

Este trabalho propôs um método eficaz de projeto e implementação de um sistema SIGFI, permitindo assim o fornecimento de energia elétrica a consumidores residenciais isoladas (autônomas). Um segundo passo seria a adaptação deste sistema a conexão direta com a rede elétrica, ou seja, a um barramento monofásico de 220V RMS. Tal implementação é objetivo para os trabalhos futuros que se pretende realizar.

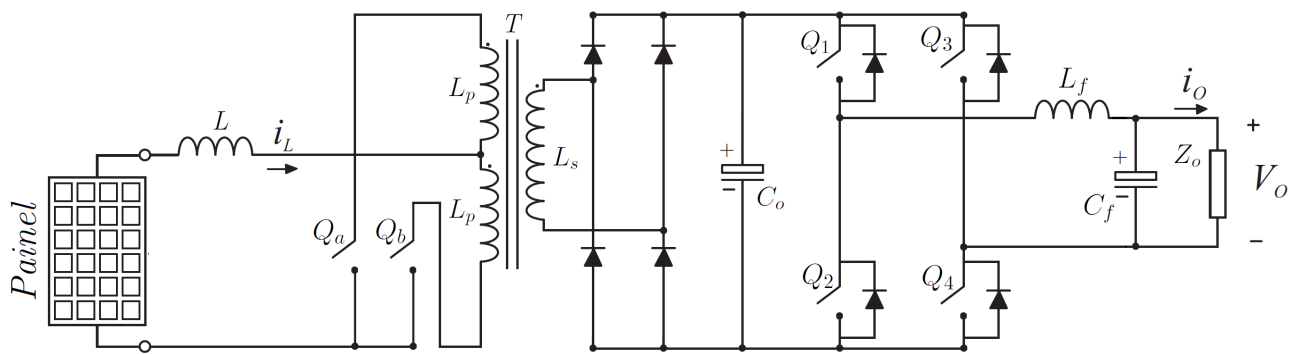
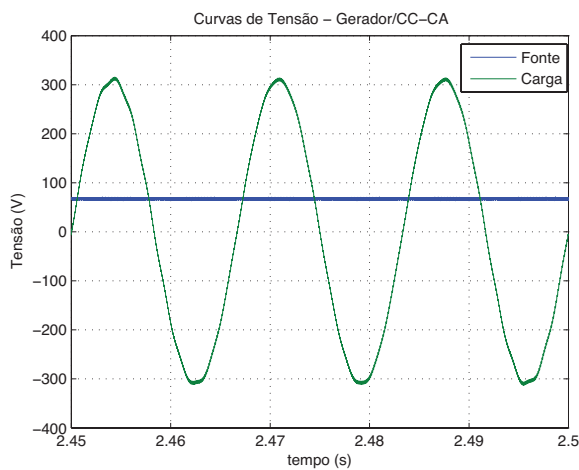
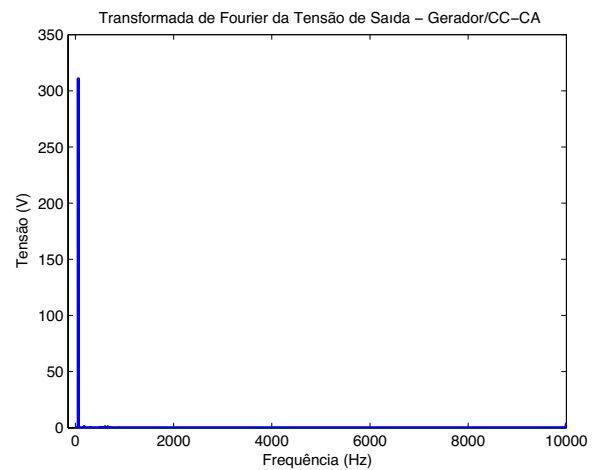


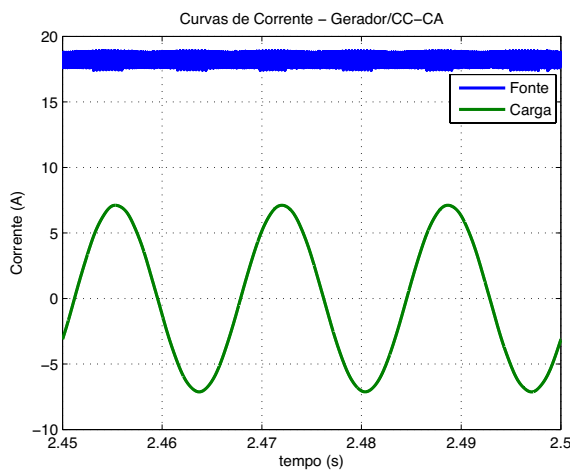
Fig. 3.21: Diagrama esquemático da montagem Gerador/Conversor CC-CA/Carga Isolada.



