



CONVERSORES CC-CC NÃO ISOLADOS PARA APLICAÇÕES EM SISTEMAS DE GERAÇÃO ELÉTRICA A CÉLULA A COMBUSTÍVEL

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Orientador: Dr. Ing. Walter Issamu Suemitsu

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

Janeiro de 2011

CONVERSORES CC-CC NÃO ISOLADOS PARA APLICAÇÕES EM SISTEMAS DE GERAÇÃO ELÉTRICA A CÉLULA A COMBUSTÍVEL

Thomas Farias Viana

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

Walter Issamu Suemitsu, Dr. Ing.

(Orientador)

Sergio Sami Hazan, Ph. D.

Júlio César de Carvalho Ferreira, M. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

Janeiro de 2011

Dedico este trabalho aos meus pais, Juarez Seixas Viana e Maria José Farias do Nascimento, que sempre foram exemplos de conduta e ajudaram a moldar meu caráter, e aos meus irmãos Tiago Farias Viana e Thais do Nascimento Viana por todo apoio. Não conseguiria transpor esta longa jornada sem a presença destes em minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, pela saúde, pelo Seu amor e por todas as bênçãos e oportunidades, incluindo este trabalho.

Agradeço ao professor Walter Issamu Suemitsu por todo apoio e confiança me passados durante essa jornada.

Agradeço aos meus queridos amigos de turma pelo companheirismo e por ter passado tantas horas de estudo juntos sem deixar o moral e o bom humor serem abatidos.

Por fim, agradeço a todos meus familiares pelo apoio incondicional que sempre me passaram possibilitando minha formação.

Resumo

Este trabalho abordará simulações de conversores CC/CC aplicáveis a Células a Combustível com o intuito de determinar qual a melhor topologia de conversor não isolado a esta aplicação.

O capítulo 1 traz a motivação do trabalho e a importância do mesmo.

No capítulo 2, são apresentadas as características principais de uma Célula a Combustível.

No capítulo 3, é feita uma abordagem aos principais aspectos de um conversor CC/CC.

O capítulo 4 desenvolve o estudo sobre as topologias de conversores CC/CC aplicáveis a este sistema.

No capítulo 5 estão contidos os resultados das simulações obtidos.

O capítulo 6 apresenta uma análise comparativa entre os valores obtidos teoricamente e os valores obtidos nas simulações contidas no capítulo 5.

Por fim, tem-se no capítulo 7 as conclusões sobre as simulações e a proposta para trabalhos futuros.

Conteúdo

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO | 1 |
| CAPÍTULO 2 – CÉLULAS A COMBUSTÍVEL | 3 |
| 2.1 Histórico | 3 |
| 2.2 Princípio de Funcionamento | 4 |
| 2.3 Tipos de Células a Combustível | 5 |
| 2.4 Perdas da Célula a Combustível | 6 |
| 2.5 Conexão em Série das Células | 7 |
| CAPÍTULO 3- CONVERSORES CC/CC | 9 |
| 3.1 Princípio de Funcionamento | 9 |
| 3.2 Principais Semicondutores de Potência | 10 |
| 3.3 Tipos de Modulação | 10 |
| 3.3.1 Modulação por largura de pulso- PWM | 10 |
| 3.3.2 Modulação por frequência de pulso- PFM | 11 |
| 3.3.3. Modulação por limites de corrente- MLC | 12 |
| 3.4 Topologias Elementares de Conversor CC/CC | 13 |
| 3.4.1. Conversor <i>Buck</i> – Abaixador de Tensão | 14 |
| 3.4.2. Conversor <i>Boost</i> – Elevador de Tensão | 16 |
| 3.4.3. Conversor <i>Buck-Boost</i> – Abaixador / Elevador de Tensão. | 19 |
| CAPÍTULO 4 – CONVERSORES ELEVADORES NÃO- ISOLADOS DE ALTO GANHO | 22 |
| 4.1 Conversor <i>Boost</i> em Cascata | 22 |
| 4.2 Conversor <i>Boost</i> Multinível | 24 |
| 4.3 Conversor <i>Boost Interleaved</i> | 26 |
| CAPÍTULO 5- SIMULAÇÕES | 29 |
| 5.1 Simulações do Conversor <i>Boost</i> em Cascata | 31 |
| 5.2 Simulações do Conversor <i>Boost</i> Multinível | 34 |
| 5.3 Simulações do Conversor <i>Boost Interleaved</i> | 37 |
| CAPÍTULO 6- ANÁLISE DOS RESULTADOS | 40 |
| CAPÍTULO 7 - CONCLUSÃO | 42 |
| REFERÊNCIAS | 44 |
| APÊNDICE I – ESQUEMAS DE SIMULAÇÃO | 46 |

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Mesmo com as fontes renováveis possuindo um maior custo de investimento por kWh no momento de implementação quando comparadas com as convencionais [1], seu uso tem crescido consideravelmente nos últimos anos. A incorporação destas na matriz energética de um país aumenta a segurança energética ao diversificá-la, reduzem a emissão de gases do efeito estufa e diminui a dependência pela geração hidroelétrica.

No Brasil o uso destas fontes foi relegado devido à abundância da geração hídrica que possui uma maior rentabilidade em razão da economia com ganho de escala, economia com pesquisas e economia devido à experiência prévia deste tipo de energia no setor. No entanto, por questões ambientais, este tipo de geração vem encontrando dificuldades na instalação de grandes reservatórios em usinas, o que deverá reduzir gradativamente sua participação na matriz elétrica brasileira, abrindo margem para a entrada das fontes alternativas de energia elétrica no cenário nacional [1], [2].

O governo brasileiro, por meio do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica- PROINFA, estimulou a produção de energia elétrica produzida por fontes alternativas, com o intuito de diversificar a matriz energética brasileira, além de aumentar a segurança do sistema energético e valorizar as características e potenciais das regiões do país [3].

O sistema de geração a célula a combustível é uma fonte alternativa que já é utilizado em pequenas centrais de geração de energia instaladas quase sempre perto das áreas consumidoras, fazendo parte de um movimento crescente no mundo que é a geração distribuída [1]. Sua utilização desta forma acarreta em uma grande economia na

implementação, pois como é instalada próxima dos centros consumidores não há necessidade da construção de linhas de transmissão. Isto resulta na redução com gastos com proteção de linhas, outros equipamentos necessários a linhas de transmissão (compensação, bobinas de bloqueio e sistemas de operação de linhas de alta tensão, entre outros) e na redução nos gastos com manutenção.

Em condições normais de operação, uma célula a combustível apresenta na saída tensões de 0,5 a 0,9 V[4]. Para aplicações viáveis algumas células são ligadas em série podendo o conjunto apresentar na saída tensões na casa de 30 V. Esta tensão é muito pequena para a entrada do inversor, equipamento de eletrônica de potência que converte corrente contínua em corrente alternada senoidal, sendo a amplitude do sinal de saída proporcional ao nível de tensão contínua na entrada. A saída do inversor poderia ser ligada a um transformador para elevar o nível de tensão ao nível de distribuição, mas isto aumentaria muito o custo do sistema. Uma solução viável é a utilização de um conversor CC-CC para elevar o nível de tensão ainda em corrente contínua. A Figura 1.1 apresenta o diagrama de blocos de um sistema de geração a célula a combustível.

O objetivo deste trabalho é o estudo de algumas estruturas de conversores CC/CC aplicáveis a células a combustível, com o intuito de compará-las, por meio de simulações digitais, e determinar qual a melhor topologia de conversor não isolado para esta aplicação. As estruturas selecionadas foram aquelas consideradas as mais viáveis para implementação e são apresentadas no Capítulo 4.

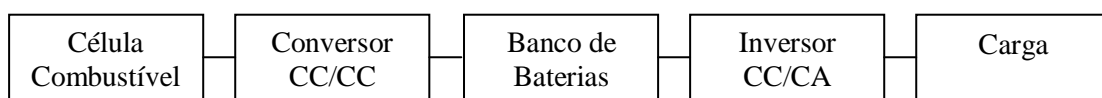


Figura 1.1- Sistema de Geração a Célula a Combustível

CAPÍTULO 2 – CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

Este capítulo abordará os principais aspectos referentes a uma célula a combustível.

2.1 Histórico

A primeira célula a combustível foi desenvolvida em 1839, por Willian Robert Grove, utilizando os conhecimentos sobre a eletrólise da água que usa a energia elétrica para gerar hidrogênio e oxigênio. Grove utilizou um conjunto de eletrodos de platina imersos em ácido nítrico (HNO_3) e um conjunto de eletrodos de zinco imersos em sulfato de zinco (ZnSO_4), gerando cerca de 12 ampères e 1,8 volts [4],[5].

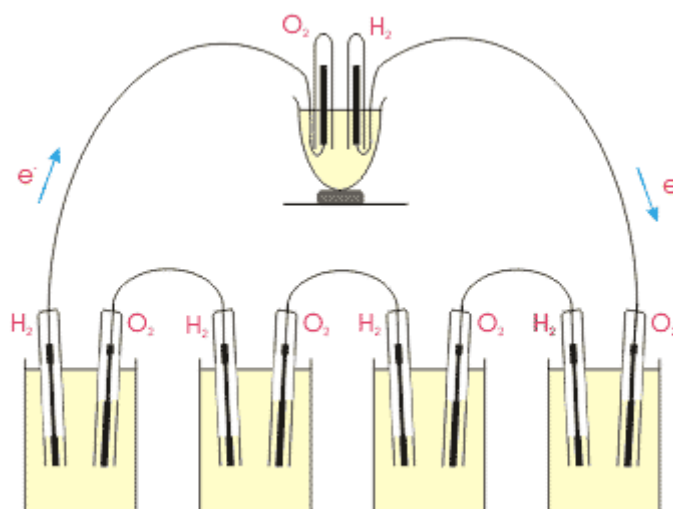


Figura 2.1- Ilustração do experimento de Grove [6].

O nome “células a combustível – *fuel cell*” surgiu em 1889 quando os químicos Ludwing Mond e Carl Langer descreveram seu experimento com uma célula a combus-

tível. Em 1930 Francis T. Bacon construiu a primeira célula funcional que despertou o interesse de várias empresas mesmo sendo muito caras.

A partir da década de 60 houve um crescimento acentuado nas pesquisas sobre este tema, diversas universidades e empresas atuam neste ramo para tornar esta tecnologia viável para aplicações em automóveis, como por exemplo, o ônibus desenvolvido pela COPPE- UFRJ.

2.2 Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento de uma célula a combustível é similar ao funcionamento de uma bateria que transforma energia química em energia elétrica e térmica, através de reações eletroquímicas entre hidrogênio e oxigênio. A estrutura básica de uma célula a combustível é apresentada na figura 2.2.

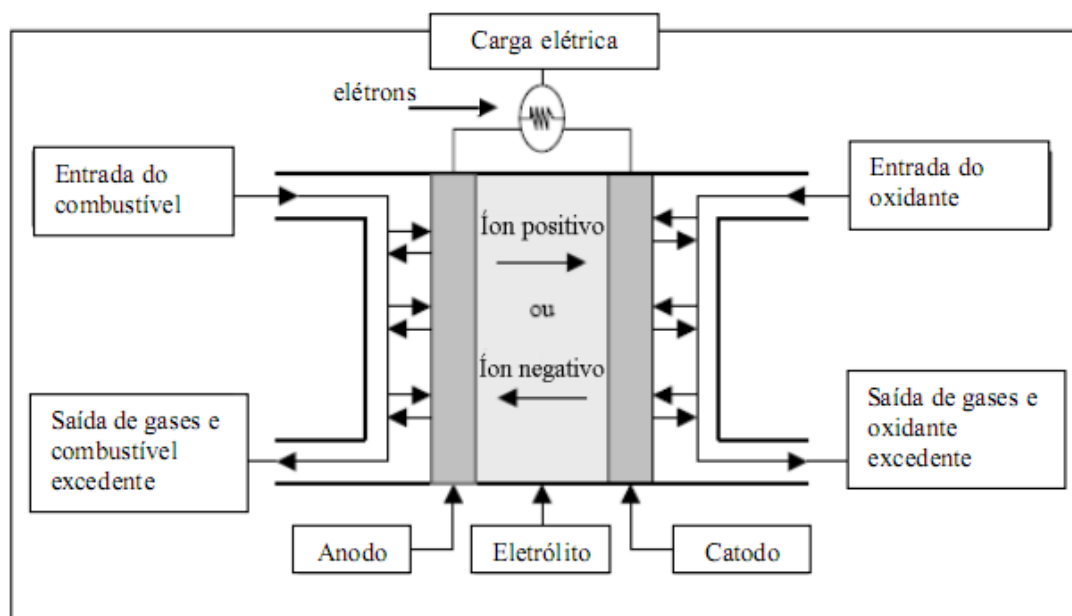


Figura 2.2- Esquema geral da Célula a Combustível [5].

A célula a combustível tem o anodo alimentado com hidrogênio puro ou outro combustível rico em hidrogênio e o catodo com um elemento oxidante que pode ser oxigênio puro ou ar atmosférico. O hidrogênio injetado no anodo sofre uma dissociação onde libera prótons e elétrons como apresenta a semi reação 2.1.



No catodo, os prótons H^+ gerados na semi reação (2.1) reagem com oxigênio formando água e calor como apresenta a relação 2.2.



A reação global da célula é obtida com a soma das semi reações 2.1 e 2.2.



A partir da reação global da célula 2.3 observa-se que os subprodutos da produção de energia elétrica, utilizando células a combustível, são água e calor, o que comprova que a célula a combustível é uma fonte limpa de geração de energia.

2.3 Tipos de Células a Combustível

As células a combustível são nomeadas de acordo com os eletrólitos por elas utilizados. Atualmente existem seis diferentes tipos de célula. São elas Alcalinas (AFC), Metanol Direto (DAFC), Ácido Fosfórico (PAFC), Óxido Sólido (SOFC), Carbonatos Fundidos (MCFC) e Membrana Polimérica (PEMFC) que é o tipo de células mais utilizado no mercado. A tabela 2.1 apresenta um comparativo entre os diversos tipos de células.

Tabela 2.1- Tipos de células a combustível e suas principais características [7].

| | PEMFC | DAFC | AFC | PAFC | MCFC | SOFC |
|--------------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Eletrólito | Membrana Polimérica | Membrana Polimérica | Hidróxido de Potássio | Ácido fosfórico | Lítio, potássio, carbonatos fundidos | Óxidos de yttria e zircônio |
| Temperatura de Operação | 60° C – 90° C | 70° C – 90° C | 70° C – 200° C | 175 °C– 200 °C | 600 °C – 700° C | 700 °C – 1000 °C |
| Combustível | H ₂ | Álcool/Água | H ₂ | H ₂ | H ₂ ,CH ₄ ,CO | H ₂ ,CH ₄ ,CO |
| Catalisador | Platina | Platina/Rutênio | Platina | Platina | Níquel-Cromo | Níquel-Zircônia |
| Íon migrante | H ⁺ | H ⁺ | OH ⁺ | H ⁺ | CO ₃ ²⁻ | O ²⁻ |
| Oxidante | Ar | Ar | Ar + Água | Ar | Ar + CO ₂ | Ar |
| Potência Típica | <250KW | <50KW | <50KW | 50KW-300KW | 300KW-3MW | 50KW-5MW |

2.4 Perdas da Célula a Combustível

A tensão de saída da célula a combustível (V_{FC}) é dada pela relação entre o potencial de Nernst (V_{nernest}) da reação entre hidrogênio e oxigênio e as perdas internas da célula. Estas perdas na célula podem ser divididas em três componentes [8]:

- Perdas por Ativação – V_{act} - são ocasionadas devido à energia utilizada para romper a barreira de ativação da reação química. É proporcional a densidade de corrente da célula.
- Perdas Ôhmicas – V_{ohm} – são ocasionadas devido à resistência a passagens dos íons através da membrana e eletrodos.
- Perdas por Concentração – V_{con} – são ocasionadas devido às mudanças de concentração na superfície dos eletrodos. É proporcional a densidade de corrente, pois

quanto maior a corrente maior será a taxa de consumo de hidrogênio e oxigênio, diminuindo a concentração destes.

$$V_{FC} = V_{Nernest} - V_{act} - V_{ohm} - V_{con} . \quad (2.4)$$

A figura 2.3 apresenta a curva tensão por densidade de corrente de uma célula a combustível, ilustrando as regiões onde cada um dos tipos de perda tem predominância.

