

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS ALESSI MADALOZO

**ESTUDO DE UM EQUALIZADOR DE TENSÃO EMPREGANDO O CONVERSOR
FORWARD OPERANDO EM MODO DE CONDUÇÃO DESCONTÍNUO**

PONTA GROSSA

2022

LUCAS ALESSI MADALOZO

**ESTUDO DE UM EQUALIZADOR DE TENSÃO EMPREGANDO O CONVERSOR
FORWARD OPERANDO EM MODO DE CONDUÇÃO DESCONTÍNUO**

**Study of a voltage equalizer employing the forward converter operating in
discontinuous conduction mode**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Illa Font

PONTA GROSSA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

LUCAS ALESSI MADALOZO

**ESTUDO DE UM EQUALIZADOR DE TENSÃO EMPREGANDO O CONVERSOR
FORWARD OPERANDO EM MODO DE CONDUÇÃO DESCONTÍNUO**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 01/julho/2022

Carlos Henrique Illa Font
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Fernanda Cristina Correa
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Max Mauro Dias Santos
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PONTA GROSSA

2022

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho não poderia ser finalizado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto meus agradecimentos. Graças a estas pessoas tão importantes, superei adversidades e encontrei toda motivação e força necessária para chegar ao fim desta marco em minha vida. Meus mais profundos e singelos agradecimento a.

A minha esposa Mayara, por todos os momentos de suporte, carinho, incentivos e, por inúmeras vezes, colocou a prioridade dos meus estudos frente as suas para que eu pudesse fazer meus trabalhos da melhor maneira possível.

A minha família, pelo apoio em momentos da minha vida.

Ao meu orientador Prof.Dr Carlos Henrique Illa Font, que me orientou por anos e projetos passados e ainda segue a me mostrar os caminhos, pela paciência, incentivo e diversas oportunidades oferecidas ao longo do processo.

Ao meu colega de trabalho e amigo Rodrigo Cabra, por várias vezes durante meu período de matérias e estágio, me ceder tempos hábeis para estudar sem intervenção e para sair com antecedência dos dias de trabalho mesmo sem ter a obrigação de fazer estes esforços.

Aos demais que de alguma forma contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional.

E por fim, o ponto alto de meus agradecimentos, a Deus pela chegada de meu filho Miguel Moura Madalozo em breve.

"So close, no matter how far
Couldn't be much more from the heart
Forever trusting who we are
And nothin' else matters. [C.C.B](Metallica)

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo o estudo de um equalizador de tensão para baterias de lítio associadas em série, baseado no conversor CC-CC isolado Forward operando no modo de condução descontínuo (MCD). Como equalizador de tensão, o conversor Forward irá operar em malha aberta, ou seja, com uma razão cíclica fixa e imposta. A equalização de tensão ocorrerá por uma característica natural do conversor em encontrar um ponto de operação estável. O auto balanço das tensões de saída do conversor (tensões nas baterias) levará a tensões de saída exatamente iguais se os secundários forem perfeitamente simétricos. Na prática, diferenças paramétricas, como no número de espiras dos indutores, podem levar a tensões de saída ligeiramente diferentes, sendo que se tal diferença não comprometa a operação como equalizador de tensão, esse mecanismo de controle é adequado. O trabalho apresenta a análise de operação do conversor em condução descontínua, as principais equações de projeto como também resultados de simulação numérica para comprovar a aplicabilidade do conversor Forward como equalizador de tensão. Os resultados de simulação numérica consideram as seguintes especificações de projeto: potência de 100 W, frequência de comutação de 50 kHz e duas baterias de 12V associadas em série com desequilíbrio máximo de 2 V.

Palavras-chave: Auto Balanço; Conversor Forward; Equalização de Tensão; Baterias de Lítio.

ABSTRACT

This work aims to study a voltage equalizer for lithium batteries associated in series, based on an isolated dc-dc Forward converter operating in discontinuous conduction mode (DCM). As a voltage equalizer, the Forward converter will operate in open loop, that is, with a fixed and imposed duty cycle. Voltage equalization will occur as a natural characteristic of the converter to find a stable operating point. The self-balancing of the converter output voltages (battery voltages) will lead to exactly the same output voltages if the secondary-sides are perfectly symmetrical. In practice, parametric differences, such as the number of turns of the output inductors, can lead to slightly different output voltages, and if such a difference does not compromise operation as a voltage equalizer, this control mechanism is adequate. The work presents the analysis of the converter operation in discontinuous conduction, the main design equations as well as numerical simulation results to prove the applicability of the Forward converter as a voltage equalizer. Numerical simulation results consider the following design specifications: power of 100 W, switching frequency of 50 kHz and two 12 V batteries associated in series with a maximum unbalance of 2 V.

Keywords: Auto Balance; Forward converter; Voltage Equalizer; Lithium Battery.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Conversor Estático CC-CC Forward	15
Figura 2 – Primeira etapa de operação	16
Figura 3 – Segunda etapa de operação	17
Figura 4 – Terceira etapa de operação com L_m maior que L	17
Figura 5 – Terceira etapa de operação com L_m menor que L	18
Figura 6 – Quarta etapa de operação	18
Figura 7 – Valores máximos de corrente e tensão no Interruptor	19
Figura 8 – Valores máximos de corrente e tensão no Diodo Retificador	20
Figura 9 – Valores máximos de corrente e tensão no Diodo Roda-Livre	20
Figura 10 – Valores máximos de corrente e tensão no Diodo de Desmagnetização	21
Figura 11 – Valores máximos de corrente e tensão no Indutor	21
Figura 12 – Conversor CC-CC Forward aplicado na equalização de tensão de duas baterias	32
Figura 13 – Tensões de saída (nas baterias) para os períodos balanceado e desbalanceado	33
Figura 14 – Primeira etapa de operação	34
Figura 15 – Segunda etapa de operação	35
Figura 16 – Terceira etapa de operação	35
Figura 17 – Quarta etapa de operação	36
Figura 18 – Quinta Etapa de Operação	37
Figura 19 – Corrente nos indutores para o período balanceado	38
Figura 20 – Tensão e corrente no interruptor para o período balanceado	38
Figura 21 – Tensão e corrente nos diodos retificadores para o período balanceado	39
Figura 22 – Tensão e corrente nos diodos de roda-livre para o período balanceado	39
Figura 23 – Corrente nos indutores para o período desbalanceado	40
Figura 24 – Tensão e corrente no interruptor para o período desbalanceado	41
Figura 25 – Tensão e corrente nos diodos retificadores para o período desbalanceado	41
Figura 26 – Tensão e corrente nos diodos de roda livre para o período desbalanceado	42
Figura 27 – Tensão e corrente no diodo de desmagnetização para o período desbalanceado	43
Figura 28 – Simulação computacional do equalizador Forward com 2 saídas	49
Figura 29 – Equalização de tensão entre duas baterias de lítio	51
Figura 30 – Formas de onda das correntes nos indutores para o período desbalanceado.	51
Figura 31 – Formas de onda das correntes nos indutores para o período balanceado.	52
Figura 32 – Formas de onda da corrente e da tensão no transistor.	53
Figura 33 – Formas de onda das correntes nos diodos retificadores e nos diodos de roda-livre para o período desbalanceado.	54
Figura 34 – Formas de onda das correntes nos diodos retificadores para o período balanceado	55
Figura 35 – Formas de onda das correntes nos diodos de roda-livre para o período balanceado	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações de projeto	50
Tabela 2 – Valores calculados para projeto	50
Tabela 3 – Percentual de erro%	54

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS LATINAS

D	Razão cíclica nominal	
D_{max}	Razão cíclica máxima	
E	Tensão de entrada	[V]
E'	Tensão de entrada refletida	[V]
f_s	Frequência de comutação	[Hz]
I_{Dr1max}	Corrente máxima no Diodo de Roda-livre	[A]
I_{Dr1med}	Corrente média no Diodo de Roda-livre	[A]
I_{Drmax}	Corrente máxima no Diodo de retificador	[A]
I_{Drmed}	Corrente média no Diodo de retificador	[A]
I_E	Corrente de entrada	[A]
L_{1max}	Máxima Corrente no Indutor 1	[A]
L_{2max}	Máxima Corrente no Indutor 2	[A]
$I_{Se f}$	Corrente eficaz no interruptor	[A]
I_{Smax}	Corrente máxima no interruptor	[A]
I_{Smed}	Corrente média no interruptor	[A]
I_p	Corrente de pico	[A]
L_1	Indutor 1	[H]
L_2	Indutor 2	[H]
L_i	Indutância	[H]
n	Relação de transformação	[Un]
N_p	Número de espiras do primário do transformador	[Un]
N_s	Número de espiras do secundário do transformador	[Un]
P_0	Potência de saída	[W]
P_E	Potência de entrada	[W]
R	Resistência	[Ohm]
R_0	Resistência	[Ohm]
t_0	Tempo de bloqueio	[s]
t_{on}	Tempo de condução	[s]
T_s	Período de comutação	[Hz]
V_0	Tensão de saída	[V]
V_{Δ}	Variação de tensão	[V]
V_{Dr1max}	Tensão máxima no Diodo de Roda-livre	[V]
V_{Drmax}	Tensão máxima Diodo de retificador	[V]
V_{Smax}	Tensão máxima no interruptor	[V]
V_{bat}	Tensão na bateria	[V]
V_{in}	Tensão de entrada	[V]

LETRAS GREGAS

Δ_{t1}	Intervalo de tempo da primeira etapa de operação	[us]
Δ_{t2}	Intervalo de tempo da segunda etapa de operação	[us]
Δ_{t3}	Intervalo de tempo da terceira etapa de operação	[us]

Δ_{t4}	Intervalo de tempo da quarta etapa de operação	[us]
Δ_{t2d1}	Intervalo da segunda etapa desbalanceada da primeira bateria	[us]
Δ_{t2d2}	Intervalo da segunda etapa desbalanceada da segunda bateria	[us]
Δ_{t3d1}	Intervalo da terceira etapa desbalanceada da primeira bateria	[us]
Δ_{t3d2}	Intervalo da terceira etapa desbalanceada da segunda bateria	[us]
γ	Número de saídas do conversor	[Un]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	DELIMITAÇÃO DO TEMA	13
1.2	PROBLEMA	13
1.3	RELEVÂNCIA	13
1.4	OBJETIVOS	14
1.4.1	Objetivos específicos	14
1.5	METODOLOGIA	14
2	ANÁLISE DO CONVERSOR FORWARD EM MODO DE CONDUÇÃO DESCONTÍNUO	15
2.1	ÉTAPAS DE OPERAÇÃO	16
2.2	FORMAS DE ONDA	19
2.3	ANÁLISE ESTÁTICA	22
2.3.1	Intervalo de Duração das Etapas de Operação	22
2.3.2	Ganho Estático	23
2.4	RESTRIÇÃO DE OPERAÇÃO	27
2.5	EQUAÇÕES PARA O PROJETO DO CONVERSOR EM MCD	27
2.5.1	Dimensionamento do Transistor	28
2.5.2	Dimensionamento do Diodo Retificador	28
2.5.3	Dimensionamento do Diodo Roda-Livre	29
2.5.4	Dimensionamento do Indutor	30
3	ANÁLISE DO CONVERSOR FORWARD COMO EQUALIZADOR DE TENSÃO	31
3.1	ETAPAS DE OPERAÇÃO	33
3.2	FORMAS DE ONDAS IDEAIS	37
4	EQUAÇÕES DE PROJETO DO EQUALIZADOR	44
4.1	RAZÃO CÍCLICA MÁXIMA	45
4.2	DIMENSIONAMENTO DO INDUTOR	46
4.3	DIMENSIONAMENTO DO TRANSISTOR	47
4.4	DIMENSIONAMENTO DO DIODO RETIFICADOR	48
4.5	DIMENSIONAMENTO DO DIODO DE RODA-LIVRE	48
5	PROJETO E RESULTADOS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	49
6	CONCLUSÕES	56
6.1	TRABALHOS FUTUROS	56
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

Em meados de 1960 começaram a ser desenvolvidos projetos com a ideia de substituir as fontes reguladoras comuns por fontes chaveadas, pelo fato de serem de menor peso, volume e com elevado rendimento quando comparadas as convencionais. Ao longo das décadas, com o aperfeiçoamento eletrônico e a alta demanda por componentes cada vez melhores e menores no dia a dia, as fontes chaveadas começaram a ser empregadas de forma geral (BARBI, 2001).