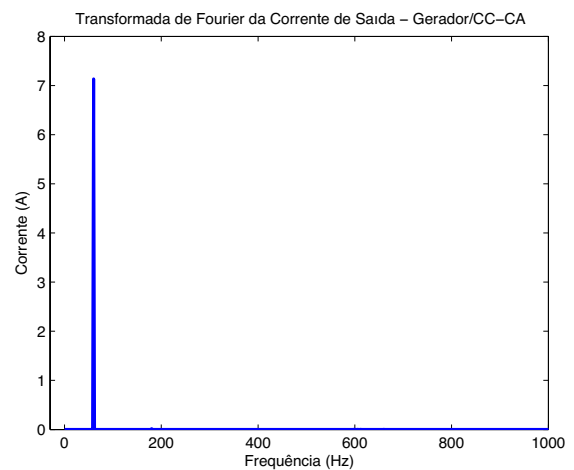
(a) Curvas de tensão no tempo.



(b) Espectro de frequência da tensão de saída.



(c) Curvas de corrente no tempo.



(d) Espectro de frequência da corrente de saída.

Fig. 3.22: Curvas de tensão e corrente do Sistema Gerador/Conversor/Carga RL.

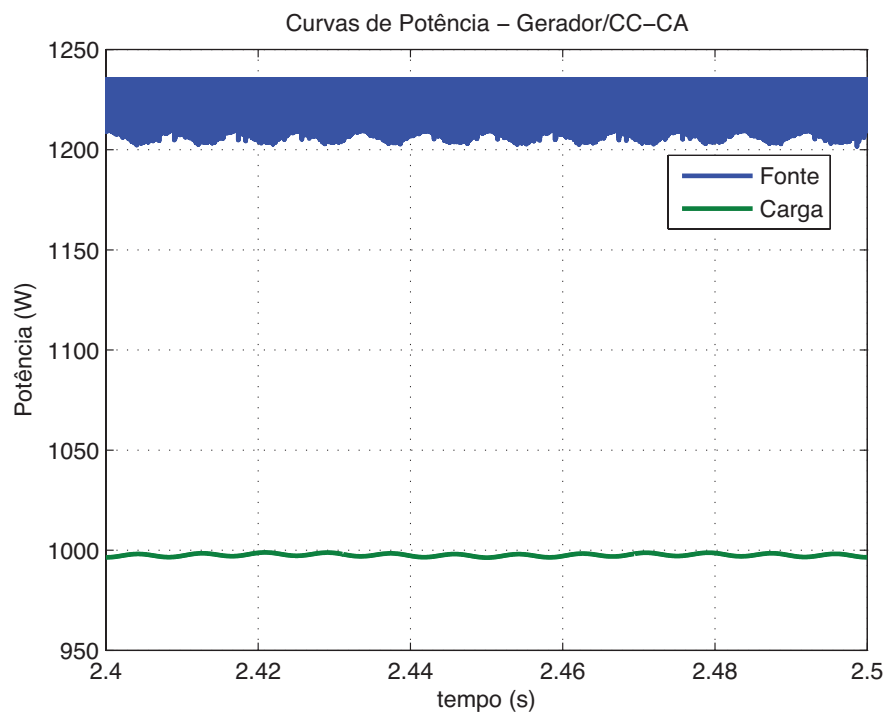


Fig. 3.23: Curvas de potência do Sistema Gerador/Conversor/Carga RL.



# Capítulo 4

## Considerações Finais

Como foi visto no decorrer do trabalho, o método de rastreamento do ponto de máxima potência implementado no conversor elevador é eficaz, sobretudo eficiente, uma vez que o algoritmo converge rapidamente para o MPP mesmo quando há uma variação de temperatura, insolação ou carga.

O conversor projetado atendeu a todos os requisitos estabelecidos quanto ao ganho desejado, ondulação de tensão e corrente, eficiência, isolamento, conteúdo harmônico, etc.

Durante o desenvolvimento deste trabalho foi possível observar que em vários momentos fez-se necessário lançar mão de conhecimentos adquiridos em algumas disciplinas da grade curricular do curso de Engenharia Elétrica desta instituição. Alguns dos conhecimentos mais básicos que pode-se citar seria a aplicação da primeira derivada nula para encontrar o ponto máximo de uma função, visto na disciplina de Cálculo Diferencial Integral I, para encontrar o MPP do painel solar, as disciplinas de programação e métodos numéricos que serviram de base para elaboração via software do modelo do painel, do algoritmo de MPPT e simulação numérica (computacional).

Disciplinas como Circuitos Elétricos, Eletrônica e Eletrônica do Potência foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Todo o dimensionamento de componentes, circuitos de comando e comparação, projeto de filtro, comportamento dos dispositivos chaveadores e funcionamento dos conversores tiveram como base estas disciplinas. Vale a pena salientar que em alguns momentos foi necessário buscar conhecimentos que estavam além do escopo da graduação, levando o aluno estudar e pesquisar outras alternativas, e desenvolvendo suas próprias soluções, baseando-se na literatura científica.