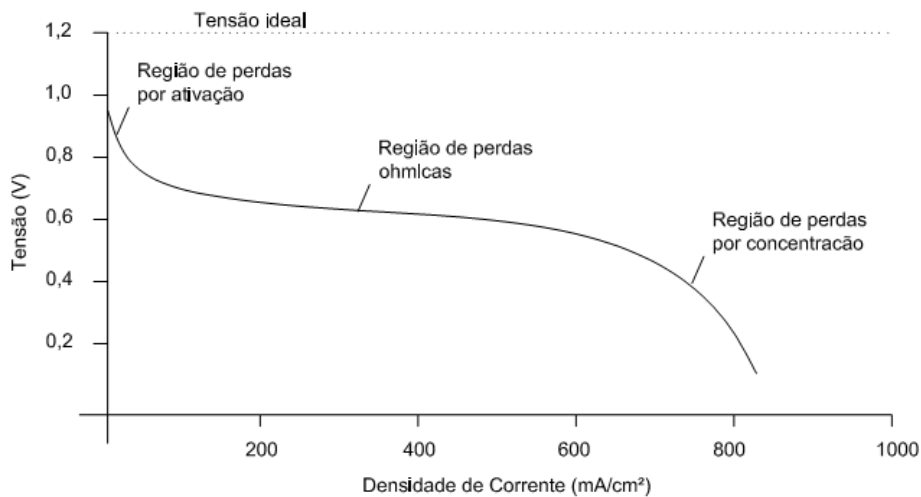


Figura 2.3- Curva de Polarização da Célula a Combustível [4].

2.5 Conexão em Série das Células

O valor teórico da tensão de saída de uma célula a combustível é 1,23 V, mas quando em operação o valor de tensão obtido é de 0,7 V. Diante deste fato é necessário se associar as células em série para se alcançar níveis mais elevados de tensão. A este conjunto se dá o nome de pilha combustível.

A associação em série das pilhas acarreta em um inconveniente que é a queda de tensão causada pela corrente que atravessa toda a superfície do eletrodo para assim alcançar a célula seguinte. Apesar de essas perdas serem pequenas, elas se tornam significativas quando comparadas à tensão de operação da célula (0,7V) [5].

A figura 2.4 apresenta uma alternativa para contornar o problema da queda de tensão, a utilização de placas bipolares para realizar a conexão entre as células. Esta placa realiza a conexão de células adjacentes por meio de duas superfícies e também possibilita a distribuição de combustível e de oxigênio para anodo e catodo. A espessura desta placa deve ser determinada de modo a reduzir a resistência pelo volume ao máximo sem comprometer a passagem dos gases pelos dutos que fazem as conexões entre as células.

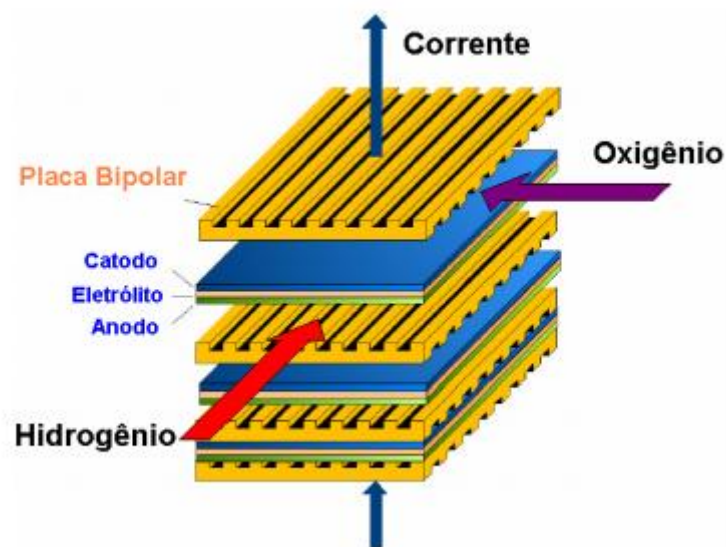


Figura 2.4 – Associação de Células com placas Bipolares [4].

CAPÍTULO 3- CONVERSORES CC/CC

Neste capítulo serão abordados os princípios de funcionamento, os requisitos básicos, tipos de modulação, principais chaves de potência e topologias elementares dos conversores CC/CC.

3.1 Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento de um conversor CC-CC é uma chave ligada em série com uma fonte de tensão em corrente contínua e uma carga como ilustra a figura 3.1.

A tensão de saída do conversor (V_{in}) é função do tempo que o semiconductor está conduzindo corrente (T_{ON}) e a tensão de entrada (V_{IN}), a razão deste tempo pelo período total de chaveamento (T) é chamada de ciclo de trabalho (D). A equação 3.1 apresenta esta relação [9].

$$D = \frac{T_{on}}{T} . \quad (3.1)$$

$$V_o = f(D) \times V_{IN} . \quad (3.2)$$

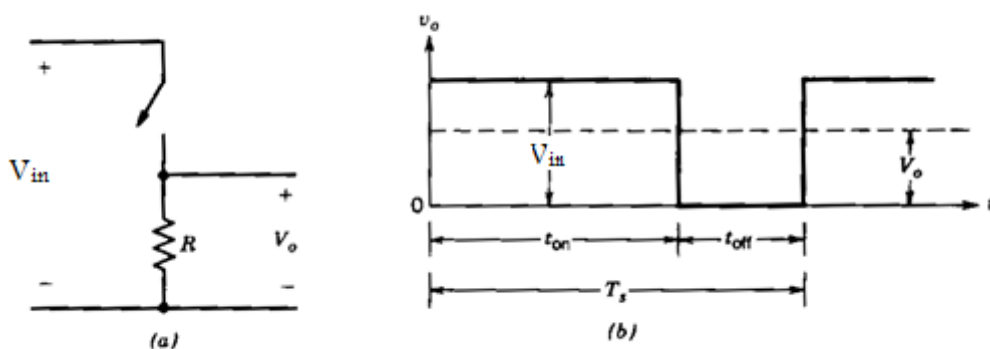


Figura 3.1 – (a) Esquemático resumido de um conversor CC/CC,

(b) Gráfico da Tensão de saída do circuito (a) [9].

3.2 Principais Semicondutores de Potência

Os principais dispositivos semicondutores de potência utilizados em conversores CC-CC são os IGBTs (*Isulated Gate Bipolar Transistors*), embora em potências da ordem de alguns kW os MOSFETs (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors*) possam ser utilizados. O princípio de construção e operação destes dispositivos é bem conhecido hoje e mais detalhes podem ser obtidos em [9]. Nos últimos anos o dispositivo denominado IGCT (*Integrated Gate Commutated Thyristor*) tem sido utilizado em conversores de alta potência, mas principalmente em inversores.

3.3 Tipos de Modulação

Neste item serão abordadas às características dos principais circuitos de modulação dos conversores CC/CC.

3.3.1 Modulação por largura de pulso- PWM

Na modulação por largura de pulso (ou PWM em inglês) opera-se com frequência constante, variando-se o tempo que a chave permanece ligada. O sinal de comando é obtido, de modo analógico, pela comparação de um sinal de controle (modulante) com uma onda periódica (portadora), por exemplo, uma onda "dente de serra". A figura 3.2 apresenta formas de onda relativas à modulação MLP de um sinal de referência que apresenta um nível contínuo. A saída do comparador é uma tensão com dois níveis, na frequência da onda triangular, ou seja, enquanto o sinal da onda portadora for menor

que o sinal modulante a chave permanece ligada, sendo desligada quando o sinal da onda portadora se torna maior que o sinal modulante [10].

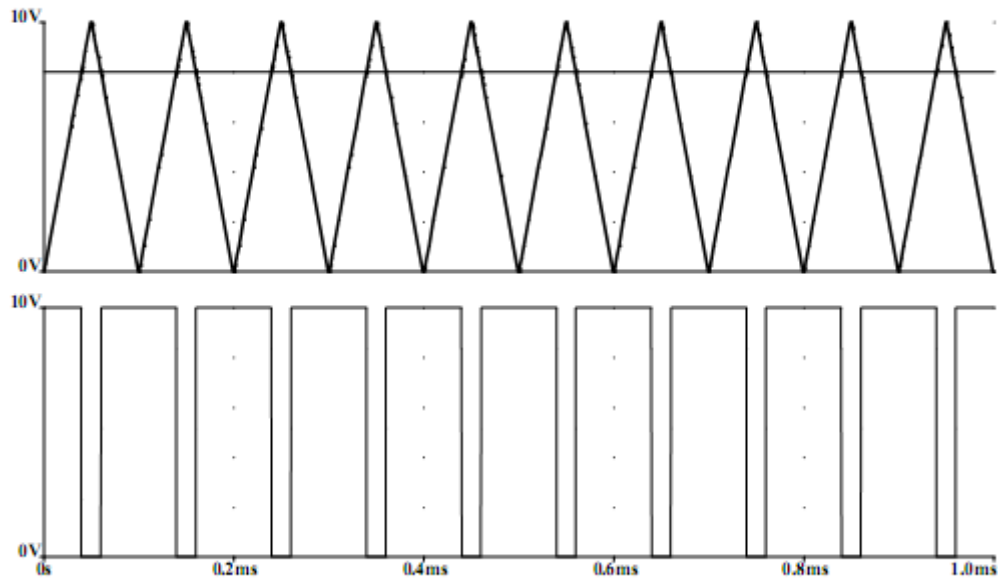


Figura 3.2- Modulação por largura de pulso [10].

3.3.2 Modulação por frequência de pulso- PFM

Neste método o tempo em que a chave permanece conduzindo é mantido constante enquanto o período total de chaveamento varia. A figura 3.3 apresenta um sinal de modulação por frequência de pulso.

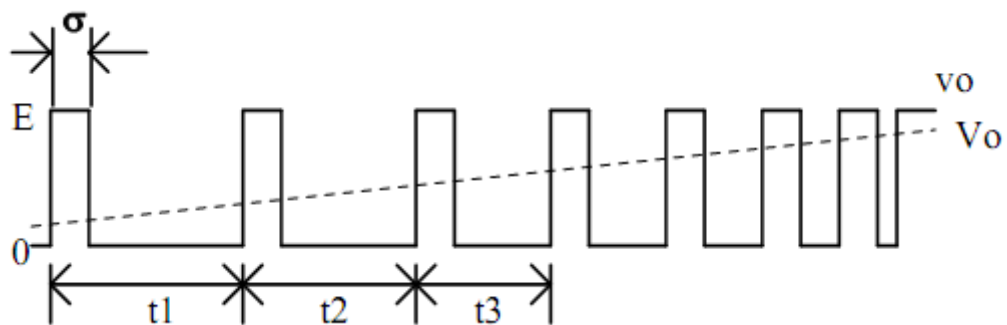


Figura 3.3- Modulação por frequência de pulso [9].

No método PFM é necessário reduzir a frequência de chaveamento do conversor para se obter uma tensão de saída mais baixa. Este fato pode ocasionar em descontinuidade de condução de corrente e aumento da ondulação da tensão de saída para baixas frequências de chaveamento [10].

3.3.3. Modulação por limites de corrente- MLC

Neste tipo de modulação são estabelecidos os limites máximo e mínimo de corrente, fazendo-se o chaveamento quando forem alcançados valores especificados (máximo e mínimo) de corrente. O valor instantâneo da corrente em regime é mantido sempre dentro dos limites estabelecidos e o conversor comporta-se como uma fonte de corrente.

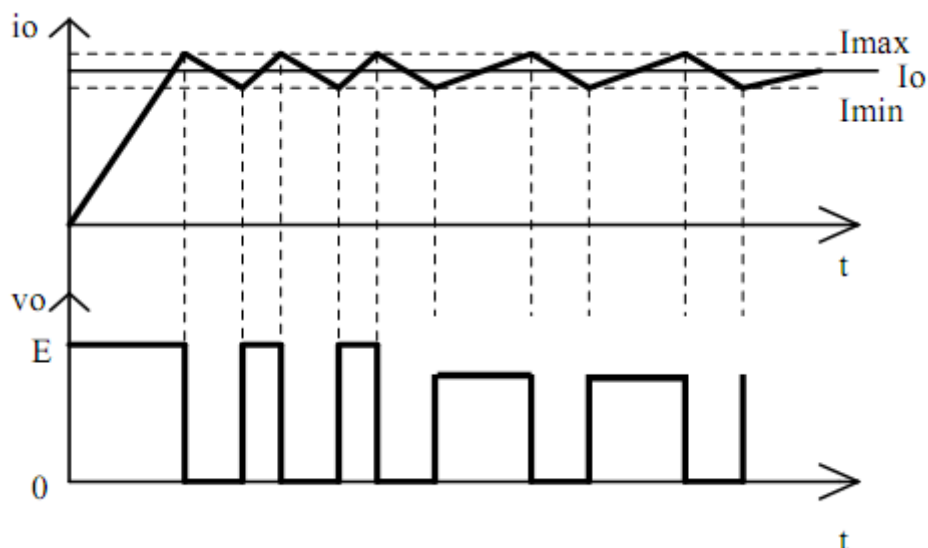


Figura 3.4- Modulação por limite de corrente [10].

Tanto a frequência como o ciclo de trabalho são variáveis, dependendo dos parâmetros do circuito e dos limites impostos. A figura 3.4 apresenta as formas de onda para este tipo de controlador. A obtenção de um sinal MLC pode ser conseguida com o uso de um comparador com histerese, atuando a partir da realimentação do valor instantâneo da corrente. [10]

A figura 3.5 apresenta um exemplo de circuito que utiliza a modulação por limites de corrente.

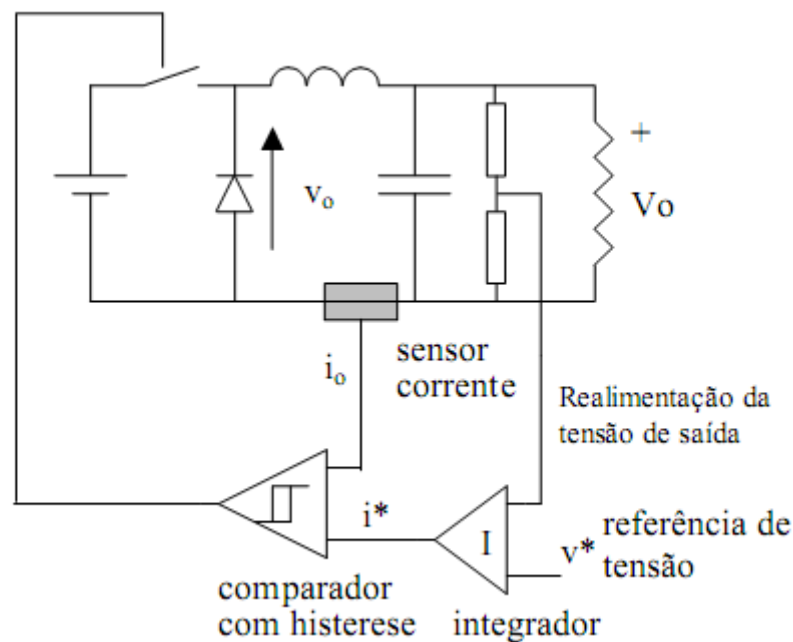


Figura 3.5 – Circuito controlador por histerese [10].

