

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RICARDO BRANCALIONE MENEGATTI

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS CONVERSORES
BOOST E *BOOST* QUADRÁTICO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2017

RICARDO BRANCALIONE MENEGATTI

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS CONVERSORES *BOOST* E *BOOST* QUADRÁTICO

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica da Coordenação de Engenharia Elétrica - CO-ELT - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Diogo Vargas

PATO BRANCO

2017

TERMO DE APROVAÇÃO

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS CONVERSORES *BOOST* E *BOOST QUADRÁTICO*** do acadêmico **Ricardo Brancalione Menegatti** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° 158 de 2017.

Fizeram parte da banca examinadora os professores:

Prof. Dr. Diogo Vargas

Prof. Dr. Carlos Marcelo de Oliveira Stein

Prof. Dr. Juliano De Pelegrini Lopes

Dedico este trabalho à minha mãe, Idovilde Brancalione Menegatti, e minha avó, Antonia Brancalione, que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos:

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Câmpus Pato Branco, pelo excelente ambiente oferecido aos seus alunos e os profissionais qualificados que disponibiliza para nos ensinar.

Ao professor Diogo Vargas, pela orientação, apoio e confiança.

Aos professores, Carlos Marcelo de Oliveira Stein e Juliano De Pelegrini Lopes, por aceitarem participar da banca e por todas as suas contribuições.

À minha mãe, Idovilde Brancalione Menegatti, e minhas irmãs, Manuela e Sabrina Brancalione Menegatti, por tudo que fizeram por mim ao longo desses anos de formação.

Aos meus avós, Antonia Brancalione e Gregório Carlos Brancalione, pelo apoio e exemplo de pessoas que foram e sempre serão para mim.

À minha namorada, Maria Eduarda Castanha, pelo apoio e atenção em todos os momentos durante esse tempo.

Aos amigos, que fizeram parte da minha formação e que vão continuar presentes em minha vida com certeza.

À todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

MENEGATTI, Ricardo Brancalione. **Estudo comparativo entre os conversores *boost* e *boost* quadrático**. 2017. Monografia. (Trabalho de Conclusão de Curso) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

O presente trabalho buscou estimar e comparar a eficiência dos conversores *boost* e *boost* quadrático, aproximando as condições de operação, como ganho estático e potência, de uma aplicação em um sistema *nanogrid* fotovoltaico isolado. Para tanto, foram realizadas análises matemáticas considerando os conversores ideais e não ideais, buscando nas equações ideais um meio de projetá-los e nas equações não ideais compará-los de maneira mais precisa com a prática. Posteriormente foram realizadas simulações e também a implementação, em malha aberta, de ambos os conversores, para comparações com os resultados teóricos e discussão dos mesmos. Os resultados teóricos e práticos foram próximos e o conversor *boost* apresentou maior eficiência que o conversor *boost* quadrático para o mesmo ganho estático e mesma potência.

Palavras-chave: *Boost*, *Boost* quadrático, Eficiência, Ganho estático.

ABSTRACT

The present work sought to estimate and compare the efficiency of the converters to increase and increase the quadratic, approaching as operating conditions, as static generator and power, of an application in an isolated photovoltaic nanogrid system. For this, mathematical analyzes were performed considering ideal and non-ideal converters, searching in the ideal equations a means of designing them and non-ideal equations more precisely compared with a practice. Simulations and also an open-loop implementation of both converters were performed for comparisons with the theoretical results and discussion of the same. The theoretical and practical results were close and the boost converter was more efficient than the quadratic boost converter for the same static gain and power.

Keywords: *Boost, Quadratic boost, Efficiency, Static gain.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Estrutura genérica de um sistema <i>nanogrid</i> fotovoltaico isolado.	17
Figura 2 –	Topologia do conversor <i>boost</i> .	20
Figura 3 –	Sinal de acionamento da chave para controle da tensão de saída do conversor.	20
Figura 4 –	Comparação entre os ganhos estáticos ideal e não ideal (com efeito ESR do indutor) do conversor <i>boost</i> .	21
Figura 5 –	Topologia do conversor <i>boost</i> em cascata.	22
Figura 6 –	Topologia do conversor <i>boost</i> quadrático.	23
Figura 7 –	Comparação entre os ganhos estáticos ideal e não ideal (com efeito ESR dos indutores) do conversor <i>boost</i> quadrático.	24
Figura 8 –	Comparação entre o ganho estático não ideal (com efeito ESR dos indutores) do conversor <i>boost</i> e conversor <i>boost</i> quadrático.	24
Figura 9 –	Conversor <i>boost</i> não ideal considerado na análise matemática.	26
Figura 10 –	Conversor <i>boost</i> quadrático não ideal considerado na análise matemática.	29
Figura 11 –	Relação entre ganho estático e rendimento do conversor <i>boost</i> em função da razão cíclica.	42
Figura 12 –	Relação entre ganho estático e rendimento do conversor <i>boost</i> quadrático em função da razão cíclica.	43
Figura 13 –	Comparação do ganho estático do CB e do CBQ em função da razão cíclica.	43
Figura 14 –	Comparação do rendimento do conversor <i>boost</i> e do conversor <i>boost</i> quadrático em função da razão cíclica.	44
Figura 15 –	Tensão sobre SW_B e $D1_B$ do conversor <i>boost</i> .	45
Figura 16 –	Tensão sobre SW_{BQ} , $D1_{BQ}$, $D2_{BQ}$ e $D3_{BQ}$ do conversor <i>boost</i> quadrático.	45
Figura 17 –	Tensão de entrada e de saída do protótipo do conversor <i>boost</i> .	48

Figura 18 – Sinal de acionamento, com frequência e tempo de chave ativa permitindo a estimativa da razão cíclica do protótipo do conversor <i>boost</i>	48
Figura 19 – Tensão sobre o diodo $D1_B$ do protótipo do conversor <i>boost</i>	49
Figura 20 – Tensão sobre a chave SW_B do protótipo do conversor <i>boost</i>	49
Figura 21 – Tensão de entrada e de saída do protótipo do conversor <i>boost</i> quadrático.	50
Figura 22 – Sinal de acionamento, com frequência e tempo de chave ativa permitindo a estimativa da razão cíclica do protótipo do conversor <i>boost</i> quadrático.	50
Figura 23 – Tensão sobre o diodo $D1_{BQ}$ do protótipo do conversor <i>boost</i> quadrático.	51
Figura 24 – Tensão sobre o diodo $D2_{BQ}$ do protótipo do conversor <i>boost</i> quadrático.	52
Figura 25 – Tensão sobre o diodo $D3_{BQ}$ do protótipo do conversor <i>boost</i> quadrático.	52
Figura 26 – Tensão sobre a chave SW_{BQ} do protótipo do conversor <i>boost</i> quadrático.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Grandezas elétricas do painel KM185.	35
Tabela 2 – Parâmetros do CB.	36
Tabela 3 – Valor médio das variáveis do CB ideal.	36
Tabela 4 – Valores máximos e mínimos das variáveis do CB ideal.	37
Tabela 5 – Valores das não idealidades consideradas para o CB.	37
Tabela 6 – Comparação entre valores médios teóricos e simulados do CB não ideal.	38
Tabela 7 – Comparação entre valores máximos e mínimos teóricos e simulados do CB não ideal.	38
Tabela 8 – Comparação entre a estimativa de rendimento teórico e simulado do CB não ideal.	38
Tabela 9 – Componentes do CBQ.	39
Tabela 10 – Valor médio das variáveis do CBQ ideal.	39
Tabela 11 – Valores máximos e mínimos das variáveis do CBQ ideal.	40
Tabela 12 – Valores das não idealidade consideradas para o CBQ.	40
Tabela 13 – Comparação entre os valores médios teóricos e simulados do CBQ não ideal.	41
Tabela 14 – Comparação entre valores máximos e mínimos teóricos e simulados do CBQ não ideal.	41
Tabela 15 – Comparação entre a estimativa de rendimento teórico e simulado do CBQ não ideal.	42
Tabela 16 – Variáveis para os projetos dos indutores.	44
Tabela 17 – Comparação entre valores práticos e teóricos das resistências dos indutores dos protótipos CB e CBQ.	47
Tabela 18 – Comparação entre valores teóricos e práticos das variáveis do protótipo do CB para estimativa do rendimento.	48

Tabela 19 – Comparação entre valores teóricos e práticos da tensão do diodo e da chave do protótipo do CB.	49
Tabela 20 – Comparação entre valores teóricos e práticos das variáveis do protótipo do CBQ para estimativa do rendimento.	51
Tabela 21 – Comparação entre valores teóricos e práticos da tensão dos diodos e da chave do protótipo do CBQ.	53
Tabela 22 – Comparação dos valores práticos da estimativa de rendimentos dos protótipos do CB e CBQ.	54
Tabela 23 – Comparação entre os valores teóricos de tensão e corrente na chave SW dos CB e CBQ.	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS GERAIS	12
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	13
2.1.1	Princípio de funcionamento e características	15
2.2	SISTEMA <i>NANOGRID</i>	17
3	CONVERSOR CHAVEADO ELEVADOR CC-CC NÃO ISOLADO	19
3.1	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E CARACTERÍSTICAS	19
3.1.1	Conversor <i>boost</i>	20
3.1.2	Não idealidades dos componentes do conversor	21
3.1.3	Conversor <i>boost</i> em cascata	22
3.1.4	Conversor <i>boost</i> quadrático	23
4	ANÁLISE MATEMÁTICA DOS CONVERSORES	25
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS DE ANÁLISE	25
4.1.1	Conversor <i>boost</i> não ideal	25
4.1.2	Conversor <i>boost</i> ideal	27
4.1.3	Conversor <i>boost</i> quadrático não ideal	29
4.1.4	Conversor <i>boost</i> quadrático IDEAL	32
5	PROJETOS E SIMULAÇÕES DOS PROTÓTIPOS DOS CONVERSORES BOOST E BOOST QUADRÁTICO	35
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS DE PROJETO	35
5.1.1	Conversor <i>boost</i>	36
5.1.2	Conversor <i>boost</i> quadrático	39
5.2	RELAÇÃO DE GANHO ESTÁTICO E RENDIMENTO	42
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46

6.1	IMPLEMENTAÇÃO DOS PROTÓTIPOS DO CB E CBQ	46
6.1.1	Considerações iniciais de implementação	46
6.1.2	Conversor <i>boost</i>	47
6.1.3	Conversor <i>boost</i> quadrático	50
6.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS	53
7	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

1.1 OBJETIVOS GERAIS

Realizar um estudo comparativo entre os conversores de topologia *boost* e *boost* quadrático por meio de análise teórica e simulação. Também projetar e realizar a implementação, em malha aberta, dos protótipos dos conversores com características de uma aplicação em um sistema *nanogrid* fotovoltaico isolado, com o objetivo de realizar uma comparação de ganho estático e rendimento entre os resultados teóricos e práticos dos mesmos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analisar, projetar e simular o conversor *boost*;
2. Analisar, projetar e simular o conversor *boost* quadrático;
3. Apresentar um estudo comparativo entre os conversores pelos resultados obtidos por análise e simulação;
4. Implementar, em malha aberta, os protótipos dos conversores baseados em um sistema *nanogrid* fotovoltaico isolado;
5. Analisar e discutir os resultados práticos obtidos nos protótipos dos conversores em relação aos seus resultados teóricos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordadas algumas definições e princípios de funcionamento da energia solar fotovoltaica, buscando explicar e caracterizar a aplicação de conversores elevadores CC-CC nessa área.

2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Durante a evolução da humanidade, o ser humano observou algumas formas de energia que existem no universo e notou que poderia utilizá-las em seu benefício. Buscou compreendê-las e dominá-las, chegando ao ponto de poder gerar algumas delas por meio de conversões de energia. Dentre elas, a energia elétrica tornou-se muito importante, sendo considerada recurso vital e estratégico para o desenvolvimento de muitos países, incluindo o Brasil.

A energia elétrica é uma das formas de energia mais conveniente ao homem, devido ao conhecimento adquirido sobre a mesma, e mais versátil, devido às diversas maneiras que é possível obtê-la e aplicá-la. Pode ser obtida por meio da conversão de energias não renováveis, como a queima de combustíveis fósseis ou o uso de substâncias radioativas, ou renováveis, como o uso do vento, luz solar, quedas de água, entre outras (ANEEL, 2008).

Durante anos as principais formas de geração de energia elétrica foram por meio das usinas hidrelétricas e termoelétricas. A usina hidrelétrica, apesar de ser considerada como fonte de geração de energia elétrica com recurso renovável, pode causar grandes impactos ambientais durante sua construção, como desvio do curso de um rio, realocação de pessoas e alagamento de grandes áreas. Nos alagamentos, além do perigo de rompimento da barragem, geralmente essas áreas são de produção ou contêm uma grande diversidade biológica, alterando o *habitat* natural de diversos animais e plantas. É uma estrutura que leva anos para ser construída e geralmente causa discussões por seus impactos ambientais.

A usina termoelétrica utiliza a queima de combustíveis, como carvão e gás natural, para realizar a geração de energia elétrica. Além dos recursos serem finitos, outro problema é a emissão de poluentes na atmosfera terrestre, principalmente os

gases mais nocivos responsáveis pelo efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O). Parte das mudanças climáticas do planeta Terra nas últimas décadas são atribuídas ao aumento desses gases na atmosfera e parte deles são decorrentes da geração de energia elétrica (ANEEL, 2005).

Com a crescente preocupação com o meio ambiente e sustentabilidade a nível mundial, surgiram outras alternativas de geração como a energia eólica e a energia solar, consideradas como fontes de energia limpa, ou seja, fontes de geração de energia que não liberam ou liberam quantidades muito baixas de poluentes à atmosfera. Com incentivos de governos e ambientalistas, esses métodos de produção estão sendo aprimorados e cada vez mais utilizados.

O Brasil possui características naturais que favorecem a geração de energia elétrica através da energia solar. O país recebe uma insolação (número de horas de brilho do Sol) superior a 3000 horas por ano e possui a maior taxa de irradiação solar do mundo. A média anual de irradiação solar no Brasil é muito maior do que em países como a Alemanha, França e Espanha, onde a geração solar é difundida e incentivada pelo governo (MARTINS *et al.*, 2008). Em 2002 foi criado o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas - Proinfa por meio da Lei nº 10.438/2002. O Proinfa tem como objetivo aumentar a participação das fontes alternativas renováveis na matriz energética do país, beneficiando empreendedores que não possuam vínculos societários com empresas de geração, transmissão ou distribuição de energia elétrica. Posteriormente, em 2012, entrou em vigor a Resolução Normativa nº 482/2012, publicada pela ANEEL, em que o consumidor poderia gerar sua própria energia elétrica por meio de fontes renováveis, para consumo ou cogeração, inclusive podendo fornecer o excedente para a concessionária de energia local. Essa resolução aborda a microgeração (menor ou igual a 100 *kW*) e minigeração (maior que 100 *kW* e menor ou igual a 1 *MW*) distribuída de energia elétrica, formas de geração que aliam economia, preservação ambiental e sustentabilidade. Em 2015, a ANEEL publicou a Resolução Normativa nº 687/2015, que revisa a Resolução Normativa nº 482/2012, com o objetivo de reduzir custos e tempo na implementação dos sistemas, compatibilizar o Sistema de Compensação de Energia Elétrica com as Condições Gerais de Fornecimento, aumentar o número de consumidores e melhorar as informações na fatura de energia elétrica.

2.1.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E CARACTERÍSTICAS

Quase todas as formas de geração de energia elétrica envolvem indiretamente a energia solar. Porém existem formas de conversão direta da luz solar em energia elétrica. Através da exposição de materiais semicondutores a luz solar, surgem alguns efeitos como o efeito termoelétrico e o efeito fotovoltaico, originando a energia heliotérmica, proveniente do calor, e a energia solar fotovoltaica, proveniente da luz. O uso comercial da energia heliotérmica tem sido impossibilitado para geração de energia elétrica devido ao baixo rendimento apresentado no processo de conversão e pelo alto custo de implementação (ANEEL, 2005).

O princípio da conversão de energia solar fotovoltaica é baseado na incidência dos fótons da luz solar sobre os átomos de dois semicondutores, geralmente silício combinados diferentemente com outros elementos, então criando uma polarização positiva forte e uma negativa, assim surgindo uma diferença de potencial elétrico. O equipamento que realiza essa conversão é denominado de célula solar ou célula fotovoltaica, e a tensão gerada depende de alguns fatores como a temperatura e a irradiação solar incidente sobre a célula fotovoltaica (SACE, 2010). A tensão gerada pelas células fotovoltaicas geralmente é na ordem de décimos de Volt. Assim, as células são associadas em série para aumentar a tensão, formando um painel solar. A tensão resultante muitas vezes não é suficiente para acionar uma carga CC ou ser convertida para um nível CA 127 ou 220 V_{RMS} . Uma solução comumente utilizada é o uso de um conversor elevador CC-CC, que eleva a tensão de saída do painel até o nível necessário (SACE, 2010).

As principais limitações desse sistema de geração são: a área ocupada pelas placas solares, o custo das células fotovoltaicas e o rendimento do sistema. O sistema fotovoltaico deve utilizar uma grande área para a captação de energia, para tornar o sistema economicamente viável em larga escala. Isso não se torna um fator crítico quando comparado a outros sistemas de geração como o hidráulico ou o eólico, que utilizam áreas maiores ainda. O tamanho ocupado também não apresenta problemas na micro ou minigeração, e é geralmente o sistema mais escolhido para geração em residências e centros urbanos.