Este trabalho mostra que, com os conhecimentos adquiridos no curso de graduação em Engenharia Elétrica desta instituição, foi possível desenvolver uma solução para um problema real de engenharia, mostrando a viabilidade do projeto de um sistema autônomo de geração

de energia elétrica em pequena escala, destinado a consumidores que se encontram em regiões isoladas, onde a infra-estrutura de uma rede de distribuição de energia elétrica não está acessível.

## 4.1 Trabalhos Futuros

Como produções futuras tem-se em vista realizar os seguintes trabalhos:

- Implementar o sistema proposto experimentalmente;
- Fazer o estudo do tempo de resposta do painel, uma vez que neste estudo o painel é implementado via software apresentando resposta imediata a estímulos do MPPT;
- Implementar uma malha de controle para o nível de tensão na carga;
- Utilizar o sistema desenvolvido ou estudar modificações para a conexão com a rede elétrica;
- Desenvolver um sistema híbrido no qual seja possível operar em modo autônomo, operar em conexão com o grid e os dois modos simultaneamente;
- Utilizando um sistema híbrido, desenvolver um dispositivo que contabilize o quanto de energia está sendo disponibilizada à rede elétrica, para fins de abono na tarifação do cliente;
- Estudar possibilidades de melhoramento no projeto do conversor push-pull quanto a perdas por saturação do núcleo, perdas nas chaves, etc.

# Apêndice A

## Código Fonte C++ da Classe PvPanel.h

### PvPanel.h

```
#ifndef PVPANEL_H_
#define PVPANEL_H_

#include <iostream>
#include <cmath>
#include <vector>

using namespace std;

#define CELSIUS +273.16           // conversão Celsius/Kelvin

class PvPanel
{

private:
    static const double K;       // constante de Boltzman
    static const double q;       // carga do elétron
    static const double Tref;    // temperatura de referência
    static const double Gref;    // reference insolation level
    static const double ee;      // banda de energia proibida do silício a 300K
    static double Vtref;         // tensão térmica de referência
```

```
private:
    double m;           // fator de idealidade do diodo
    double T;           // temperatura
    double Ioref;       // corrente de saturação do diodo de referência
    double Io;          // corrente de saturação do diodo
    double G;           // nível de insolação
    double Vt;          // tensão térmica
    double Rsh;         // resistor shunt
    double Rs;          // resistor serie
    double Iphref;      // fonte de corrente de referência
    double Iph;         // fonte de corrente
    int Ns;             // número de células em série
    int Nsh;            // número de células em paralelo
    double Rout;       // resistência de saída

public:
    vector<double> I;   // vetor corrente
    vector<double> V;   // vetor tensão
    vector<double> P;   // vetor potência
    vector<double> R;   // vetor resistência

private:
    double Isc;         // corrente de curto-circuito
    double Voc;         // tensão de circuito aberto
    double Pmax;        // potência máxima
    double Impp;        // corrente de máxima potência
    double Vmpp;        // tensão de máxima potência
    double Rmpp;        // resistência de máxima potência

public:
    PvPanel();
    virtual ~PvPanel();

public:
    /***** métodos SET *****/
    void setm(double m_){ this->m = m_; update_panel(); }
    void setT(double T_){ this->T = T_; update_panel();}
```

```
void setIoref(double Ioref_){ this->Ioref = Ioref_; update_panel(); }
void setG(double G_){ this->G = G_; update_panel();}
void setRsh(double Rsh_){ this->Rsh = Rsh_; }
void setRs(double Rs_){ this->Rs = Rs_; }
void setIphref(double Iphref_){ this->Iphref = Iphref_; update_panel(); }
void setNs(int Ns_){ this->Ns = Ns_; update_panel(); }
void setNsh(int Nsh_){ this->Nsh = Nsh_; update_panel(); }
void setRout(double Rout_){ this->Rout = Rout_; }
void setVmpp(double Vmpp_){ this->Vmpp = Vmpp_; }
void setImpp(double Impp_){ this->Impp = Impp_; }
void setRmpp(double Rmpp_){ this->Rmpp = Rmpp_; }
void setPmax(double Pmax_){ this->Pmax = Pmax_; }

public:
    /***** métodos GET *****/
    double getee(void){ return this->ee; }
    double getq(void){ return this->q; }
    double getm(void){ return this->m; }
    double getT(void){ return this->T; }
    double getTref(void){ return this->Tref; }
    double getIo(void){ return this->Io; }
    double getIoref(void){ return this->Ioref; }
    double getG(void){ return this->G; }
    double getGref(void){ return this->Gref; }
    double getVt(void){ return this->Vt; }
    double getVtref(void){ return this->Vt; }
    double getRsh(void){ return this->Rsh; }
    double getRs(void){ return this->Rs; }
    double getIph(void){ return this->Iph; }
    double getIphref(void){ return this->Iphref; }
    double getVmpp(void){ return this->Vmpp; }
    double getImpp(void){ return this->Impp; }
    double getRmpp(void){ return this->Rmpp; }
    double getPmax(void){ return this->Pmax; }
    double getVoc(void){ return this->Voc; }
    double getIsc(void){return this->Isc; }
    int getNs(void){ return this->Ns; }
    int getNsh(void){ return this->Nsh; }
```

```

double getRout(void){ return this->Rout; }

private:
double f(double vv, double ii){ return ( Nsh*Iph - Nsh*Io*( exp((vv/Ns
+ Rs/Nsh*ii)/m/Vt) - 1 ) - vv/(Ns/Nsh*Rsh) - Rs/Rsh*ii - ii); }
double dfdv(double vv, double ii){ return ( -Nsh*Io/Ns/m/Vt*exp((vv/Ns
+ Rs/Nsh*ii)/m/Vt) - 1/(Ns/Nsh*Rsh) ); }
double dfdi(double vv, double ii){ return ( -Io*Rs/(m*Vt)*exp((vv/Ns
+ Rs/Nsh*ii)/m/Vt) - Rs/Rsh - 1 ); }

public:
void createIvector(double IO, double Iend, int nn);
void createIvector(double IO, double Iend);
void createVvector(double V0, double Vend, int nn);
void createVvector(double V0, double Vend);
void panel_curve_fit_I(int n);
void panel_curve_fit_V(int n);
double solve_V(double ii);
double solve_I(double vv);
void update_panel(void){ cfgVt(); cfgIph(); cfgIsc(); cfgIo(); cfgVoc(); }

private:
/***** configuration methods *****/
void cfgVt(void){ Vt = K*T/q; }
void cfgIph(void){ Iph = Iphref*G/Gref; }
void cfgIsc(void){ Isc = Nsh*Iph; }
void cfgIo(void){ Io = Ioref*pow(T/Tref,3)*exp( ee*q/(m/Ns)*(1/Vtref-1/Vt) ); }
// void cfgVoc(void){ Voc = this->solve_V(0);}
void cfgVoc(void){ Voc = Ns*m*Vt*log(1+Iph/Io); }

};

#endif /* PVPANEL_H_ */