3.4 Topologias Elementares de Conversor CC/CC

Neste item serão abordadas as características das topologias elementares dos conversores CC/CC.

3.4.1. Conversor *Buck* – Abaixador de Tensão

Nesta topologia de conversor, apresentada na figura 3.6, a tensão de entrada (E) é recortada pela chave (T). Com o capacitor (C_o) suficientemente grande, a tensão de saída (V_o) no resistor (R_o) é praticamente constante, apresentando apenas pequenas oscilações que podem ser desprezadas.

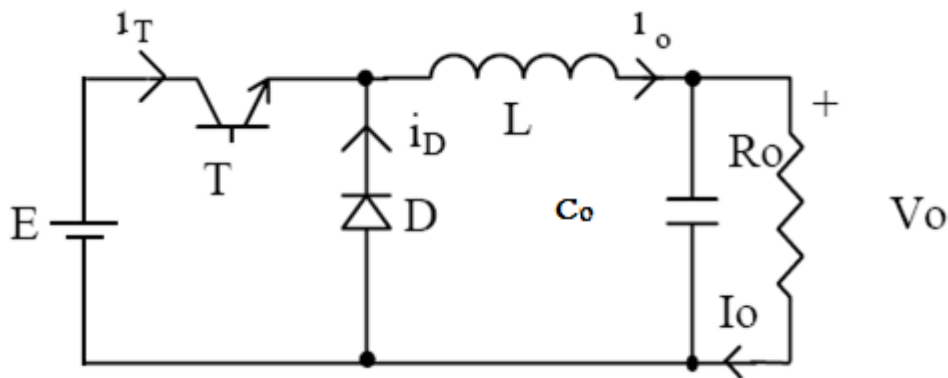


Figura 3.6- Conversor *buck* [11].

Com a chave conduzindo (diodo inversamente polarizado), transfere-se energia da fonte para o indutor (o indutor carrega) e para o capacitor (quando a corrente no indutor é maior que a corrente de carga (V_o/R_o)).

Quando T desliga, o diodo passa a conduzir dando continuidade à passagem de corrente no indutor. A energia armazenada em L é entregue ao capacitor e à carga. Enquanto o valor instantâneo da corrente pelo indutor for maior do que a corrente da carga, a diferença carrega o capacitor. Quando a corrente for menor, o capacitor se descarrega, suprindo a diferença a fim de manter constante a corrente da carga (aproximação de tensão constante na saída) [11].

Se a corrente pelo indutor não vai a zero enquanto a chave está aberta, o circuito opera no modo de condução contínua, caso contrário tem-se o modo descontinuo. Preferencialmente se opera no modo de condução contínua devido a haver neste caso uma relação bem determinada entre a largura de pulso e a tensão média de saída. A figura 3.7 apresenta as formas de onda típicas de ambos os modos de operação.

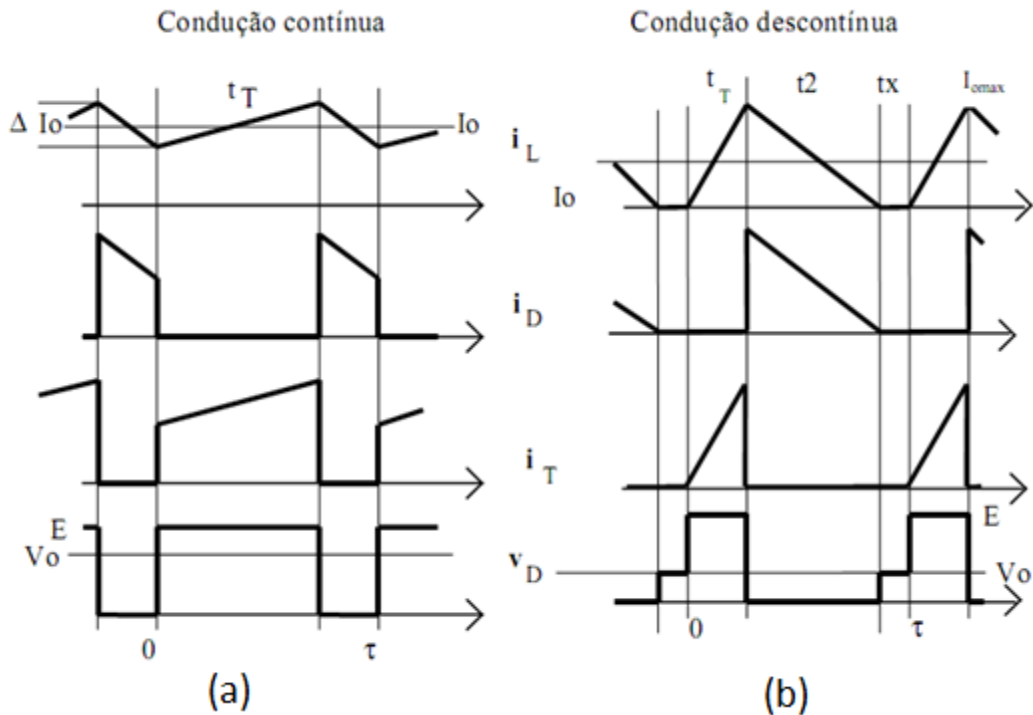


Figura 3.7 – (a) Formas de onda do modo de condução contínua de corrente; (b) Formas de onda do modo de condução descontinua de corrente [11].

No modo de condução contínua, a tensão média sobre a indutância em regime é nula. Com isso é possível determinar a relação entrada/saída do conversor. A figura 3.8 apresenta a forma de onda da tensão no indutor.

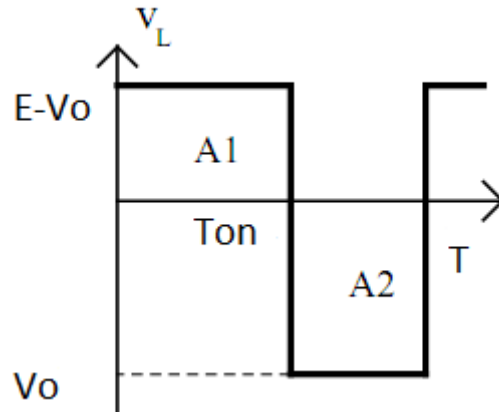


Figura 3.8 – Forma de onda de tensão no indutor em um conversor *buck* [11].

A relação entre a tensão de entrada do conversor (E) e a tensão de saída (V_o) pode ser obtida utilizando-se o critério das áreas iguais na figura 3.8. Como a tensão média no indutor é nula em regime permanente a área acima do eixo de tensão zero (A_1) deve ser igual à área abaixo do eixo (A_2).

$$A_1 = (E - V_o) \times t_{on} , \quad (3.4)$$

$$A_2 = V_o \times (T - t_{on}) . \quad (3.5)$$

Igualando-se as equações 3.4 e 3.5 e utilizando-se a equação 3.1, obtém - se a expressão do ganho do conversor *buck*:

$$G = \frac{V_o}{E} = D , \quad (3.6)$$

em que D é o ciclo de trabalho, divisão do tempo em que a chave permanece ligada (T_{on}) pelo período total de chaveamento (T).

3.4.2. Conversor *Boost* – Elevador de Tensão

Neste conversor a tensão de saída (V_o) é maior que a tensão de entrada (E). Isto é possível porque quando a chave (T) está conduzindo a tensão da fonte (E) é toda aplicada no indutor (L), o qual acumula energia que é enviada ao capacitor (C_o) e à carga (R_o) quando a chave (T) deixa de conduzir. No período de condução da chave o diodo (D) está reversamente polarizado, pois a tensão de saída é maior que a tensão de entrada (E)[11].

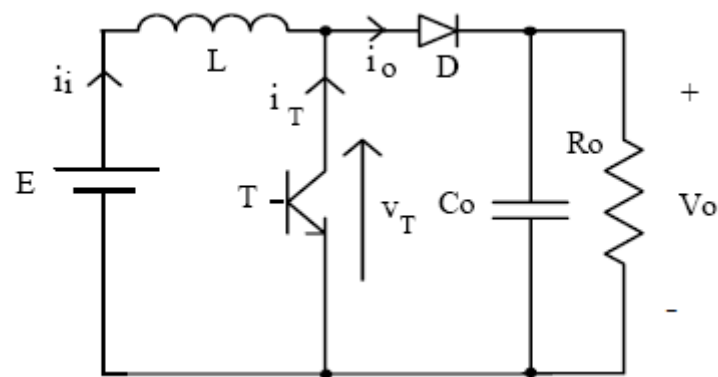


Figura 3.9- Conversor *boost* [10].

Uma desvantagem do conversor *boost* é que a corrente de saída é sempre descontínua. A corrente de entrada pode ser contínua ou descontínua, caracterizando os modos de condução contínua ou descontínua de corrente.

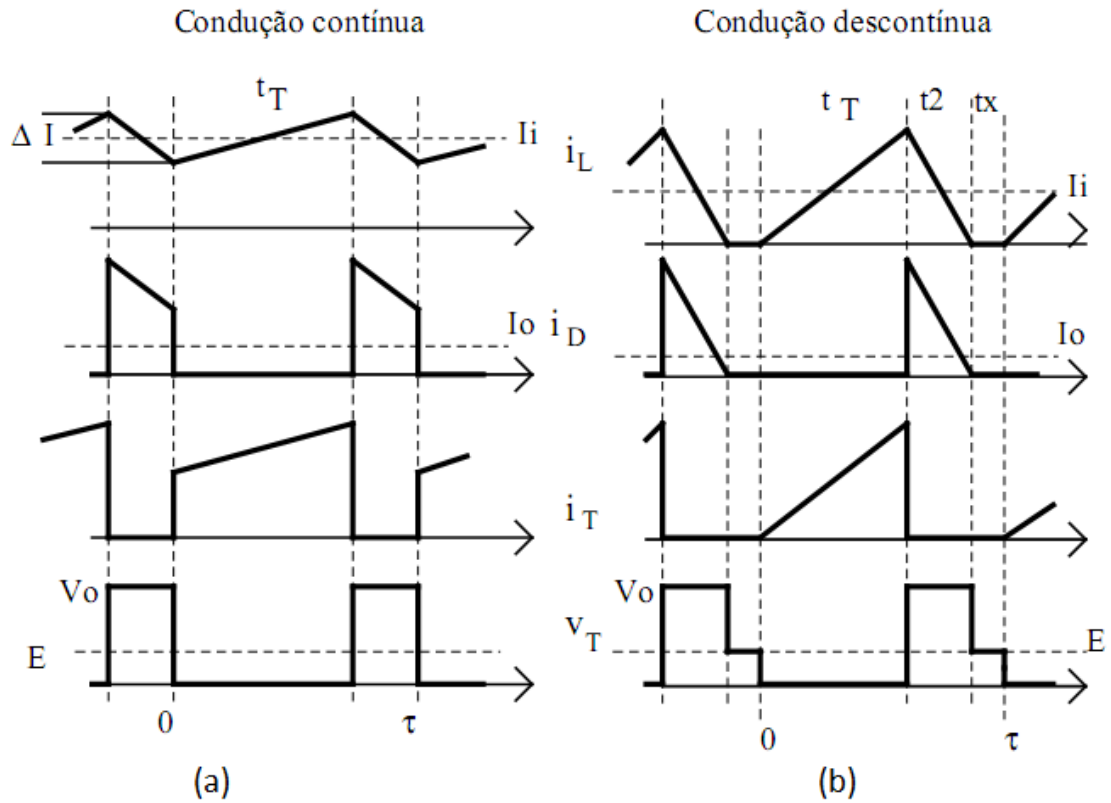


Figura 3.10 – (a) Formas de onda do modo de condução contínua de corrente; (b) Formas de onda do modo de condução descontínua de corrente [11].

No modo de condução contínua, a tensão média sobre a indutância, em regime, é nula. Com isso é possível determinar a relação entrada/saída do conversor. A figura 3.11 apresenta a forma de onda da tensão no indutor.

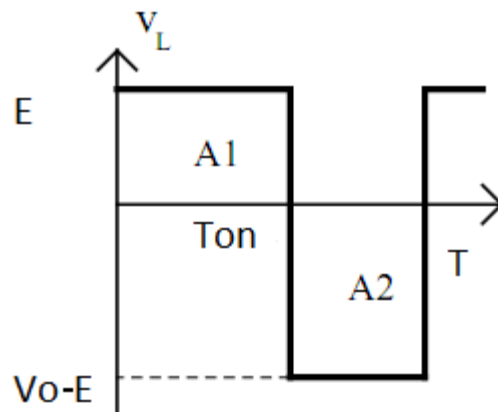


Figura 3.11– Forma de onda de tensão no indutor em um conversor *boost*.

A relação entre a tensão de entrada do conversor (E) e a tensão de saída (V_o) pode ser obtida utilizando-se o critério das áreas iguais na figura 3.11. Como a tensão média no indutor é nula em regime permanente a área acima do eixo de tensão zero (A_1) deve ser igual à área abaixo do eixo (A_2):

$$A_1 = E \times t_{on} \quad (3.7)$$

$$A_2 = (V_o - E) \times (T - t_{on}) . \quad (3.8)$$

Igualando-se as equações 3.7 e 3.8 e utilizando-se a equação 3.1, obtém - se a expressão do ganho do conversor *boost*:

$$G = \frac{V_o}{E} = \frac{1}{1-D} . \quad (3.9)$$

3.4.3. Conversor *Buck-Boost* – Abaixador / Elevador de Tensão.

Nesta topologia de conversor é possível obter na saída (V_o) uma tensão maior ou menor que a tensão de entrada (E). Porém, a tensão de saída apresenta uma polaridade oposta à tensão de entrada.

Quando a chave (T) está conduzindo, o indutor recebe toda a tensão da fonte. O diodo neste momento não conduz e o capacitor (C_o) alimenta a carga (R_o) mantendo a tensão de saída constante. No momento em que a chave (T) deixa de conduzir, a corrente no indutor passa a circular pelo diodo e a energia armazenada no indutor é transferida para o capacitor e para a carga[11].

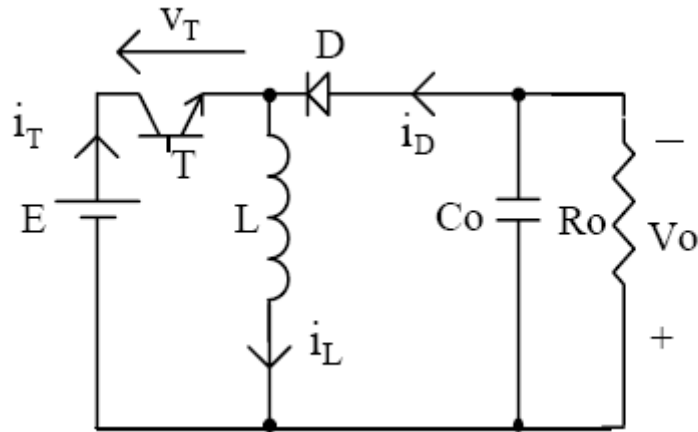


Figura 3.12- Conversor *buck – boost* [11].