Nas adversidades de implementação está o custo, principalmente dos painéis fotovoltaicos. Com os estudos e o avanço das tecnologias, o custo dos dispositivos do conjunto de geração está diminuindo. De acordo com Shankleman e Martin (2017), o custo médio global ponderado de um sistema de geração fotovoltaico em escala

economicamente viável em 2009 era quase 5 mil dólares por kW gerado, mas com previsão de custar menos de mil dólares no ano de 2025. Também é apresentada uma previsão de que a partir do ano de 2030 a energia solar terá um custo médio global de geração menor que o das energias eólica, carvão e usinas de ciclo combinado, conforme (SHANKLEMAN; MARTIN, 2017). Dessa maneira, a energia fotovoltaica tem-se tornado muito promissora e atrativa, tanto na geração quanto na área de pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias que venham a auxiliar o processo, reduzindo custos e aumentando a eficiência.

Com incentivos governamentais e a redução de custo da implementação, houve um aumento no número de unidades geradoras que utilizam energias renováveis no Brasil. Segundo ANEEL (2016), a geração distribuída conectada a rede, quando entrou em vigor a Resolução Normativa nº 482/2012 em 2012, houve três conexões a rede de energia. Esse número aumentou e em Março de 2016, após entrarem em vigor as novas regras da Resolução Normativa nº 687/2015 aprovadas pela ANEEL, houve um aumento de conexões, praticamente dobrando o número de instalações, contando com 6670 conexões até Novembro de 2016, totalizando 60,895 kW de potência instalada em que 77% é proveniente de fonte solar. De acordo com ANEEL (2017), a potência fiscalizada gerada por centrais geradoras solar fotovoltaicas é de 418,325 MW , representando aproximadamente 0,27% da matriz energética nacional. Esse tipo de geração conta ainda com mais 1,06 GW de potência outorgada provenientes de empreendimentos em construção e mais 1,47 GW de potência outorgada proveniente de empreendimentos com construção ainda não iniciada, sinalizando investimento e crescimento da energia solar fotovoltaica no país.

A eficiência de um sistema de geração fotovoltaico é um fator importante na relação custo x benefício, devido ao custo da implementação do sistema em relação ao desperdício de energia. A eficiência relaciona a energia solar irradiada sobre o painel e a energia elétrica entregue à carga. Esse rendimento, dito total, do sistema é diretamente proporcional aos rendimentos individuais dos dispositivos envolvidos na conversão. Assim, a melhoria do rendimento total aumenta conforme os rendimentos individuais dos dispositivos aumentam, à medida que avança a tecnologia de construção dos mesmos.

2.2 SISTEMA NANOGRID

Nanogrid é um pequeno sistema de geração distribuída aplicada em redes de baixa tensão que pode operar de maneira isolada ou interligada à rede de distribuição da concessionária local. Os sistemas fotovoltaicos isolados são utilizados em lugares remotos, onde não há energia elétrica cabeada, o acesso é muito restrito ou simplesmente para economia de energia elétrica. O sistema *nanogrid* mantém a mesma estrutura física do sistema *microgrid*, apenas com potências geradas menores, geralmente atendendo um pequeno sistema ou uma única carga (SCALA *et al.*, 2017). Para Bryan *et al.* (2004), a potência enquadrada para *nanogrid* é abaixo de 2 kW, enquanto Devi e Prabha (2015) define que a potência vai de centenas de Watts até 5 kW. Uma explicação mais específica sobre as cargas do sistema *nanogrid* é dada por Nordman (2009), em que o autor descreve que as cargas podem ser de qualquer potência, mas geralmente são menores que 100 W. A Figura 1 apresenta a estrutura de um sistema *nanogrid* fotovoltaico isolado genérico, com baterias, transformador, atendendo cargas CC e CA.

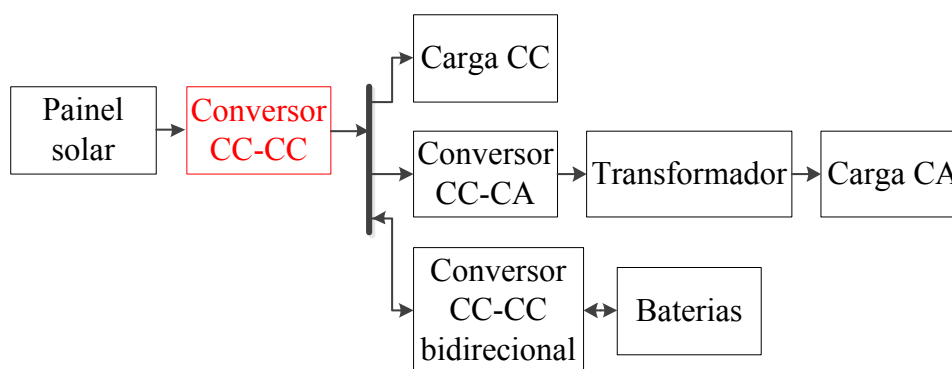


Figura 1 – Estrutura genérica de um sistema *nanogrid* fotovoltaico isolado.
Fonte: Adaptado de Beena (2015).

No sistema apresentado na Figura 1, um dos elementos principais e objetivo de estudo desse trabalho é o conversor CC-CC, que eleva a tensão de saída do painel para o nível necessário de acordo com a aplicação.

O painel fotovoltaico possui uma relação não linear entre a tensão e a corrente elétrica fornecida. Devido a isso, existe uma curva de relação entre potência e tensão que também é não linear, de modo que existe somente um Ponto de Máxima Potência (*Maximum Power Point*, MPP) disponível que pode ser entregue pelo painel. A curva que relaciona potência e tensão varia conforme a irradiação solar e a temperatura no painel, assim a mesma varia ao longo do dia, criando diferentes MPPs. O ponto de operação sobre essa curva varia conforme a impedância de entrada do con-

versor associado, assim para alcançar o MPP é necessário a variação de impedância do conversor, que é realizada através da variação razão cíclica do mesmo. Por causa disso, são utilizados algoritmos que rastreiam o MPP, conhecidos como Seguidor do Ponto de Máxima Potência (*Maximum Power Point Tracking*, MPPT) com o objetivo de maximizar a extração de potência cedida pelo painel, aumentando a eficiência do sistema. (ALTIN; OZTURK, 2016). O controle via MPPT não será implementado nos protótipos desse trabalho.

3 CONVERSOR CHAVEADO ELEVADOR CC-CC NÃO ISOLADO

Neste capítulo será apresentado o princípio de funcionamento e algumas características do conversor elevador CC-CC, assim como a escolha dos conversores e a caracterização das não idealidades consideradas no desenvolvimento do trabalho.

3.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO E CARACTERÍSTICAS

A eletrônica de potência está interessada no processamento de energia elétrica por meio de dispositivos eletrônicos. O elemento principal é o conversor chaveado. A utilização de um conversor chaveado no lugar de um regulador linear de tensão se deve a baixa eficiência do linear em relação ao chaveado (HART, 2001). As análises dos conversores serão realizadas considerando que os mesmos estão operando em Modo de Condução Contínua (*Continuous-Conduction Mode, CCM*).

O conversor chaveado contém basicamente três portas: a de entrada da energia, a de entrada do controle e a porta de saída de energia. A energia de entrada total é processada conforme a ação de controle, produzindo uma energia de saída condicionada. Em um conversor CC-CC, a tensão CC de entrada é convertida em uma tensão CC de saída com maior ou menor amplitude, com a possibilidade de ter polaridade oposta ou com isolamento da referência entre entrada e saída, variando conforme a topologia do conversor (ERICKSON; MAKSIMOVIC, 2007).

Para a aplicação na saída do painel fotovoltaico, é necessário um conversor elevador unidirecional, já que há fluxo de energia somente do painel ao conversor. A aplicação não exige a isolação do conversor, assim topologia escolhida é não isolada a qual torna o circuito elétrico equivalente reduzido. Das topologias de conversores chaveados elevadores não isolados básicos encontradas na literatura está o Conversor *Boost* (CB). Devi e Prabha (2015) apresentam algumas topologias de conversores para sistema *nanogrid*, citando que o CB é utilizado devido ao fluxo de corrente de entrada contínua e a elevação de tensão realizada sem transformador. Outra vantagem do CB é a posição do chave, que não exige isolação entre acionamento e conversor.

3.1.1 CONVERSOR BOOST

A topologia do CB é apresentada na Figura 2. O controle da tensão, que eleva a tensão de entrada (V_{IN}) até a tensão de saída (V_{OUT}), do conversor é feito por meio da chave SW , que recebe um sinal de acionamento, representado na Figura 3, com frequência f fixa e conseqüentemente um período T fixo, pois o período de um sinal é igual ao inverso de sua frequência, conforme Equação (1). Então é definida a razão cíclica D do sinal, que teoricamente pode variar de 0 a 1 e é representada na Equação (2), e essa forma de acionamento é denominada Modulação por Largura de Pulso (*Pulse-Width Modulation*, PWM) (MARTINS; BARBI, 2006).

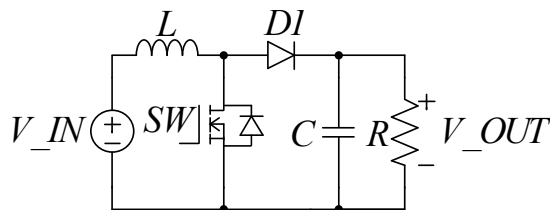


Figura 2 – Topologia do conversor *boost*.
Fonte: Autoria própria.

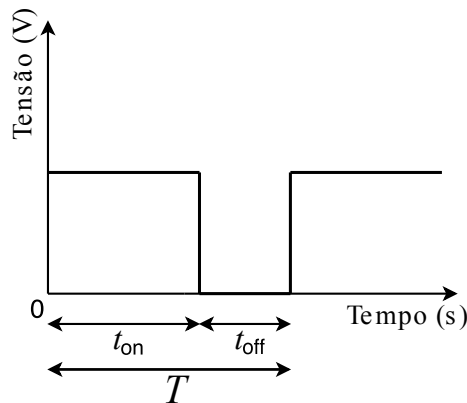


Figura 3 – Sinal de acionamento da chave para controle da tensão de saída do conversor.
Fonte: Autoria própria.

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (2)$$

A relação de tensão de saída e tensão de entrada, conhecida como ganho estático G , do CB é dada na Equação (3), assim sendo possível o controle do ganho estático em função da razão cíclica (MOHAN; UNDELAND, 2007). Assim, na teoria, seria possível que o CB tivesse valores grandes de ganho estático, tão grandes que quando D se aproximasse de 1 o ganho estático tenderia ao infinito. O subíndice B será usado quando algum componente ou valor pertencer ao conversor *boost*.

$$G_B = \frac{V_{OUT_B}}{V_{IN_B}} = \frac{1}{1 - D_B} \quad (3)$$

3.1.2 NÃO IDEALIDADES DOS COMPONENTES DO CONVERSOR

Na prática, o valor do ganho estático do CB é limitado devido as suas não idealidades. Dentre as não idealidades do conversor real estão alguns efeitos parasitas intrínsecos dos elementos do circuito, como o efeito de Resistência em Série Equivalente (*Equivalent Serie Resistance*, ESR). Dessa forma a representação de um elemento do circuito é feita com a inserção de uma resistência em série, que causa perdas no circuito e limita o ganho do conversor (TSENG; LIANG, 2004). A Figura 4 apresenta uma comparação, considerando somente o efeito ESR do indutor, entre o ganho estático ideal e o não ideal do CB (TSENG; LIANG, 2004). A resistência considerada para o indutor foi de 1Ω e a resistência da carga igual a 625Ω .

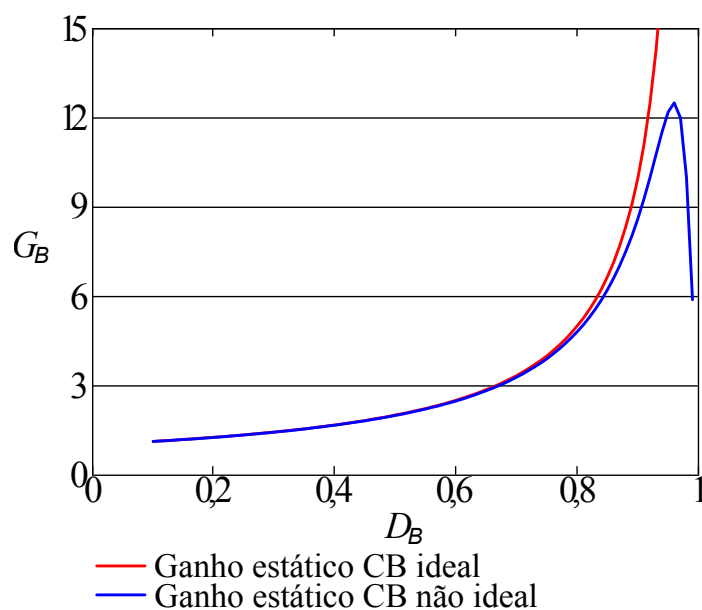


Figura 4 – Comparação entre os ganhos estáticos ideal e não ideal (com efeito ESR do indutor) do conversor *boost*.
Fonte: Autoria própria.

Conforme a Figura 4, o ganho estático não ideal do CB cresce até um certo valor e logo após decai, conforme D_B se aproxima do valor unitário. Assim, o ganho estático não ideal desse conversor é limitado. Além disso, quando D_B aumenta, os valores de tensão e corrente dos componentes aumentam, elevando a potência dissipada nos mesmos e com isso diminuindo a eficiência do conversor (TSENG; LIANG, 2004). De forma objetiva, Saadat e Abbaszadeh (2016) mencionam que, para sistemas fotovoltaicos, o CB é um dos conversores mais comuns para elevar tensão, porém

quando necessário altos ganhos estáticos a alta razão cíclica é um problema que resulta na redução da eficiência. Dessa forma, o ganho máximo limitado do CB pode não ser suficiente para atingir o valor de ganho necessário exigido na aplicação, e caso seja projetado para ganhos muito próximos do limite o rendimento se torna baixo e inviabiliza a aplicação.

Além do efeito ESR dos indutores, será considerada, na análise matemática e na simulação, a resistência de condução $R_{DS(on)}$ da chave MOSFET, resistência essa que surge entre o dreno e fonte (*drain* e *source*) enquanto a chave estiver conduzindo, e também a tensão de condução dos diodos, visando uma modelagem mais fiel dos conversores (TSENG; LIANG, 2004). Choudhury e Nayak (2016) apresentam uma análise de ganho estático em que é possível notar que o efeito ESR dos capacitores possui pouca influência no ganho estático, assim optou-se por desconsiderar tal efeito nas análises.

3.1.3 CONVERSOR *BOOST* EM CASCATA

Uma alternativa para elevar o ganho de tensão seria o arranjo de dois CB em série, para que a tensão fosse elevada duas vezes. Essa topologia resultante é conhecida como *boost* em cascata, se tornando um conversor quadrático com duas chaves controladas, apresentado na Figura 5, e tem como ganho estático o resultado do produto do ganho estático dos dois conversores CB em série, conforme Equação (4) (LOPES, 2014).

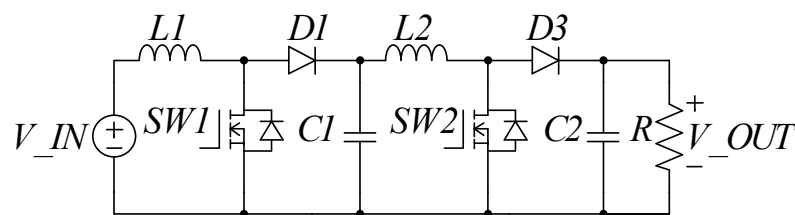


Figura 5 – Topologia do conversor *boost* em cascata.
Fonte: A autoria própria.

$$G = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{1}{(1-D)} \times \frac{1}{(1-D)} = \frac{1}{(1-D)^2} \quad (4)$$

Essa topologia possui vantagem sobre o CB em relação ao ganho estático, porém possui desvantagem em relação ao número de chaves e a eficiência. Assim como o ganho estático, o rendimento do conversor *boost* em cascata é produto dos rendimentos individuais dos conversores associados em série, resultando em um rendimento total menor que o rendimento individual de cada conversor (LOPES, 2014).

3.1.4 CONVERSOR BOOST QUADRÁTICO

Da topologia *boost* em cascata, é possível obter um outro conversor com o mesmo ganho estático e com apenas uma chave ativa. A alteração se deve a troca de uma chave ativa por uma chave passiva, tornando o circuito equivalente uma associação de um conversor passivo em série com um conversor ativo. Mudando a posição da chave $SW1$ e substituindo-a por um diodo $D2$ tem-se o Conversor *Boost* Quadrático (CBQ), apresentado na Figura 6. A redução de uma chave diminui as perdas e simplifica o acionamento (LOPES, 2014). Kummar *et al.* (2016) e Choudhury e Nayak (2016) apresentam o ganho estático do CBQ, sendo esse idêntico ao do *boost* em cascata, conforme Equação (5), validando a substituição da chave.