```

## PvPanel.cpp

```
#include "PvPanel.h"

const double PvPanel::K = 1.3854e-23;           // Joule/Kelvin
const double PvPanel::q = 1.602177e-19;       // Coulomb
const double PvPanel::Tref = 25. CELSIUS;     // Kelvin
const double PvPanel::Gref = 1000;            // Watt/m2
const double PvPanel::ee = 1.12;              // eV
        double PvPanel::Vtref = K*Tref/q;     // Volts

PvPanel::PvPanel() //construtor
{
    this->m = 1.66;
    this->T = 25. CELSIUS;
    this->G = 1000;
    this->Rsh = 40.0;
    this->Rs = 0.031;
    this->Iphref = 3.15;
    this->Ioref = 3.17e-6;
    this->Nsh = 1;
    this->Ns = 1;
    this->Pmax = 0;
    this->Impp = 0;
    this->Vmpp = 0;
    cfgVt();
    cfgIph();
    cfgIsc();
    cfgIo();
    cfgVoc();
}

PvPanel::~PvPanel()
{
    // TODO Auto-generated destructor stub
}

void PvPanel::createIvector(double I0, double Iend, int nn)
```

```
{
    for(int i = 0; i < nn; i++)
    {
        this->I.push_back(I0+(i)*(Iend-I0)/(floor(nn)-1));
    }
}

void PvPanel::createIvector(double I0, double Iend)
{
    this->createVvector(I0, Iend, 100);
}

void PvPanel::createVvector(double V0, double Vend, int nn)
{
    for(int i = 0; i < nn; i++)
    {
        this->V.push_back(V0+(i)*(Vend-V0)/(floor(nn)-1));
    }
}

void PvPanel::createVvector(double V0, double Vend)
{
    this->createIvector(V0, Vend, 100);
}

void PvPanel::panel_curve_fit_I(int n)
{
    // traça a curva VxI do painel, a partir do vetor I utilizando o método Newton-Rhapson

    int i, ind = 0;
    double vr, Pmax_ = 0;

    for(i = 0; i < n; i++)
    {
        vr = this->solve_V(this->I[i]);
        this->V.push_back(vr);
        this->R.push_back(vr/this->I[i]);
        this->P.push_back(vr*this->I[i]);
    }
}
```



```
        if(this->P[i] > Pmax_ )
        {
            Pmax_ = this->P[i];
            ind = i;
        }
    }

    this->Pmax = this->P[ind];
    this->Rmpp = this->R[ind];
    this->Impp = this->I[ind];
    this->Vmpp = this->V[ind];
}

void PvPanel::panel_curve_fit_V(int n)
{
    // traça a curva VxI do painel, a partir do vetor V utilizando o método newthon-rhapson

    int i, ind = 0;
    double ir, Pmax_ = 0;

    for(i = 0; i < n; i++)
    {
        ir = this->solve_I(this->V[i]);
        this->I.push_back(ir);
        this->R.push_back(this->V[i]/ir);
        this->P.push_back(ir*this->V[i]);

        if(this->P[i] > Pmax_ )
        {
            Pmax_ = this->P[i];
            ind = i;
        }
    }

    this->Pmax = this->P[ind];
    this->Rmpp = this->R[ind];
    this->Impp = this->I[ind];
}
```

```
    this->Vmpp = this->V[ind];
}

/*
 * obtém a tensão do painel, através da corrente do painel