Apesar de possuírem relativas vantagens em frente as fontes reguladoras comuns, existem também algumas desvantagens que devem ser levadas em consideração para que possam ser empregadas da melhor forma possível. Elas são menos robustas que as fontes convencionais mas, do ponto do vista eletrônico, produzem maior ondulação de tensão na saída e maior interferência eletromagnética, além de apresentarem número de componentes maiores, conseqüentemente um valor maior.

Assim como os avanços tecnológicos em fontes chaveadas, com sistemas de armazenamento de energia não foi diferente. Ao longo dos anos as baterias de chumbo-ácido vêm sendo substituídas por células de íon-lítio com inúmeras vantagens frente ao seu antecessor, as quais se destacam elevada densidade de potência e energia, retenção de carga, menores peso e volume (BARSUKOV, 2009)(YOSHIO; BRODD; KOZAWA, 2009).

Entretanto, as células de íon-lítio podem sofrer sobretensão durante o processo de carregamento, sendo necessário operarem com um sistema de equalização de tensão (YANG *et al.*, 2017). Os sistemas de equalização de tensão em baterias podem ser implementados com técnicas passivas ou ativas (FONT, 2019). As técnicas ativas empregam conversores de eletrônica de potência, tanto não isolados quanto isolados.

Dentre os conversores de potência, a mesma topologia pode ser aplicada de diferentes formas apenas alterando seu modo de operação. Um dos modos que será apresentado neste trabalho, por sua vantagem em não necessitar de um sistema de controle mais complexo e junto as características intrínsecas do conversor de achar um ponto de operação estável, é o modo de condução descontínuo, assunto este que não possui muita abrangência em demais literaturas mas que garantirá que a equalização entre duas baterias de lítio ocorra (HART, 2016).

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este trabalho contempla a análise sobre o conversor Forward primeiramente operando no modo de condução descontínuo e em seguida, empregado para equalização de tensão entre duas baterias de lítio em série. Apresenta-se as formas de onda de corrente e tensão de cada componente bem como as equações de dimensionamento dos mesmos, equacionamento de valores críticos que devem ser respeitados para que o conversor possa operar adequadamente na aplicação desejada.

1.2 PROBLEMA

As baterias de lítio quando carregadas podem fazer com que uma célula, de forma individual, sofra sobretensão durante este processo danificando-a de forma permanente. Para que possa ser evitado a falha funcional do componente, um sistema de equalização deve ser implementado com a finalidade de garantir a saúde das baterias de lítio durante seu carregamento. Com a intenção de que o conversor opere como equalizador, deve-se garantir que o mesmo opere em MCD e assim, o mesmo poderá operar em malha aberta com razão cíclica fixa.

1.3 RELEVÂNCIA

Embora existam trabalhos que reportem o conversor Forward operando como equalizador de tensão, não é comum o estudo do conversor Forward operando em condução descontínua como também encontrar-se na literatura as equações de projeto para o conversor Forward operando como equalizador de tensão. Ao se explorar a operação do conversor Forward em condução descontínua e sua aplicação como equalizador de tensão, este trabalho contribui para que esta solução possa ser empregada em futuros projetos de equalizadores de tensão ativos com conversores estáticos.

1.4 OBJETIVOS

O presente trabalho tem por propósito o desenvolvimento de um sistema de equalização de tensão através de um conversor Forward que realizará o autobalanco das cargas envolvendo duas baterias de lítio desbalanceadas.

1.4.1 Objetivos específicos

São objetivos específicos do trabalho:

- Estudar o conversor Forward operando em condução descontínua;
- Estudar o conversor Forward como equalizador de tensão de baterias;
- Analisar o conversor Forward como equalizador de tensão de baterias;
- Obter as equações de projeto do conversor Forward operando como equalizador de tensão;
- Realizar um projeto;
- Realizar simulações numéricas computacionais.

1.5 METODOLOGIA

Para que os objetivos sejam alcançados, emprega-se a seguinte metodologia:

- revisão bibliográfica;
- análise teórica;
- obtenção das equações de projeto;
- desenvolvimento do projeto;
- realização de simulação computacional;
- discussão dos resultados.

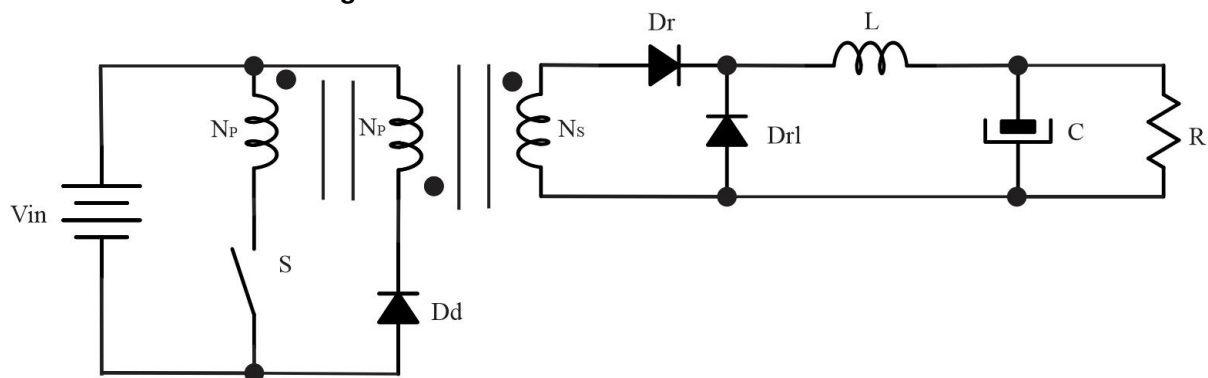
2 ANÁLISE DO CONVERSOR FORWARD EM MODO DE CONDUÇÃO DESCONTÍNUO

Neste capítulo será apresentado o conversor CC-CC Forward e analisado o seu funcionamento considerando o modo de condução descontínuo e as respectivas etapas de operação, tanto para o caso onde a indutância magnetizante é maior que a indutância do indutor de saída, quanto para o caso onde a indutância magnetizante é menor que a indutância do indutor de saída e quais as suas diferenças, além de construtivas, operacionais (ASSEF, s.d.).

Na Figura 1 está representado o circuito elétrico do conversor Forward. O mesmo possui uma fonte de entrada V_{in} , um interruptor S em série com o enrolamento primário do transformador com N_p espiras, um diodo de desmagnetização D_d em série com o enrolamento de desmagnetização com N_p espiras, o secundário do transformador com N_s espiras, o diodo retificador D_r , um diodo de roda-livre D_{rl} , o indutor de saída L e a carga representada no esquemático por um capacitor C em paralelo a uma resistência R .

Por simplicidade de notação, o transformador foi representado por um transformador ideal, sem explicitar a sua indutância magnetizante L_m .

Figura 1 – Conversor Estático CC-CC Forward



Fonte: Autoria própria.

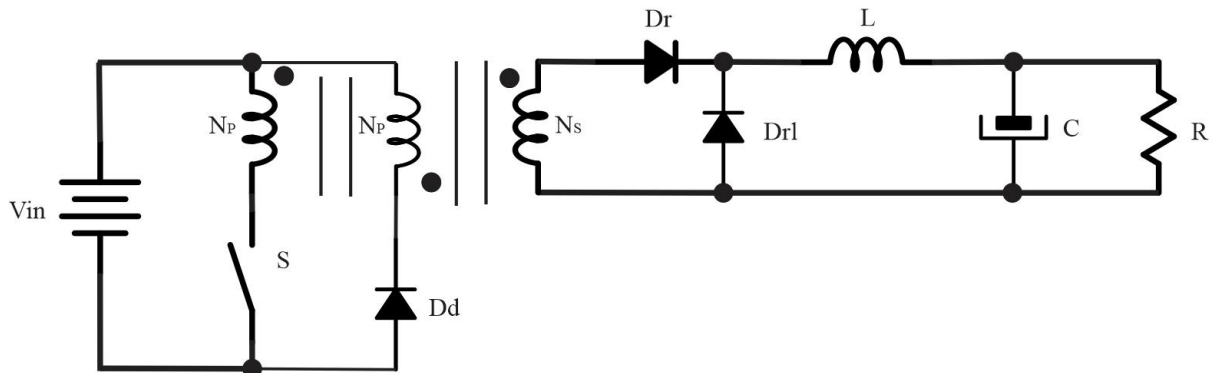
2.1 ETAPAS DE OPERAÇÃO

As etapas de operação estão apresentadas nas Figuras 2, 3, 4, 5 e 6 sendo que, para o valor de indutância magnetizante maior que o valor da indutância do indutor de saída é representada pela figura 4 e para o indutor de saída com indutância com valor maior que a indutância magnetizante é representada pela figura 5.

A análise sobre estas diferenças é necessária para ter o entendimento das diferentes situações que podem ocorrer, caso o projeto dos componentes magnéticos se altere. Isso interfere diretamente na mudança de etapa de operação.

Primeira Etapa (Figura 2) : inicia-se quando o interruptor S está fechado (conduzindo); os diodos D_d e D_{rl} encontram-se bloqueados; D_r está em condução; não há corrente no enrolamento de desmagnetização e a fonte de tensão transfere energia para a indutância magnetizante do transformador, para o indutor de saída e a carga.

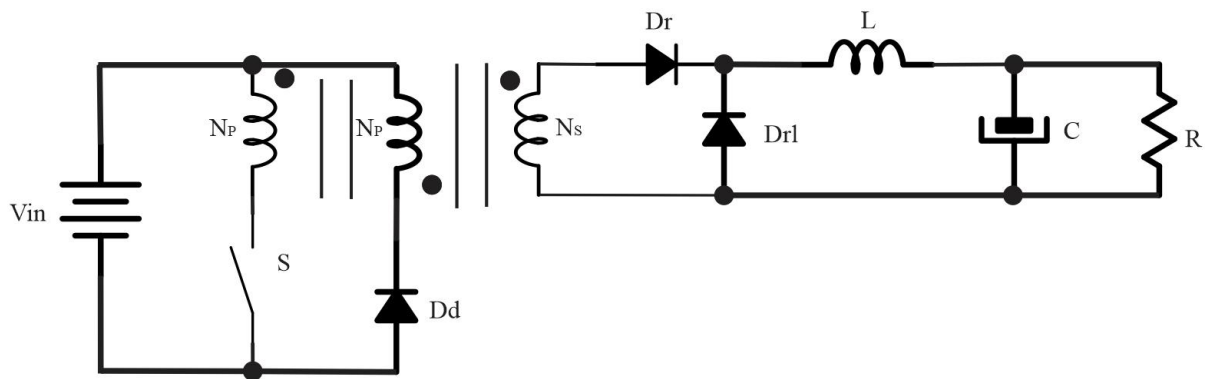
Figura 2 – Primeira etapa de operação



Fonte: Autoria própria.

Segunda Etapa (Figura 3) : tem início quando o interruptor S abre (bloqueia). O diodo de desmagnetização D_d entra em condução e a energia armazenada na indutância magnetizante será transferida para a fonte de entrada; D_r estando bloqueado, a corrente armazenada no indutor L circula por D_{rl} sendo entregue para a carga, esta etapa encerra-se quando a energia na indutância magnetizante for totalmente transferida para a fonte de entrada; a corrente no enrolamento de desmagnetização atinge zero, fazendo o diodo D_d bloquear (transformador deve ser inteiramente desmagnetizado, caso contrário saturará).

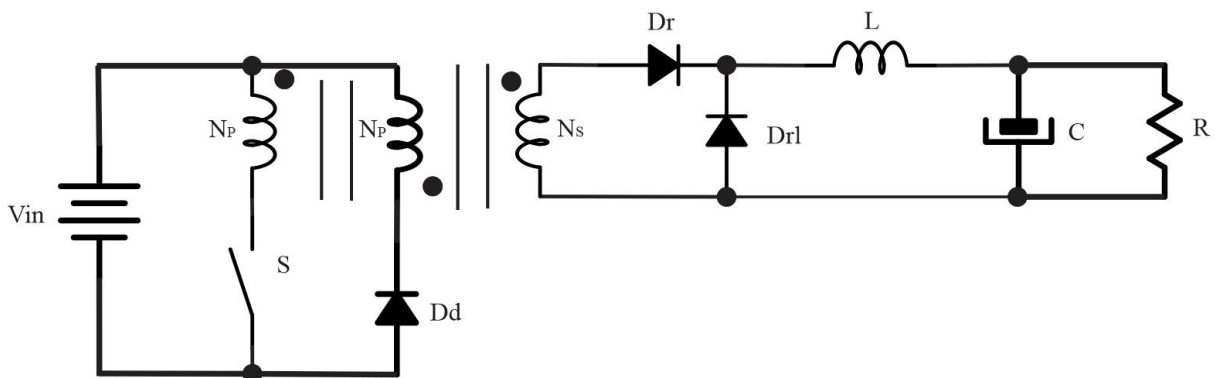
Figura 3 – Segunda etapa de operação



Fonte: Autoria própria.