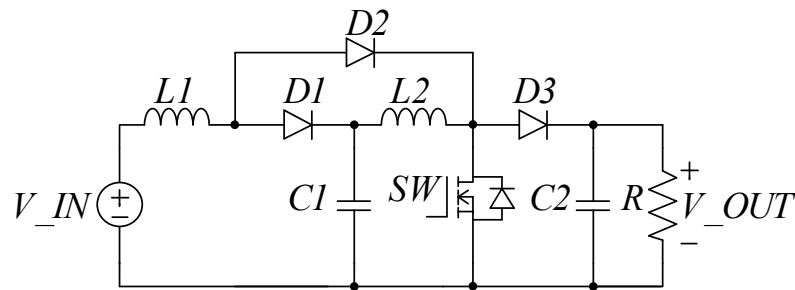


Figura 6 – Topologia do conversor *boost* quadrático.
Fonte: Autoria própria.

$$G_{BQ} = \frac{V_{OUT_{BQ}}}{V_{IN_{BQ}}} = \frac{1}{(1 - D_{BQ})^2} \quad (5)$$

No estudo comparativo de conversores para *nanogrid*, Devi e Prabha (2015) apresentam os méritos do CBQ como o alto ganho de tensão e a redução de esforços de tensão e corrente sobre os componentes, sendo usado em aplicações de alta potência e indicado para sistemas fotovoltaicos.

Assim como o CB, o ganho ideal do CBQ diverge do seu ganho não ideal devido ao efeito ESR. A Figura 7 apresenta uma comparação entre o ganho estático ideal e o não ideal do CBQ (CHOUDHURY; NAYAK, 2016). As resistências consideradas para ambos os indutores foram de 1Ω e a resistência da carga igual a 625Ω . O subíndice *BQ* será usado quando algum componente ou valor pertencer ao conversor *boost* quadrático.

Na Figura 8 é possível constatar que o CBQ apresenta um ganho estático maior que o CB para a mesma razão cíclica, até o ponto que as curvas se interceptam, ou seja, o ganho estático do CBQ necessita uma razão cíclica menor que o CB para alcançar o mesmo valor de ganho estático. Nos ganhos estáticos é considerado

apenas o efeito ESR dos indutores, ilustrando a limitação do ganho com a inserção de tal efeito. Posteriormente serão realizadas análises de relação de ganho estático e rendimento dos conversores em função da razão cíclica considerando todas as não idealidades citadas anteriormente.

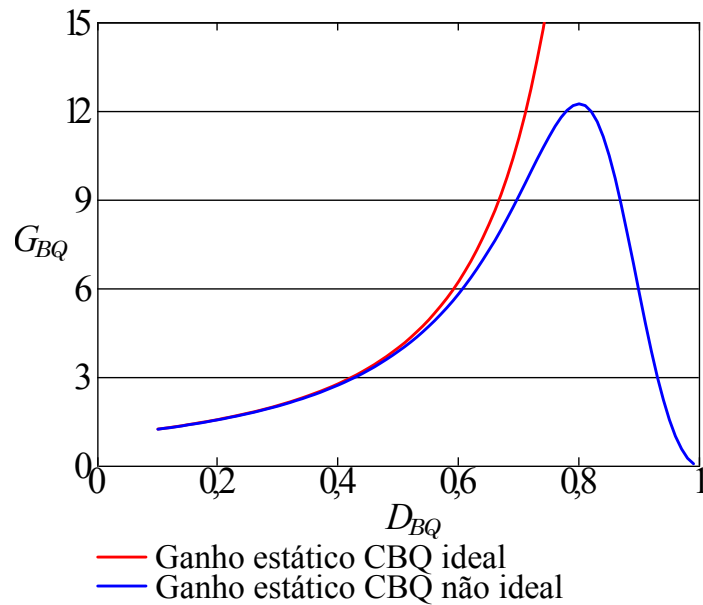


Figura 7 – Comparação entre os ganhos estáticos ideal e não ideal (com efeito ESR dos indutores) do conversor *boost* quadrático.

Fonte: Autoria própria.

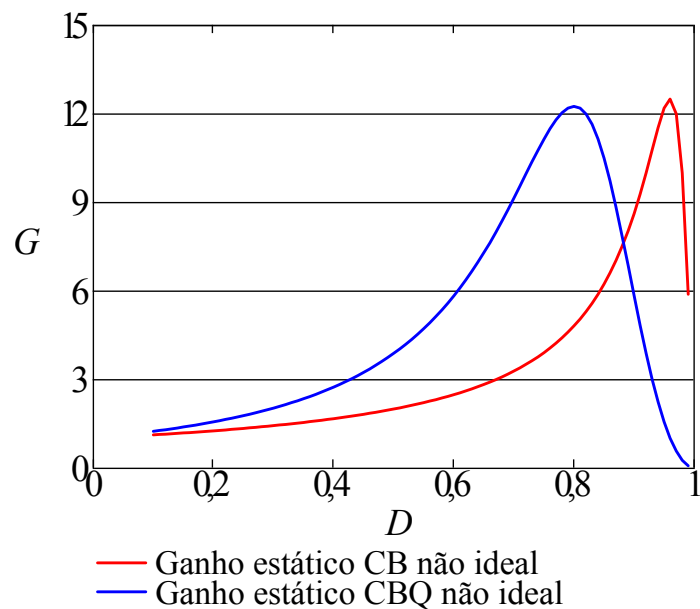


Figura 8 – Comparação entre o ganho estático não ideal (com efeito ESR dos indutores) do conversor *boost* e conversor *boost* quadrático.

Fonte: Autoria própria.

4 ANÁLISE MATEMÁTICA DOS CONVERSORES

Neste capítulo serão apresentadas as considerações, simplificações e as análises matemáticas, não ideal e ideal, dos conversores *boost* e *boost* quadrático.

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS DE ANÁLISE

As análises dos conversores, já em regime permanente, serão realizadas considerando uma fonte de tensão CC na entrada, visando que a implementação dos mesmos será da mesma maneira. A utilização de uma fonte CC não representa rigorosamente um painel fotovoltaico, porém é suficiente para que se faça as análises e discuta-se os resultados de ganho estático e rendimento dos conversores.

Outros fatores a serem mencionados sobre a modelagem é que em ambos os casos será considerado que o conversor está operando em CCM, pois esse modo geralmente apresenta rendimento mais elevado e menor esforço de tensão e/ou corrente sobre os componentes (NAVAMANI *et al.*, 2015). Também será considerado em alguns casos que as variações de tensão nos conversores são suficientemente pequenas a ponto de serem consideradas nulas, sendo que essa aproximação auxiliará em alguns cálculos (HART, 2001).

4.1.1 CONVERSOR *BOOST* NÃO IDEAL

A Figura 9 apresenta o CB com as resistências que representam as não idealidades e os instrumentos de medição com o nome das variáveis do conversor. R_{L1_B} representa a resistência do indutor $L1_B$, R_{SW_B} a resistência de condução da chave SW_B e a tensão de condução do diodo $D1_B$ ($V_{D1_B(on)}$) surge quando o mesmo entra em condução.

O CB opera em duas etapas. Na primeira etapa a chave SW_B está em condução e o diodo $D1_B$ está bloqueado. Na segunda etapa a chave SW_B bloqueia e o diodo $D1_B$ entra em condução. Com isso, é possível obter o ganho estático do conversor, o rendimento e as equações necessárias para determinar os componentes do mesmo.

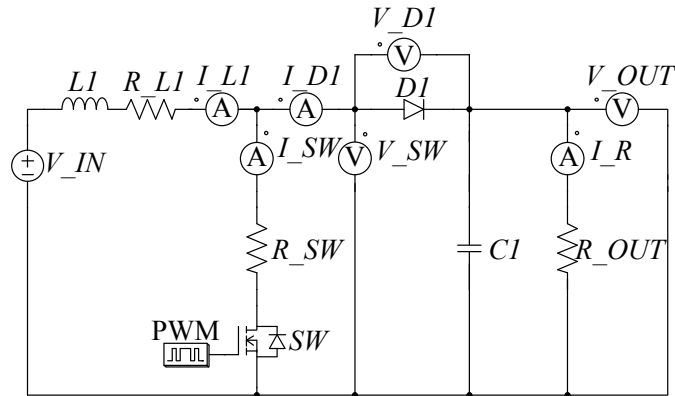


Figura 9 – Conversor *boost* não ideal considerado na análise matemática.
Fonte: Autoria própria.

As Equações (6) e (7), em valores médios, representam o ganho estático (G_B) e rendimento do conversor (η_B), respectivamente.

$$G_B = \frac{V_{IN_B} - V_{D1_{B(on)}} \cdot (1 - D_B)}{V_{IN_B}} \times \frac{R_{OUT_B} \cdot (1 - D_B)}{(R_{SW_B} + R_{L1_B}) \cdot D_B + (R_{OUT_B}) \cdot (1 - D_B)^2 + R_{L1_B} \cdot (1 - D_B)} \quad (6)$$

$$\eta_B = \frac{P_{OUT_B}}{P_{IN_B}} \cong \frac{V_{OUT_B} \cdot I_{R_B}}{V_{IN_B} \cdot I_{L1_B}} = \frac{V_{OUT_B}}{V_{IN_B}} \cdot (1 - D_B) \quad (7)$$

As Equações de (8) a (11), em valores médios, representam a corrente no indutor $L1$ (I_{L1_B}), corrente no resistor R_{OUT} (I_{R_B}), indutância $L1$ ($L1_B$), capacitância $C1$ ($C1_B$), respectivamente.

$$I_{L1_B} = \frac{V_{OUT_B}}{R_{OUT_B} \cdot (1 - D_B)} \quad (8)$$

$$I_{R_B} = \frac{V_{OUT_B}}{R_{OUT_B}} \quad (9)$$

$$L1_B = \frac{(V_{IN_B} - I_{L1_B} \cdot (R_{L1_B} + R_{SW_B})) \cdot D_B \cdot T_B}{\Delta I_{L1_B}} \quad (10)$$

$$C1_B = \frac{V_{OUT_B} \cdot D_B \cdot T_B}{R_{OUT_B} \cdot \Delta V_{OUT_B}} \quad (11)$$

As Equações de (12) a (15), em valores médios, representam a tensão na chave SW (V_{SW_B}), corrente na chave SW (I_{SW_B}), tensão no diodo $D1$ (V_{D1_B}) e corrente no diodo $D1$ (I_{D1_B}), respectivamente. Por estarem em paralelo, a tensão sobre o capacitor $C1_B$ será tratada como a tensão de saída sobre o resistor R_{OUT_B} .

$$V_SW_B = (V_OUT_B + V_D1_{B(on)}) \cdot (1 - D_B) + (R_SW_B \cdot I_L1_B) \cdot D_B \quad (12)$$

$$I_SW_B = I_L1_B \cdot D_B \quad (13)$$

$$V_D1_B = (-V_OUT_B + I_L1_B \cdot R_SW_B) \cdot D_B + V_D1_{B(on)} \cdot (1 - D_B) \quad (14)$$

$$I_D1_B = I_L1_B \cdot (1 - D_B) \quad (15)$$

Barbi (2014) apresenta uma dedução, por outro método do utilizado aqui, do ganho estático do CB. O conversor analisado possui as mesmas não idealidades do proposto aqui e a equação resultante é igual a Equação (6), assim validando essa.

As Equações de (16) a (19) referem-se, respectivamente, a tensão máxima na saída ($V_OUT_{B(pk)}$), tensão mínima na saída ($V_OUT_{B(min)}$), corrente máxima no indutor $L1$ ($I_L1_{B(pk)}$) e corrente mínima no indutor $L1$ ($V_OUT_{B(min)}$).

$$V_OUT_{B(pk)} = V_OUT_B + \frac{\Delta V_OUT_B}{2} \quad (16)$$

$$V_OUT_{B(min)} = V_OUT_B - \frac{\Delta V_OUT_B}{2} \quad (17)$$

$$I_L1_{B(pk)} = I_L1_B + \frac{\Delta I_L1_B}{2} \quad (18)$$

$$I_L1_{B(min)} = I_L1_B - \frac{\Delta I_L1_B}{2} \quad (19)$$

As Equações de (20) a (23) referem-se, respectivamente, a tensão máxima na chave SW ($V_SW_{B(pk)}$), corrente máxima na chave SW ($I_SW_{B(pk)}$), tensão máxima no diodo $D1$ ($V_D1_{B(pk)}$) e a corrente máxima no diodo $D1$ ($I_D1_{B(pk)}$).

$$V_SW_{B(pk)} = V_OUT_B + \frac{\Delta V_OUT_B}{2} + V_D1_{B(on)} \quad (20)$$

$$I_SW_{B(pk)} = I_L1_B + \frac{\Delta I_L1_B}{2} \quad (21)$$

$$V_D1_{B(pk)} = -(V_OUT_B + \frac{\Delta V_OUT_B}{2}) + (I_L1_B - \frac{\Delta I_L1_B}{2}) \cdot R_SW_B \quad (22)$$

$$I_D1_{B(pk)} = I_L1_B + \frac{\Delta I_L1_B}{2} \quad (23)$$

4.1.2 CONVERSOR BOOST IDEAL

É possível obter as equações do CB ideal por meio das equações do CB não ideal. Considerando as não idealidades nulas, ou seja, considerando zero a re-

sistência do indutor, da chave e também a tensão de condução do diodo obtém-se as Equações de (24) a (33), que representam analogamente as equações, de valores médios, apresentadas na Sessão 4.1.1.

$$G_B = \frac{1}{1 - D_B} \quad (24)$$

$$\eta_B = \frac{P_{OUT_B}}{P_{IN_B}} \cong \frac{V_{OUT_B} \cdot I_{R_B}}{V_{IN_B} \cdot I_{L1_B}} = \frac{V_{OUT_B}}{V_{IN_B}} \cdot (1 - D_B) \quad (25)$$

$$I_{L1_B} = \frac{V_{OUT_B}}{R_{OUT_B} \cdot (1 - D_B)} \quad (26)$$

$$I_{R_B} = \frac{V_{OUT_B}}{R_{OUT_B}} \quad (27)$$

$$L1_B = \frac{V_{IN_B} \cdot D_B \cdot T_B}{\Delta I_{L1_B}} \quad (28)$$

$$C1_B = \frac{V_{OUT_B} \cdot D_B \cdot T_B}{R_{OUT_B} \cdot \Delta V_{OUT_B}} \quad (29)$$

$$V_{SW_B} = V_{OUT_B} \cdot (1 - D_B) \quad (30)$$

$$I_{SW_B} = I_{L1_B} \cdot D_B \quad (31)$$

$$V_{D1_B} = -V_{OUT_B} \cdot D_B \quad (32)$$

$$I_{D1_B} = I_{L1_B} \cdot (1 - D_B) \quad (33)$$

O CB ideal é muito difundido e abordado em livros didáticos de eletrônica de potência. Erickson e Maksimovic (2007) e Hart (2001) apresentam equações do CB ideal que são idênticas as mencionadas acima. Em alguns casos algumas equações são escritas em função da frequência e não do período.

As Equações de (34) a (41) referem-se, analogamente, as equações de máximos e mínimos apresentadas na Sessão 4.1.1. Os valores de máximos e mínimos de tensão e corrente no conversor ideal auxiliam no dimensionamento dos componentes do circuito.

$$V_{OUT_B(pk)} = V_{OUT_B} + \frac{\Delta V_{OUT_B}}{2} \quad (34)$$

$$V_{OUT_B(min)} = V_{OUT_B} - \frac{\Delta V_{OUT_B}}{2} \quad (35)$$

$$I_{L1_B(pk)} = I_{L1_B} + \frac{\Delta I_{L1_B}}{2} \quad (36)$$

$$I_{L1_B(min)} = I_{L1_B} - \frac{\Delta I_{L1_B}}{2} \quad (37)$$

$$V_{SW_{B(pk)}} = V_{OUT_B} + \frac{\Delta V_{OUT_B}}{2} \quad (38)$$

$$I_{SW_{B(pk)}} = I_{L1_B} + \frac{\Delta I_{L1_B}}{2} \quad (39)$$

$$V_{D1_{B(pk)}} = -(V_{OUT_B} + \frac{\Delta V_{OUT_B}}{2}) \quad (40)$$

$$I_{D1_{B(pk)}} = I_{L1_B} + \frac{\Delta I_{L1_B}}{2} \quad (41)$$

4.1.3 CONVERSOR BOOST QUADRÁTICO NÃO IDEAL

A Figura 10 apresenta o CBQ com as resistências que representam as não idealidades e os instrumentos de medição com o nome das variáveis do conversor. $R_{L1_{BQ}}$ e $R_{L2_{BQ}}$ representam as resistências dos indutores $L1_{BQ}$ e $L2_{BQ}$, respectivamente, $R_{SW_{BQ}}$ a resistência de condução da chave SW_{BQ} e as tensões de condução dos diodos $D1_{BQ}$ ($V_{D1_{BQ(on)}}$), $D2_{BQ}$ ($V_{D2_{BQ(on)}}$) e $D3_{BQ}$ ($V_{D3_{BQ(on)}}$) surgem quando os mesmos entram em condução.