 * */
double PvPanel::solve_V(double ii)
{
    bool flag = true;
    double error = 1e-5;
    double fv_r, fv_r_;
    double vr, vtemp, vmax = this->getVoc(), vmin = 0;

    //if (fv_1*fv_2 < 0) // verificando se os valores obtidos estão na vizinhança do zero
        // este teste foi descartado, pois sabemos que o valor que desejamos
        // encontrar está entre vmax e vmin (limites do painel)

    vr = vmax; // chute inicial
    while(flag) // Método de Newton-Rhapson
    {
        fv_r = f(vr, ii);
        fv_r_ = dfdv(vr, ii);
        vtemp = vr - fv_r/fv_r_;

        if(fabs(vtemp - vr) > error)
        {
            vr = vtemp;
        }
        else
        {
            flag = false;
        }
    }

    if(vr > vmax)
    {
        vr = vmax;
    }
}
```

```
}
else
{
    if(vr < vmin) //ou zero
    {
        vr = vmin;
    }
}

return vr;
}

/*
 * obtém a corrente do painel, a partir da tensão do painel
 * */
double PvPanel::solve_I(double vv)
{
    bool flag = true;
    double error = 1e-9;
    double fi_r, fi_r_;
    double ir, itemp, imax = this->getIsc(), imin = 0;

    //if (fi_1*fi_2 < 0) // verificando se os valores obtidos estão na vizinhança do zero
    // este teste foi descartado, pois sabemos que o valor que desejamos
    // encontrar está entre imax e imin (limites do painel)

    ir = imax; // chute inicial
    while(flag) // Método de Newton-Rhapson
    {
        fi_r = f(vv, ir);
        fi_r_ = dfdi(vv, ir);
        itemp = ir - fi_r/fi_r_;

        if(fabs(itemp - ir) > error)
        {
            ir = itemp;
        }
    }
    else
```

```
        {
            flag = false;
        }
    }

    if(ir > imax)
    {
        ir = imax;
    }
    else
    {
        if(ir < imin)// ou zero
        {
            ir = imin;
        }
    }

    return ir;
}
```

# Apêndice B

## Utilização de Blocos DLL no PSIM 6.0

Para o desenvolvimento deste trabalho foi necessário criar um Bloco DLL que implementasse o painel fotovoltaico, uma vez que este elemento não está disponível na maioria dos softwares de simulação.

O PSIM provê um recurso que permite com facilidade a inclusão destes blocos compilados. Esta seção apresenta os procedimentos básicos para a criação e compilação de blocos DLL no Dev C++ 4.9.9.2.

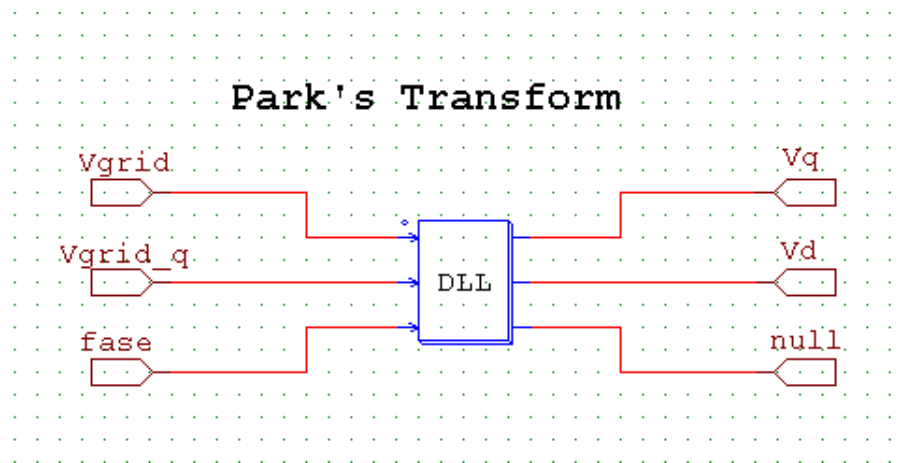
### Blocos DLL

Um bloco DLL permite ao usuário escrever um código C/C++, por exemplo, compilá-lo dentro de um arquivo .dll através de alguma IDE de desenvolvimento (neste caso será utilizado o Dev C++), e importá-lo dentro do ambiente do PSIM. Estes blocos podem ser usados como circuitos de potência e/ou de controle.