Terceira Etapa $L_m > L$ (Figura 4) : o interruptor está aberto (bloqueado), o diodo D_d conduz devido a indutância magnetizante ser maior que a do indutor de saída. Não há corrente advindo no conversor do primário para o secundário. Toda corrente do indutor de saída já foi transferida e o capacitor carregado encontra-se fornecendo energia para a carga.

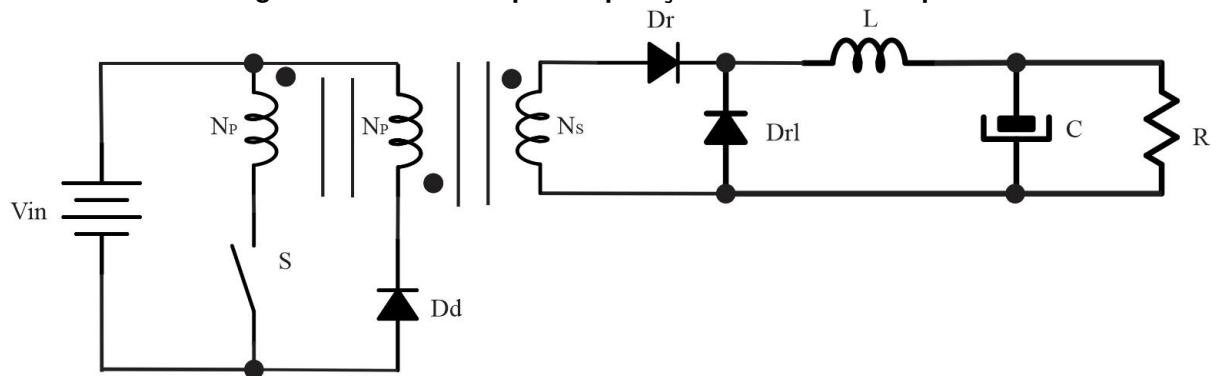
Figura 4 – Terceira etapa de operação com L_m maior que L



Fonte: Autoria própria.

Terceira Etapa $L_m < L$ (Figura 5) : O interruptor está aberto (bloqueado), o diodo D_d também está bloqueado devido ao tempo de desmagnetização da indutância do indutor de saída ser maior. E o diodo D_{rl} continua conduzindo. Não há corrente advindo no conversor do primário para o secundário. Toda corrente da indutância magnetizante já foi transferida para a entrada do conversor.

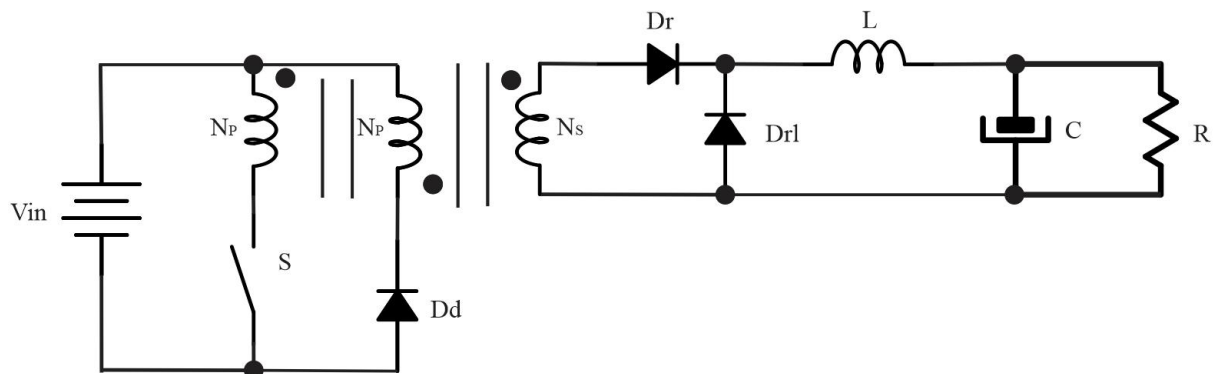
Figura 5 – Terceira etapa de operação com L_m menor que L



Fonte: Autoria própria.

Quarta Etapa (Figura 6) : Esta última etapa tem início com o bloqueio do diodo D_d , a indutância magnetizante não possui energia armazenada e todos os semicondutores estão bloqueados, caracterizando a etapa descontínua. Nesta etapa somente o capacitor de saída alimenta a carga.

Figura 6 – Quarta etapa de operação



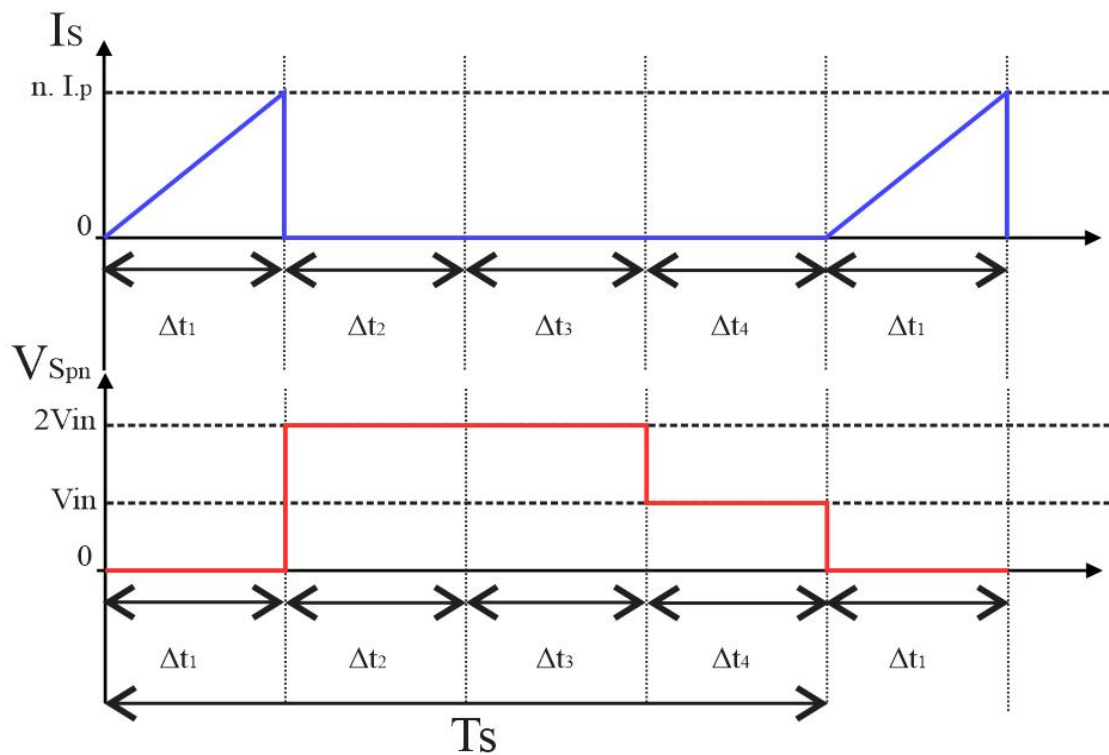
Fonte: Autoria própria.

2.2 FORMAS DE ONDA

Nesta seção será retratada as formas de onda das principais grandezas envolvidas de cada componente do conversor bem como seus valores máximos e mínimos teóricos.

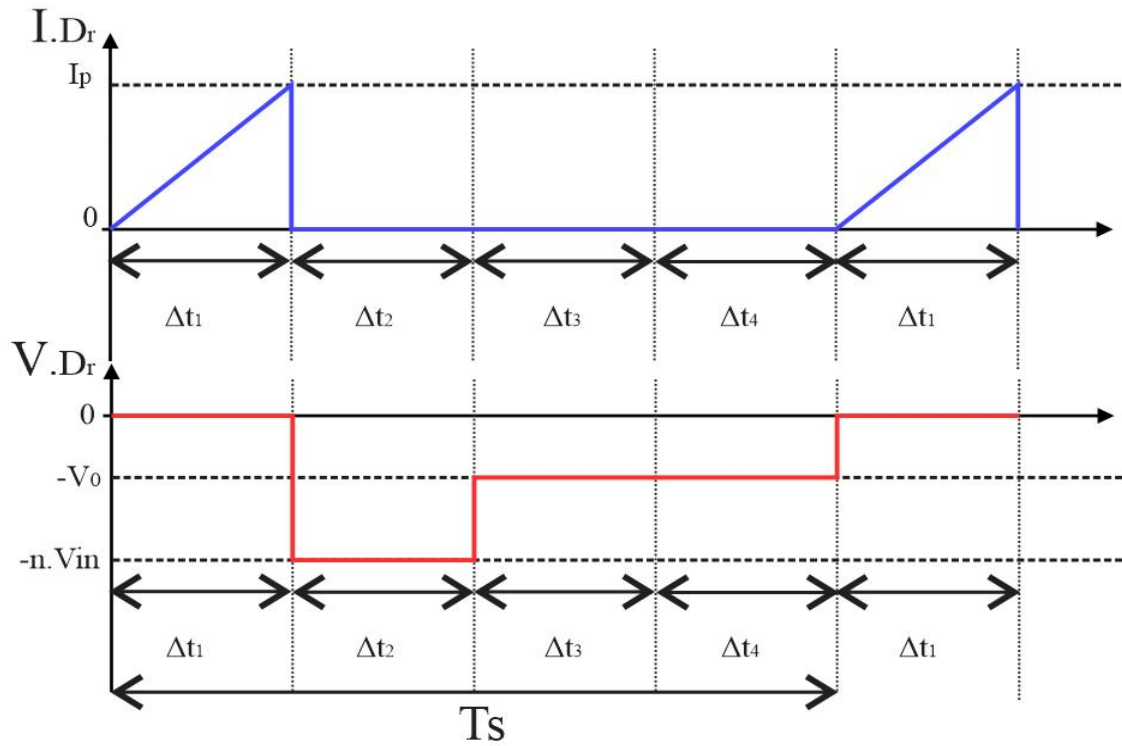
As Figuras 7 a 11 representam as formas de ondas ideais de cada componente do conversor e os valores de pico de corrente de cada componente que nelas se referenciam serão apresentados na Seção 2.3 .

Figura 7 – Valores máximos de corrente e tensão no Interruptor



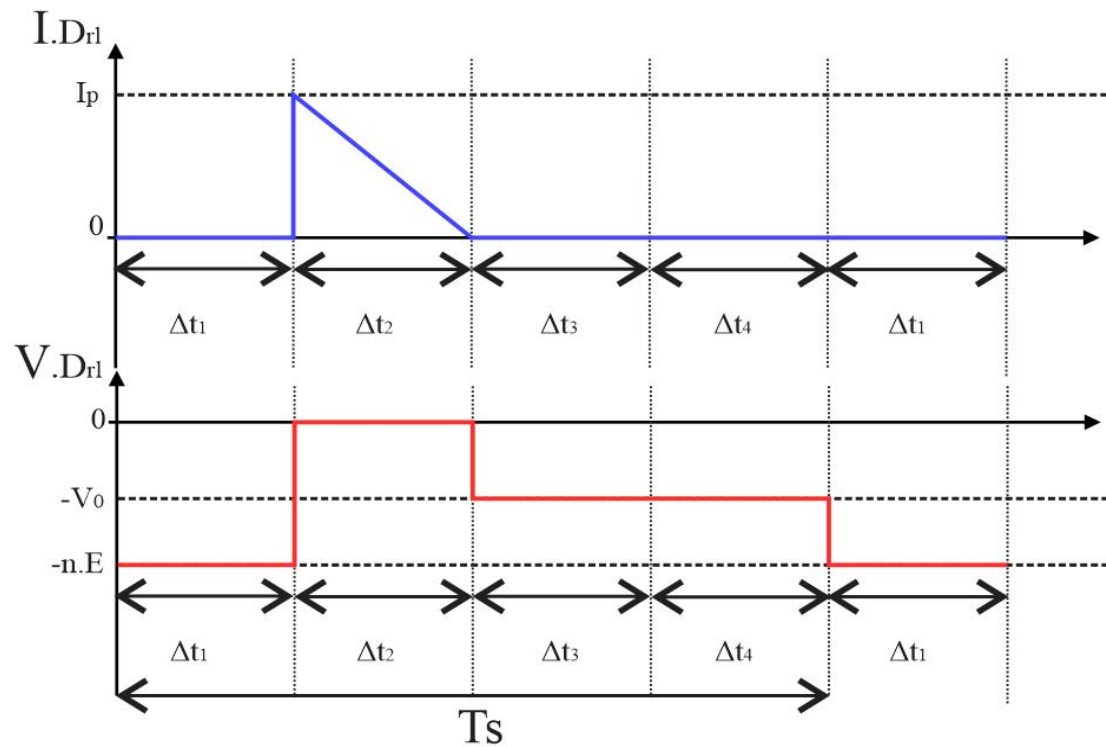
Fonte: Autoria própria.