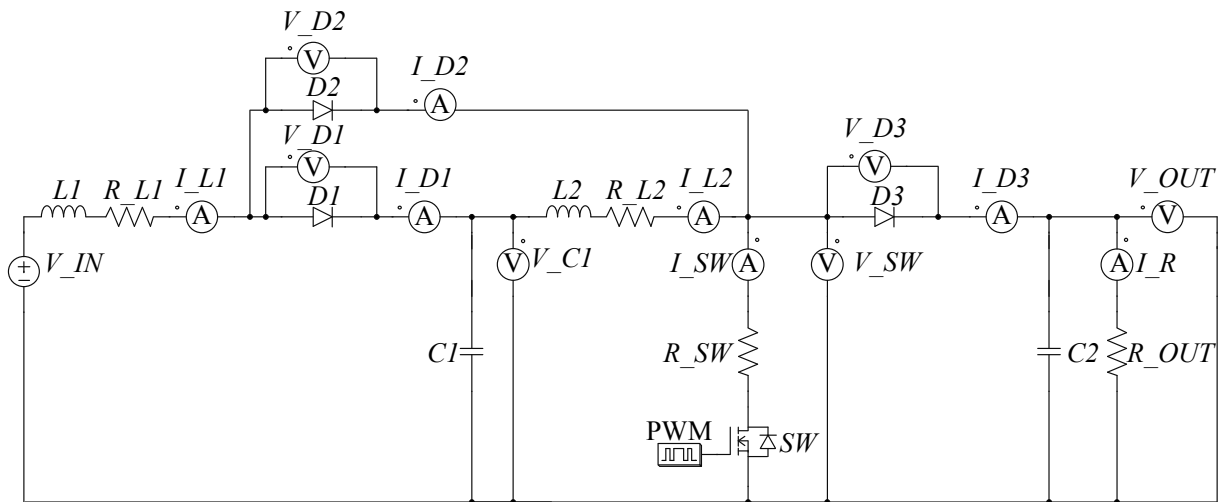


Figura 10 – Conversor *boost* quadrático não ideal considerado na análise matemática.
Fonte: Autoria própria.

O CBQ também opera em duas etapas. Na primeira etapa, a chave SW_{BQ} e o diodo $D2_{BQ}$ estão em condução enquanto $D1_{BQ}$ e $D3_{BQ}$ estão bloqueados. Na segunda etapa, SW_{BQ} e $D2_{BQ}$ bloqueiam enquanto $D1_{BQ}$ e $D3_{BQ}$ entram em condução.

As Equações (42) e (43), em valores médios, representam o ganho estático (G_{BQ}) e o rendimento do conversor (η_{BQ}), respectivamente.

$$G_{BQ} = (-V_{D3_{BQ(on)}} \cdot (1 - D_{BQ}) - \frac{V_{D2_{BQ(on)}} \cdot D_{BQ}}{1 - D_{BQ}} - V_{D1_{BQ(on)}} + \frac{V_{IN_{BQ}}}{(1 - D_{BQ})}) \times$$

$$(V_{IN_{BQ}} \cdot (A + B + E + (1 - D_{BQ})))^{-1}$$

$$\text{em que : } A = \frac{R_{L1_{BQ}} + R_{SW_{BQ}} \cdot D_{BQ}}{R_{OUT_{BQ}} \cdot (1 - D_{BQ})^3}$$

$$B = \frac{2 \cdot R_{SW_{BQ}} \cdot D_{BQ}}{R_{OUT_{BQ}} \cdot (1 - D_{BQ})^2}$$

$$E = \frac{R_{L2_{BQ}} + R_{SW_{BQ}} \cdot D_{BQ}}{R_{OUT_{BQ}} \cdot (1 - D_{BQ})}$$

(42)

$$\eta_{BQ} = \frac{P_{OUT_{BQ}}}{P_{IN_{BQ}}} \cong \frac{V_{OUT_{BQ}} \cdot I_{R_{BQ}}}{V_{IN_{BQ}} \cdot I_{L1_{BQ}}} = \frac{V_{OUT_{BQ}}}{V_{IN_{BQ}}} \cdot (1 - D_{BQ})^2 \quad (43)$$

As Equações de (44) a (51), em valores médios, representam a corrente no indutor $L1$ ($I_{L1_{BQ}}$), corrente no indutor $L2$ ($I_{L2_{BQ}}$), corrente no resistor R_{OUT} ($I_{R_{BQ}}$), indutância $L1$ ($L1_{BQ}$), indutância $L2$ ($L2_{BQ}$), capacitância $C1$ ($C1_{BQ}$), capacitância $C2$ ($C2_{BQ}$), respectivamente.

$$I_{L1_{BQ}} = \frac{V_{OUT_{BQ}}}{R_{OUT_{BQ}} \cdot (1 - D_{BQ})^2} \quad (44)$$

$$I_{L2_{BQ}} = \frac{V_{OUT_{BQ}}}{R_{OUT_{BQ}} \cdot (1 - D_{BQ})} \quad (45)$$

$$I_{R_{BQ}} = \frac{V_{OUT_{BQ}}}{R_{OUT_{BQ}}} \quad (46)$$

$$V_{C1_{BQ}} = -\frac{V_{OUT_{BQ}} \cdot (R_{L1_{BQ}} + R_{SW_{BQ}} \cdot D_{BQ})}{R_{OUT_{BQ}} \cdot (1 - D_{BQ})^3} - V_{D1_{BQ(on)}} - \frac{V_{OUT_{BQ}} \cdot R_{SW_{BQ}} \cdot D_{BQ}}{R_{OUT_{BQ}} \cdot (1 - D_{BQ})^2} + \frac{V_{IN_{BQ}} - V_{D2_{BQ(on)}} \cdot D_{BQ}}{(1 - D_{BQ})} \quad (47)$$

$$L1_{BQ} = \frac{(V_{IN_{BQ}} - I_{L1_{BQ}} \cdot R_1 - I_{L2_{BQ}} \cdot R_{SW_{BQ}} - V_{D2_{BQ(on)}}) \cdot D_{BQ} \cdot T_{BQ}}{\Delta I_{L1_{BQ}}}$$

$$\text{em que : } R_1 = R_{L1_{BQ}} + R_{SW_{BQ}}$$

(48)

$$L2_{BQ} = \frac{(V_{C1_{BQ}} - I_{L2_{BQ}} \cdot R_2 - I_{L1_{BQ}} \cdot R_{SW_{BQ}}) \cdot D_{BQ} \cdot T_{BQ}}{\Delta I_{L2_{BQ}}}$$

(49)

$$\text{em que : } R_2 = R_{L2_{BQ}} + R_{SW_{BQ}}$$

$$C1_{BQ} = \frac{V_{OUT_{BQ}} \cdot D_{BQ} \cdot T_{BQ}}{R_{OUT_{BQ}} \cdot \Delta V_{C1_{BQ}} \cdot (1 - D_{BQ})} \quad (50)$$

$$C2_{BQ} = \frac{V_{OUT_{BQ}} \cdot D_{BQ} \cdot T_{BQ}}{R_{OUT_{BQ}} \cdot \Delta V_{OUT_{BQ}}} \quad (51)$$

As Equações de (52) a (59), em valores médios, representam a tensão na chave SW ($V_{SW_{BQ}}$), corrente na chave SW ($I_{SW_{BQ}}$), tensão no diodo $D1$ ($V_{D1_{BQ}}$), corrente no diodo $D1$ ($I_{D1_{BQ}}$), tensão no diodo $D2$ ($V_{D2_{BQ}}$), corrente no diodo $D2$ ($I_{D2_{BQ}}$), tensão no diodo $D3$ ($V_{D3_{BQ}}$) e corrente no diodo $D3$ ($I_{D3_{BQ}}$), respectivamente.

$$V_{SW_{BQ}} = (V_{OUT_{BQ}} + V_{D3_{BQ}(on)}) \cdot (1 - D_{BQ}) + R_{SW_B} \cdot (I_{L1_{BQ}} + I_{L2_{BQ}}) \cdot D_{BQ} \quad (52)$$

$$I_{SW_{BQ}} = (I_{L1_{BQ}} + I_{L2_{BQ}}) \cdot D_{BQ} \quad (53)$$

$$V_{D1_{BQ}} = (-V_{C1_{BQ}} + V_{D2_{BQ}(on)} + R_{SW_{BQ}} \cdot (I_{L1_{BQ}} + I_{L2_{BQ}})) \cdot D_{BQ} + V_{D1_{BQ}(on)} \cdot (1 - D_{BQ}) \quad (54)$$

$$I_{D1_{BQ}} = I_{L1_{BQ}} \cdot (1 - D_{BQ}) \quad (55)$$

$$V_{D2_{BQ}} = (V_{C1_{BQ}} - V_{OUT_{BQ}} - V_{D3_{BQ}(on)} + V_{D1_{BQ}(on)}) \cdot (1 - D_{BQ}) + V_{D2_{BQ}(on)} \cdot D_{BQ} \quad (56)$$

$$I_{D2_{BQ}} = I_{L1_{BQ}} \cdot D_{BQ} \quad (57)$$

$$V_{D3_{BQ}} = (-V_{OUT_{BQ}} + R_{SW_{BQ}} \cdot (I_{L1_{BQ}} + I_{L2_{BQ}})) \cdot D_{BQ} + V_{D3_{BQ}(on)} \cdot (1 - D_{BQ}) \quad (58)$$

$$I_{D3_{BQ}} = I_{L2_{BQ}} \cdot (1 - D_{BQ}) \quad (59)$$

As Equações de (60) a (67) referem-se, respectivamente, a tensão máxima na saída ($V_{OUT_{BQ}(pk)}$), tensão mínima na saída ($V_{OUT_{BQ}(min)}$), tensão máxima no capacitor $C1$ ($V_{C1_{BQ}(pk)}$), tensão mínima no capacitor $C1$ ($V_{C1_{BQ}(min)}$), corrente máxima no indutor $L1$ ($I_{L1_{BQ}(pk)}$), corrente mínima no indutor $L1$ ($I_{L1_{BQ}(min)}$), corrente máxima no indutor $L2$ ($I_{L2_{BQ}(pk)}$), corrente mínima no indutor $L2$ ($I_{L2_{BQ}(min)}$).

$$V_{OUT_{BQ}(pk)} = V_{OUT_{BQ}} + \frac{\Delta V_{OUT_{BQ}}}{2} \quad (60)$$

$$V_{OUT_{BQ}(min)} = V_{OUT_{BQ}} - \frac{\Delta V_{OUT_{BQ}}}{2} \quad (61)$$

$$V_{C1_{BQ}(pk)} = V_{C1_{BQ}} + \frac{\Delta V_{C1_{BQ}}}{2} \quad (62)$$

$$V_{C1_{BQ}(min)} = V_{C1_{BQ}} - \frac{\Delta V_{C1_{BQ}}}{2} \quad (63)$$

$$I_{L1_{BQ}(pk)} = I_{L1_{BQ}} + \frac{\Delta I_{L1_{BQ}}}{2} \quad (64)$$

$$I_{L1_{BQ}(min)} = I_{L1_{BQ}} - \frac{\Delta I_{L1_{BQ}}}{2} \quad (65)$$

$$I_{L2_{BQ(pk)}} = I_{L2_{BQ}} + \frac{\Delta I_{L2_{BQ}}}{2} \quad (66)$$

$$I_{L2_{BQ(min)}} = I_{L2_{BQ}} - \frac{\Delta I_{L2_{BQ}}}{2} \quad (67)$$

As Equações de (68) a (75) referem-se, respectivamente, a tensão máxima na chave SW ($V_{SW_{BQ(pk)}}$), corrente máxima na chave SW ($I_{SW_{BQ(pk)}}$), tensão máxima no diodo $D1$ ($V_{D1_{BQ(pk)}}$), corrente máxima no diodo $D1$ ($I_{D1_{BQ(pk)}}$), tensão máxima no diodo $D2$ ($V_{D2_{BQ(pk)}}$), corrente máxima no diodo $D2$ ($I_{D2_{BQ(pk)}}$), tensão máxima no diodo $D3$ ($V_{D3_{BQ(pk)}}$) e corrente máxima no diodo $D3$ ($I_{D3_{BQ(pk)}}$).

$$V_{SW_{BQ(pk)}} = V_{OUT_B} + \frac{\Delta V_{OUT_B}}{2} + V_{D3_{BQ(on)}} \quad (68)$$

$$I_{SW_{B(pk)}} = (I_{L1_{BQ}} + \frac{\Delta I_{L1_B}}{2}) + (I_{L2_{BQ}} + \frac{\Delta I_{L2_{BQ}}}{2}) \quad (69)$$

$$V_{D1_{BQ(pk)}} = -V_{C1_{BQ}} + V_{D2_{BQ(on)}} + R_{SW_{BQ}} \cdot (I_{L1_{BQ(min)}} + I_{L2_{BQ(min)}}) \quad (70)$$

$$I_{D1_{BQ(pk)}} = I_{L1_{BQ}} + \frac{\Delta I_{L1_{BQ}}}{2} \quad (71)$$

$$V_{D2_{B(pk)}} = (V_{C1_{BQ}} - \frac{\Delta V_{C1_{BQ}}}{2}) - (V_{OUT_{BQ}} - \frac{\Delta V_{OUT_{BQ}}}{2}) \quad (72)$$

$$I_{D2_{BQ(pk)}} = I_{L1_{BQ}} + \frac{\Delta I_{L1_{BQ}}}{2} \quad (73)$$

$$V_{D3_{BQ(pk)}} = -(V_{OUT_{BQ}} + \frac{\Delta V_{OUT_{BQ}}}{2}) + \quad (74)$$

$$R_{SW_{BQ}} \cdot (I_{L1_{BQ(min)}} + I_{L2_{BQ(min)}})$$

$$I_{D3_{BQ(pk)}} = I_{L2_{BQ}} + \frac{\Delta I_{L2_{BQ}}}{2} \quad (75)$$

4.1.4 CONVERSOR BOOST QUADRÁTICO IDEAL

É possível obter as equações do CBQ ideal por meio das equações do CBQ não ideal. Como feito anteriormente, considerando as não idealidades nulas, ou seja, considerando zero as resistências dos indutores, a resistência de condução da chave e também as tensões de condução dos diodos obtém-se as Equações de (76) a (93), que representam analogamente as equações, de valores médios, apresentadas na Sessão 4.1.3.

$$G_{BQ} = \frac{1}{(1 - D_{BQ})^2} \quad (76)$$

$$\eta_{BQ} = \frac{P_{OUT_{BQ}}}{P_{IN_{BQ}}} \cong \frac{V_{OUT_{BQ}} \cdot I_{R_{BQ}}}{V_{IN_{BQ}} \cdot I_{L1_{BQ}}} = \frac{V_{OUT_{BQ}}}{V_{IN_{BQ}}} \cdot (1 - D_{BQ})^2 \quad (77)$$

$$I.L1_{BQ} = \frac{V.OUT_{BQ}}{R.OUT_{BQ} \cdot (1 - D_{BQ})^2} \quad (78)$$

$$I.L2_{BQ} = \frac{V.OUT_{BQ}}{R.OUT_{BQ} \cdot (1 - D_{BQ})} \quad (79)$$

$$I.R_{BQ} = \frac{V.OUT_{BQ}}{R.OUT_{BQ}} \quad (80)$$

$$V.C1_{BQ} = \frac{V.IN_{BQ}}{(1 - D_{BQ})} \quad (81)$$

$$L1_{BQ} = \frac{V.IN_{BQ} \cdot D_{BQ} \cdot T_{BQ}}{\Delta I.L1_{BQ}} \quad (82)$$

$$L2_{BQ} = \frac{V.C1_{BQ} \cdot D_{BQ} \cdot T_{BQ}}{\Delta I.L2_{BQ}} \quad (83)$$

$$C1_{BQ} = \frac{V.OUT_{BQ} \cdot D_{BQ} \cdot T_{BQ}}{R.OUT_{BQ} \cdot \Delta V.C1_{BQ} \cdot (1 - D_{BQ})} \quad (84)$$

$$C2_{BQ} = \frac{V.OUT_{BQ} \cdot D_{BQ} \cdot T_{BQ}}{R.OUT_{BQ} \cdot \Delta V.OUT_{BQ}} \quad (85)$$

$$V.SW_{BQ} = V.OUT_{BQ} \cdot (1 - D_{BQ}) \quad (86)$$

$$I.SW_{BQ} = (I.L1_{BQ} + I.L2_{BQ}) \cdot D_{BQ} \quad (87)$$

$$V.D1_{BQ} = -V.C1_{BQ} \cdot D_{BQ} \quad (88)$$

$$I.D1_{BQ} = I.L1_{BQ} \cdot (1 - D_{BQ}) \quad (89)$$

$$V.D2_{BQ} = (V.C1_{BQ} - V.OUT_{BQ}) \cdot (1 - D_{BQ}) \quad (90)$$

$$I.D2_{BQ} = I.L1_{BQ} \cdot D_{BQ} \quad (91)$$

$$V.D3_{BQ} = -V.OUT_{BQ} \cdot D_{BQ} \quad (92)$$

$$I.D3_{BQ} = I.L2_{BQ} \cdot (1 - D_{BQ}) \quad (93)$$

As Equações de (94) a (109) referem-se, analogamente as equações de máximos e mínimos apresentadas na Sessão 4.1.3.

$$V.OUT_{BQ(pk)} = V.OUT_{BQ} + \frac{\Delta V.OUT_{BQ}}{2} \quad (94)$$

$$V.OUT_{BQ(min)} = V.OUT_{BQ} - \frac{\Delta V.OUT_{BQ}}{2} \quad (95)$$

$$V.C1_{BQ(pk)} = V.C1_{BQ} + \frac{\Delta V.C1_{BQ}}{2} \quad (96)$$

$$V.C1_{BQ(min)} = V.C1_{BQ} - \frac{\Delta V.C1_{BQ}}{2} \quad (97)$$

$$I.L1_{BQ(pk)} = I.L1_{BQ} + \frac{\Delta I.L1_{BQ}}{2} \quad (98)$$

$$I_L1_{BQ(min)} = I_L1_{BQ} - \frac{\Delta I_L1_{BQ}}{2} \quad (99)$$

$$I_L2_{BQ(pk)} = I_L2_{BQ} + \frac{\Delta I_L2_{BQ}}{2} \quad (100)$$

$$I_L2_{BQ(min)} = I_L2_{BQ} - \frac{\Delta I_L2_{BQ}}{2} \quad (101)$$

$$V_SW_{BQ(pk)} = V_OUT_{BQ} + \frac{\Delta V_OUT_{BQ}}{2} \quad (102)$$

$$I_SW_{BQ(pk)} = (I_L1_{BQ} + \frac{\Delta I_L1_{BQ}}{2}) + (I_L2_{BQ} + \frac{\Delta I_L2_{BQ}}{2}) \quad (103)$$

$$V_D1_{BQ(pk)} = -(V_C1_{BQ} + \frac{\Delta V_C1_{BQ}}{2}) \quad (104)$$

$$I_D1_{BQ(pk)} = I_L1_{BQ} + \frac{\Delta I_L1_{BQ}}{2} \quad (105)$$

$$V_D2_{BQ(pk)} = (V_C1_{BQ} - \frac{\Delta V_C1_{BQ}}{2}) - (V_OUT_{BQ} - \frac{\Delta V_OUT_{BQ}}{2}) \quad (106)$$

$$I_D2_{BQ(pk)} = I_L1_{BQ} + \frac{\Delta I_L1_{BQ}}{2} \quad (107)$$

$$V_D3_{BQ(pk)} = -(V_OUT_{BQ} + \frac{\Delta V_OUT_{BQ}}{2}) \quad (108)$$

$$I_D3_{BQ(pk)} = I_L2_{BQ} + \frac{\Delta I_L2_{BQ}}{2} \quad (109)$$

5 PROJETOS E SIMULAÇÕES DOS PROTÓTIPOS DOS CONVERSORES BOOST E BOOST QUADRÁTICO

Neste capítulo serão apresentados os parâmetros de projeto baseados na aplicação do conversor em um sistema *nanogrid* fotovoltaico não isolado, o projeto dos conversores *boost* e *boost* quadrático e também uma comparação entre os resultados teóricos e os resultados da simulação. Posteriormente é apresentada uma análise sobre a relação entre ganho estático e rendimento em função da razão cíclica para ambos os conversores.