Os blocos DLL estão disponíveis no ambiente de trabalho do PSIM através do menu: Elements > Other > Function Blocks. A Figura B.1 mostra um bloco DLL sendo utilizado dentro de um subcircuit do PSIM.

O único atributo que o bloco recebe é o nome do arquivo .ddl, que deve estar no mesmo diretório que o projeto utilizado no PSIM. O ponto no lado esquerdo do bloco (Figura B.1) indica a localização das entradas que devem ser fornecidas pelo projeto do PSIM, os dados são então processados e entregues às saídas deste, que estão do lado oposto que por sua vez são enviadas ao PSIM. A DLL é chamada pelo PSIM a cada passo de cálculo da simulação, todavia quando a entrada da DLL são elementos discretos (zero-order hold, integradores discretos, blocos função de transferência no domínio Z, etc), estas são chamadas a cada tempo de amostragem.

O trecho de código abaixo é um exemplo (*template*) de um arquivo .dll que pode ser utilizado



*Fig. B.1: Bloco DLL com três entradas e três saídas.*

no PSIM, neste caso o código implementa uma Transformada Park para uma dada tensão e ângulo de fase.

```
include <windows.h>
#include <cmath>

__declspec(dllexport) void simuser (double t, double delt, double *in, double *out)
{
// Insira o seu código aqui ..... início

    const double pi = 3.141592653589793;
    const double deg2rad = pi/180;
    double Vgrid, Vgrid_q, fase;
    double Vq, Vd, teta;

    // Inputs
    Vgrid  = in[0];
    Vgrid_q = in[1];
    fase   = in[2];

    // Park's Transform
    teta = fase*deg2rad;
    Vq = Vgrid_q*cos(teta) - Vgrid*sin(teta);
    Vd = Vgrid_q*sin(teta) + Vgrid*cos(teta);
```

```
// Outputs
out[0] = Vq;
out[1] = Vd;
out[2] = teta;

// Insira o seu código aqui ..... fim
}
```

As variáveis contidas na lista de parâmetros da função *simuser()* são fornecidas automaticamente pelo PSIM, estas representam:

- *t*: instante de tempo;
- *delt*: passo de cálculo;
- *in*: vetor com as entradas;
- *out*: vetor com as saídas.

Todo o desenvolvimento se dá dentro da função *simuser()*, para isso deve-se seguir algumas recomendações:

- O código desenvolvido deve ser inserido dentro das marcações indicadas do *template* fornecido;
- Os nome da função, o número de variáveis, tipo e sequência não devem ser alterados;
- O tamanho máximo dos vetores de entrada e saída é 20 (quantidade de variáveis de entrada e saída por bloco);
- Variáveis globais fora do escopo de *simuser()* não são permitidas.

## Criação de uma DLL utilizando o Dev C++

Para gerar uma DLL é preciso criar um projeto específico no ambiente Dev C++. O projeto pode ser criado pelo menu através do caminho: Arquivo > Novo > Projeto... (Figura B.2).

Em seguida uma nova janela será aberta para que seja feita a seleção do tipo de projeto que deseja-se criar. Deve-se selecionar a opção do ícone DLL, conforme está apresentado na Figura B.3.

A partir deste ponto inicia-se o desenvolvimento do código desejado.