No conversor *buck – boost* tanto a corrente de entrada quanto a corrente de saída são descontínuas e a corrente no indutor pode ser contínua ou descontínua, caracterizando os modos de condução contínua ou descontínua de corrente.

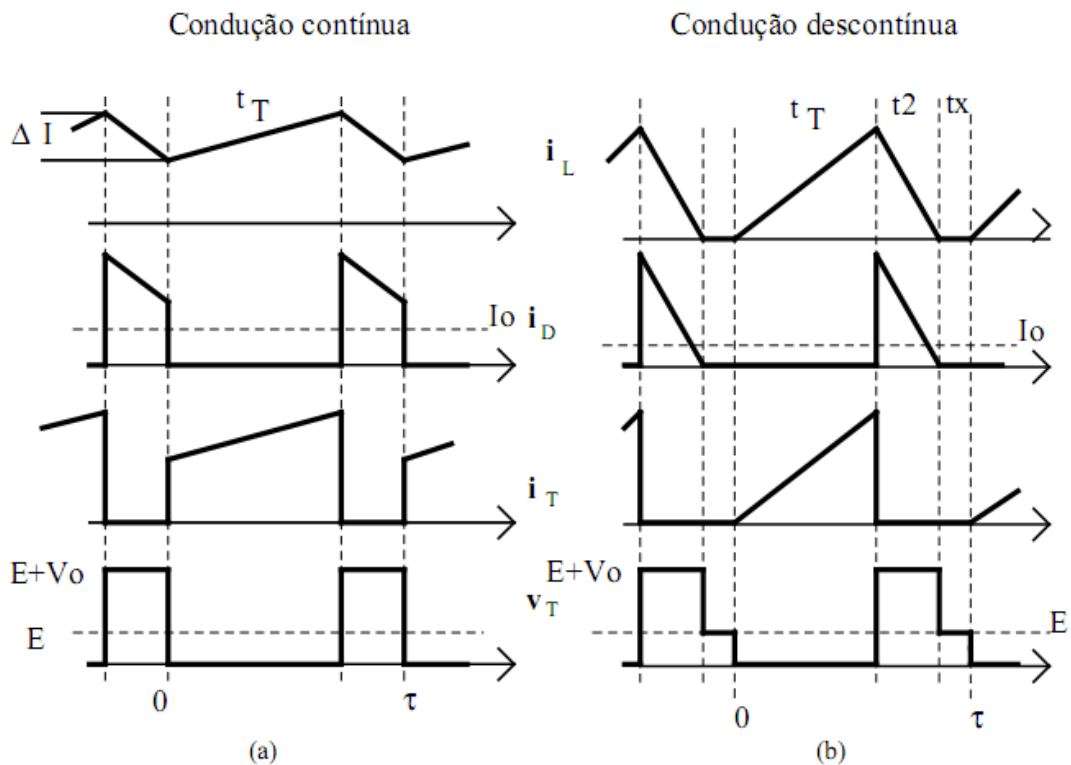


Figura 3.13 – (a) Formas de onda do modo de condução contínua de corrente; (b) Formas de onda do modo de condução descontínua de corrente [11].

No modo de condução contínua, a tensão média sobre a indutância, em regime, é nula. Com isso é possível determinar a relação entrada/saída do conversor. A figura 3.14 apresenta a forma de onda da tensão no indutor.

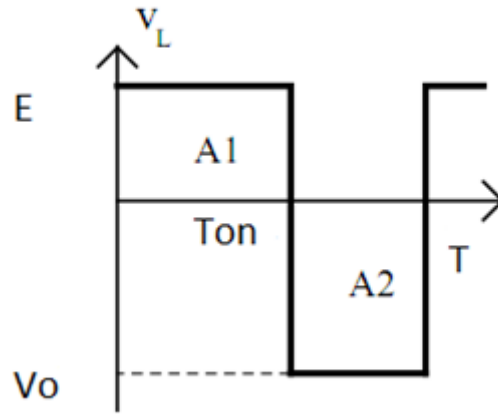


Figura 3.14 – Forma de onda de tensão no indutor em um conversor *Buck - Boost*.

A relação entre a tensão de entrada do conversor (E) e a tensão de saída (V_o) pode ser obtida utilizando-se o critério das áreas iguais na figura 3.14. Como a tensão média no indutor é nula em regime permanente, a área acima do eixo de tensão zero (A_1) deve ser igual à área abaixo do eixo (A_2):

$$A_1 = E \times t_{on} \quad (3.10)$$

$$A_2 = V_o \times (T - t_{on}) . \quad (3.11)$$

Igualando-se as equações 3.10 e 3.11 e utilizando-se a equação 3.1, obtém - se a expressão do ganho do conversor *buck - boost*:

$$G = \frac{V_o}{E} = \frac{D}{1-D} . \quad (3.12)$$

CAPÍTULO 4 – CONVERSORES ELEVADORES NÃO- ISOLADOS DE ALTO GANHO

A saída de uma célula combustível apresenta nível baixo de tensão, por isso é necessário elevar a tensão, ainda em corrente contínua, para que o inversor seja alimentado em um nível em que seja possível alimentar cargas diretamente ou alimentar um transformador para elevar a tensão a níveis de distribuição.

Existem diversas topologias de conversores não isolados que apresentam ganho de tensão elevado, como por exemplo, topologias em cascata, multiníveis, interleaved, ultra-lift luo, fly-inductor. Neste trabalho serão abordadas as topologias do conversor *boost* em cascata, multinível e *interleaved* por serem mais viáveis de utilização.

4.1 Conversor *Boost* em Cascata

O conversor *boost* em cascata consiste na associação de conversores *boost* de modo que o estágio de saída de um conversor atua como estágio de entrada de outro conversor. Esta topologia permite alcançar uma elevação de tensão muito grande, o que não seria possível utilizando um estágio único.

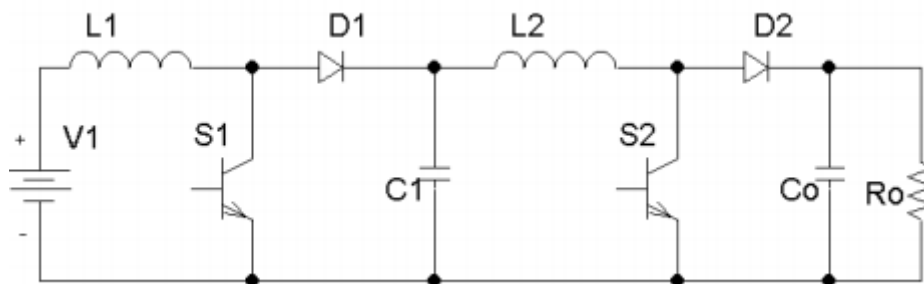


Figura 4.1 – Conversor *boost* em cascata [12].

A figura 4.1 ilustra a associação de dois conversores *boost* em cascata. Para efeito de simplificação do circuito de controle das chaves, e para evitar o batimento de frequência, as chaves S1 e S2 são acionadas simultaneamente. Desta forma os indutores L1 e L2 são carregados ao mesmo tempo. A figura 4.2 apresenta as formas de onda típicas de um conversor *boost* em cascata.

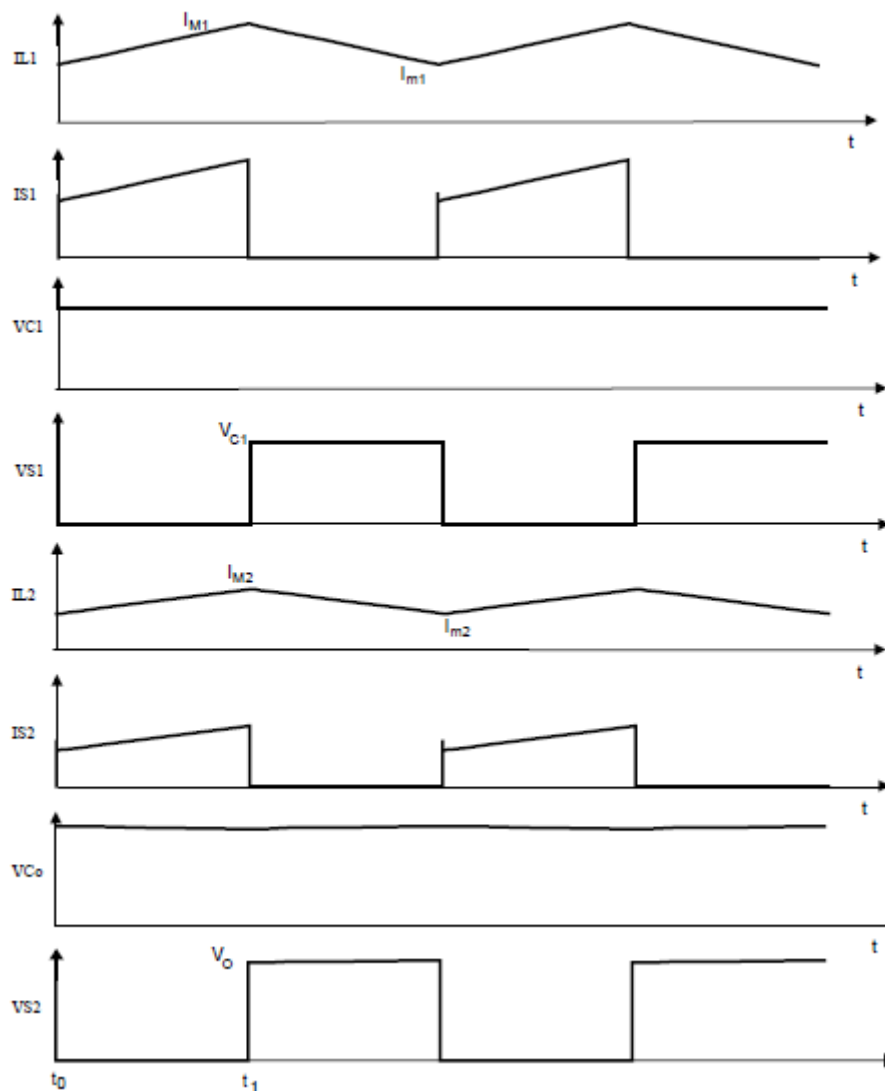


Figura 4.2 – Formas de onda típicas de um conversor *boost* em cascata [12].

A topologia apresentada na figura 4.1 pode ser simplificada com a utilização de apenas uma chave.

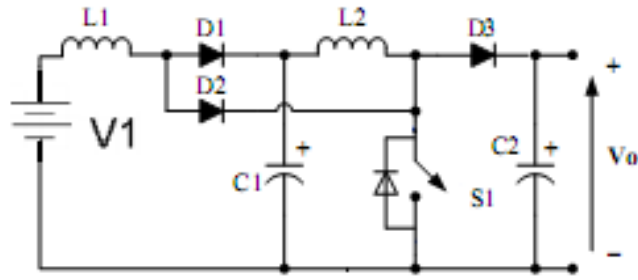


Figura 4.3 – Conversor *boost* em cascata com apenas uma chave de potência [13].

Reposicionando a chave S1 e incluindo o diodo D2 no circuito é possível carregar os dois indutores ao mesmo tempo. O uso de apenas uma chave (S1) reduz as perdas por chaveamento. Em momentos de condução da chave, o indutor L1 fica submetido à tensão de entrada da fonte CC e o indutor L2 ao valor da tensão existente no capacitor C1. Desta forma, o primeiro *boost* eleva a tensão da fonte para o valor da tensão de C1 e o segundo *boost* eleva o valor da tensão de C1 para o valor da tensão de saída [12].

A expressão do ganho de tensão do conversor *boost* em cascata é dada pelo produto dos ganhos individuais de cada conversor utilizado. No caso de apenas dois conversores em cascata a expressão do ganho é apresentada na equação 4.1:

$$\frac{V_0}{V_i} = \left(\frac{1}{1-D} \right)^2. \quad (4.1)$$

4.2 Conversor *Boost* Multinível

No conversor multinível é possível a utilização de chaves de potência de capacidades de tensão e corrente menor que nas demais topologias utilizadas no mesmo nível de tensão. Isto é possível porque estas grandezas são divididas entre os semicondutores

que compõem o conversor, ou seja, as chaves ficam submetidas a um valor de tensão correspondente à metade da tensão de saída.

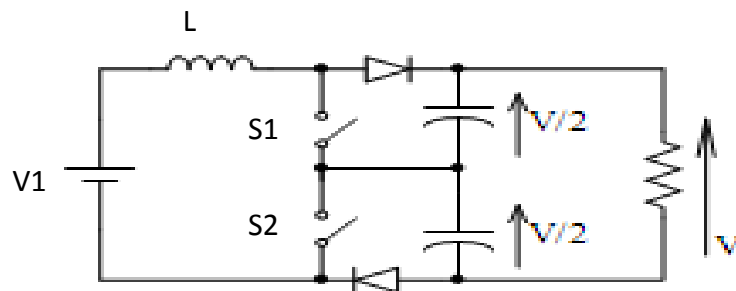


Figura 4.4 Conversor *boost* multinível [14]

As chaves são acionadas com o mesmo período de chaveamento, mas com uma defasagem de acionamento entre elas. Este tipo de chaveamento leva o circuito a apresentar as quatro configurações mostradas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Etapas de condução do Conversor *boost* multinível.

| Etapa | S1 | S2 |
|--------------|------------|------------|
| 1 | Conduzindo | Conduzindo |
| 2 | Conduzindo | Bloqueada |
| 3 | Bloqueada | Conduzindo |
| 4 | Bloqueada | Bloqueada |

As etapas de funcionamento do conversor *boost* multinível são apresentadas na figura 4.5.

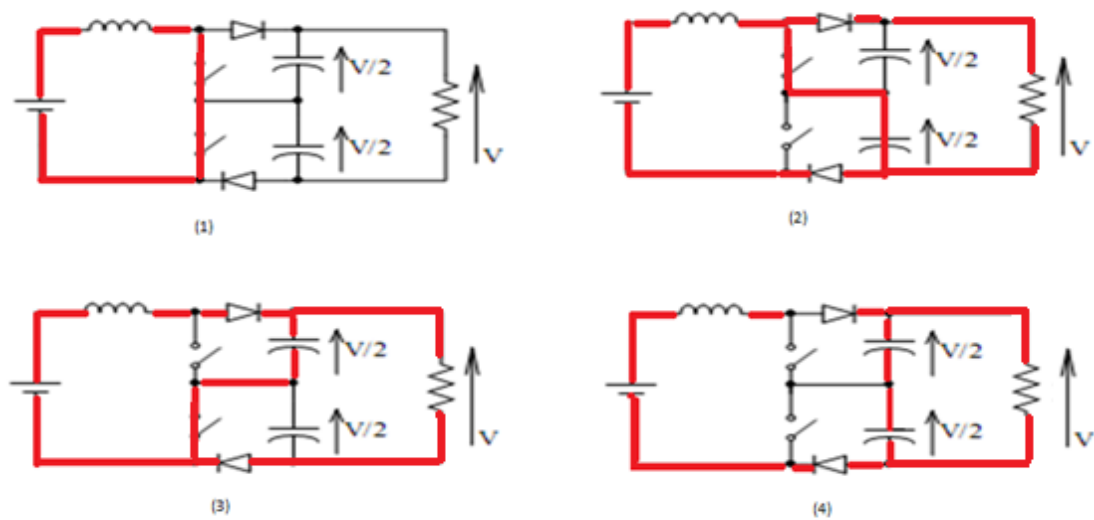


Figura 4.5 - Etapas de condução do conversor *boost* multinível.