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS DE PROJETO

O projeto dos protótipos é baseado no MPP do painel solar monocristalino KM185 da Komaes Solar, buscando definir um valor de ganho estático e de potência para a comparação dos conversores. As principais características do MPP do painel são apresentadas, conforme Tabela 1. Esses valores são obtidos na condição padrão de teste, com irradiação solar de 1000 W/m^2 e temperatura do painel de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (KOMAES, 2017).

Tabela 1 – Grandezas elétricas do painel KM185.

Potência	Tensão	Corrente
185 W	36,79 V	5,04 A

Fonte: Adaptado de KOMAES (2017).

Outras considerações de projeto foram que a tensão de saída CC será de 250 V, valor esse geralmente utilizado para a conversão em 127 V_{RMS} , a ondulação de corrente nos indutores de 30% e a ondulação de tensão nos capacitores de 5% da tensão de saída e a frequência de chaveamento em 30 kHz. O valor de tensão da fonte CC de entrada será de 36,79 V e a resistência de carga do conversor R_{OUT} igual a $337,83784 \text{ } \Omega$, de modo a obter 185 W na saída do conversor. Visando tal potência na saída e considerando que existem perdas no conversor real, a fonte precisa suprir a potência demandada pela carga e compensar as perdas, assim a potência fornecida pela fonte é maior que 185 W, o que não seria possível utilizando o painel fotovoltaico. A fonte CC não representa precisamente um painel fotovoltaico, porém dessa maneira

é possível analisar os conversores próximo da potência a qual os mesmos iriam operar.

5.1.1 CONVERSOR BOOST

O projeto do conversor é realizado utilizando as equações ideais. Com isso são determinados os componentes e os valores de suas não idealidades e posteriormente é desenvolvida a análise do conversor considerando tais não idealidades.

Utilizando as equações da Sessão 4.1.2 foi possível determinar os valores dos componentes e de algumas variáveis importantes do CB ideal, conforme Tabelas 2 e 3, respectivamente. O valor do capacitor C_{1B} foi alterado de $1,683 \mu F$ para $2,2 \mu F$, sendo esse o valor comercial superior mais próximo visando aproximar ao que será utilizado posteriormente.

Tabela 2 – Parâmetros do CB.

Parâmetro	Valor
D_B	0,85284
L_{1B}	693,28675 μH
C_{1B}	2,2 μF
R_{OUT_B}	337,83784 Ω

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3 – Valor médio das variáveis do CB ideal.

Variável	Valor
V_{IN_B}	36,79 V
V_{OUT_B}	250 V
G_B	6,79532
I_{L1_B}	5,02854 A
I_{R_B}	0,74 A
V_{SW_B}	36,79 V
I_{SW_B}	4,28854 A
V_{D1_B}	-213,21 V
I_{D1_B}	0,74 A

Fonte: Autoria própria.

Também foram calculados os valores de máximos e mínimos de tensão e corrente sobre os componentes do CB, conforme Tabela 4.

Baseado nos valores das Tabelas 3 e 4, foi optado por utilizar o diodo 30ETH06 e a chave MOSFET IRFP460PbF. Dado seus respectivos *datasheets*, para o diodo em sua curva de tensão de condução, a $175^\circ C$, determinou-se uma tensão de condução de $0,5 V$ e para a chave determinou um $R_{DS(on)}$, ou aqui descrito como R_{SW_B} , típico de $0,27 \Omega$ (IR, 2001) (IR, 2003). Também foi possível projetar o indu-

tor $L1_B$, onde determinou-se o valor teórico de $R.L1_B$ em $0,11857 \Omega$, considerando o condutor em uma temperatura de $100 \text{ }^\circ\text{C}$ (BARBI *et al.*, 2002). Os valores das não idealidades são apresentados na Tabela 5.

Tabela 4 – Valores máximos e mínimos das variáveis do CB ideal.

Variável	Valor
ΔV_{OUT_B}	9,56215 V
ΔI_{L1_B}	1,50856 A
$V_{OUT_B(pk)}$	254,78107 V
$V_{OUT_B(min)}$	245,21893 V
$I_{L1_B(pk)}$	5,78282 A
$I_{L1_B(min)}$	4,27426 A
$V_{SW_B(pk)}$	254,78107 V
$I_{SW_B(pk)}$	5,78282 A
$V_{D1_B(pk)}$	-254,78107 V
$I_{D1_B(pk)}$	5,78282 A

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5 – Valores das não idealidades consideradas para o CB.

Variável	Valor
V_{D1_B}	0,5 V
R_{SW_B}	0,27 Ω
R_{L1_B}	0,11857 Ω

Fonte: Autoria própria.

Com componentes e não idealidades definidos, é possível simular o CB e comparar os resultados com valores teóricos. Com a inserção das não idealidades do efeito ESR a tensão de saída não é a mesma da projetada, sendo necessário ajustar a razão cíclica de modo a obter a tensão desejada, sendo a nova razão cíclica D_B de 0,86057. Assim, as Tabelas 6 e 7 apresentam a comparação dos resultados da simulação do CB não ideal com os resultados das equações não ideais apresentadas na Sessão 4.1.1. O *software* utilizado para ambas simulações foi o PSIM Versão 9.0, com um tempo total de simulação de $0,1001 \text{ s}$, com passo de simulação de 5 ns e utilizando os últimos três períodos do sinal para a determinação dos resultados.

A Tabela 7 apresenta o valor mínimo da corrente no indutor $L1_B$ maior que zero, garantido o modo de operação CCM (MOHAN; UNDELAND, 2007). Um fator importante ainda não calculado é o rendimento do conversor, que relaciona potência de entrada e potência de saída, e que pela Equação (43) permite estimar um valor de rendimento por meio da tensão e corrente de entrada e de saída.

Tabela 6 – Comparação entre valores médios teóricos e simulados do CB não ideal.

Variável	Valor teórico	Valor simulado
V_{IN_B}	36,79 V	36,79 V
V_{OUT_B}	250 V	249,77253 V
G_B	6,79532	6,78914
I_{L1_B}	5,30727 A	5,29982 A
I_{R_B}	0,74 A	0,73933 A
V_{SW_B}	36,1607 V	36,16846 V
I_{SW_B}	4,56727 A	4,56037 A
V_{D1_B}	-213,8393 V	-213,60407 V
I_{D1_B}	0,74 A	0,73945 A

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 – Comparação entre valores máximos e mínimos teóricos e simulados do CB não ideal.

Variável	Valor teórico	Valor simulado
ΔV_{OUT_B}	9,6488 V	9,63853 V
ΔI_{L1_B}	1,4369 A	1,43699 A
$V_{OUT_B(pk)}$	254,8244 V	254,58282 V
$V_{OUT_B(min)}$	245,1756 V	244,94429 V
$I_{L1_B(pk)}$	6,02573 A	6,01587 A
$I_{L1_B(min)}$	4,58882 A	4,57888 A
$V_{SW_B(pk)}$	255,3244 V	255,08287 V
$I_{SW_B(pk)}$	6,02573 A	6,01589 A
$V_{D1_B(pk)}$	-253,58542 V	-253,34594 V
$I_{D1_B(pk)}$	6,02573 A	6,01559 A

Fonte: Autoria própria.

A comparação entre as estimativas de rendimento teórico e simulado, por meio da Equação (7), é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 – Comparação entre a estimativa de rendimento teórico e simulado do CB não ideal.

Variável	Valor teórico	Valor simulado
η_B	0,94748	0,94709

Fonte: Autoria própria.

Os resultados entre teoria e simulação apresentados nas Tabelas 6, 7 e 8 são próximos, sendo o maior erro percentual relativo de aproximadamente 0,216% (sobre o valor da corrente mínima no indutor $L1_B$). O cálculo do erro relativo percentual é apresentado abaixo:

$$\text{Erro (\%)} = \frac{\text{Valor teórico} - \text{Valor prático}}{\text{Valor teórico}} \cdot 100$$

5.1.2 CONVERSOR BOOST QUADRÁTICO

O procedimento para o projeto do CBQ é semelhante ao do CB. Utilizando as equações da Sessão 4.1.4 foi possível determinar os valores dos componentes e de algumas variáveis importantes do CBQ ideal, conforme Tabelas 9 e 10, respectivamente. O valor dos capacitores $C_{1_{BQ}}$ e $C_{2_{BQ}}$ foram alterados de $3,17072 \mu F$ e $1,21633 \mu F$ para $3,3 \mu F$ e $2,2 \mu F$, respectivamente, sendo esses os valores comerciais superiores mais próximos visando aproximar ao que serão utilizados posteriormente.

Tabela 9 – Componentes do CBQ.

Componente	Valor
D_{BQ}	0,61639
$L_{1_{BQ}}$	501,06934 μH
$L_{2_{BQ}}$	3,40493 mH
$C_{1_{BQ}}$	3,3 μF
$C_{2_{BQ}}$	2,2 μF
$R_{OUT_{BQ}}$	337,83784 Ω

Fonte: Autoria própria.

Tabela 10 – Valor médio das variáveis do CBQ ideal.

Variável	Valor
$V_{IN_{BQ}}$	36,79 V
$V_{OUT_{BQ}}$	250 V
G_{BQ}	6,79532
$I_{L1_{BQ}}$	5,02854 A
$I_{L2_{BQ}}$	1,92902 A
$I_{R_{BQ}}$	0,74 A
$V_{SW_{BQ}}$	95,9036 V
$I_{SW_{BQ}}$	4,28854 A
$V_{D1_{BQ}}$	-59,1136 V
$I_{D1_{BQ}}$	1,92902 A
$V_{D2_{BQ}}$	-59,1136 V
$I_{D2_{BQ}}$	3,09952 A
$V_{D3_{BQ}}$	-154,0964 V
$I_{D3_{BQ}}$	0,74 A

Fonte: Autoria própria.

Também foram calculados os valores de máximos e mínimos de tensão e corrente sobre os componentes do CBQ, conforme Tabela 11.

Tabela 11 – Valores máximos e mínimos das variáveis do CBQ ideal.

Variável	Valor
$\Delta V_{C1_{BQ}}$	12,01031 V
$\Delta V_{OUT_{BQ}}$	6,91099 V
ΔI_{L1_B}	1,50856 A
ΔI_{L2_B}	0,57871 A
$V_{OUT_{BQ(pk)}}$	253,4555 V
$V_{OUT_{BQ(min)}}$	246,5445 V
$I_{L1_{BQ(pk)}}$	5,78282 A
$I_{L1_{BQ(min)}}$	4,27426 A
$I_{L2_{BQ(pk)}}$	2,21837 A
$I_{L2_{BQ(min)}}$	1,63967 A
$V_{SW_{BQ(pk)}}$	256,25 V
$I_{SW_{BQ(pk)}}$	8,00119 A
$V_{D1_{BQ(pk)}}$	-102,1536 V
$I_{D1_{BQ(pk)}}$	5,78282 A
$V_{D2_{BQ(pk)}}$	-154,0964 V
$I_{D2_{BQ(pk)}}$	5,78282 A
$V_{D3_{BQ(pk)}}$	-256,25 V
$I_{D3_{BQ(pk)}}$	2,21837 A

Fonte: Autoria própria.

Foi escolhido utilizar novamente o diodo 30ETH06 e a chave MOSFET IRFP460PbF. As tensões de condução dos diodos foram de 0,7 V, 0,8 V e 0,7 V para os diodos $D1_{BQ}$, $D2_{BQ}$ e $D3_{BQ}$, respectivamente. A resistência $R_{SW_{BQ}}$ se mantém em 0,27 Ω e as resistências teóricas $R_{L1_{BQ}}$ e $R_{L2_{BQ}}$ foram calculadas em 0,08469 Ω e 0,44657 Ω , respectivamente. As não idealidades do CBQ foram considerados nas mesmas condições que as do CB e são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Valores das não idealidade consideradas para o CBQ.

Variável	Valor
$V_{D1_{BQ}}$	0,7 V
$V_{D2_{BQ}}$	0,8 V
$V_{D3_{BQ}}$	0,7 V
$R_{SW_{BQ}}$	0,27 Ω
$R_{L1_{BQ}}$	0,08469 Ω
$R_{L2_{BQ}}$	0,44657 Ω

Fonte: Autoria própria.

Com a inserção das não idealidades a tensão de saída não é igual a projetada, como visto anteriormente, sendo a nova razão cíclica D_{BQ} de 0,6347.

As Tabelas 13 e 14 apresentam uma comparação entre os resultados simulados e teóricos, baseados nas equações da Sessão 4.1.3, do CBQ não ideal.

Tabela 13 – Comparação entre os valores médios teóricos e simulados do CBQ não ideal.

Variável	Valor teórico	Valor simulado
$V_{IN_{BQ}}$	36,79 V	36,79 V
$V_{OUT_{BQ}}$	250 V	249,87508 V
$V_{C1_{BQ}}$	93,78358 V	93,80505 V
G_{BQ}	6,79532	6,79193
$I_{L1_{BQ}}$	5,5453 A	5,543 A
$I_{L2_{BQ}}$	2,02571 A	2,03054 A
$I_{R_{BQ}}$	0,74 A	0,73963 A
$V_{SW_{BQ}}$	92,87895 V	92,90341 V
$I_{SW_{BQ}}$	4,8053 A	4,80341 A
$V_{D1_{BQ}}$	-57,46323 V	-57,48495 V
$I_{D1_{BQ}}$	2,02571 A	2,03047 A
$V_{D2_{BQ}}$	-56,55861 V	-56,58331 V
$I_{D2_{BQ}}$	3,51958 A	3,51252 A
$V_{D3_{BQ}}$	-157,12105 V	-156,97167 V
$I_{D3_{BQ}}$	0,74 A	0,73965 A

Fonte: Autoria própria.

Tabela 14 – Comparação entre valores máximos e mínimos teóricos e simulados do CBQ não ideal.

Variável	Valor teórico	Valor simulado
$\Delta V_{OUT_{BQ}}$	7,1163 V	7,10999 V
$\Delta V_{C1_{BQ}}$	12,98701 V	13,03825 V
$\Delta I_{L1_{BQ}}$	1,41346 A	1,41342 A
$\Delta I_{L2_{BQ}}$	0,5644 A	0,56463 A
$V_{OUT_{BQ}(pk)}$	253,55815 V	253,34227 V
$V_{OUT_{BQ}(min)}$	246,44185 V	246,23228 V
$V_{C1_{BQ}(pk)}$	100,27708 V	100,03704 V
$V_{C1_{BQ}(min)}$	87,29007 V	86,99879 V
$I_{L1_{BQ}(pk)}$	6,25202 A	6,23865 A
$I_{L1_{BQ}(min)}$	4,83857 A	4,82523 A
$I_{L2_{BQ}(pk)}$	2,30791 A	2,30897 A
$I_{L2_{BQ}(min)}$	1,74351 A	1,74434 A
$V_{SW_{BQ}(pk)}$	254,25815 V	254,04229 V
$I_{SW_{BQ}(pk)}$	8,55994 A	8,54765 A
$V_{D1_{BQ}(pk)}$	-97,69992 V	-97,46310 V
$I_{D1_{BQ}(pk)}$	6,25202 A	6,23867 A
$V_{D2_{BQ}(pk)}$	-159,15178 V	-159,23397 V
$I_{D2_{BQ}(pk)}$	6,25202 A	6,23866 A
$V_{D3_{BQ}(pk)}$	-251,78099 V	-251,56786 V
$I_{D3_{BQ}(pk)}$	2,30792 A	2,30884 A

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 14 apresenta os valores mínimos das correntes no indutor L_{1BQ} e no indutor L_{2BQ} maiores que zero, garantido o modo de operação CCM (NAVAMANI *et al.*, 2015).