Figura 8 – Valores máximos de corrente e tensão no Diodo Retificador



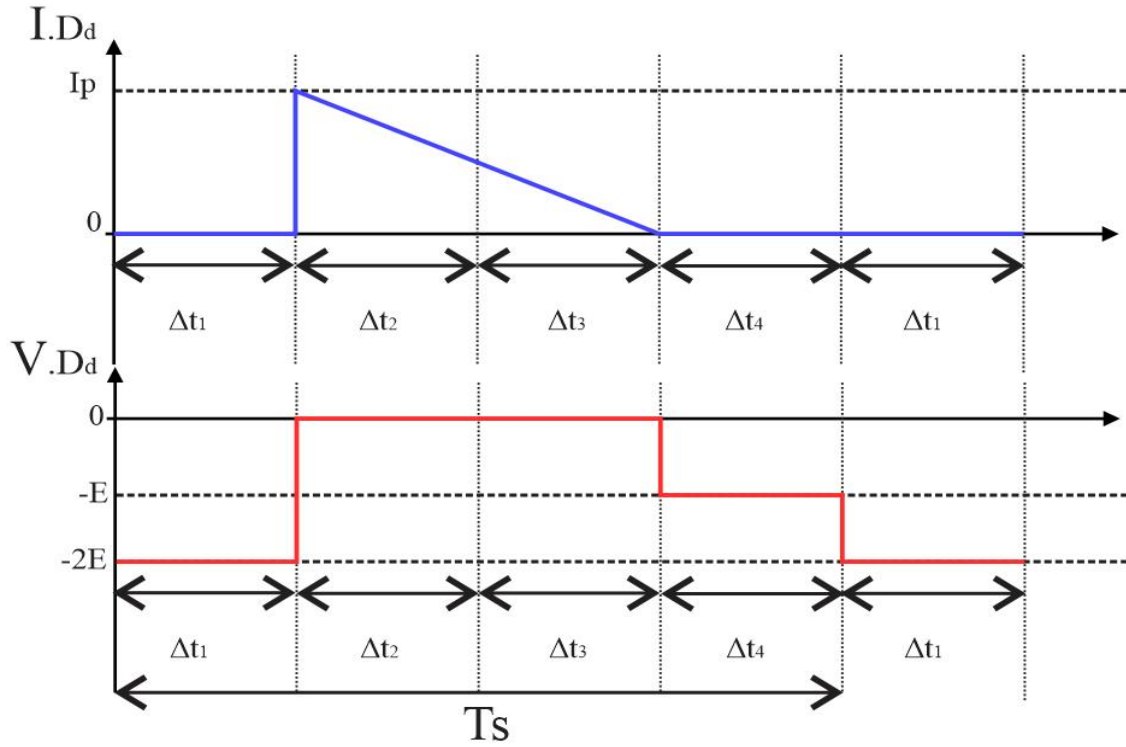
Fonte: Autoria própria.

Figura 9 – Valores máximos de corrente e tensão no Diodo Roda-Livre



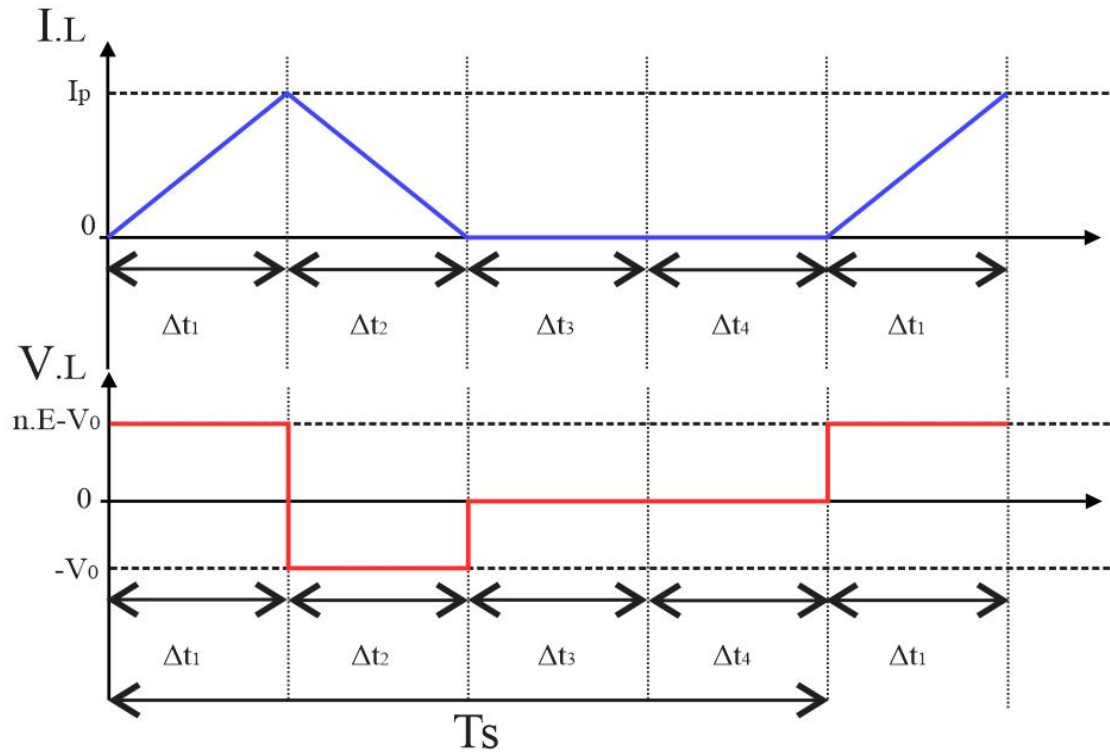
Fonte: Autoria própria.

Figura 10 – Valores máximos de corrente e tensão no Diodo de Desmagnetização



Fonte: Autoria própria.

Figura 11 – Valores máximos de corrente e tensão no Indutor



Fonte: Autoria própria.

2.3 ANÁLISE ESTÁTICA

Essa seção tem por finalidade demonstrar as equações de projeto para um conversor Forward operando em condução descontínua.

2.3.1 Intervalo de Duração das Etapas de Operação

Os intervalos de tempo das etapas de operação são definidos pelas Equações (1), (2) e (3), respectivamente. As etapas 2 e 3 foram consideradas como uma única etapa, pelo fato de a magnetização do transformador não influenciar a conversão de energia da entrada para a saída do conversor.

$$\Delta t_1 = t_{on} = DT_s \quad (1)$$

$$\Delta t_2 + \Delta t_3 = \frac{E' - V_0}{V_0} DT_s \quad (2)$$

$$\Delta t_4 = \frac{V_0 - E'.D}{V_0} T_s \quad (3)$$

Sendo:

D = Razão cíclica nominal;

T_s = Período de comutação;

E' = Tensão de entrada refletida;

V_0 = Tensão de saída;

Δt_1 = Intervalo da primeira etapa de operação;

Δt_2 = Intervalo da segunda etapa de operação;

Δt_3 = Intervalo da terceira etapa de operação;

Δt_4 = Intervalo da quarta etapa de operação.

2.3.2 Ganho Estático

A expressão para o ganho estático é obtida a partir do balanço de energia no indutor de saída. Considerando a operação em regime permanente, o valor médio da tensão no indutor é igual a zero e a seguinte expressão pode ser escrita:

$$(E' - V_0) \cdot t_{on} + (-V_0) \cdot t_0 = 0 \quad (4)$$

Realizando-se as manipulações matemáticas pertinentes e dividindo ambos os lados pelo período de comutação T_s tem-se:

$$(E' - V_0) \cdot \frac{t_{on}}{T_s} = V_0 \cdot \frac{t_0}{T_s} \quad (5)$$

Sabendo que a razão do intervalo de condução pelo período de comutação é igual a razão cíclica nominal tem-se:

$$\frac{t_{on}}{T_s} = D \quad (6)$$

Então:

$$(E' - V_0) \cdot D = V_0 \cdot \frac{t_0}{T_s} \quad (7)$$

Sendo:

t_{on} = Período de condução do transistor;

t_0 = Período bloqueado de condução do diodo de roda livre.;

Para o período balanceado compreende-se que para o indutor, o valor de tensão é calculado pela Equação (8) e, através de seu desenvolvimento, pode-se obter o valor de pico da corrente no indutor, como demonstrado na Equação (11).

$$V_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (8)$$

$$(E' - V_0) = L \frac{I_p}{t_{on}} \quad (9)$$

$$\frac{(E' - V_0) \cdot t_{on}}{L} = I_p \quad (10)$$

$$I_p = \frac{(E' - V_0).D}{L.f_s} \quad (11)$$

Sendo:

L_i = Valor da Indutância;

I_p = Corrente de pico;

f_s = Frequência de comutação;

Para a segunda e terceira etapas de operação tem-se:

$$-V_0 = L \frac{-I_p}{t_0} \quad (12)$$

$$t_0 = L \frac{I_p}{V_0} \quad (13)$$

Substituindo-se a Equação (13) em Equação (7), nota-se que:

$$(E' - V_0).D = \frac{V_0}{T_s} \cdot L \frac{I_p}{V_0} \quad (14)$$

$$(E' - V_0).D = L \frac{I_p}{T_s} \quad (15)$$

Definindo a relação de transformação dos enrolamentos primário e secundário como n tem-se:

$$n = \frac{N_s}{N_p} \quad (16)$$

Desprezando-se a etapa de magnetização, o valor médio da corrente de entrada é igual a corrente no transistor:

$$I_E = \frac{1}{T} \int_0^T i_s(t) dt \quad (17)$$

$$I_E = \frac{1}{T} \frac{I_p \cdot t_{on}}{2} \quad (18)$$

$$I_E = \frac{I_p \cdot D \cdot n}{2} \quad (19)$$

Sendo:

I_E = Valor médio da corrente de entrada;

n = Relação de transformação do transformador.

N_s = Número de espiras do secundário do transformador;

N_p = Número de espiras do primário do transformador;

Ao se considerar o conversor ideal onde a potência de entrada será igual a potência de saída, tem-se:

$$P_E = P_0 \quad (20)$$

Podendo também ser escrito da seguinte maneira:

$$E \cdot I_E = V_0 \cdot I_0 = \frac{(V_0)^2}{R} \quad (21)$$

Isolando-se I_p em Equação (19) e substituindo-se a Equação (21) chega-se:

$$I_p = \frac{2 \cdot I_E}{D \cdot n} \quad (22)$$

$$I_p = \frac{2}{D \cdot n} \cdot \frac{(V_0)^2}{E \cdot R} \quad (23)$$

e em seguida a substituição de Equação (23) em Equação (15) obtém-se:

$$(E' - V_0) \cdot D = \frac{L}{T_s} \cdot \frac{2}{D \cdot n} \cdot \frac{(V_0)^2}{E \cdot R} \quad (24)$$

Sendo:

P_E = Potência de entrada;

P_0 = Potência de saída;

E = Tensão de entrada;

I_0 = Corrente de saída;

R = Valor da resistência equivalente a carga.