A partir da análise das configurações assumidas pelo conversor no chaveamento PWM com pulsos defasados de meio ciclo de trabalho para cada chave, o ganho de tensão deste conversor é apresentado na equação 4.2:

$$\frac{V_i}{V_0} = \frac{1}{1-D} \quad , \quad (4.2)$$

onde D é o ciclo de trabalho.

4.3 Conversor *Boost Interleaved*

A topologia *interleaved* consiste na associação em paralelo de dois conversores *boost* tradicionais idênticos. Esta configuração foi proposta como uma forma de superar limitações tecnológicas [13]. Assim como na topologia multinível, as chaves são acionadas com a mesma frequência, mas com defasagem entre os pulsos de uma chave para outra.

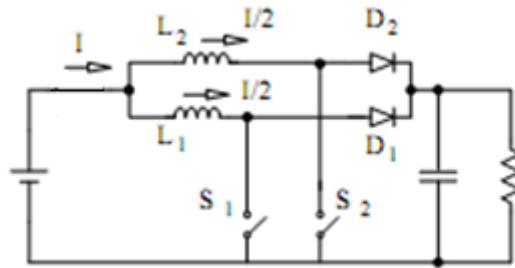


Figura 4.6 – Conversor *boost interleaved* [13].

Utilizando-se esta topologia é possível atingir valores de potência muito superiores aos dos conversores operando isoladamente. A existência dos diodos D1 e D2 impede a troca de energia entre os conversores da associação.

A figura 4.7 apresenta as formas de onda típicas do conversor *interleaved* com modulação PWM com defasagem de meio período entre os pulsos de cada chave.

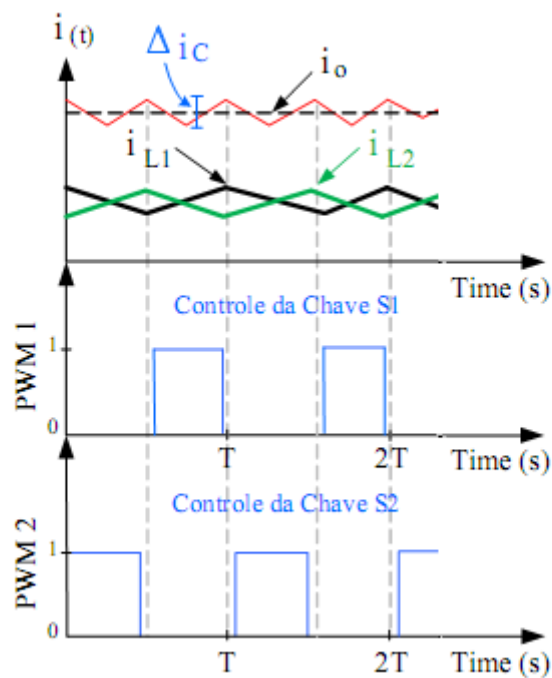


Figura 4.7 – Formas de ondas típicas do conversor *interleaved* [12].

Como este conversor é a associação em paralelo de dois conversores *boost*, o seu ganho de tensão é o mesmo de quando está operando isoladamente. O ganho de tensão do conversor *boost interleaved* é apresentado na equação 4.3:

$$\frac{V_i}{V_0} = \frac{1}{1-D} . \quad (4.3)$$

CAPÍTULO 5- SIMULAÇÕES

Nas simulações será utilizado o modelo de célula a combustível no Simulink™ do Matlab™, proposto por Wang [15], que consiste na associação de 48 células individuais. Este modelo possui uma potência nominal de 500 W. As figuras 5.1 e 5.2 apresentam as curvas de tensão e potência de saída, respectivamente, da pilha a combustível operando em suas características nominais.

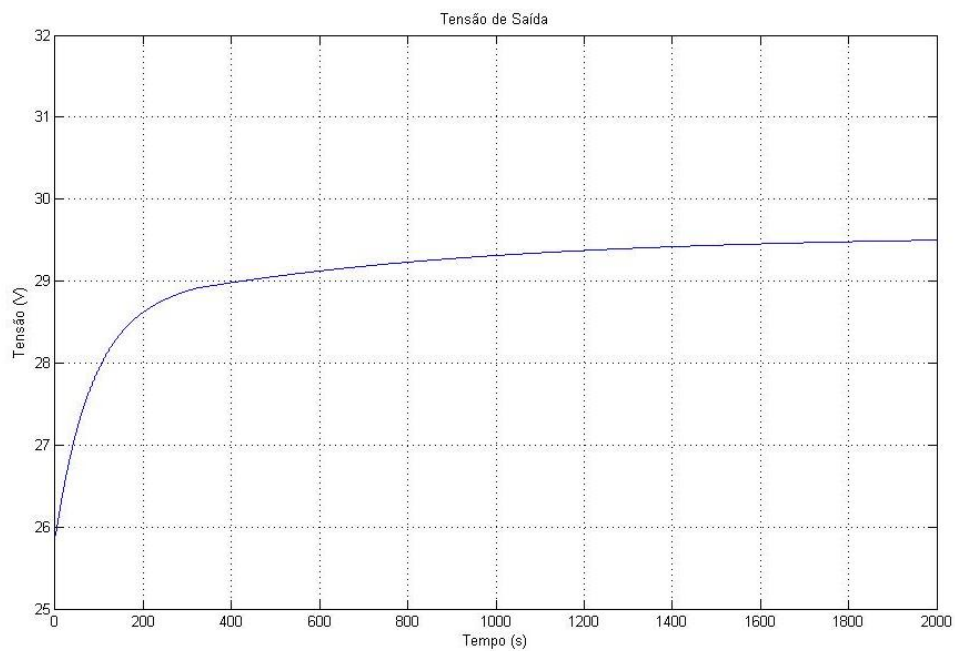


Figura 5.1- Tensão de Saída da Pilha a Combustível.

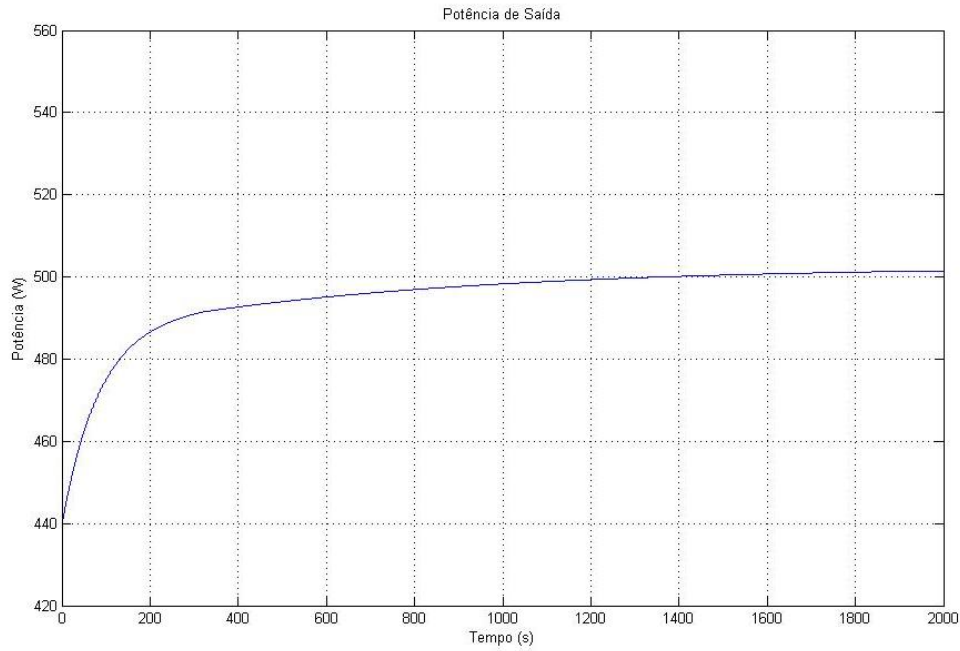


Figura 5.2 – Potência de Saída da Pilha a Combustível.

As simulações que serão apresentadas neste capítulo foram feitas no Simulink™ do Matlab™, utilizando uma fonte de tensão controlada que representa a característica de tensão apresentada na figura 5.1. Nestas simulações dos conversores foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Indutores de 1 mH;
- Capacitores de 560 μ F;
- Cargas formadas com banco de resistências de 500 W com tensão nominal de 50V;
- Frequencia de Chaveamento de 2 kHz;
- Ciclo de trabalho de 30, 50, 70% %;
- MOSFETs controlados com modulação de largura de pulso (PWM);

5.1 Simulações do Conversor *Boost* em Cascata

As figuras 5.3 e 5.4 apresentam as respostas de tensão e corrente, respectivamente, do conversor *boost* em cascata para um ciclo de trabalho de 30%.

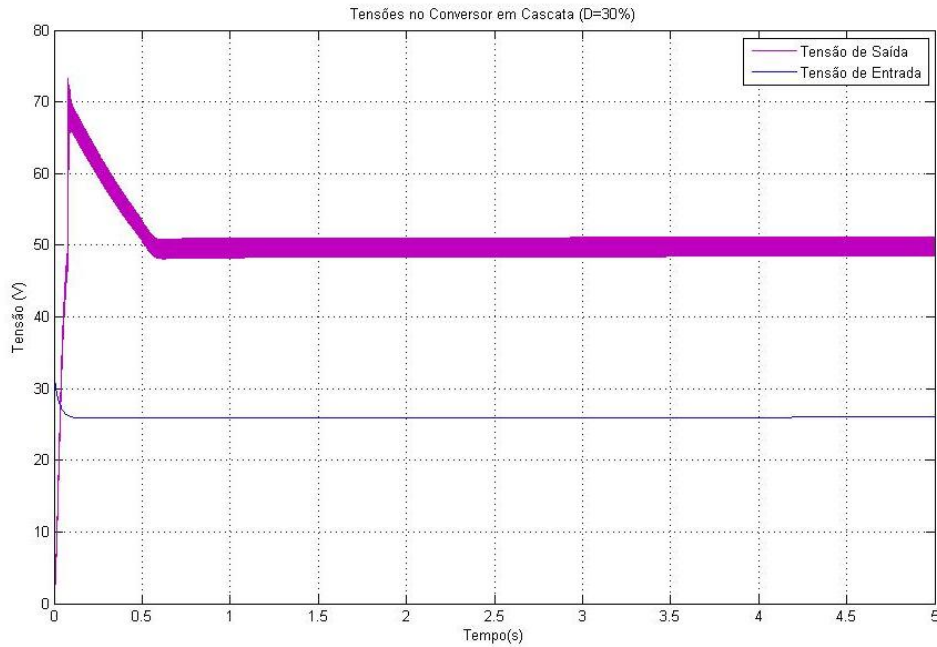


Figura 5.3 – Tensões de Entrada e Saída para $D= 30\%$.

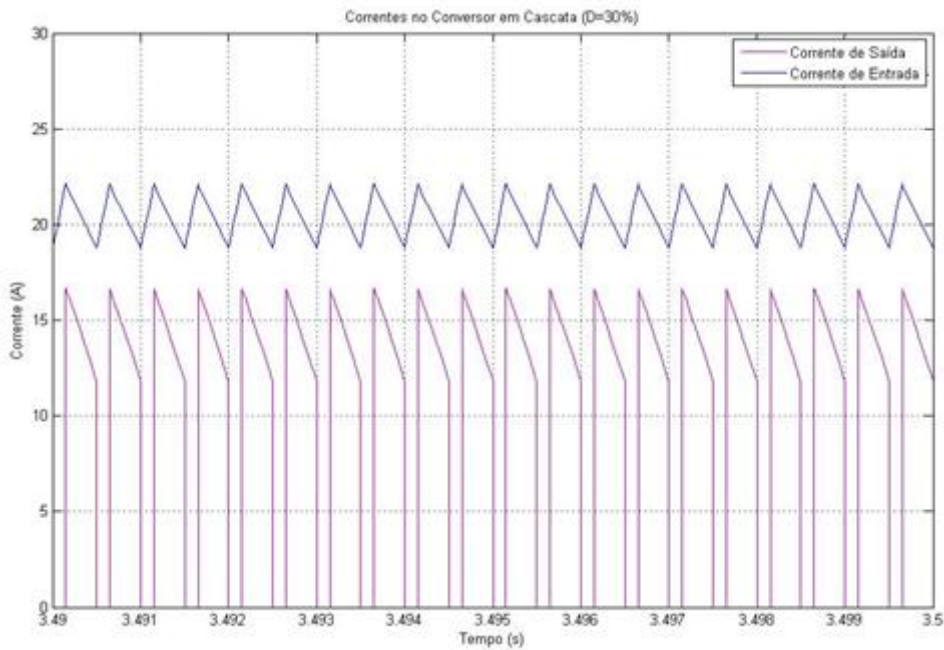


Figura 5.4 – Correntes de Entrada e Saída para $D= 30\%$.

As figuras 5.5 e 5.6 apresentam as respostas de tensão e corrente, respectivamente, do conversor *boost* em cascata para um ciclo de trabalho de 50%.

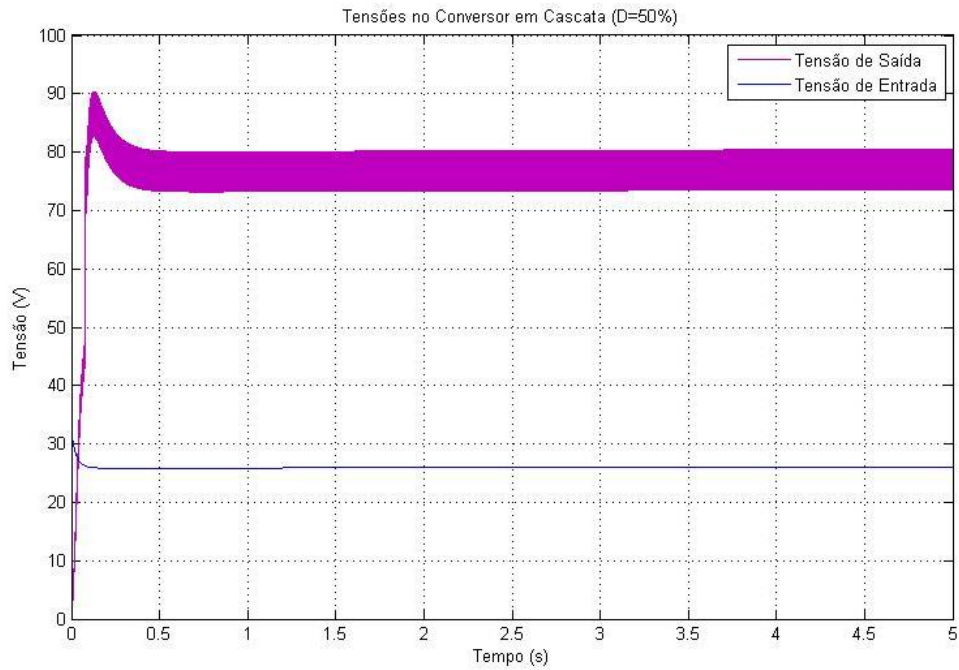


Figura 5.5 – Tensões de Entrada e Saída para D= 50%.