A comparação entre das estimativas de rendimento teórico e simulado, por meio da Equação (43), é apresentada na Tabela 15.

Tabela 15 – Comparação entre a estimativa de rendimento teórico e simulado do CBQ não ideal.

Variável	Valor teórico	Valor simulado
η_{BQ}	0,90681	0,90628

Fonte: Autoria própria.

Novamente os resultados entre teoria e simulação, apresentados nas Tabelas 13, 14 e 15 são próximos, sendo o maior erro percentual relativo de aproximadamente 0,395% (sobre o valor da variação de tensão no capacitor C_{1BQ}).

5.2 RELAÇÃO DE GANHO ESTÁTICO E RENDIMENTO

Através das equações não ideais dos conversores, foi realizada uma análise do ganho estático e do rendimento de cada conversor em função da razão cíclica. As Figuras 11 e 12 apresentam as curvas de ganho estático e rendimento do CB e do CBQ respectivamente. As Figuras 13 e 14 apresentam as comparações entre ganho estático e rendimento do CB e CBQ, respectivamente.

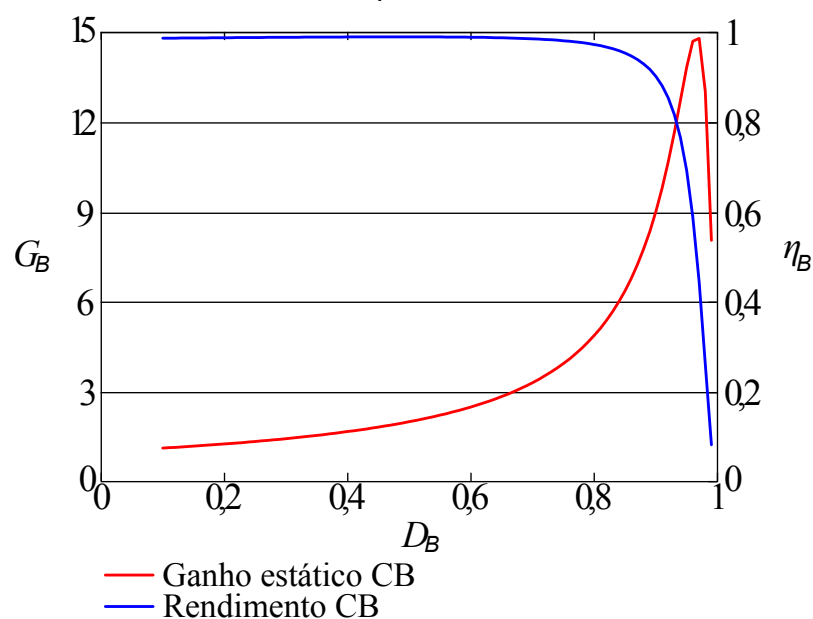


Figura 11 – Relação entre ganho estático e rendimento do conversor *boost* em função da razão cíclica.

Fonte: Autoria própria.

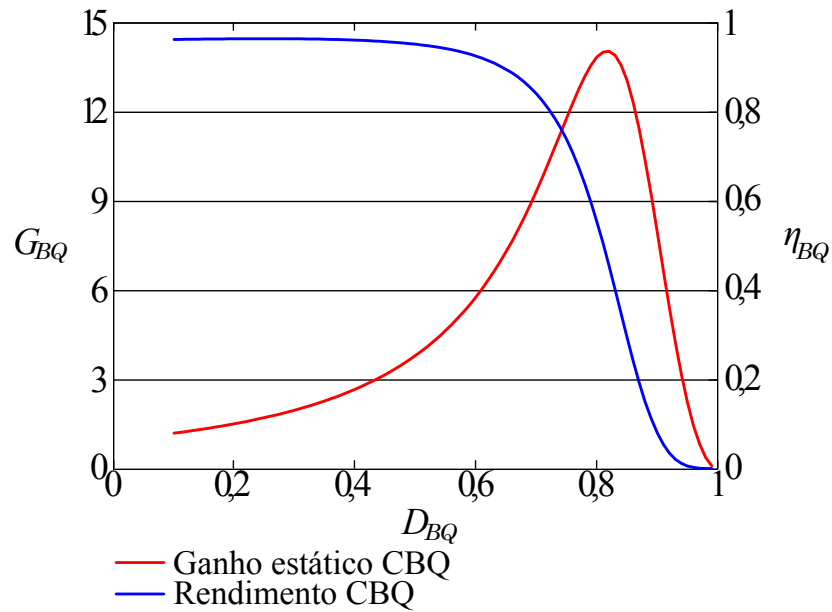


Figura 12 – Relação entre ganho estático e rendimento do conversor *boost* quadrático em função da razão cíclica.

Fonte: Autoria própria.

Apesar de, teoricamente, os conversores poderem trabalhar com um ganho estático maior, a medida que a razão cíclica se aproxima do valor unitário o rendimento cai, inviabilizando aplicações que exigem alto rendimento, conforme Figuras 11 e 12.

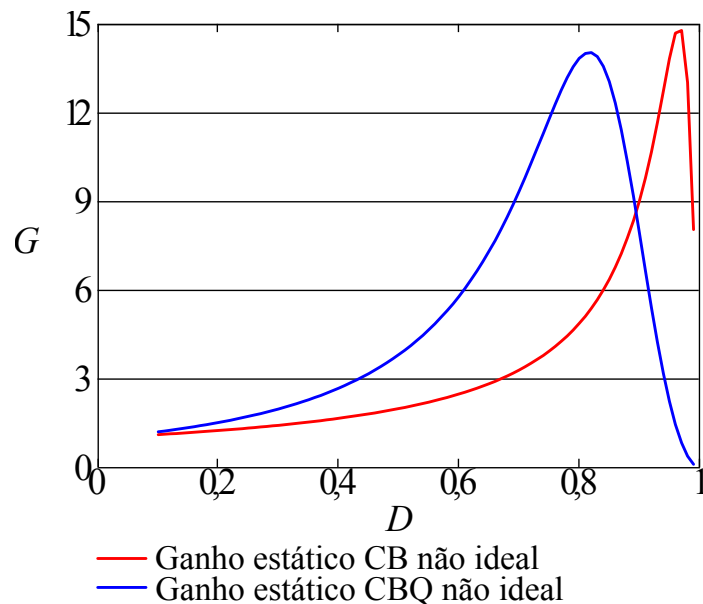


Figura 13 – Comparação do ganho estático do CB e do CBQ em função da razão cíclica.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 13 apresenta os ganhos estáticos do CB e CBQ, onde o ganho do CBQ apresenta vantagem, até o ponto de interseção das curvas, por alcançar um maior ganho estático para uma mesma razão cíclica.

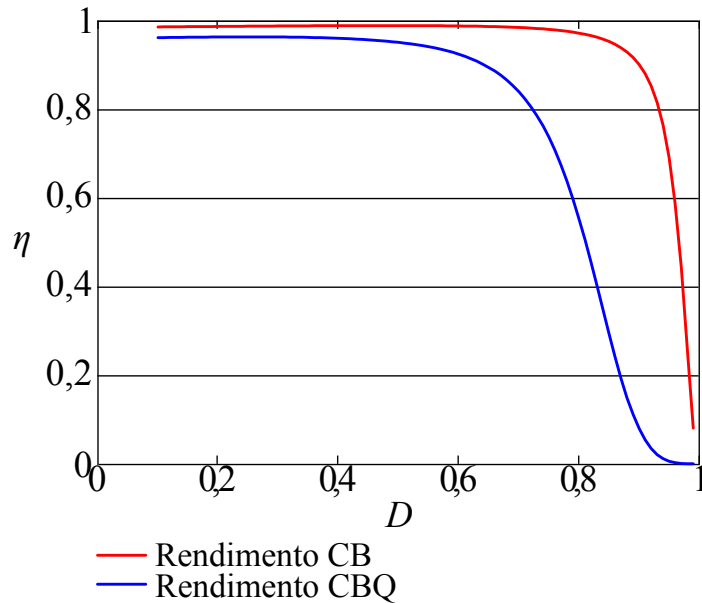


Figura 14 – Comparação do rendimento do conversor *boost* e do conversor *boost quadrático* em função da razão cíclica.

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 14 é notável que para a mesma razão cíclica, em nenhum momento o rendimento do CBQ é maior que CB, só sendo possível tal evento se conversores trabalhem com diferentes valores de razão cíclica.

Os valores das variáveis utilizadas para os projetos dos indutores são apresentados na Tabela 16, conforme projeto apresentado por Barbi *et al.* (2002).

Tabela 16 – Variáveis para os projetos dos indutores.

Variável	$L1_B$	$L1_{BQ}$	$L2_{BQ}$
B_{max}	0,3 T	0,3 T	0,3 T
J_{max}	450 A/cm ²	450 A/cm ²	450 A/cm ²
K_w	0,7	0,7	0,7
$I_{L_{pk}}$	5,78282 A	5,78282 A	2,21837 A
$I_{L_{min}}$	4,27426 A	4,27426 A	1,63967 A
$I_{L_{rms}}$	5,04736 A	5,04736 A	1,93624 A
Núcleo	NEE – 42/21/15	NEE – 42/21/15	NEE – 42/21/15
Condutor	AWG 22	AWG 22	AWG 22
Nº de condutores	4	4	2

Fonte: Autoria própria.

Por meio da simulação, também foram obtidas as formas da tensão sobre alguns componentes dos conversores. A Figura 15 apresenta as formas de tensão sobre a chave SW_B e o diodo $D1_B$, e a Figura 16 apresenta as formas de tensão sobre a chave SW_{BQ} , $D1_{BQ}$, $D2_{BQ}$ e $D3_{BQ}$.

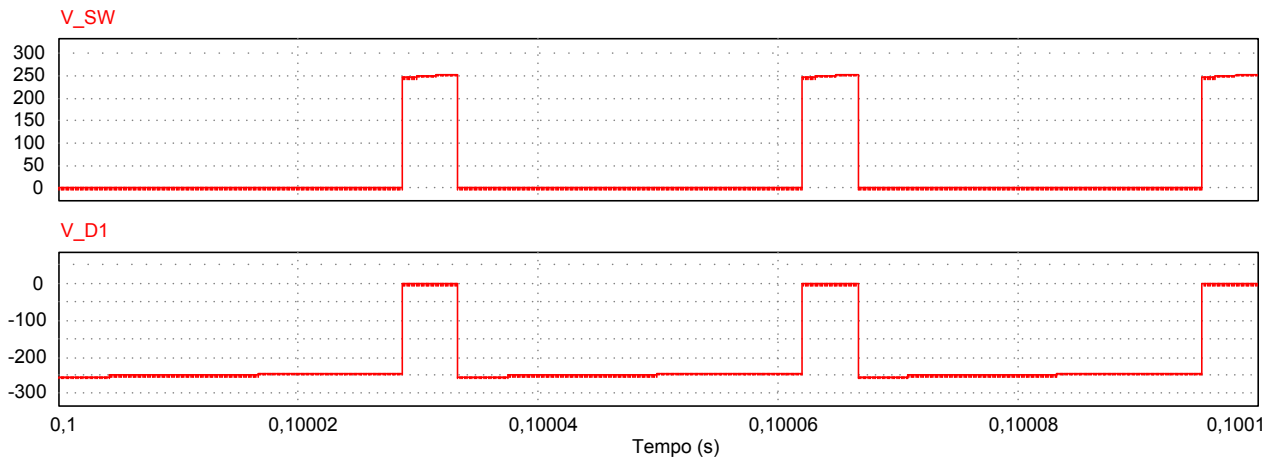


Figura 15 – Tensão sobre SW_B e $D1_B$ do conversor *boost*.
Fonte: Autoria própria.

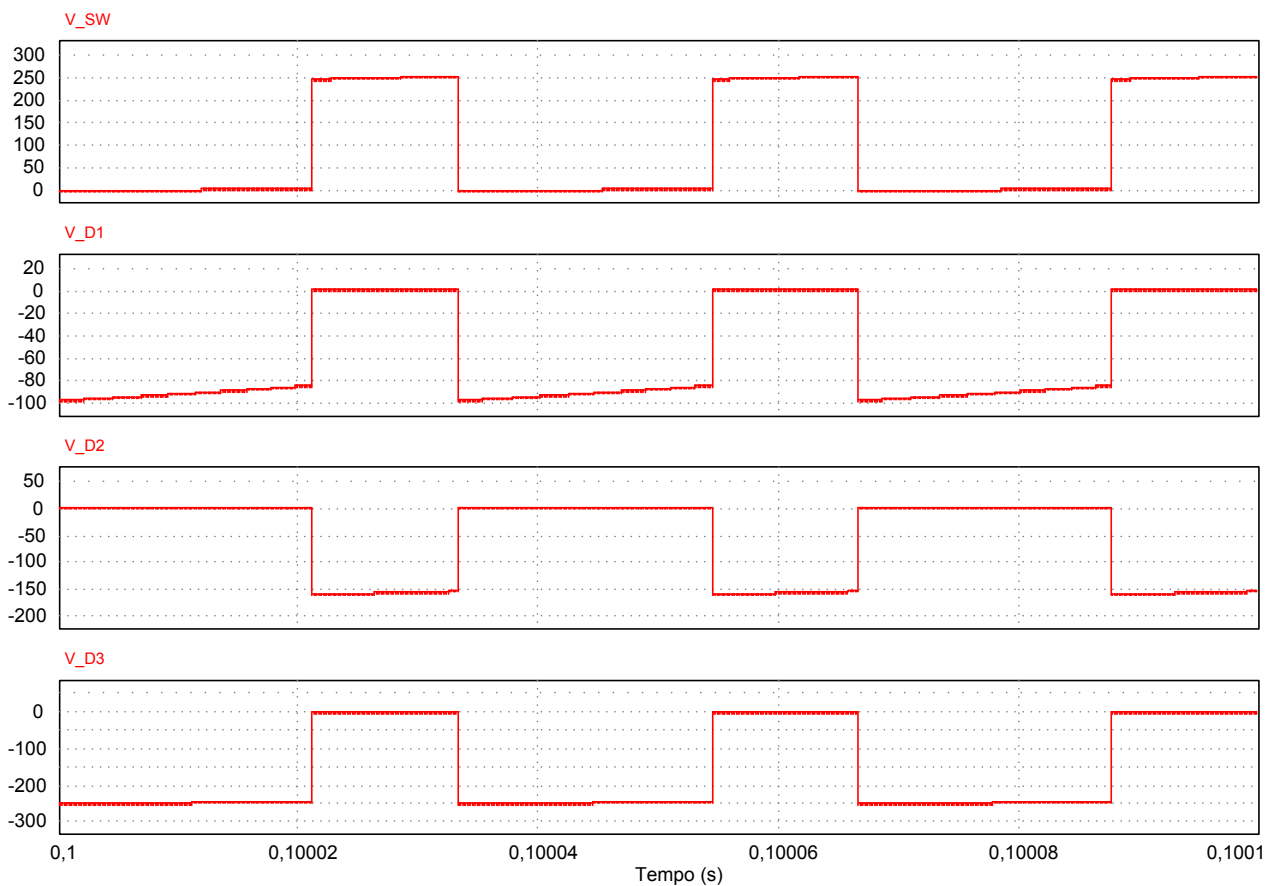


Figura 16 – Tensão sobre SW_{BQ} , $D1_{BQ}$, $D2_{BQ}$ e $D3_{BQ}$ do conversor *boost* quadrático.
Fonte: Autoria própria.

Portanto, nesse capítulo foi possível comparar os valores teóricos e simulados, considerando as não idealidades de efeito ESR dos indutores, resistência de condução da chave e tensão de condução dos diodos. Para as condições de projeto, o CB apresentou um rendimento superior ao CBQ, assim a razão cíclica reduzida do CBQ não é suficiente para compensar a sua topologia e o número de componentes para elevar a eficiência do mesmo.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados da implementação dos protótipos do CB e CBQ. Também serão analisados e discutidos tais resultados em comparação com os valores teóricos do conversor não ideal. Também serão discutidos algumas considerações acerca das não idealidades consideradas.

6.1 IMPLEMENTAÇÃO DOS PROTÓTIPOS DO CB E CBQ

6.1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS DE IMPLEMENTAÇÃO

Utilizada para ambos os conversores, a tensão de entrada foi feita utilizando três fontes de tensão CC em paralelo com $36,8V$ cada, visando que os conversores drenam correntes maiores que $6 A$ e cada fonte disponível em laboratório é limitada em $3 A$. Também foram utilizados dois reostatos de 300Ω em série, ajustados com o auxílio de um multímetro, de modo a obter 337Ω para a carga. O sinal de acionamento utilizado é proveniente de um circuito *driver*, composto de um CI SG3524, que gera o sinal e permite modificar a frequência e a razão cíclica por meio de resistores variáveis, e um circuito de acionamento integrado com *buffer totem pole*, sendo que a potência consumida pelo *driver* não será considerada para a estimativa da eficiência (TI, 2015) (HART, 2001). As medidas de tensões dos circuitos foram realizadas utilizando um osciloscópio, de forma a obter o formato da onda e seu valor médio.