Sabe-se que o período é igual é o inverso da frequência como referenciado na Equação (25):

$$T_s = \frac{1}{f_s} \quad (25)$$

Assim, substituindo a Equação (25) na Equação (24), a mesma pode ser escrita como:

$$(E' - V_0).D = \frac{2.L.f_s.(V_0)^2}{D.E.R.n} \quad (26)$$

$$\frac{2.L.f_s.(V_0)^2}{D.E.R.n} + D.V_0 - E.n.D = 0 \quad (27)$$

Dividindo-se ambos os lados por E se obtém:

$$\frac{2.L.f_s}{D.R.n}.\left(\frac{V_0}{E}\right)^2 + D.\frac{V_0}{E} - n.D = 0 \quad (28)$$

Em seguida dividindo-se por $(2.L.f_s)$ e multiplicando-se por $(D.R.n)$, tem-se:

$$\left(\frac{V_0}{E}\right)^2 + \frac{n.D^2.R}{2.L.f_s}.\frac{V_0}{E} - \frac{n^2.D^2.R}{2.L.f_s} = 0 \quad (29)$$

A Equação (29) é uma equação do segundo grau e pode ser resolvida aplicando-se a fórmula de Bhaskara, com os seguintes coeficientes:

$$a = 1 \quad (30)$$

$$b = \frac{n.D^2.R}{2.L.f_s} \quad (31)$$

$$c = -n.b \quad (32)$$

Portanto:

$$\frac{V_0}{E} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4.a.c}}{2.a} \quad (33)$$

$$\frac{V_0}{E} = -\frac{n.D^2.R}{4.L.f_s} \pm \sqrt{\frac{n^2.D^4.R^2}{16.L^2.(f_s)^2} + \frac{n^2.D^2.R}{2.L.f_s}} \quad (34)$$

Assim, o ganho estático do conversor é dado por:

$$\frac{V_0}{E} = \frac{n.D}{4.L.f_s}.\left(\sqrt{R^2.D^2.8.L.f_s.R} - D.R\right) \quad (35)$$

2.4 RESTRIÇÃO DE OPERAÇÃO

Os resultados da equações a seguir devem ser respeitados para que o conversor opere em modo de condução descontínuo.

Para a obtenção da razão cíclica crítica, deve-se igualar a Equação (35) com o ganho estático do conversor Forward em MCC, que é igual a $D.n$. Assim obtém-se:

$$4.L.f_s = (\sqrt{R^2.D^2.8.L.f_s.R - D.R}) \quad (36)$$

Transfere-se $-D.R$ para o outro lado a fim de isolar o argumento com raiz:

$$(4.L.f_s + D.R) = \sqrt{R^2.D^2.8.L.f_s.R} \quad (37)$$

Com os valores dentro da raiz já isolados, eleva-se ao quadrado ambos os lados:

$$(16.L^2.f_s^2 + 8.L.f_s.D.R + (D.R)^2) = R^2.D^2.8.L.f_s.R \quad (38)$$

$$2.L.f_s + D.R = R \quad (39)$$

$$D_{CR} = \frac{R - 2.L.f_s}{R} = 1 - \frac{2.L.f_s}{R} \quad (40)$$

Portanto, para que o conversor opere em MCD, $D < D_{CR}$.

2.5 EQUAÇÕES PARA O PROJETO DO CONVERSOR EM MCD

Para que o que o conversor opere no modo de condução descontínuo ou seja, para que em uma determinada etapa de operação não exista corrente circulando pelo sistema e todos os seus semicondutores estejam bloqueados. É necessário que estes componentes estejam corretamente dimensionados. Nesta seção será apresentada as equações para os valores máximos de tensão, médios, eficazes e de pico de corrente nos principais elementos do conversor.

2.5.1 Dimensionamento do Transistor

Para os valores de dimensionamento do transistor será calculado os valores de corrente média, eficaz e pico, e o valor máximo de tensão.

1. Valor de pico da corrente:

$$I_{Spk} = I'_p = n \cdot I_P \quad (41)$$

2. Valor médio da corrente:

$$I_{Smed} = \frac{n \cdot D \cdot I_P}{2} \quad (42)$$

3. Valor eficaz de corrente:

$$I_{Seff} = n^2 \cdot I_P^2 \cdot \sqrt{\frac{D}{3}} \quad (43)$$

4. Valor máximo de tensão:

$$V_{Spk} = 2E \quad (44)$$

2.5.2 Dimensionamento do Diodo Retificador

Para os valores de dimensionamento do diodo retificador será calculado os valores de corrente média e pico, e o valor máximo de tensão.

1. Valor de pico da corrente:

$$I_{Drpk} = I_P \quad (45)$$

2. Valor médio da corrente:

$$I_{Drmed} = \frac{I_P \cdot D}{2} \quad (46)$$

3. Valor máximo da tensão:

$$I_{Drmax} = -(n \cdot E + V_0) \quad (47)$$

2.5.3 Dimensionamento do Diodo Roda-Livre

Para os valores de dimensionamento do diodo de Roda-Livre será calculado os valores de corrente média e pico, e o valor máximo de tensão.

1. Valor de pico da corrente:

$$I_{Drlpk} = I_P \quad (48)$$

2. Valor médio da corrente:

$$I_{Drlmed} = \frac{E.n - V_0.D.I_P}{2.V_0} \quad (49)$$

3. Valor máximo da tensão:

$$I_{Drlmax} = -E.n \quad (50)$$

2.5.4 Dimensionamento do Indutor

O dimensionamento do indutor será calculado pela Equação (24) e isolando-se L .

$$L = \frac{E \cdot n \cdot D^2 \cdot (E \cdot n - V_0)}{2 \cdot f_s \cdot P_0} \quad (51)$$

3 ANÁLISE DO CONVERSOR FORWARD COMO EQUALIZADOR DE TENSÃO

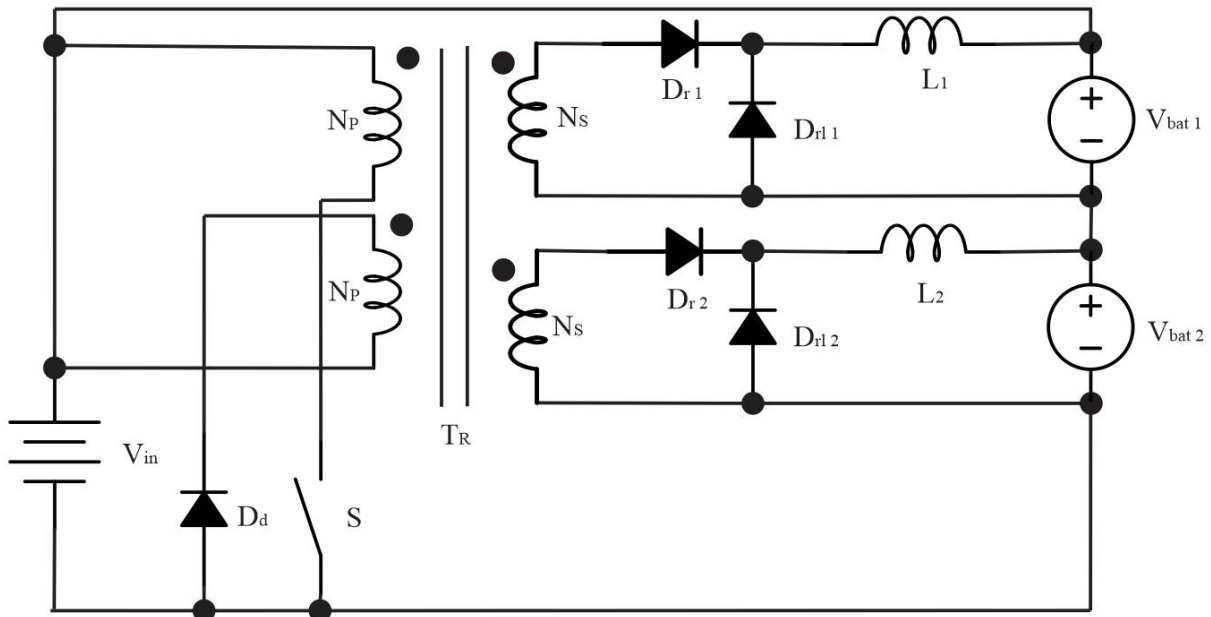
Para que o conversor Forward opere como equalizador de tensão, ele deve ser projetado para operar no modo de condução descontínuo (MCD). Nesse modo de operação, o conversor apresenta uma característica de saída particular, onde verifica-se que existe um decaimento da tensão de saída com o aumento da corrente de saída, para o mesmo valor de razão cíclica (FONT, 2019) (PAGLIOSA, 2018).

Essa característica confere ao conversor a capacidade de encontrar um ponto de operação estável, sem alterar o valor da razão cíclica, que com o projeto adequado do conversor, levará ao ponto de operação onde as saídas apresentam o mesmo valor, ou seja, ficam equalizadas. Na literatura, esta característica é denominada de auto equilíbrio ou auto balanço (PAGLIOSA, 2018).

Portanto, o conversor pode operar em malha aberta, com uma razão cíclica fixa, não necessitando o emprego de um sistema de controle em malha fechada para realizar a equalização de tensão.

Para estudar o conversor Forward como equalizador de tensão, utiliza-se a representação mostrada na Figura 12, para duas baterias conectadas em série. A fonte de tensão V_{in} representa a tensão equivalente de um carregador de bateria, enquanto as baterias são representadas simplificadaamente pelas fontes V_{bat1} e V_{bat2} . O transformador é representado pelo símbolo de um transformador ideal com um enrolamento primário, dois enrolamentos secundários e um enrolamento de desmagnetização, conectado ao primário como habitualmente é realizado para o conversor Forward.

Figura 12 – Conversor CC-CC Forward aplicado na equalização de tensão de duas baterias



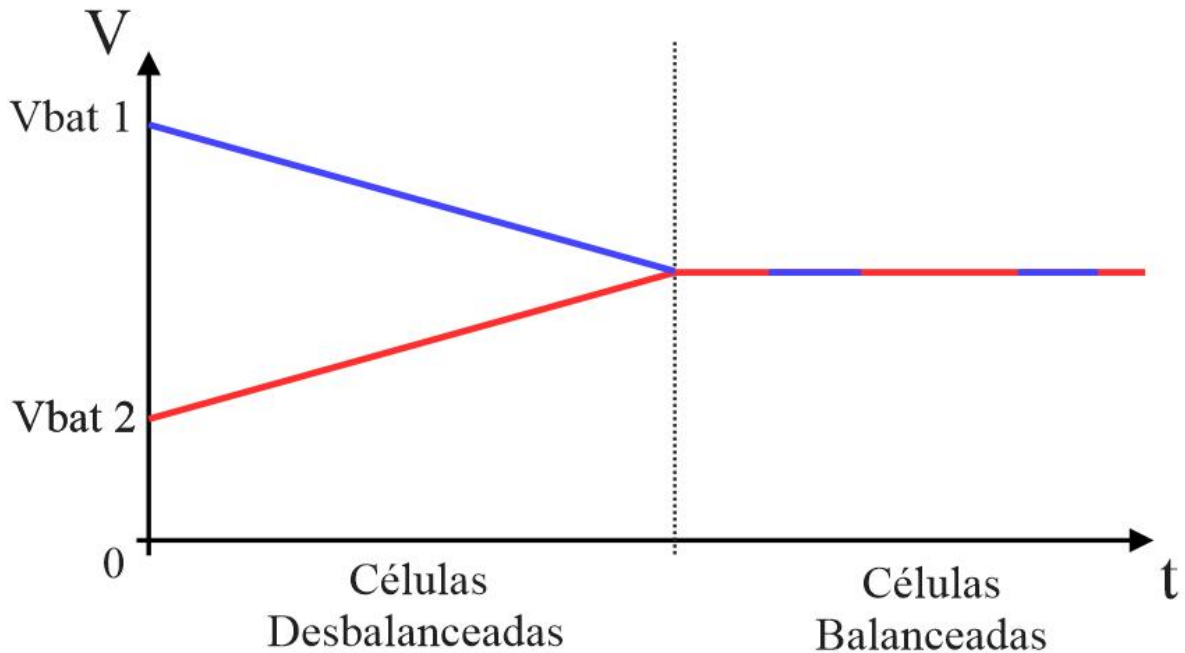
Fonte: Autoria própria.

Na operação como equalizador de tensão, tem-se dois períodos de operação distintos, como representado na Figura 13 (COSTA; ILLA FONT; BARBI, 2018). No primeiro período, denominado de desbalanceado, as tensões nas baterias estão desbalanceadas e o conversor Forward atuará no sentido de realizar o equilíbrio destas tensões (CHATZINIKOLAOU; ROGERS, 2017).

No segundo período, denominado de balanceado, o conversor Forward continuará operando, trocando energia entre as baterias e o barramento CC da saída do carregador de baterias (fonte V_{in}). Caso um novo desbalanceamento ocorra, o conversor Forward irá novamente atuar para realizar o balanceamento das tensões.