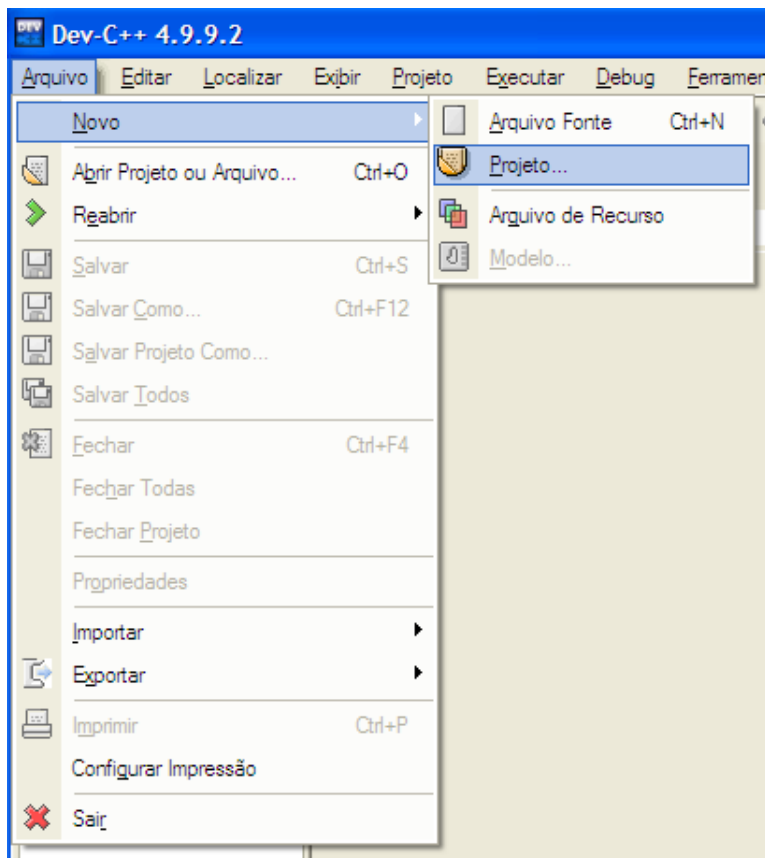


Fig. B.2: Menu de seleção do Dev C++.

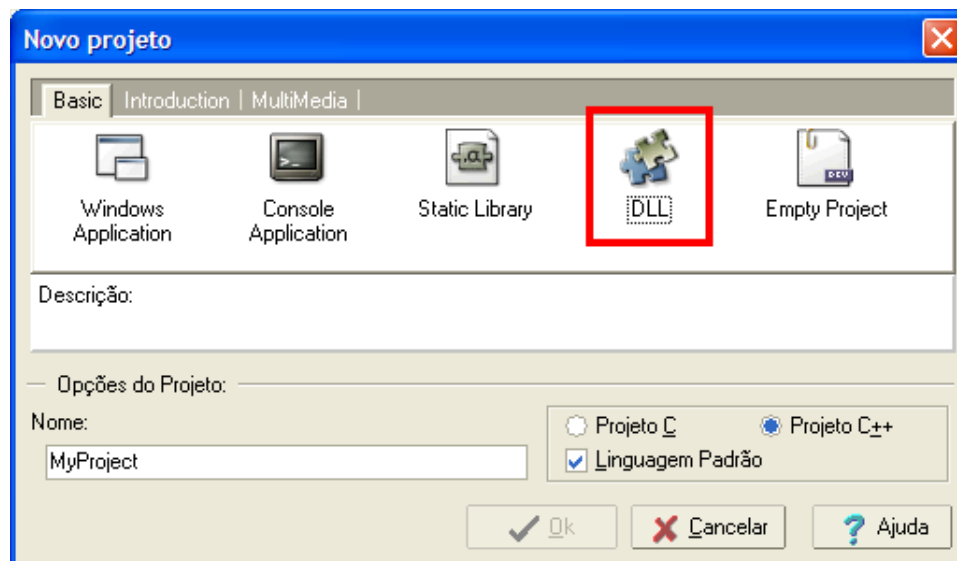


Fig. B.3: Menu de projetos do Dev C++.



Aplicando o que foi apresentado é possível adicionar um painel fotovoltaico ao ambiente de simulação do PSIM, utilizando a classe/biblioteca *PvPanel* (Apêndice A). A Figura B.4 mostra os circuitos construídos no PSIM e o trecho de código abaixo, utiliza o método *solve\_V()* que recebe um valor de corrente que atravessa o painel como parâmetro e retorna a respectiva tensão de saída (Figura B.4(b)).