Outro fator importante são as não idealidades consideradas. Para a tensão de condução dos diodos e a resistência de condução da chave foram mantidos os valores estimados baseados nos respectivos *datasheets*. Os valores das resistências dos indutores foram alterados devido a limitação física de espaço nos núcleos para o número de espiras projetadas, e essa mudança conseqüentemente altera também a razão cíclica do conversor. Buscando representar de maneira mais fiel as não idealidades, novas resistências e razões cíclicas foram projetadas, conforme Tabela 17.

O valor prático das resistências dos indutores foram medidos em temperatura ambiente, próxima de $20 ^\circ C$, e comparados com os valores estimados teoricamente a $20 ^\circ C$, sendo o maior erro percentual relativo de aproximadamente 10%. Os valores considerados para o cálculo de comparação com a prática foram os de $100 ^\circ C$,

considerando o fato de que os indutores operam aquecidos em uma temperatura mais elevada.

Os resultados teóricos foram recalculados de acordo com as mudanças realizadas nos valores

Tabela 17 – Comparação entre valores práticos e teóricos das resistências dos indutores dos protótipos CB e CBQ.

Variável	Valor prático	Valor teórico 20 °C	Valor teórico 100 °C
R_{L1B}	0,0638 Ω	0,06455 Ω	0,08623 Ω
D_B	-	-	0,85984
R_{L1BQ}	0,058 Ω	0,05648 Ω	0,07546 Ω
R_{L2BQ}	0,207 Ω	0,23055 Ω	0,30798 Ω
D_{BQ}	-	-	0,6338

Fonte: Autoria própria.

6.1.2 CONVERSOR BOOST

Primeiramente foi implementado o protótipo do CB, em placa de circuito impresso. Após o conversor e o sinal de acionamento estarem conectados, foi utilizado um canal do osciloscópio na entrada do CB e outro canal na saída do mesmo. Assim, foi possível acompanhar a tensão de entrada e saída ao mesmo tempo, conforme variava-se o valor da razão cíclica. Assim a Figura 17 apresenta a tensão de entrada, canal 1 amarelo, e a tensão de saída, canal 2 azul, do protótipo do CB.

Posteriormente foi analisado o sinal do acionamento, conforme Figura 18. Nessa figura é possível observar a frequência de acionamento, em torno 30 kHz, e também, entre os cursores, o tempo de chave ativa, assim permitindo uma estimativa da razão cíclica do sinal, por meio das Equações (1) e (2), utilizado na obtenção da Figura 17. Com isso, obteve-se uma razão cíclica D_B de 0,864.

A estimativa de rendimento do conversor, por meio da Equação (7), é apresentada abaixo:

$$\eta_B = \frac{P_{OUT_B}}{P_{IN_B}} \cong \frac{V_{OUT_B}}{V_{IN_B}} \cdot (1 - D_B) = \frac{251 V}{36,8 V} \cdot (1 - 0,864) = 0,92761$$

A Tabela 18 apresenta uma comparação dos valores teóricos e práticos das variáveis envolvidas na estimativa do rendimento do protótipo do CB e o erro percentual relativo das mesmas.

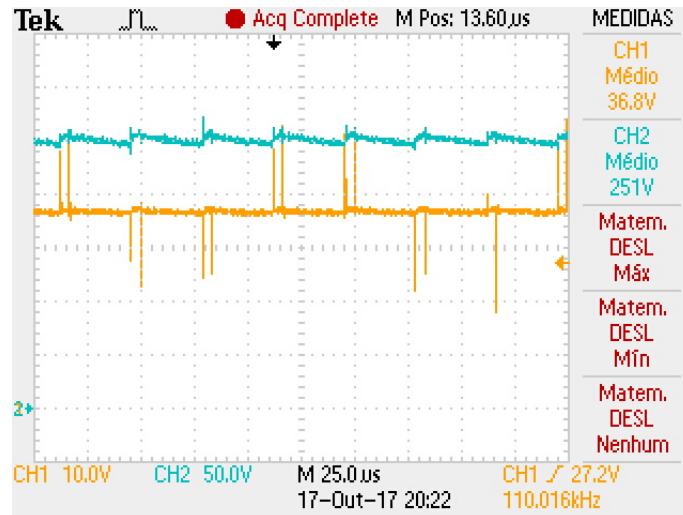


Figura 17 – Tensão de entrada e de saída do protótipo do conversor *boost*.
Fonte: Autoria própria.

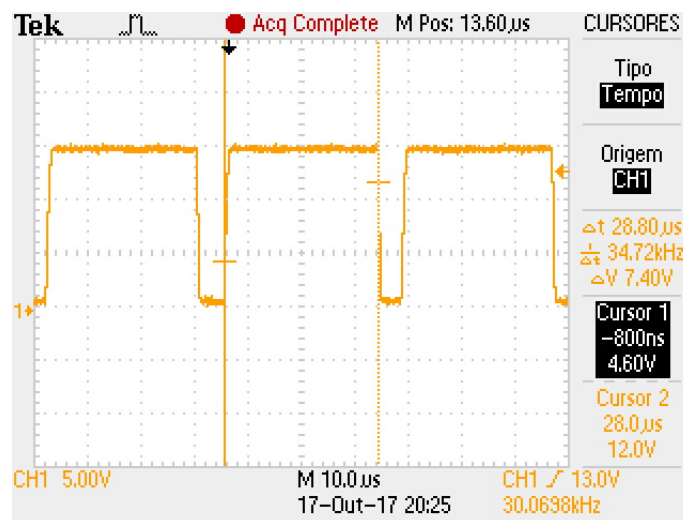


Figura 18 – Sinal de acionamento, com frequência e tempo de chave ativa permitindo a estimativa da razão cíclica do protótipo do conversor *boost*.
Fonte: Autoria própria.

Tabela 18 – Comparação entre valores teóricos e práticos das variáveis do protótipo do CB para estimativa do rendimento.

Variável	Valor teórico	Valor prático	Erro (%)
V_{OUT_B}	250 V	251 V	0,4
V_{IN_B}	36,79 V	36,8 V	0,02718
G_B	6,79532	6,82065	0,37276
D_B	0,85984	0,864	0,48381
η_B	0,95567	0,92761	2,93616

Fonte: Autoria própria.

A tensão sobre o diodo $D1_B$ e a chave SW_B é apresentada nas Figuras 19 e 20. A Tabela 19 apresenta a comparação entre os valores de tensão teóricos e práticos dos componentes citados.

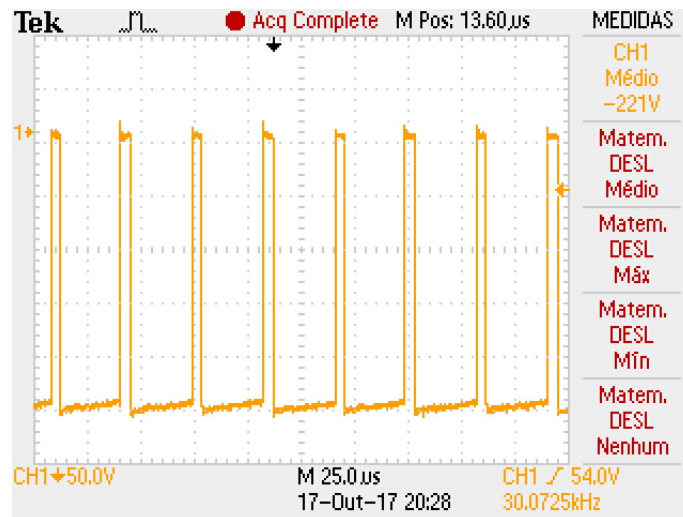


Figura 19 – Tensão sobre o diodo $D1_B$ do protótipo do conversor *boost*.
Fonte: Autoria própria.

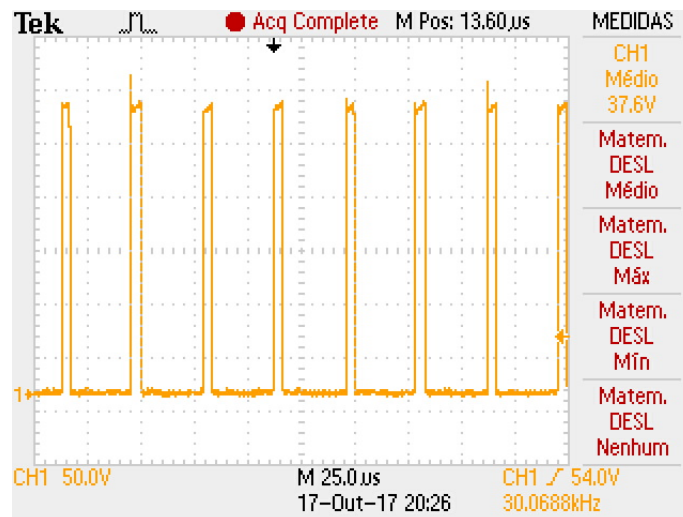


Figura 20 – Tensão sobre a chave SW_B do protótipo do conversor *boost*.
Fonte: Autoria própria.

Tabela 19 – Comparação entre valores teóricos e práticos da tensão do diodo e da chave do protótipo do CB.

Variável	Valor teórico	Valor prático	Erro (%)
V_{D1_B}	-213,54967 V	-221 V	3,46333
V_{SW_B}	36,45033 V	37,6 V	3,15407

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 20 é possível observar o modo de condução CCM, em que a tensão na chave possui dois estágios, zero e tensão de saída, diferente do Modo de Condução Descontínuo (*Discontinuous-Conduction Mode*, DCM) em que a tensão na chave apresenta três estágios, com zero, tensão de saída e tensão de entrada (MARTINS; BARBI, 2006).

6.1.3 CONVERSOR BOOST QUADRÁTICO

O protótipo do CBQ também foi implementado em placa de circuito impresso. As análises foram feitas da mesma forma que para o CB, em que a tensão de entrada e saída foram analisadas ao mesmo tempo e essa era controlada com o ajuste da razão cíclica do *driver*, de modo a obter a tensão desejada na saída. Dessa maneira, a Figura 21 apresenta a tensão de entrada, canal 1 amarelo, e a tensão de saída, canal 2 azul, do CBQ.

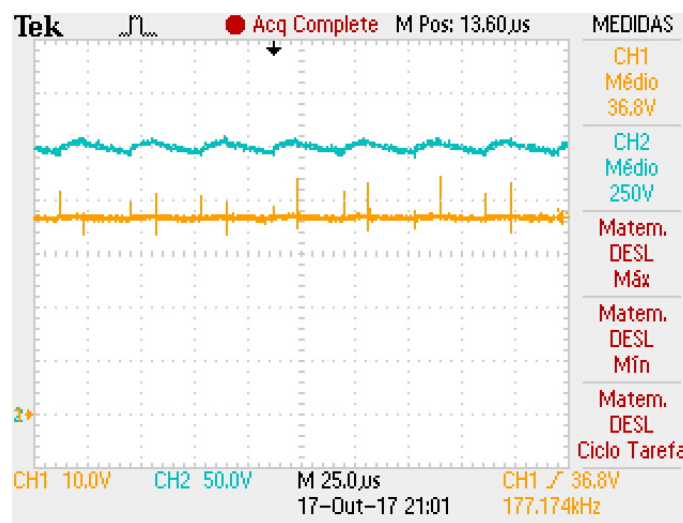


Figura 21 – Tensão de entrada e de saída do protótipo do conversor *boost* quadrático.
Fonte: Autoria própria.

Então foi analisado o sinal de acionamento do CBQ, conforme Figura 22.

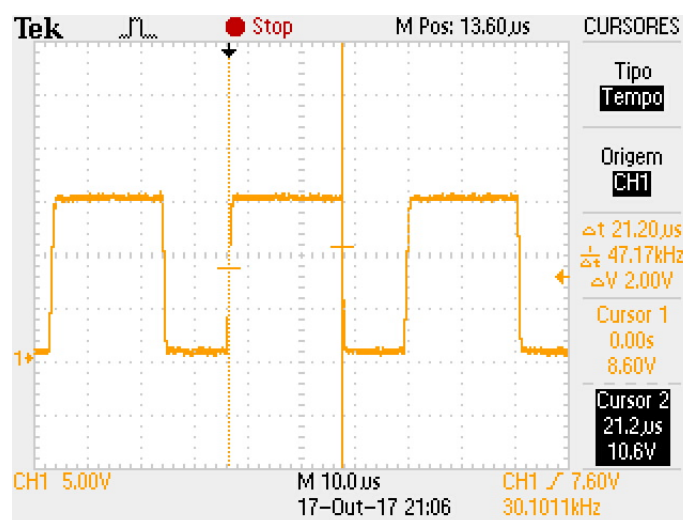


Figura 22 – Sinal de acionamento, com frequência e tempo de chave ativa permitindo a estimativa da razão cíclica do protótipo do conversor *boost* quadrático.
Fonte: Autoria própria.

A figura apresenta o valor da frequência, em torno de 30 kHz , e entre os cursores o tempo em que a chave permanece ativa, possibilitando estimar através das

Equações (1) e (2) o valor da razão cíclica, que resultou em uma razão cíclica D_{BQ} de 0,636.

A estimativa de rendimento do conversor, por meio da Equação (43), é apresentada abaixo:

$$\eta_{BQ} = \frac{P_{OUT_{BQ}}}{P_{IN_{BQ}}} \cong \frac{V_{OUT_{BQ}}}{V_{IN_{BQ}}} \cdot (1 - D_{BQ})^2 = \frac{250 \text{ V}}{36,8 \text{ V}} \cdot (1 - 0,636)^2 = 0,90011$$

A Tabela 20 apresenta uma comparação entre os valores teóricos e práticos das variáveis utilizadas para a estimativa do rendimento do CBQ e o erro percentual relativo das mesmas.

Tabela 20 – Comparação entre valores teóricos e práticos das variáveis do protótipo do CBQ para estimativa do rendimento.

Variável	Valor teórico	Valor prático	Erro (%)
$V_{OUT_{BQ}}$	250 V	250 V	0
$V_{IN_{BQ}}$	36,79 V	36,8 V	0,02718
G_{BQ}	6,79532	6,79348	0,02708
D_{BQ}	0,6338	0,636	0,34711
η_{BQ}	0,91128	0,90011	1,22575

Fonte: Autoria própria.

A estimativa do rendimento do CBQ foi por meio da Equação (43), relacionado ganho estático e razão cíclica. Também foi analisada a tensão sobre os diodos e a chave do CBQ. As Figuras de 23 a 26 representam a tensão sobre o diodo $D1_{BQ}$, diodo $D2_{BQ}$, diodo $D3_{BQ}$ e chave SW_{BQ} , respectivamente.

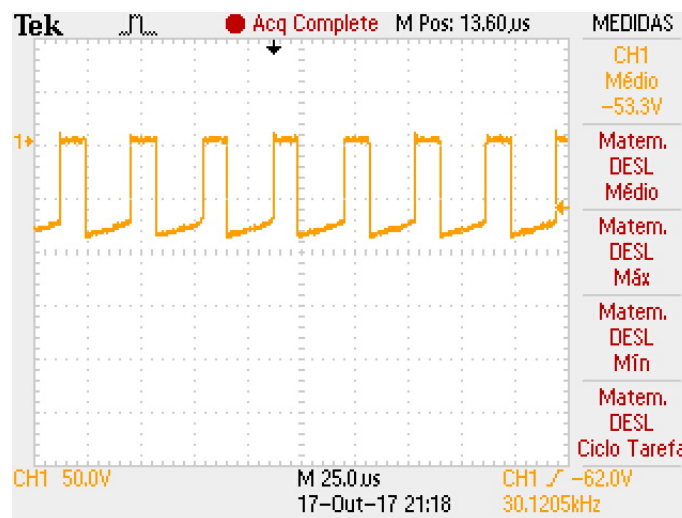


Figura 23 – Tensão sobre o diodo $D1_{BQ}$ do protótipo do conversor *boost* quadrático.

Fonte: Autoria própria.

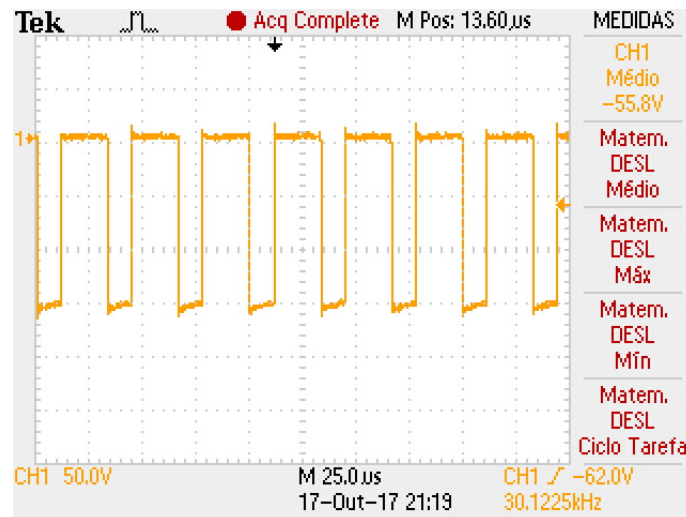


Figura 24 – Tensão sobre o diodo $D2_{BQ}$ do protótipo do conversor *boost* quadrático.
Fonte: Autoria própria.