Destaca-se que o conversor Forward deve operar em MCD tanto no período desbalanceado quanto no período balanceado.

Figura 13 – Tensões de saída (nas baterias) para os períodos balanceado e desbalanceado



Fonte: Autoria própria.

3.1 ETAPAS DE OPERAÇÃO

No modo descontínuo de condução, o conversor Forward pode apresentar quatro ou cinco etapas de operação (caso se considere um transformador ideal, o conversor Forward irá apresentar três ou quatro etapas de operação).

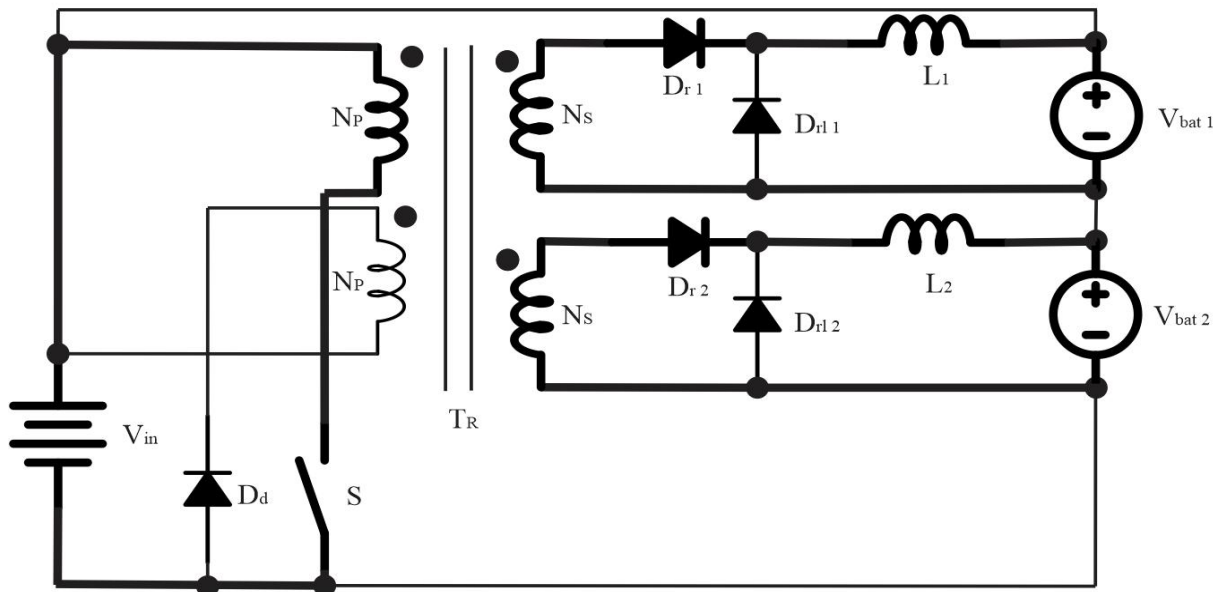
As etapas de operação estão apresentadas nas Figuras 14, 15, 16, 17 e 18 sendo que para o período desbalanceado, o conversor terá cinco etapas de operação (etapas 1, 2, 3, 4 e 5) e para o período balanceado, o conversor terá quatro etapas de operação (etapas 1, 2, 3 e 5).

As etapas de operação são descritas a seguir:

Primeira etapa (Figura 14): esta etapa de operação tem início quando o interruptor S entra em condução. Os diodos de desmagnetização e de roda-livre de ambos os secundários se encontram bloqueados e os diodos retificadores entram em condução. A fonte de tensão V_{in} transfere energia para a indutância magnetizante do transformador, para os indutores de saída de cada secundário e para as baterias. As correntes nos indutores de saída crescem em rampa, desde zero até um valor máximo. Particularmente para o caso desbalanceado, considerando que a tensão de V_{bat2} é menor que V_{bat1} , por

exemplo, a corrente no indutor L_2 terá maior valor, transferindo mais energia para esta bateria.

Figura 14 – Primeira etapa de operação

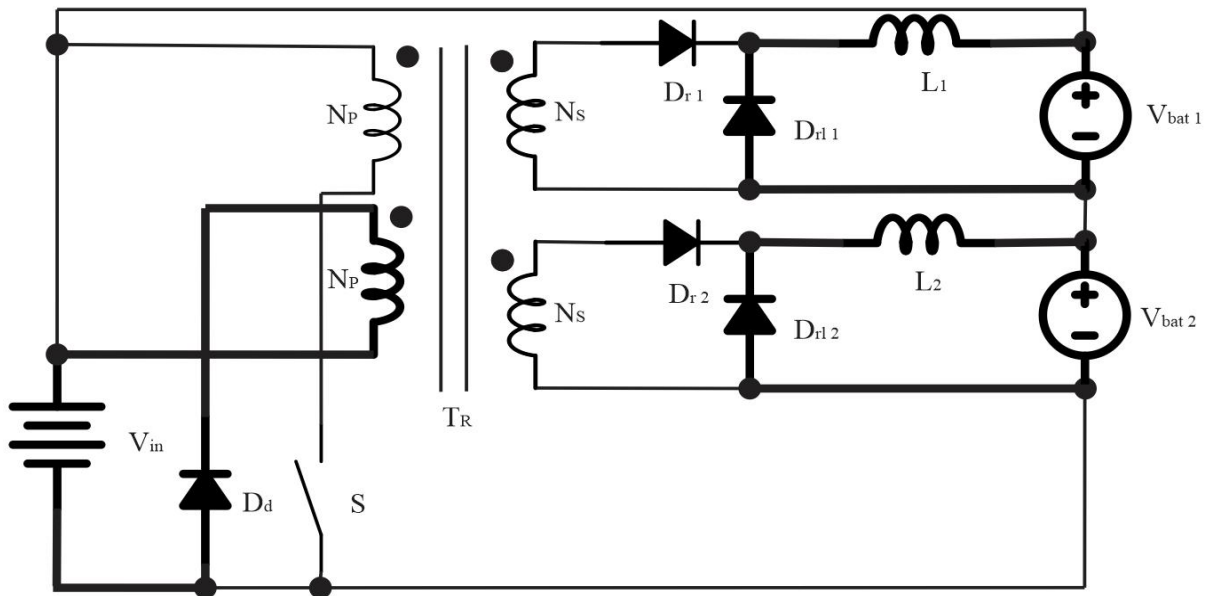


Fonte: Autoria própria.

Segunda etapa (Figura 15): esta etapa inicia quando o interruptor S é comandado a bloquear. No primário, o diodo de desmagnetização entra em condução e a energia previamente armazenada na indutância magnetizante é transferida para a fonte V_{in} . No secundário, os diodos retificadores bloqueiam e os diodos de roda livre entram em condução, transferindo a energia previamente armazenada nos indutores de saída para as baterias. As correntes nos indutores de saída decrescem em rampa. Ao se considerar a condição de baterias desbalanceadas, onde a tensão de V_{bat2} é menor que V_{bat1} , por exemplo, a corrente no diodo D_{rl2} terá maior intensidade, transferindo mais energia para esta bateria e, aumentando a tensão de saída V_{bat2} .

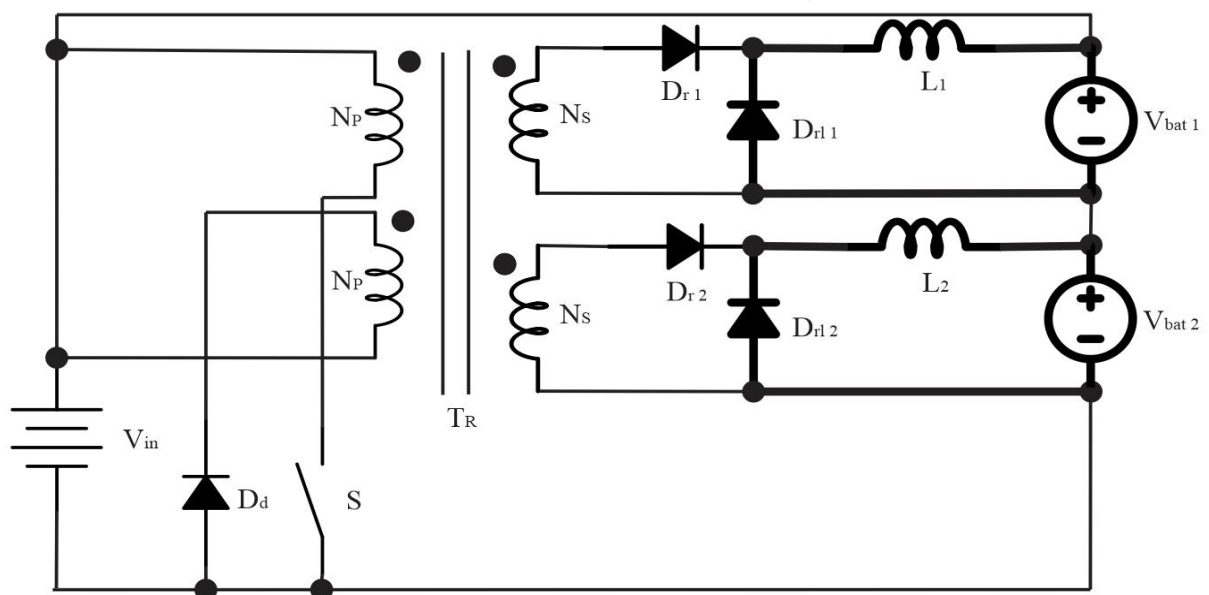
Terceira etapa (Figura 16): esta etapa de operação inicia quando a corrente na indutância magnetizante chega a zero, bloqueando o diodo de desmagnetização D_d . No secundário, os diodos de roda livre permanecem em condução e as correntes nos indutores de saída continuam decrescendo em rampa. Quando a corrente em um ou em ambos os indutores de saída chegar a zero, esta etapa é finalizada.

Figura 15 – Segunda etapa de operação



Fonte: Autoria própria.

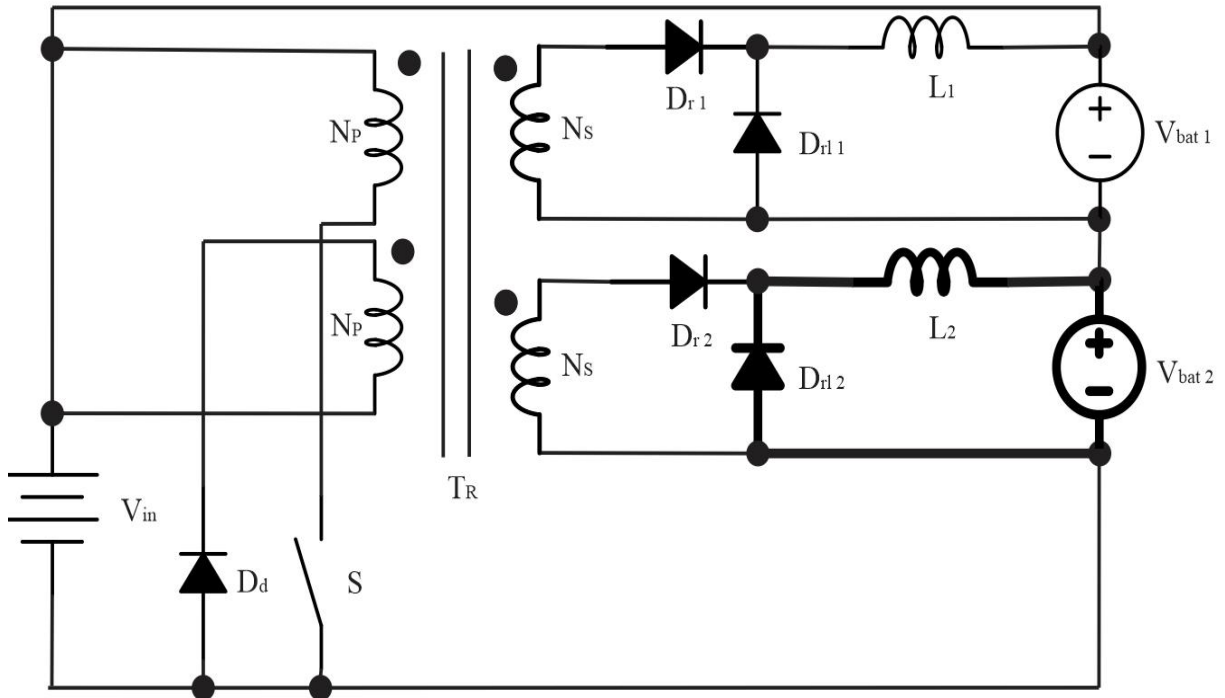
Figura 16 – Terceira etapa de operação



Fonte: Autoria própria.