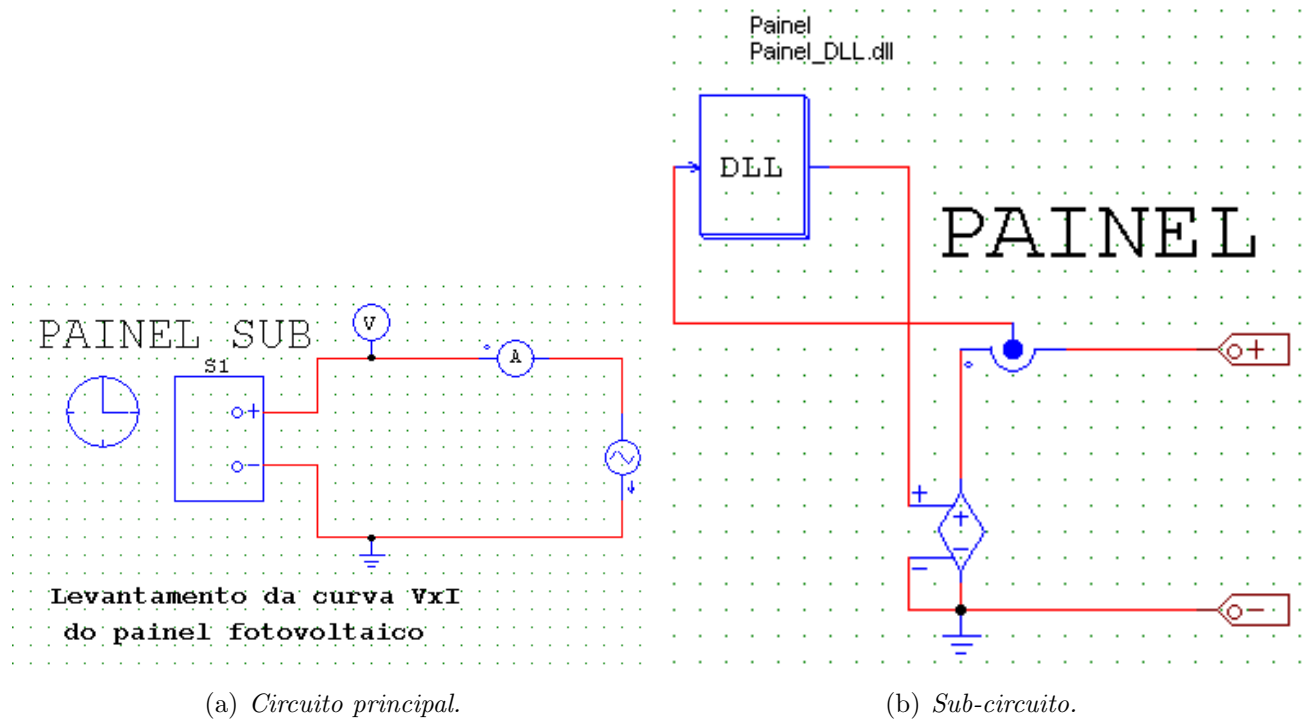


Fig. B.4: Implementação do painel fotovoltaico no PSIM.

```
#include <windows.h>
#include <cmath>
#include "PvPanel.h"
```

```
__declspec(dllexport) void simuser (double t, double delT, double *in, double *out)
{
// Place your code here.....begin
/*****
Utilização de um Painel Fotovoltaico no PSIM
*****/
```

```
static PvPanel panel;
```

```
double vIn, iIn;

//Input
iIn = in[0];
vIn = panel.solve_V(iIn);

//Output
out[0] = vIn;

// Place your code here.....end
}
```

# Referências Bibliográficas

- [1] Rashid M. H.; (1999) Eletrônica de Potência: Circuitos, Dispositivos e Aplicações, Livro, 2ª Edição, Makron Books do Brasil.
- [2] Farret F. A.; (1999) Aproveitamento de Pequenas Fontes de Energia Elétrica, Livro, Editora UFSM, Universidade Federal de Santa Maria - Brasil.
- [3] Barbi I.; Martins D. C. (2006) Conversores CC-CC Básicos Não Isolados, Livro, Edição do Autor, Universidade Federal de Santa Catarina - Brasil.
- [4] Jiang J. A.; Huang T. L. (2005) Maximum Power Tracking for Photovoltaic power Systems, Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol 8, Nº 2, pp. 147-153.
- [5] Holmes D. G.; Atmur P.; Beckett C. C.; Bull M. P.; Kong W. Y.; Luo W. J.; Ng D. K. C.; Sachchithanathan N.; Su P. W.; Ware D. P.; Wrzos P. (2005) An Innovative, Efficient Current-Fed Push-Pull Grid Connectable Inverter for Distributed Generation Systems, Monash University 2005 Future Energy Challenge Team - Australia.
- [6] Lee J. H.; Bae. H. (2006) Advanced Incremental Conduance MPPT Algorithm with a Variable Step Size, EPE-PEMC - Eslovênia.
- [7] Hartmann L. V. (2007) Otimização de Sistemas Fotovoltaicos, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande - Brasil.
- [8] Vitorino M. A. (2008) Sistema de Bombeamento Fotovoltaico com Motor de Indução e sem Baterias, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande - Brasil.
- [9] Gabe I. J. (2008) Contribuição ao Controle de Inversores PWM Alimentados em Tensão Conectados à Rede através de Filtro-*LCL*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria - Brasil.
- [10] Manual do Módulo Solar Kyocera KC 130TM.

- [11] PSIM User's Guide - Version 6.0, 2003, Powersim Inc..
- [12] Energia solar no Brasil pode ser vantajosa a partir de 2013, artigo, [www.inovacaotecnologica.com.br](http://www.inovacaotecnologica.com.br), acesso em 28/03/2010.
- [13] Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety of Germany, [www.bmu.de/english/renewable\\_energy](http://www.bmu.de/english/renewable_energy) e [www.erneuerbare-energien.de/english](http://www.erneuerbare-energien.de/english), acesso em 28/03/2010.
- [14] Projeto de Cooperação Técnica Eletrobrás/GTZ, artigo, [www.eletobras.com.br](http://www.eletobras.com.br), acesso em 28/03/2010.
- [15] Energias Alternativas - Eletrobras/Eletronuclear, página web, [www.eletronuclear.gov.br](http://www.eletronuclear.gov.br), acesso em 28/03/2010.
- [16] Kyocera Solar do Brasil, página web, [www.kyocerasolar.com.br](http://www.kyocerasolar.com.br), acesso em 28/03/2010.