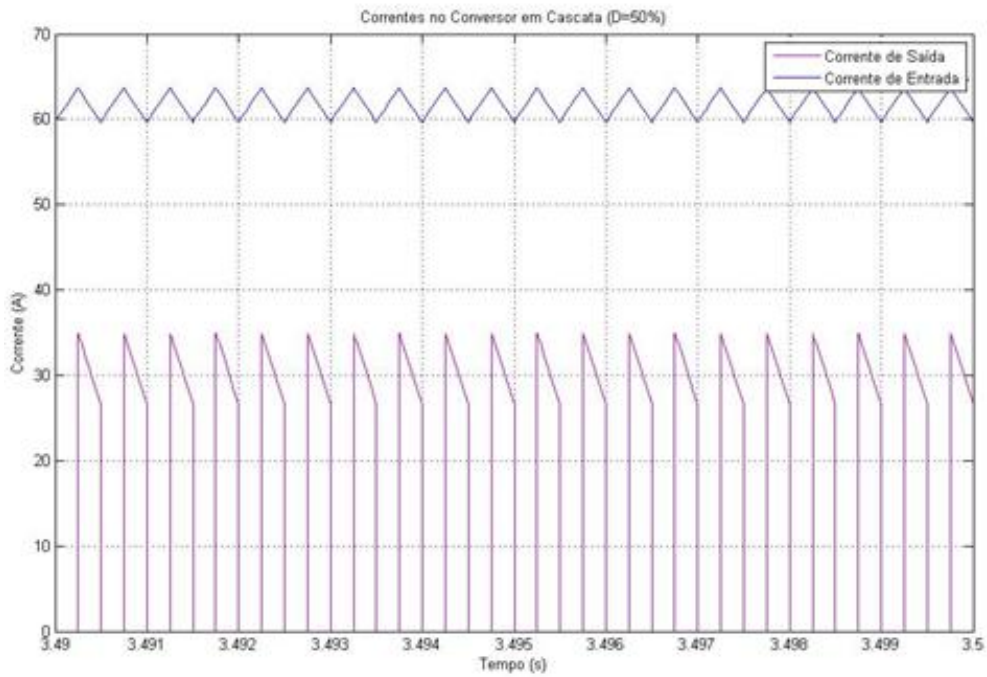


Figura 5.6 – Correntes de Entrada e Saída para D= 50%.

As figuras 5.7 e 5.8 apresentam as respostas de tensão e corrente respectivamente, do conversor *boost* em cascata para um ciclo de trabalho de 70%.

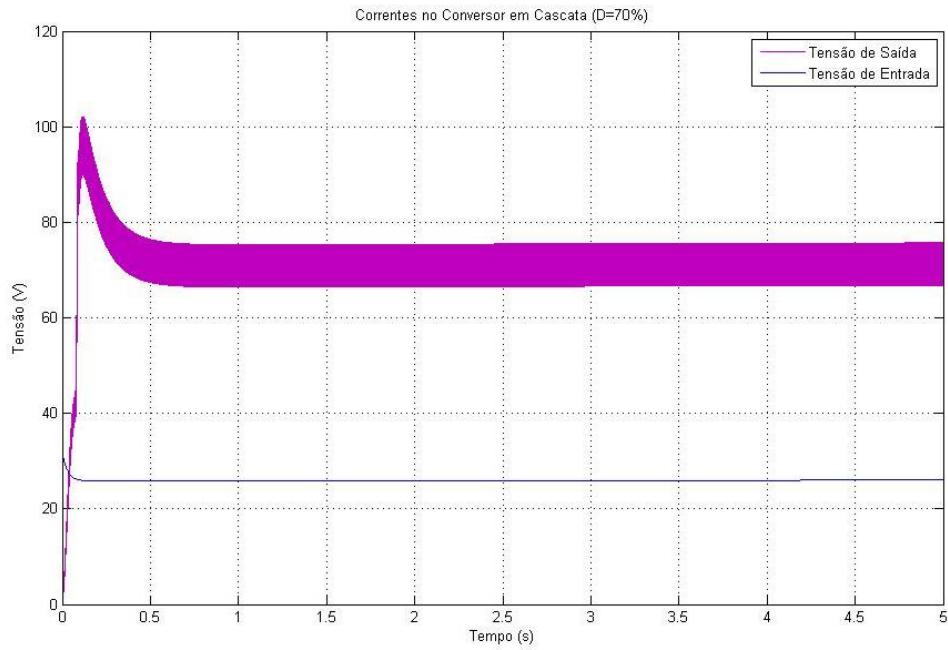


Figura 5.7 – Tensões de Entrada e Saída para D= 70%.

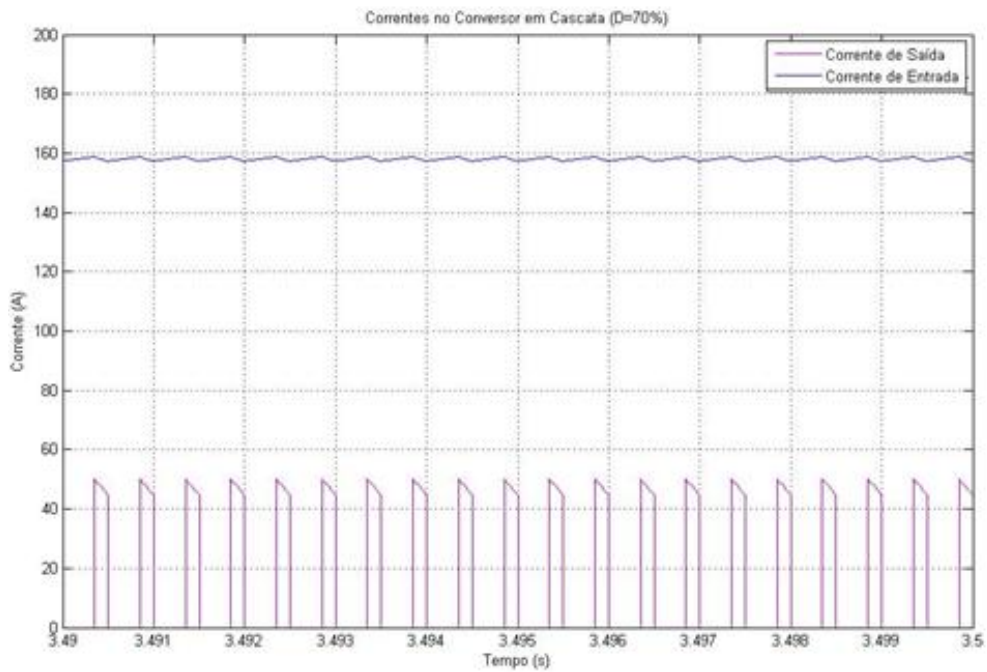


Figura 5.8 – Correntes de Entrada e Saída para D= 70%.

5.2 Simulações do Conversor *Boost* Multinível

As figuras 5.9 e 5.10 apresentam as respostas de tensão e corrente respectivamente, do conversor *boost* Multinível para um ciclo de trabalho de 30%.

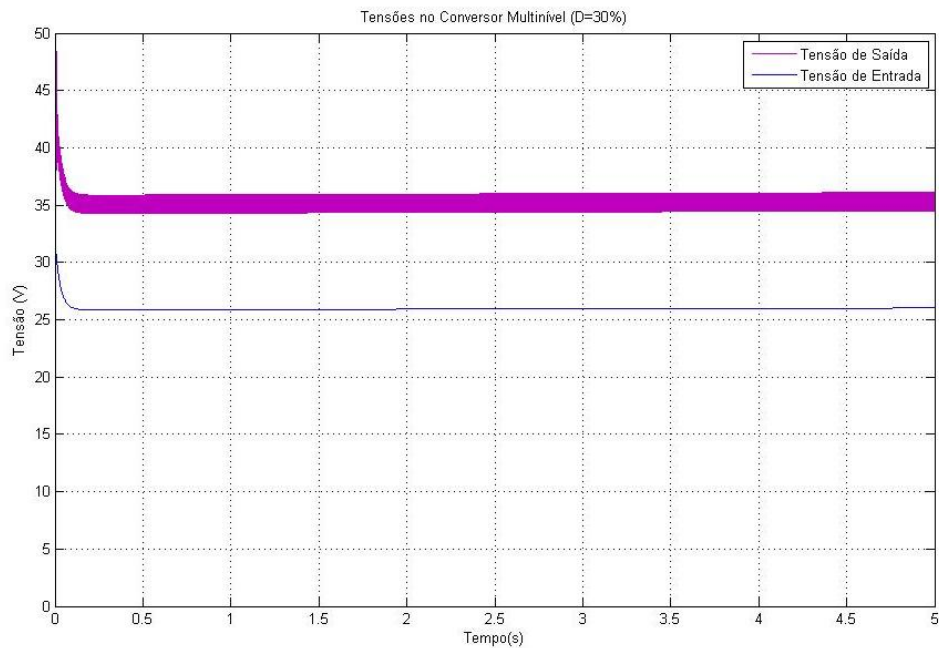


Figura 5.9 – Tensões de Entrada e Saída para D= 30%.

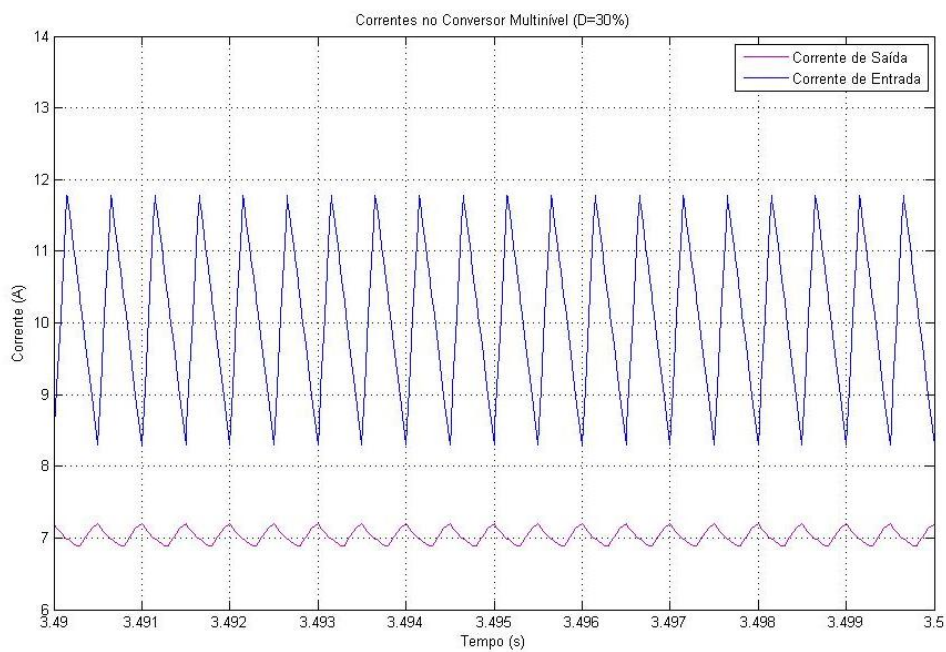


Figura 5.10 – Correntes de Entrada e Saída para D= 30%.

As figuras 5.11 e 5.12 apresentam as respostas de tensão e corrente respectivamente, do conversor *boost* Multinível para um ciclo de trabalho de 50%.

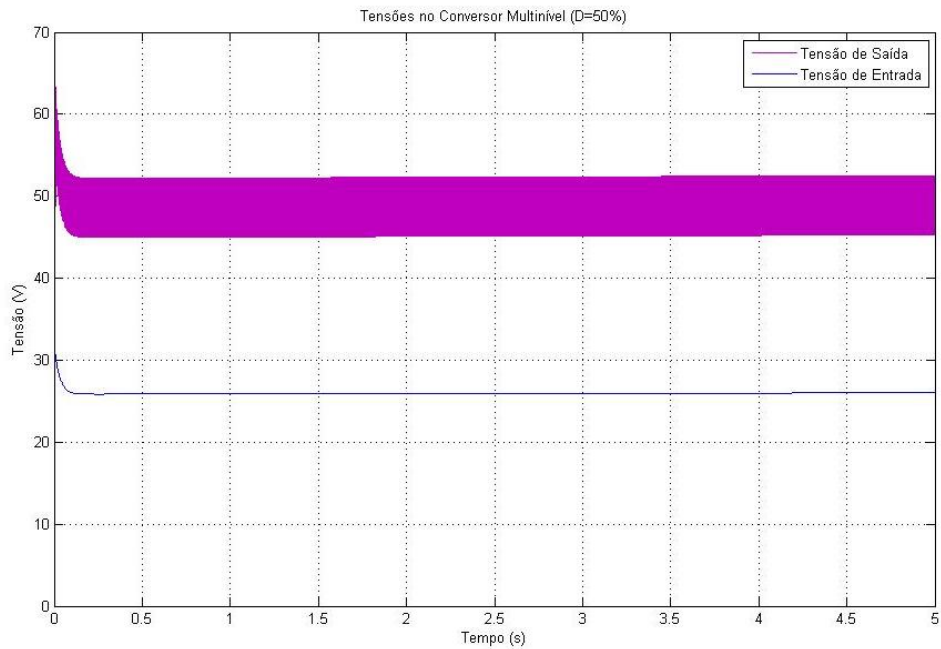


Figura 5.11 – Tensões de Entrada e Saída para D= 50%.

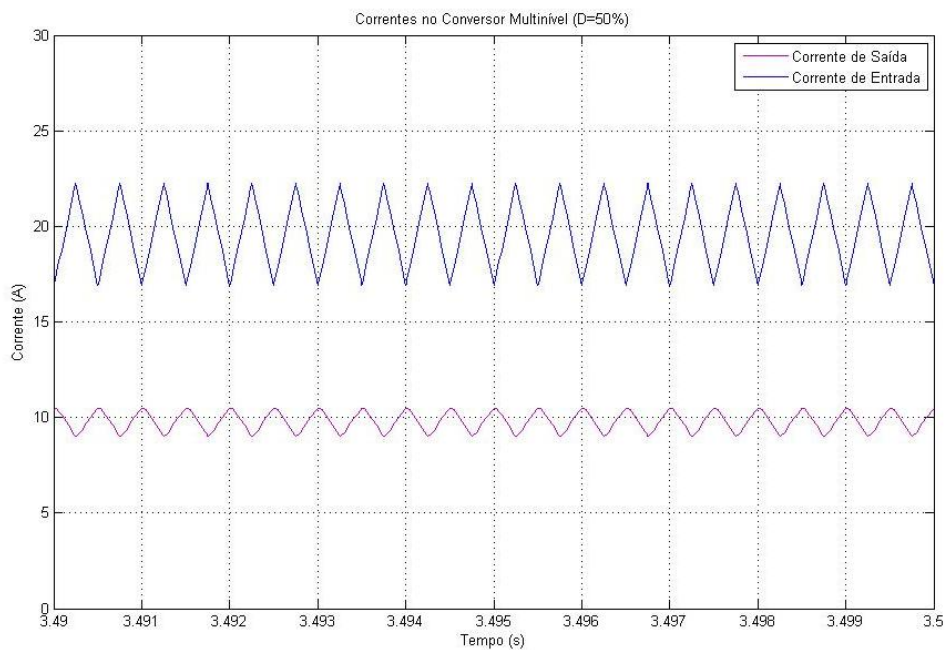


Figura 5.12 – Correntes de Entrada e Saída para D= 50%.

As figuras 5.13 e 5.14 apresentam as respostas de tensão e corrente respectivamente, do conversor *boost* Multinível para um ciclo de trabalho de 70%.