Quarta etapa (Figura 17): Quando a corrente no indutor de saída L_1 chegar a zero, o diodo de roda livre D_{r11} bloqueia e esta etapa tem início. O indutor L_2 continua transferindo energia para a bateria com tensão V_{bat2} , elevando seu nível de tensão.

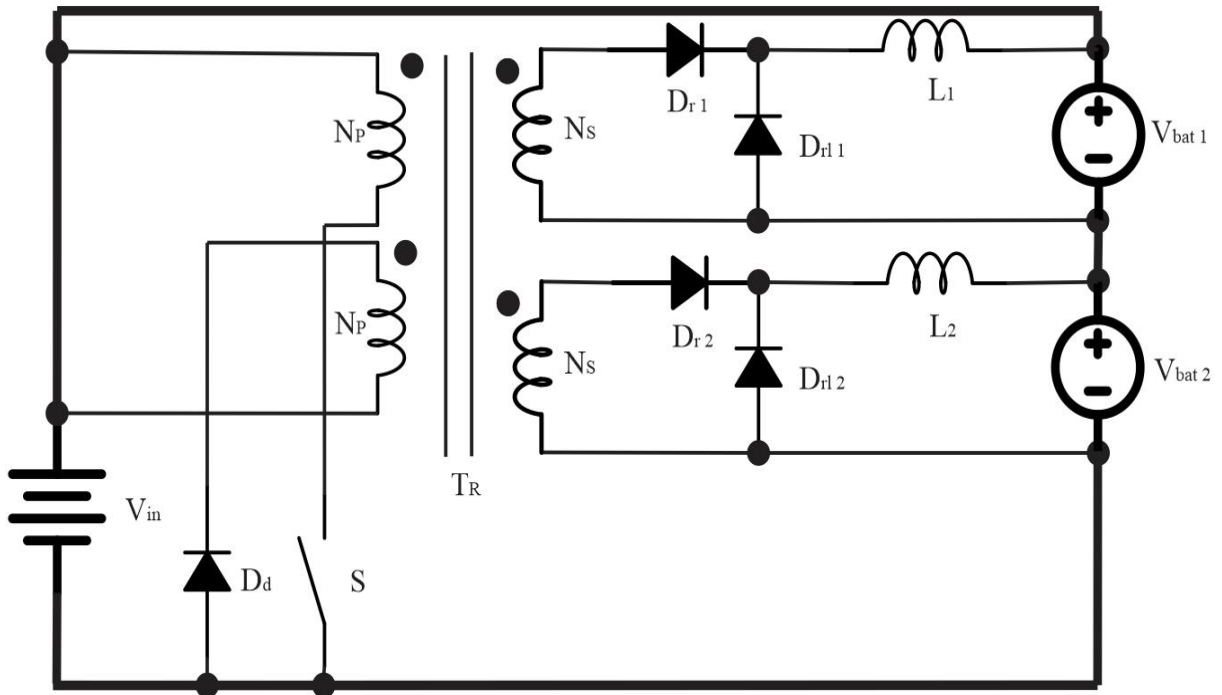
Figura 17 – Quarta etapa de operação



Fonte: Autoria própria.

Quinta etapa (Figura 18): a última etapa, geralmente denominada de etapa descontínua, tem início com o bloqueio dos dois diodos de roda-livre (para o caso balanceado) ou com o bloqueio do diodo D_{rl2} (para o caso desbalanceado). As indutâncias de saída não possuem energia armazenada, assim, não havendo mais nenhuma transferência de energia. Todos os semicondutores estão bloqueados, indicando que todas as correntes nos elementos do conversor Forward são iguais a zero. Quando o interruptor S é comandado conduzir novamente, retorna-se à primeira etapa de operação e inicia-se um novo período de comutação.

Figura 18 – Quinta Etapa de Operação



Fonte: Autoria própria.

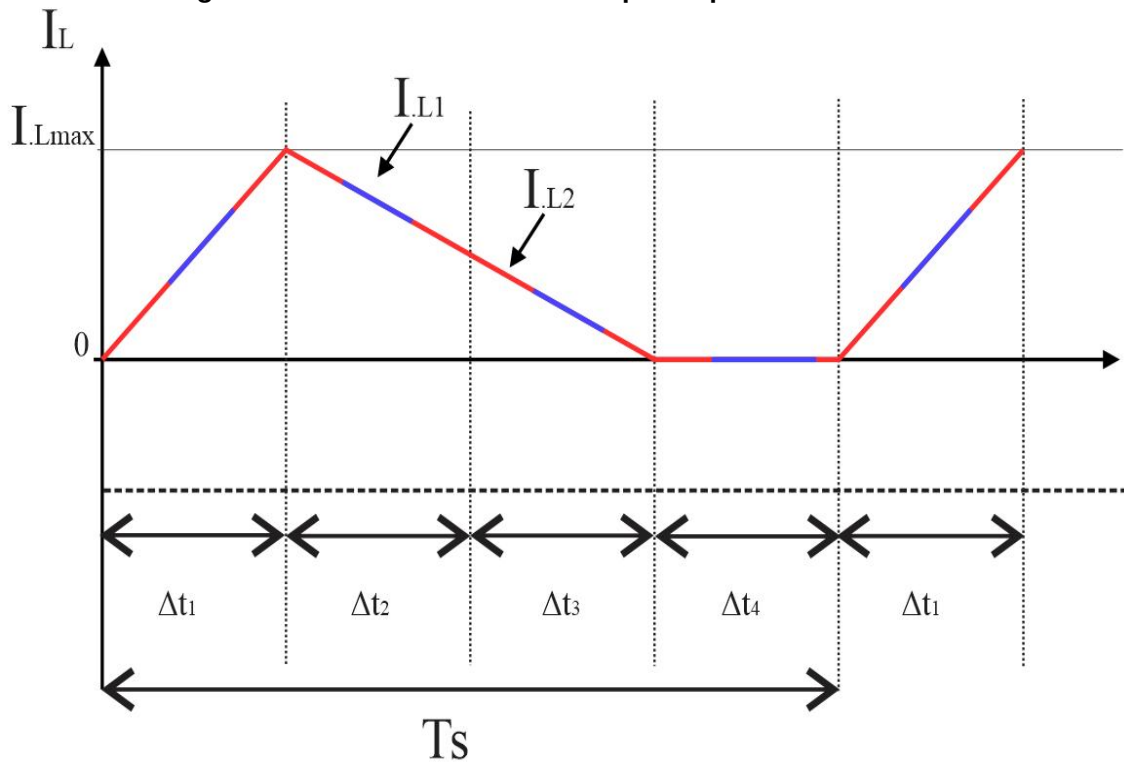
3.2 FORMAS DE ONDAS IDEAIS

As formas de onda ideais para um período de comutação são apresentadas nas Figuras 19 a 26 e foram obtidas pela análise das etapas de operação.

No que se refere ao conversor operando no período balanceado, tem-se quatro etapas de operação; são apresentadas as formas de onda das correntes nos indutores de saída (Figura 19), corrente e tensão no interruptor (Figura 20), corrente e tensão nos diodos retificadores (Figura 21) e corrente e tensão nos diodos de roda livre (Figura 22).

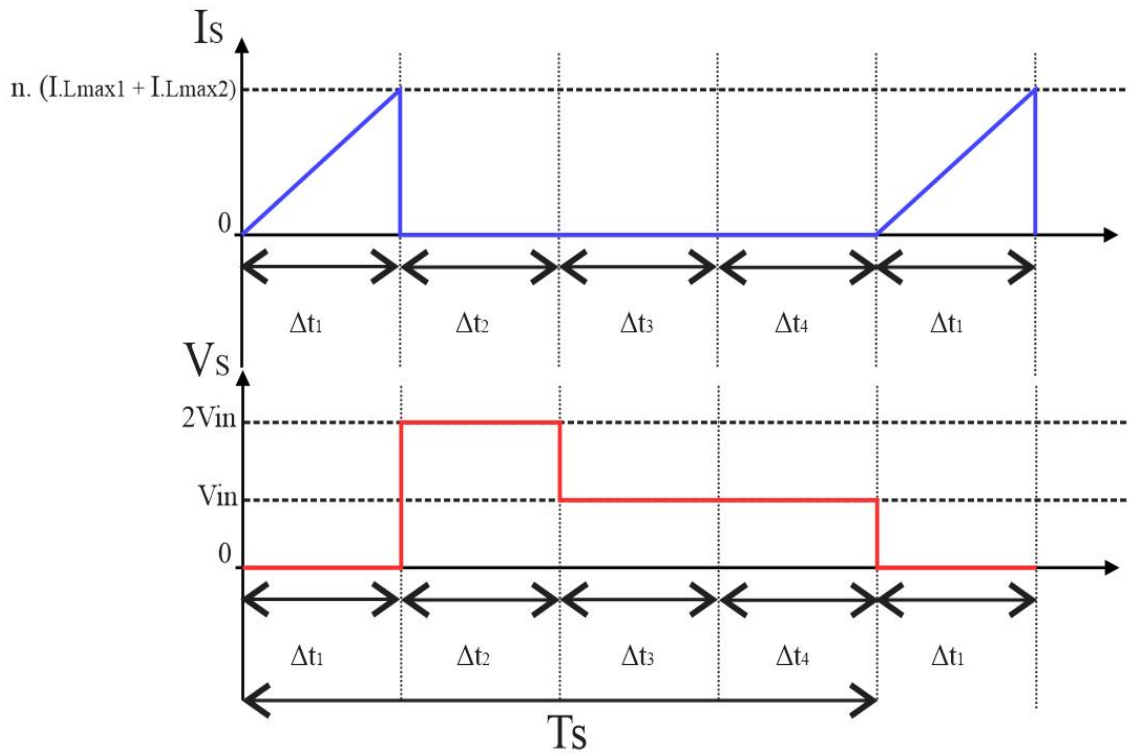
Na Figura 19 a cor azul representa o valor da corrente do indutor um ao longo do tempo e a cor vermelha representa o valor do indutor dois ao longo do tempo, nota-se que estes valores são iguais para o período balanceado, assim como os valores dos demais componentes no mesmo período.

Figura 19 – Corrente nos indutores para o período balanceado



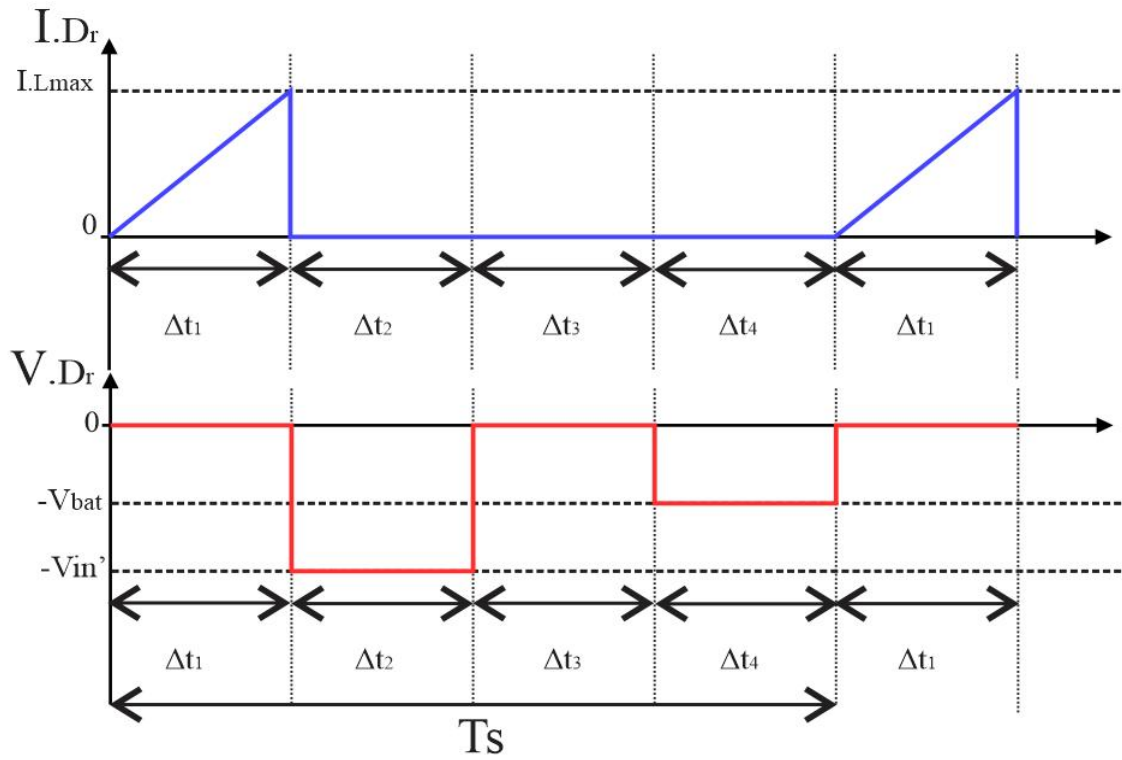
Fonte: Autoria própria.