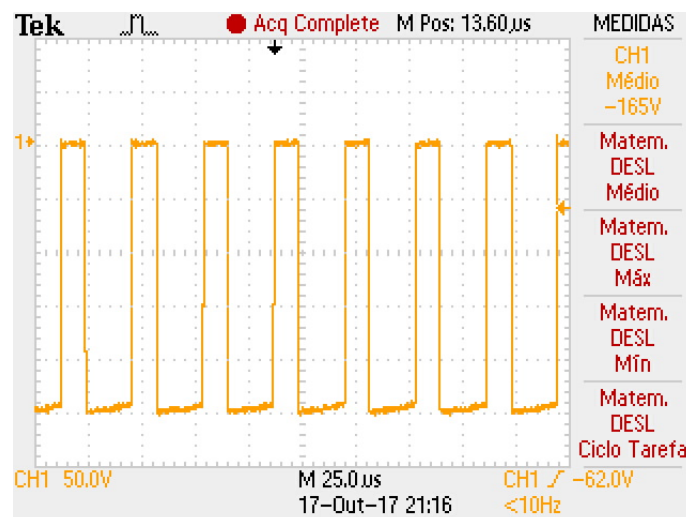


Figura 25 – Tensão sobre o diodo $D3_{BQ}$ do protótipo do conversor *boost* quadrático.
Fonte: Autoria própria.

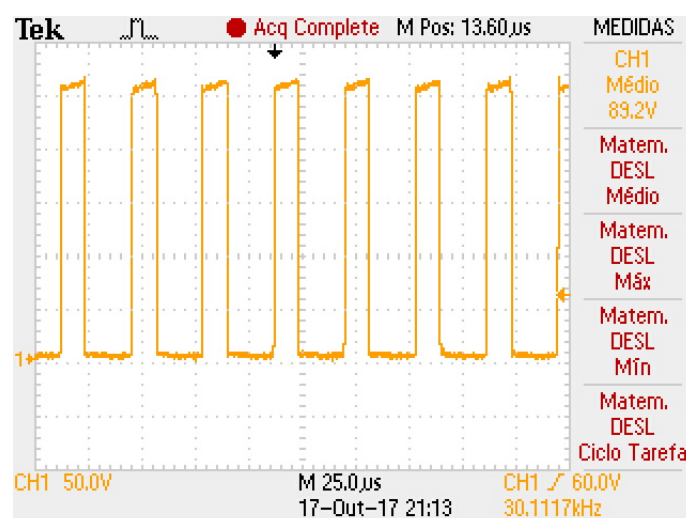


Figura 26 – Tensão sobre a chave SW_{BQ} do protótipo do conversor *boost* quadrático.
Fonte: Autoria própria.

O CBQ pode operar em quatro modos de condução diferentes. O primeiro modo é quando ambos indutores estão em CCM, o segundo quando ambos estão em DCM e os dois últimos modos são quando apenas um dos indutores está em DCM. O modo CCM do CBQ pode ser visto por meio das Figuras de 23 a 25. Isso se deve ao fato de que a tensão nos diodos possuem apenas dois estágios, diferentemente dos outros modos DCM que apresentam três estágios, variando sobre qual componente será feita análise de acordo com o modo de operação (YAN *et al.*, 2013).

A Tabela 21 apresenta uma comparação entre os valores teóricos e práticos de tensão sobre os diodos e a chave do CBQ e o erro percentual relativo dos mesmos.

Tabela 21 – Comparação entre valores teóricos e práticos da tensão dos diodos e da chave do protótipo do CBQ.

Variável	Valor teórico	Valor prático	Erro (%)
$V_{D1_{BQ}}$	-57,34561 V	-53,3 V	7,05479
$V_{D2_{BQ}}$	-56,72326 V	-55,8 V	1,62766
$V_{D3_{BQ}}$	-156,90311 V	-165 V	5,16044
$V_{SW_{BQ}}$	93,09689 V	89,2 V	4,1858

Fonte: Autoria própria.

6.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os valores obtidos na prática foram relativamente próximos dos valores teóricos, sendo o maior erro percentual relativo de 7,05479%. A diferença entre teoria e prática pode estar atribuída a alguns fatores não considerados, como a o efeito ESR dos capacitores, a resistência das trilhas, perdas no chaveamento ou até mesmo em valores diferentes dos fatores considerados, como a resistência da chave ou das tensões de condução dos diodos, devido a temperatura de operação dos conversores.

A diferença também podem estar atribuída a resolução dos resultados obtidos do osciloscópio utilizado nas medições. O equipamento realiza o cálculo da média do sinal em função do que é mostrado na tela do mesmo, assim o mais correto seria a apresentação de um sinal com ciclos completos. Na prática os resultados obtidos não foram com ciclos completos, o que gera uma diferença no cálculo da média realizado pelo osciloscópio, porém a quantidade de ciclos (7) minimizou a diferença de valor gerado pela medição com ciclos incompletos. O equipamento também apresenta uma quantidade menor de números significativos do que a considerada na teoria.

Quando analisadas as estimativas de rendimento de ambos os conversores, conforme as Tabelas 17 e 19, o valor encontrado na prática foi próximo do teórico

e mais do que isso, quando comparados, o CB apresenta uma eficiência superior ao CBQ, conforme previsto na teoria para as condições desse projeto, conforme Tabela 22.

Tabela 22 – Comparação dos valores práticos da estimativa de rendimentos dos protótipos do CB e CBQ.

Variável	Valor prático CB	Valor prático CBQ
η	0,92761	0,90011

Fonte: Autoria própria.

Essa diferença pode estar relacionada ao maior número de componentes que o CBQ possui em relação ao CB e também a própria topologia, que acaba resultando em maiores esforços de tensão ou corrente em alguns componentes, como a chave *SW*. A Tabela 23 apresenta uma comparação, com valores da simulação do projeto, dos esforços sobre a chave *SW* e a perda na condução, para ambos os conversores.

Tabela 23 – Comparação entre os valores teóricos de tensão e corrente na chave SW dos CB e CBQ.

Variável	Valor teórico CB	Valor teórico CBQ
V_{SW}	36,16846 V	92,90341 V
I_{SW}	4,56037 A	4,80341 A
$V_{SW(pk)}$	255,08287 V	254,04229 V
$I_{SW(pk)}$	6,01589 A	8,54765 A
P_{SW}	6,56624 W	9,87394 W

Fonte: Autoria própria.

É possível observar na Tabela 23 que a chave *SW* do CBQ possui pico de tensão semelhante e pico de corrente maior que a do CB, e também maiores perdas por condução. Isso acontece porque quando o CBQ está operando na primeira etapa, chave fechada, a corrente de $L1_{BQ}$ e $L2_{BQ}$ passam pela chave, decorrente da mudança da chave *SW1* por *D2* no conversor *boost* em cascata.

7 CONCLUSÃO

Com o crescente interesse nas energias renováveis para geração de energia elétrica, a energia solar fotovoltaica tem se apresentado como uma boa alternativa para tal função. Relativamente nova no mercado a nível comercial, possui um custo de implementação e geração relativamente alto quando comparados com as energias tradicionais de geração de energia elétrica. O destaque da energia fotovoltaica tem levado a estudos para melhorar o processo de produção, criando novas alternativas e aumentando a eficiência das já existentes.

Dentre os estudos está o aumento da eficiência dos equipamentos que compõem o sistema de geração de energia solar fotovoltaica, visando evitar desperdícios e tornar o negócio economicamente viável em relação aos custos do processo, de implementação e geração.

Dos elementos que compõem o sistema de geração de energia solar fotovoltaico está o painel solar fotovoltaico. Esse funciona em conjunto com um conversor elevador CC-CC, elevando o nível de tensão da saída do painel para outro nível, de acordo com sua aplicação. A energia extraída do painel é então processada pelo conversor elevador CC-CC, que então além de elevar o nível de tensão tem que apresentar uma eficiência alta para que a energia não seja desperdiçada. Tal evento ocorre em sistemas *nanogrids* fotovoltaicos não isolados, sistemas de geração com características de cargas com baixas potências. Dentre os conversores encontrados em tal aplicação, estão os conversores *boost* e *boost* quadrático, de topologias relativamente simples.

O conversor *boost* apresenta a característica de conseguir altos ganhos de tensão sem a necessidade de transformadores, porém exige uma alta razão cíclica de acionamento, o que resulta em uma redução da eficiência do conversor. O conversor *boost* quadrático também apresenta como característica alto ganho de tensão sem a necessidade de transformadores, porém com uma razão cíclica menor que o conversor *boost*, o que leva a ideia da comparação dos conversores, com topologias e quantidades de componentes diferentes.

Inicialmente foram realizadas duas análises matemáticas em ambos os conversores. A primeira análise efetuada foi considerando as não idealidades do con-

versor, com isso buscando poder estimar a eficiência e a limitação de ganho de tensão, já que os conversores na prática possuem tal limitação. Tal análise também permite uma comparação mais próxima da prática. Posteriormente foi efetuada uma análise considerando o conversor ideal, visando um meio de projetar e implementar o mesmo.

Em seguida foi realizada uma comparação entre os resultados teóricos e simulados dos conversores não ideais, buscando ratificar as equações e resultados encontrados na teoria. Na comparação realizada, os resultados encontrados foram próximos, sem nenhum resultado discrepante que pudesse indicar erros conceituais. Também foi analisado a relação de ganho estático e rendimento em função da razão cíclica de ambos os conversores, buscando na teoria analisar o ganho de tensão que o conversor pode operar com um bom rendimento.

A próxima etapa foi a implementação dos protótipos dos conversores. Inicialmente seria implementado apenas um protótipo, porém optou-se pela implementação de ambos para validar e apresentar de maneira mais precisa a comparação entre ambos. Os componentes foram dimensionados através do projeto, que buscou aproximar a implementação da aplicação, aproximando o nível de ganho de tensão e a potência que os protótipos iriam operar. Isso devido ao fato de que a tensão de entrada dos protótipos foi feita por meio de uma fonte CC, que não é uma representação equivalente do painel solar fotovoltaico, mas que mesmo assim permite uma estimativa da eficiência de ambos conversores.

Alguns componentes como chave e diodos foram comprados, e outros como os indutores e as placas de circuito impresso foram projetados e confeccionados. Posteriormente, com ambos protótipos implementados, foi realizado os testes e obtidos os resultados. Em ambos os casos buscou-se manter os mesmos valores para a tensão de entrada, de saída e a frequência de operação dos conversores, para que o ganho estático fosse o mesmo, deixando assim a estimativa da eficiência em função da razão cíclica, que foi analisada em ambos os casos.

Os dados obtidos na prática para a estimativa dos rendimentos foram próximos dos valores teóricos, podendo ser as diferenças resultantes de simplificações realizadas para tal cálculo teórico, outros efeitos práticos não considerados na análise matemática e também a possíveis diferença nos valores considerados, já que os mesmos dependem de alguns fatores mais complexos de aferir, como a temperatura de operação.

Assim como na teoria, o conversor *boost*, mesmo com uma razão cíclica mais elevada, apresentou um valor estimado de eficiência mais elevado que o con-

versor *boost* quadrático. Essa diferença poder estar relacionada com a quantidade de componentes que o conversor *boost* quadrático possui e a sua topologia, aumentando os esforços nos componentes como na chave, conforme comparação via simulação realizada. Assim, para tal faixa de ganho estático e potência, o conversor *boost* se mostra mais eficiente que o conversor *boost* quadrático, diminuindo os desperdícios de energia no processo de elevar o nível de tensão.

Portanto, para trabalhos futuros sugerem-se que sejam realizadas análises sobre a influência de cada não idealidade na eficiência dos conversores e também um estudo da influência do ganho estático e da potência na eficiência dos conversores, dessa forma podendo, se houver, identificar pontos de operação em que o conversor *boost* quadrático apresente maior eficiência que o conversor *boost*.

REFERÊNCIAS

ALTIN, Necmi; OZTURK, Ertan. Maximum Power Point Tracking Quadratic Boost Converter for Photovoltaic Systems. **ECAI 2016 - International Conference - 8th Edition**, 2016.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2. ed . - Brasília: [s.n.], 2005. Disponível em: <<http://goo.gl/QSqPX3>>. Acesso em: 03 abr. 2017.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3. ed . - Brasília: [s.n.], 2008. Disponível em: <<http://goo.gl/o0yAbA3>>. Acesso em: 03 abr. 2017.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Lugar ao Sol**. 2016. Disponível em: <<http://goo.gl/7WTfbx>>. Acesso em: 04 abr. 2017.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Banco de Informações de Geração: Capacidade de Geração do Brasil**. 2017. Disponível em: <<http://goo.gl/vzo1MB>>. Acesso em: 04 abr. 2017.

BARBI, Ivo. **Modelagem de conversores CC-CC empregando modelo médio em espaço de estados**. 2014.

BARBI, Ivo; FONT, Carlos Henrique IIIa; ALVES, Ricardo Luis. Projeto físico de indutores e transformadores. 2002.

BEENA, Anish Benny K. H. Analysis and Implementation of Quadratic Boost Converter for Nanogrid Applications. **International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering**, v. 04, n. 07, p. 6043–6048, 2015. ISSN 23203765.

BRYAN, J; DUKE, R; ROUND, S. Decentralized generator scheduling in a nanogrid using DC bus signaling. **IEEE Power Engineering Society General Meeting**, v. 1, p. 977–982, 2004.

CHOUDHURY, Tanmoy Roy; NAYAK, Byamakesh. Comparison and analysis of cascaded and Quadratic Boost Converter. **2015 IEEE Power, Communication and Information Technology Conference, PCITC 2015 - Proceedings**, n. October 2015, p. 78–83, 2016.

DEVI, IS Sree; PRABHA, DM Mary Synthia Regis. Survey on nanogrid converters. **Indian Journal of Science and Technology**, Indian Society for Education and Environment, v. 8, n. 24, p. 1, 2015.

ERICKSON, Robert W; MAKSIMOVIC, Dragan. **Fundamentals of power electronics**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2007.

- HART, Daniel W. **Electrónica de Potência**. [S.l.]: PEARSON EDUCACIÓN, 2001.
- IR. **International Rectifier. datasheet 30ETH06**. 233 Kansas St., El Segundo, California 90245, USA: [s.n.], 2001. Disponível em: <goo.gl/7Rji6C>. Acesso em: 10 out. 2017.
- IR. **International Rectifier. datasheet IRFP460PbF**. 233 Kansas St., El Segundo, California 90245, USA: [s.n.], 2003. Disponível em: <goo.gl/28du5s>. Acesso em: 10 out. 2017.
- KOMAES. **NINGBO "KOMAES" SOLAR TECHNOLOGY CO., LTD. Monocrystalline Solar Module**. Jifeng Road, Jishigang Industrial Zone, Yinzhou District, Ningbo, China: [s.n.], 2017. Disponível em: <goo.gl/yb8oGh>. Acesso em: 10 out. 2017.
- KUMMAR, R. Selva; VIGNESH, C. J.; DEIVANAYAKI, V. P. Gayathri; NAVEENA, P. Design and Comparison of Quadratic Boost Converter with Boost Converter. **International Journal of Engineering Research and Technology**, v. 5, n. 01, p. 877–881, 2016.
- LOPES, J. L. D. **Conversor boost quadrático entrelaçado com multiplicação capacitiva de tensão**. 121 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Londrina, Londrina -PR, 2014.
- MARTINS, Denizar Cruz; BARBI, Ivo. **Eletrônica de potência: Conversores CC-CC básicos não isolados**. [S.l.]: Edição dos Autores, 2006.
- MARTINS, Fernando Ramos; PEREIRA, Enio Bueno; ABREU, Samuel Luna De; COLLE, Sergio. **Brazilian atlas for solar energy resource: SWERA results**. 2008. 2651–2655 p.
- MOHAN, Ned; UNDELAND, Tore M. **Power electronics: converters, applications, and design**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.
- NAVAMANI, J Divya; VEENA, ML; LAVANYA, A; VIJAYAKUMAR, K. **Efficiency comparison of quadratic boost DC-DC converter in CCM and DCM**. 2015. 1156–1161 p.
- NORDMAN, Bruce. Nanogrids: Evolving our electricity systems from the bottom up. In **Darnell Green Power Forum**, 2009.
- SAADAT, Peyman; ABBASZADEH, Karim. A Single-Switch High Step-Up DC-DC Converter Based on Quadratic Boost. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS**, v. 63, n. 12, p. 7733–7742, 2016.
- SACE, Abb. **Technical Application Papers No. 10—Photovoltaic plants**. 2010.
- SCALA, Massimo La; BRUNO, Sergio; NUCCI, Carlo Alberto; LAMONACA, S; STECCHI, Ugo. **From Smart Grids to Smart Cities: New Challenges in Optimizing Energy Grids**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2017.
- SHANKLEMAN, Jess; MARTIN, C. **Solar Could Beat Coal to Become the Cheapest Power on Earth**. 2017. Disponível em: <<http://goo.gl/4MfqV6r>>. Acesso em: 04 abr. 2017.

TI. **Texas Instruments. *datasheet* SGX524 Regulating Pulse-Width Modulators.** Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265: [s.n.], 2015. Disponível em: <goo.gl/5Tx5Kb>. Acesso em: 13 out. 2017.

TSENG, K. C.; LIANG, Tsorng-Juu. Novel high-efficiency step-up converter. **IEE Proceedings-Electric Power Applications**, IET, v. 151, n. 2, p. 182–190, 2004.

YAN, Tiesheng; XU, Jianping; DONG, Zheng; SHU, Lisan; YANG, Ping. Quadratic boost pfc converter with fast dynamic response and low output voltage ripple. v. 2, p. 402–406, 2013.