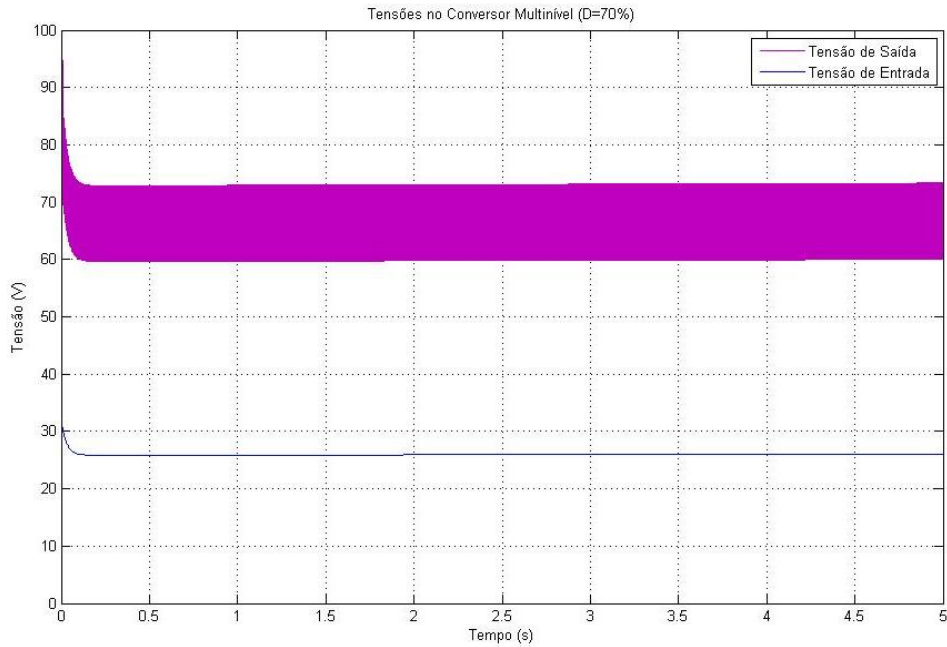


Figura 5.13 – Tensões de Entrada e Saída para D= 70%.

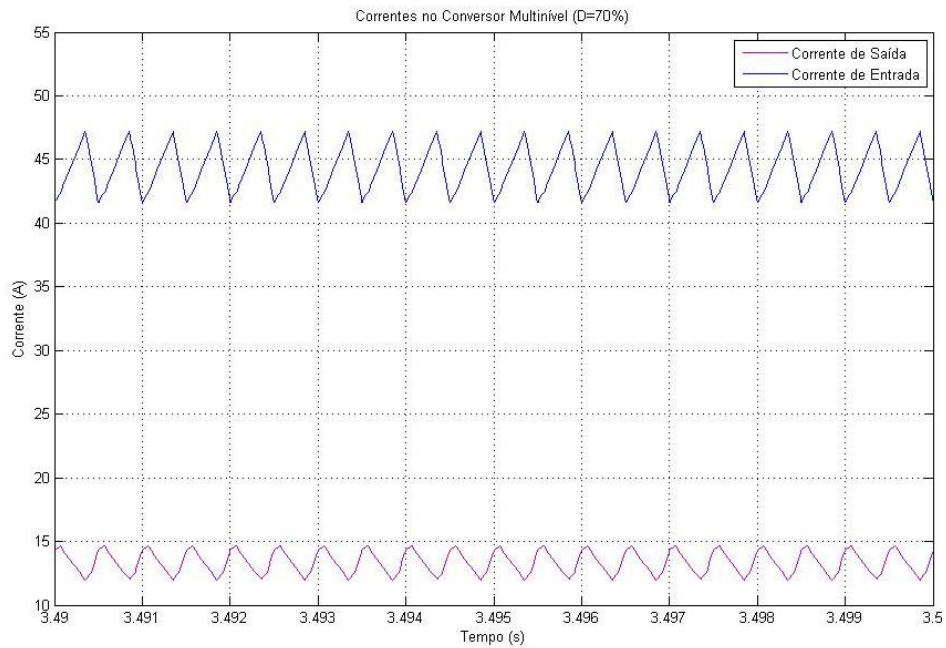


Figura 5.14 – Correntes de Entrada e Saída para D= 70%.

5.3 Simulações do Conversor *Boost Interleaved*

As figuras 5.15 e 5.16 apresentam as respostas de tensão e corrente respectivamente, do conversor *boost interleaved* para um ciclo de trabalho de 30%.

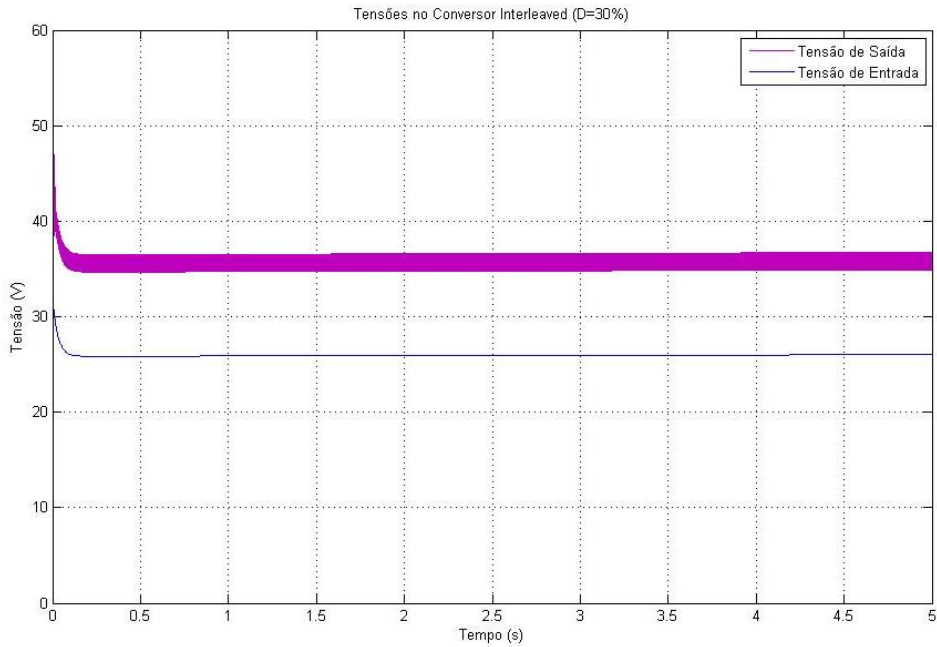


Figura 5.15 – Tensões de Entrada e Saída para $D= 30\%$.

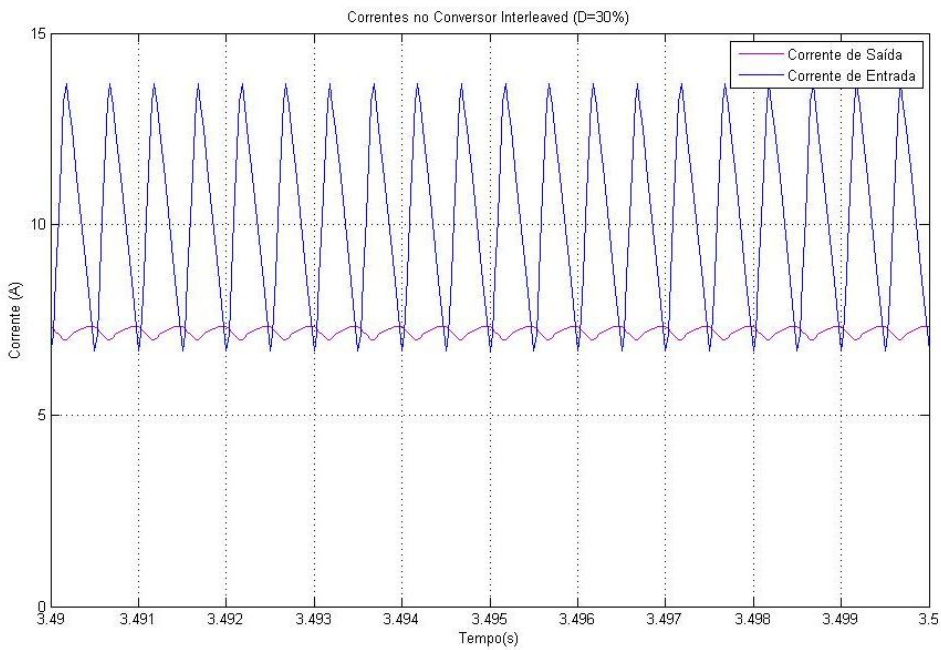


Figura 5.16 – Correntes de Entrada e Saída para $D= 30\%$.

As figuras 5.17 e 5.18 apresentam as respostas de tensão e corrente respectivamente, do conversor *boost interleaved* para um ciclo de trabalho de 50%.

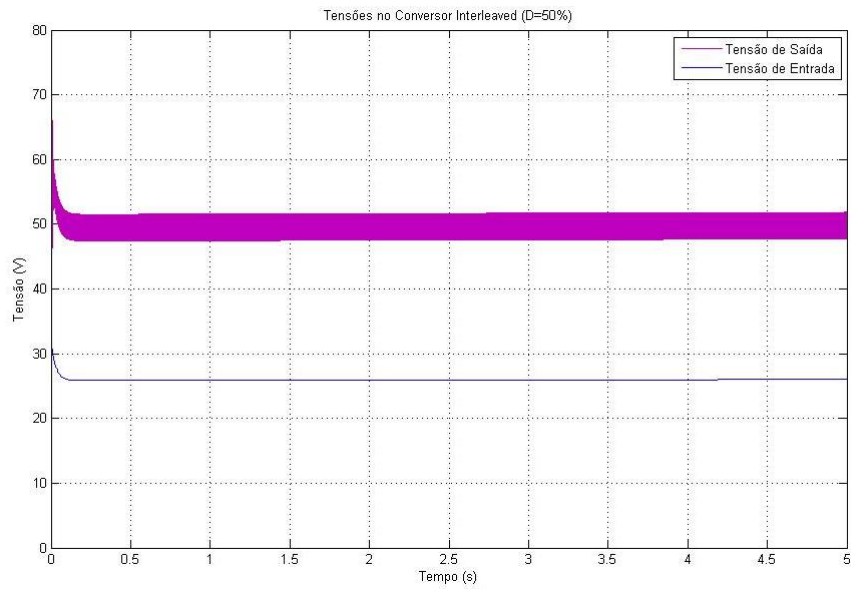


Figura 5.17 – Tensões de Entrada e Saída para D= 50%.

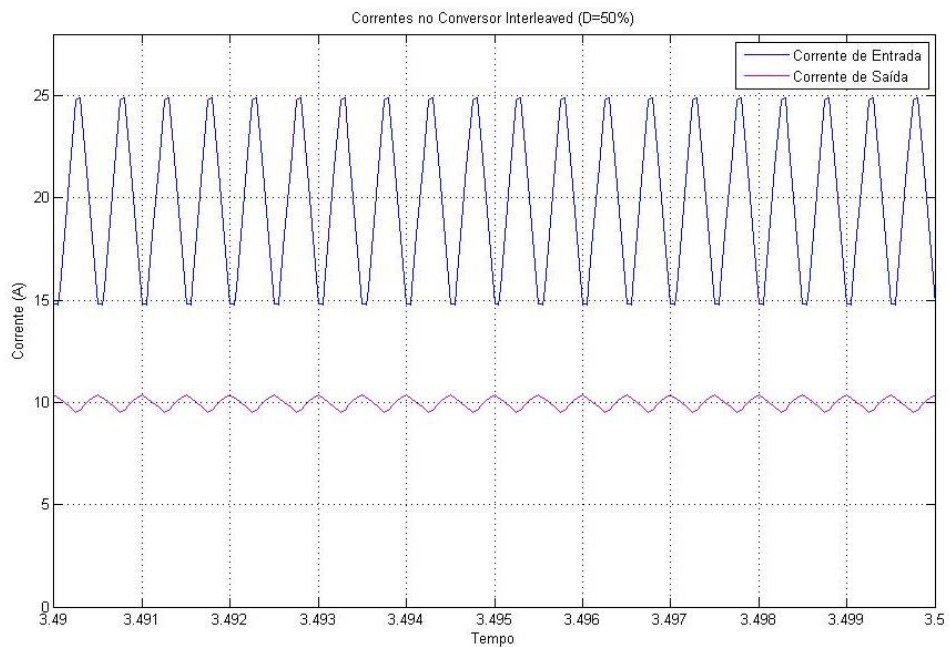


Figura 5.18 – Correntes de Entrada e Saída para D= 50%.

As figuras 5.19 e 5.20 apresentam as respostas de tensão e corrente respectivamente, do conversor *boost interleaved* para um ciclo de trabalho de 70%.

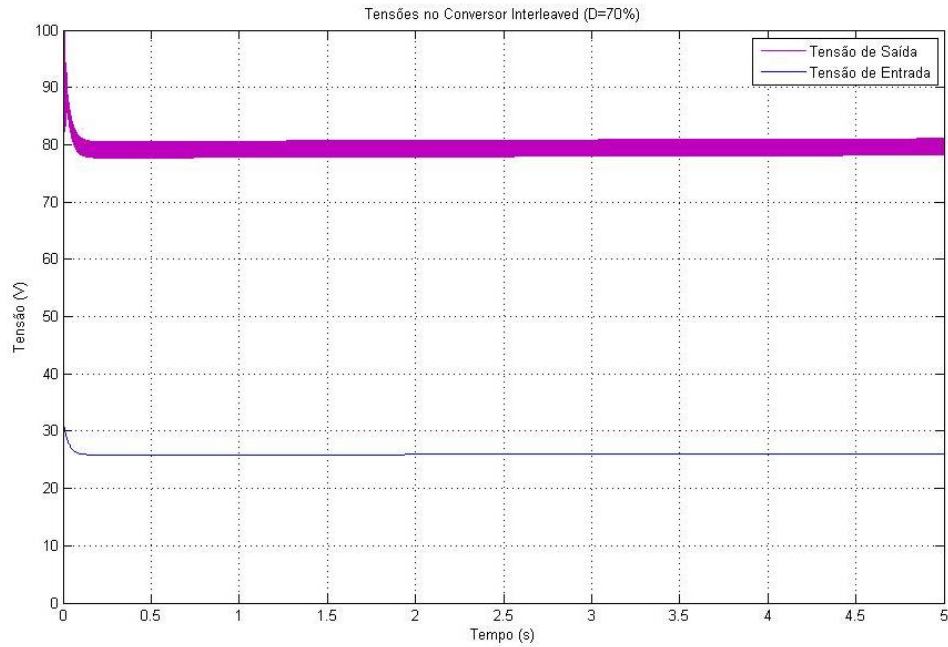


Figura 5.19 – Tensões de Entrada e Saída para D= 70%.

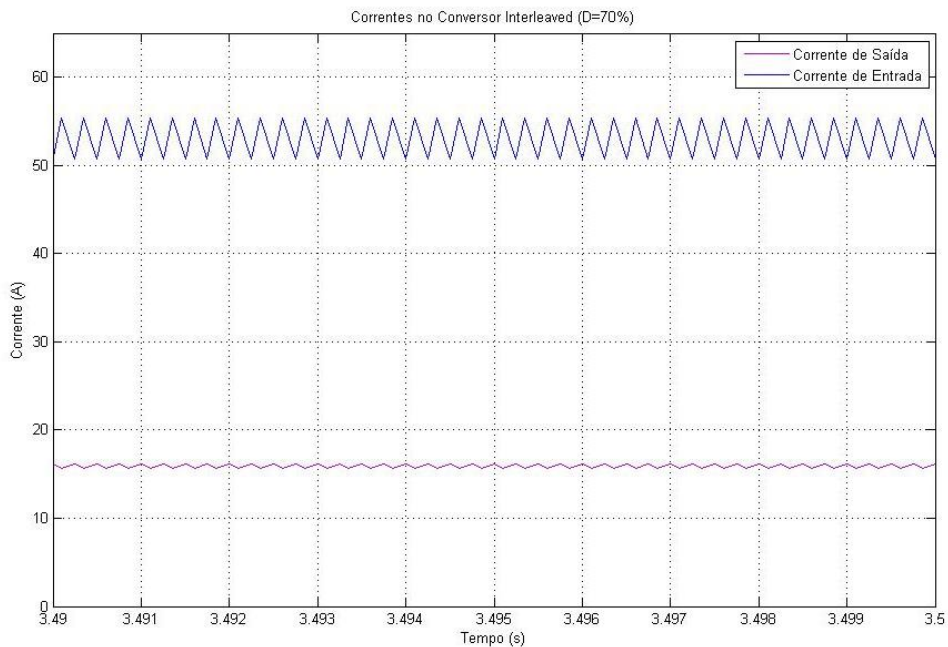


Figura 5.20 – Correntes de Entrada e Saída para D= 70%.

CAPÍTULO 6- ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Tabela 6.1 apresenta um comparativo entre os valores simulados e os valores teóricos obtidos através da equação 4.1.

Tabela 6.1 – Comparação das respostas do conversor em cascata.

| D(%) | Ganho | V_i | V_o Teórico | V_o Simulado | Erro (%) |
|------|-------|-------|---------------|----------------|----------|
| 30 | 2,04 | 27,5 | 56,12 | 50 | 11% |
| 50 | 4 | 27,5 | 110 | 79 | 28% |
| 70 | 11,11 | 27,5 | 305,56 | 75 | 75% |

A Tabela 6.2 apresenta um comparativo entre os valores simulados e os valores teóricos obtidos através da equação 4.2.

Tabela 6.2 – Comparação das respostas do conversor multinível.

| D(%) | Ganho | V_i | V_o Teórico | V_o Simulado | Erro (%) |
|------|-------|-------|---------------|----------------|----------|
| 30 | 1,43 | 27,5 | 39,29 | 35 | 11% |
| 50 | 2,00 | 27,5 | 55 | 50 | 9% |
| 70 | 3,33 | 27,5 | 91,67 | 65 | 29% |

A Tabela 6.3 apresenta um comparativo entre os valores simulados e os valores teóricos obtidos através da equação 4.3.

Tabela 6.3 – Comparação das respostas do conversor *interleaved*.

| D(%) | Ganho | V_i | V_o Teórico | V_o Simulado | Erro (%) |
|------|-------|-------|---------------|----------------|----------|
| 30 | 1,43 | 27,5 | 39,29 | 38 | 3% |
| 50 | 2,00 | 27,5 | 55 | 50 | 9% |
| 70 | 3,33 | 27,5 | 91,67 | 80 | 13% |

O aumento do ciclo de trabalho faz com que a influência das características não ideais dos componentes dos conversores se tornem significativas fazendo com que o erro entre o valor teórico e simulado se torne maior.

No conversor multinível o valor de erro na simulação com ciclo de trabalho de 30% foi maior que na simulação com o ciclo de trabalho de 50% porque a potência de saída do conversor foi menor que a potência solicitada pela carga, causando queda de tensão na saída do conversor.

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÃO

Após a análise e simulação dos conversores é possível realizar uma comparação entre as três topologias abordadas neste trabalho. A tabela 7.1 apresenta esta comparação.

Tabela 7.1 – Comparação entre os Conversores.

| Conversor | Vantagem | Desvantagem |
|---|---|---|
| Conversor <i>Boost em Cascata</i> | Apresenta grandes fatores de elevação de tensão; Utiliza apenas uma chave de potência; | Corrente descontínua na Saída; Recomendado para aplicações de alta tensão e baixa potência; Utiliza dois indutores, o que aumenta a perda ôhmica. |
| Conversor <i>Boost Multinível</i> | Permite a utilização de semicondutores com baixos limites de tensão; | Apresenta variação de tensão nos capacitores do barramento CC, causando também distorções na forma de onda da tensão de saída. |
| Conversor <i>Boost Interleaved</i> | Repartição das correntes entre as chaves do conversor; | Utiliza dois indutores, o que aumenta a perda ôhmica; Necessita de circuitos independentes de controle das chaves. |

Em aplicações que necessitam de potência elevada, como nos sistemas isolados, onde seria preciso utilizar diversas pilhas em paralelo, uma topologia adequada à utilização seria uma combinação entre as topologias multinível e *interleaved*, que iria diminuir os custos com os semicondutores já que seriam utilizados semicondutores com menores valores nominais de tensão e corrente. Com isso seria possível atingir altos valores de tensão e corrente, utilizando chaves com menor capacidade.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se o estudo, projeto e execução de um controle realimentado de tensão controlando o ciclo de trabalho das chaves e a tensão de saída. Com este controle seria possível obter a tensão esperada na saída, sem intervenção manual na operação.

REFERÊNCIAS

- [1] Castro, N. J., Martini, S., Brandão, R., Dantas, G. A., Timponi, R. R. “A Importância das Fontes Alternativas e Renováveis na Evolução da Matriz Elétrica Brasileira”. V Seminário de Geração e Desenvolvimento Sustentável, 2009.
- [2] BEN 2010 - Balanço Energético Nacional, Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2010.
- [3] Site do Ministério de Minas e Energia – Proinfa .
<http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/>. Acesso em 30/10/2010.
- [4] Larminie, J., Dicks, A. “Fuel Cell Systems Explained”. Editora John Wiley & Sons, 2000.
- [5] Serpa, L.A. “ Estudo e Implementação de um Sistema Gerador de Energia Empregando Células A Combustível do Tipo PEM”. Florianópolis – SC, 2004.
- [6] <http://celulasdecombustivel.planetaclix.pt/historia.html> . Acesso em 06/01/2011.
- [7] Da Silva, G. E. “Estudo de modelos em regime permanente de uma célula a combustível de membrana polimérica”. Rio de Janeiro, 2007.
- [8] Serra, E. T., Furtado J. G. M, Soares, G. F. W., Codeceira Neto, A. “Células a Combustível: uma alternativa para geração distribuída e sua inserção no mercado Brasileiro”. Rio de Janeiro: CEPEL, 2005.
- [9] Mohan, N., Underland, T. M., Robbins, W. P. “Power Electronics”. Ed. John Wiley and Sons, 1995.
- [10] Pomílio, J. A. “Técnicas de Modulação em Fontes Chaveadas” – Fontes Chaveadas Capítulo 3, São Paulo. Disponível em “<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor>”.
- [11] Pomílio, J. A. “Topologias Básicas de Fontes Chaveadas” – Fontes Chaveadas Capítulo 5, São Paulo. 2001.
- [12] Peraça , M.T. “ Conversores CC-CC Elevadores Para Aplicação em Equipamentos de Refrigeração” – Dissertação de Mestrado , UFSC, Florianópolis, 2002.

[13] Padilha, F. J. C. “Topologias de Conversores Eletrônicos para Sistemas Fotovoltai-
cos Acoplados à Rede de Distribuição”, Exame de Qualificação para o Doutorado –
COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.

[14] Barbi, I., Braga, H. A. C. “CONVERSORES ESTÁTICOS MULTINÍVEIS –
UMA REVISÃO” . SBA Controle & Automação Vol. 11, no. 01, 2000.

[15] Wang, C., Nehrir, M. H., Shaw, S. R., “Dynamic models and model validation for
PEM fuel cells using electrical circuits”. IEEE Transactions on Energy Conversion 20,
pp. 442– 451, 2005.

APÊNDICE I – ESQUEMAS DE SIMULAÇÃO

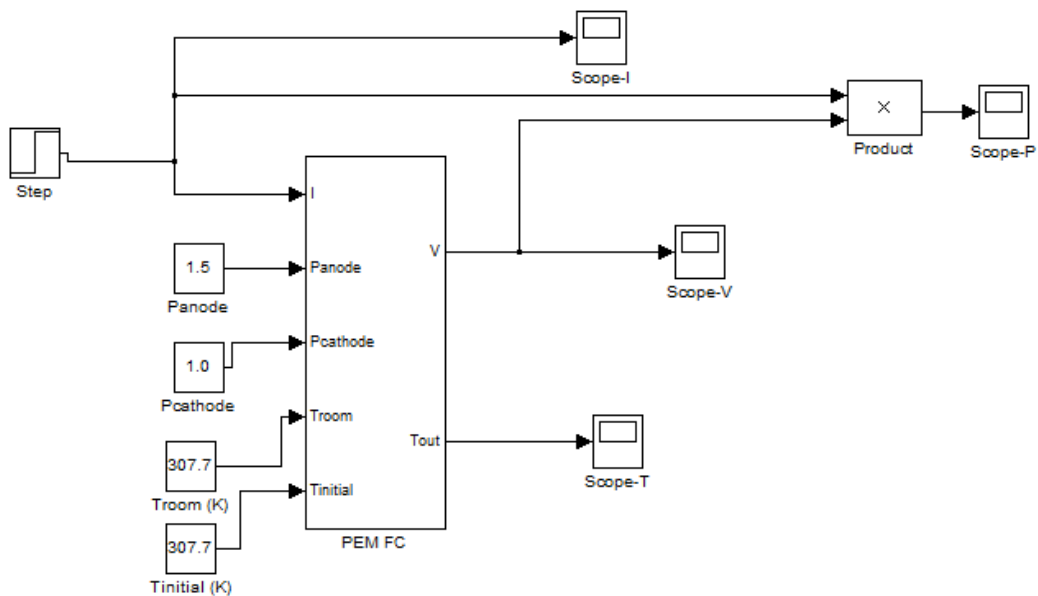


Figura 1 – Esquema de simulação da célula combustível.

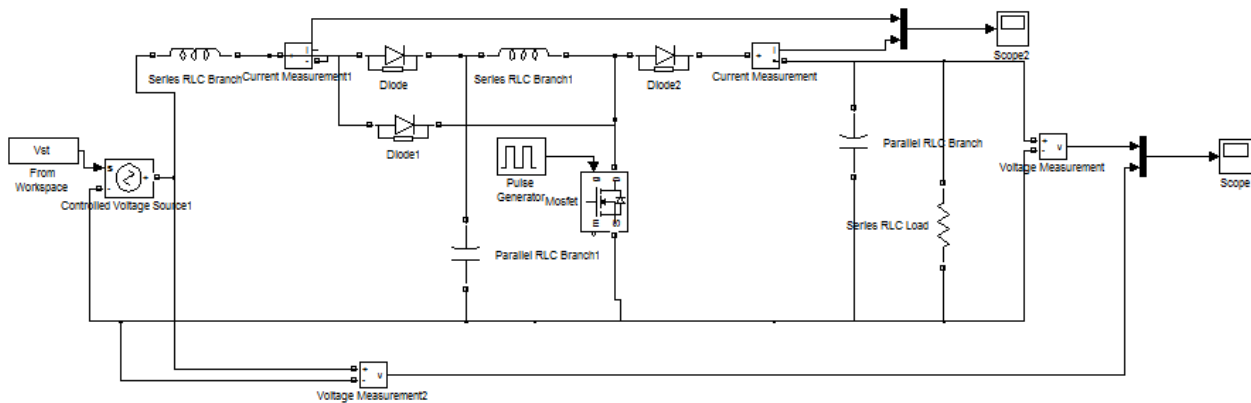


Figura 2 – Esquema de simulação do conversor *boost* em cascata.

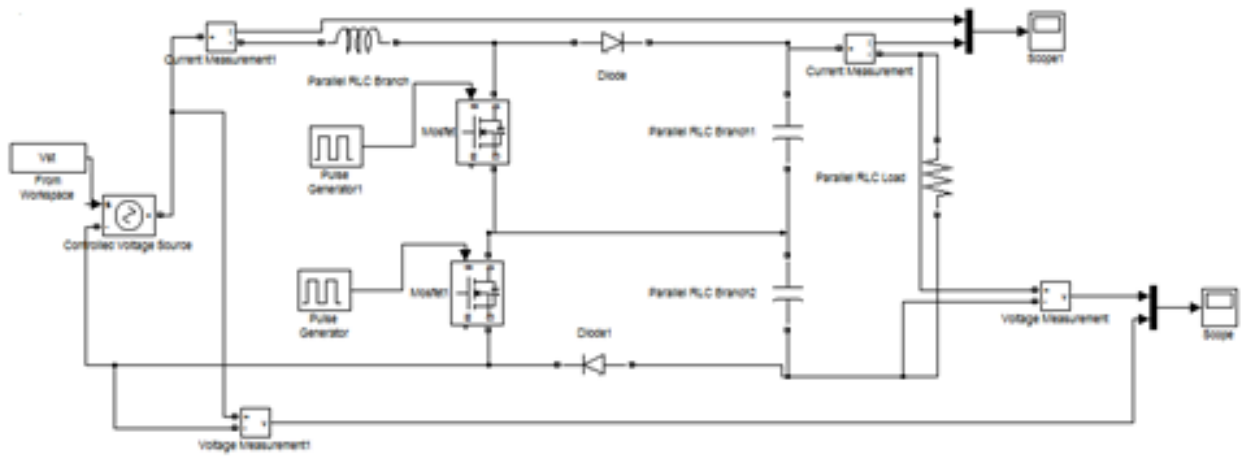


Figura 3 – Esquema de simulação do conversor *boost* multinível.

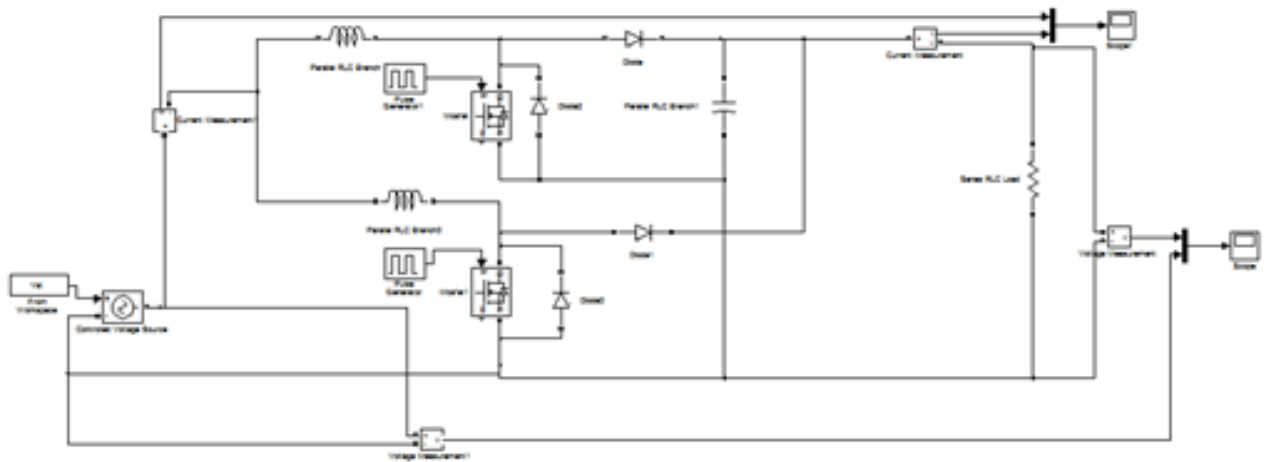


Figura 4 – Esquema de simulação do conversor *boost interleaved*.