Figura 20 – Tensão e corrente no interruptor para o período balanceado



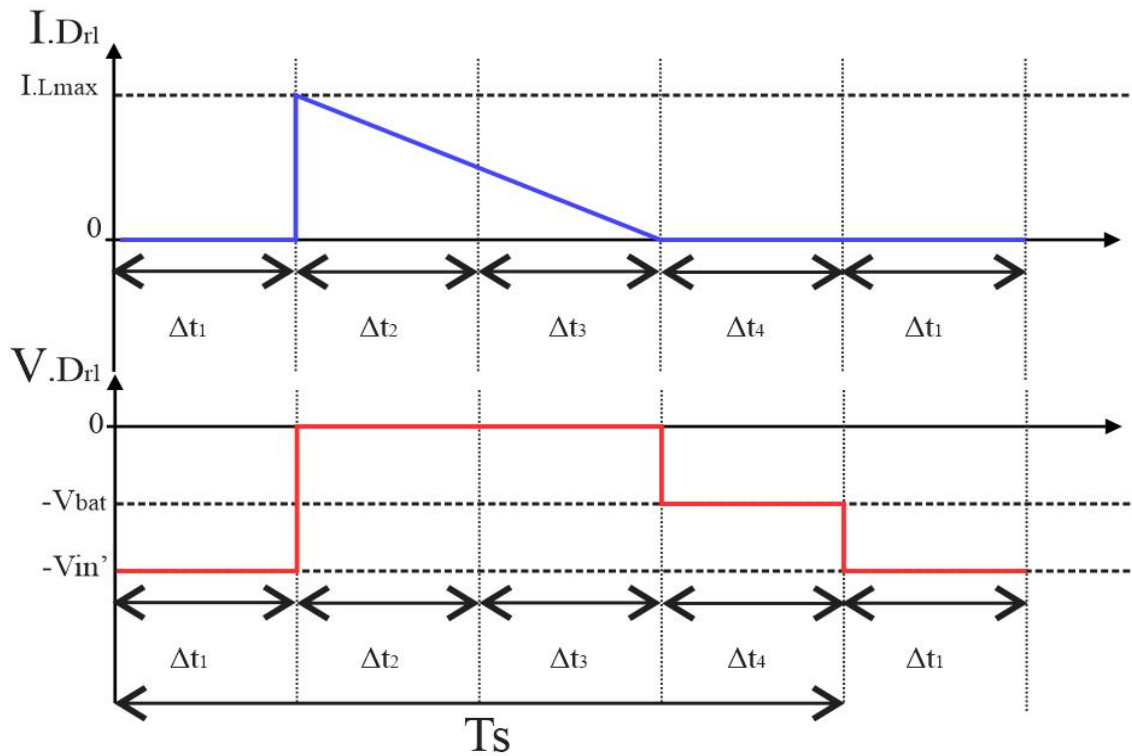
Fonte: Autoria própria.

Figura 21 – Tensão e corrente nos diodos retificadores para o período balanceado



Fonte: Autoria própria.

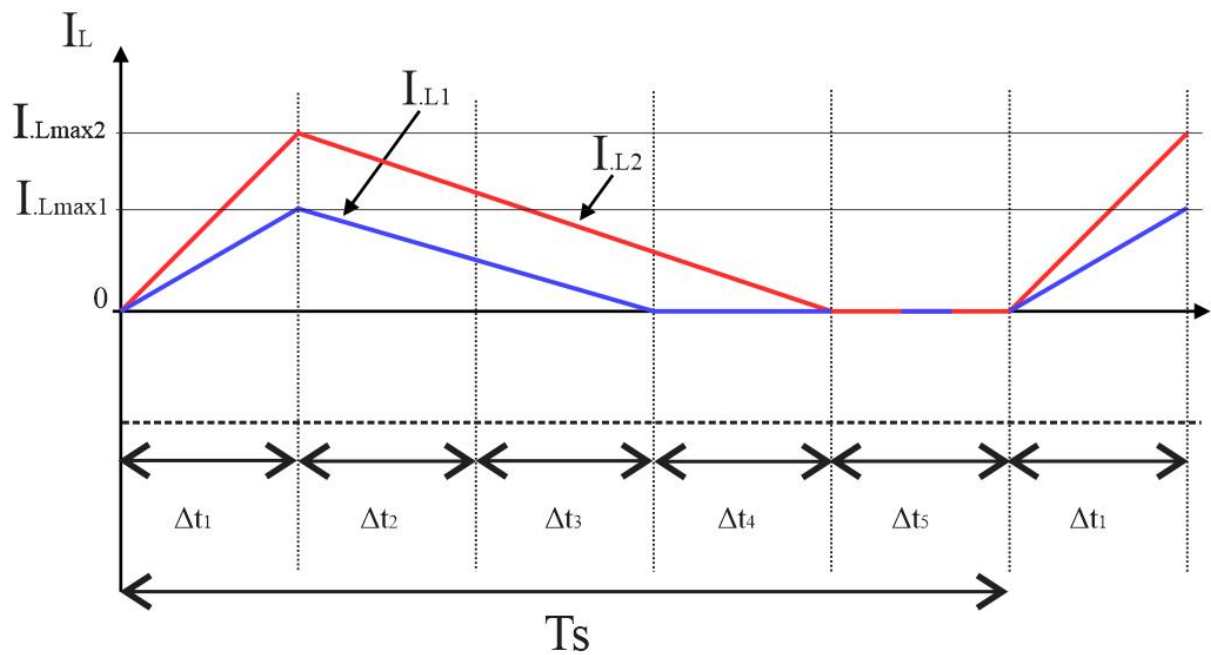
Figura 22 – Tensão e corrente nos diodos de roda-livre para o período balanceado



Fonte: Autoria própria.

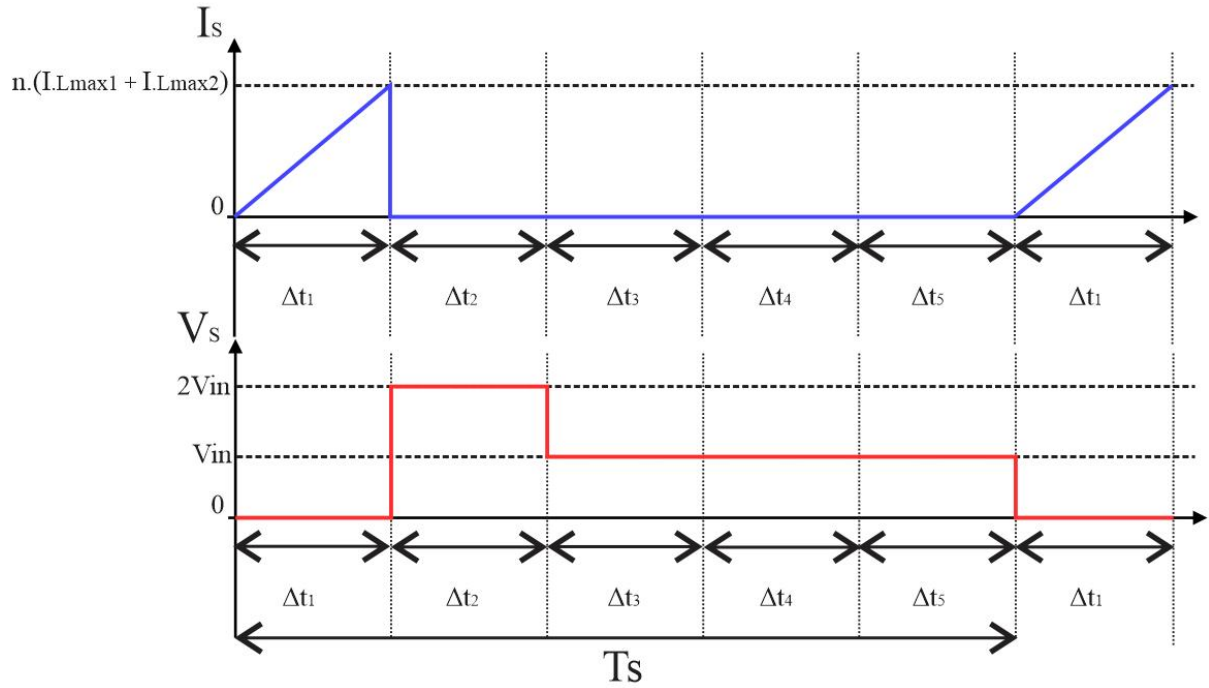
No que se refere ao conversor operando em desbalanceamento de cargas, o mesmo possui cinco etapas de operação. Nas Figuras 23 a 27 são apresentadas as formas de onda das correntes nos indutores de saída (Figura 23), corrente e tensão no interruptor (Figura 24), corrente e tensão nos diodos retificadores (Figura 25), corrente e tensão nos diodos de roda livre (Figura 26) e corrente e tensão no diodo de desmagnetização (Figura 27).

Figura 23 – Corrente nos indutores para o período desbalanceado



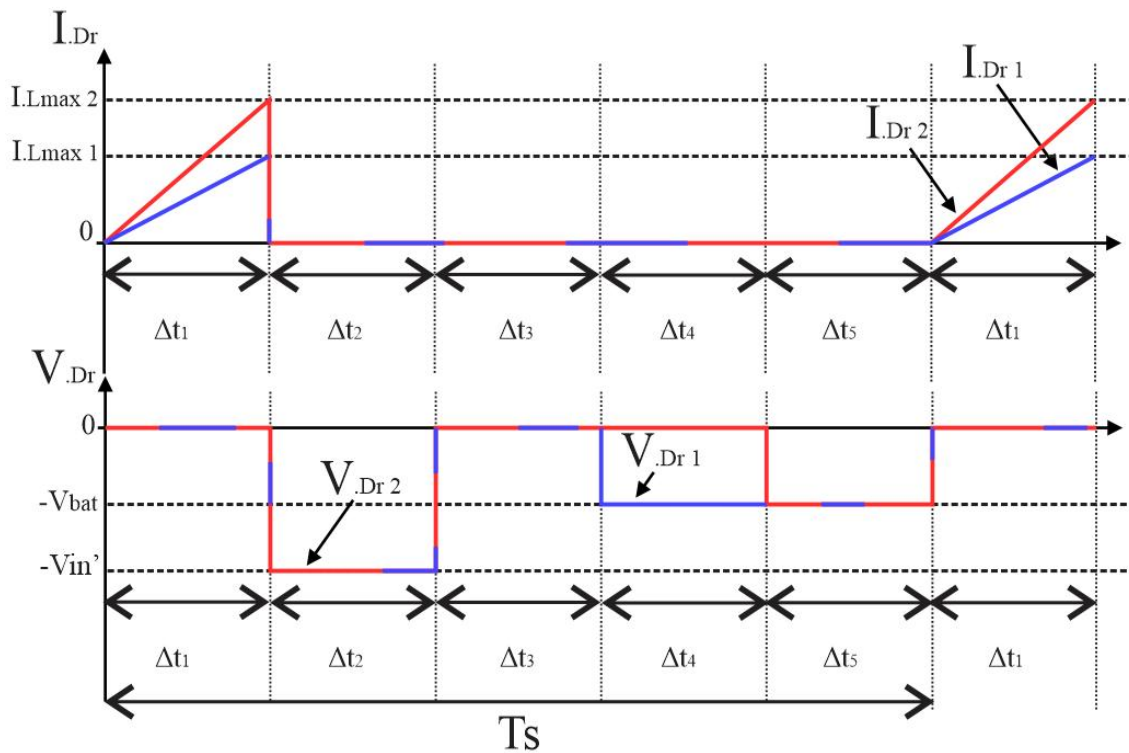
Fonte: Autoria própria.

Figura 24 – Tensão e corrente no interruptor para o período desbalanceado



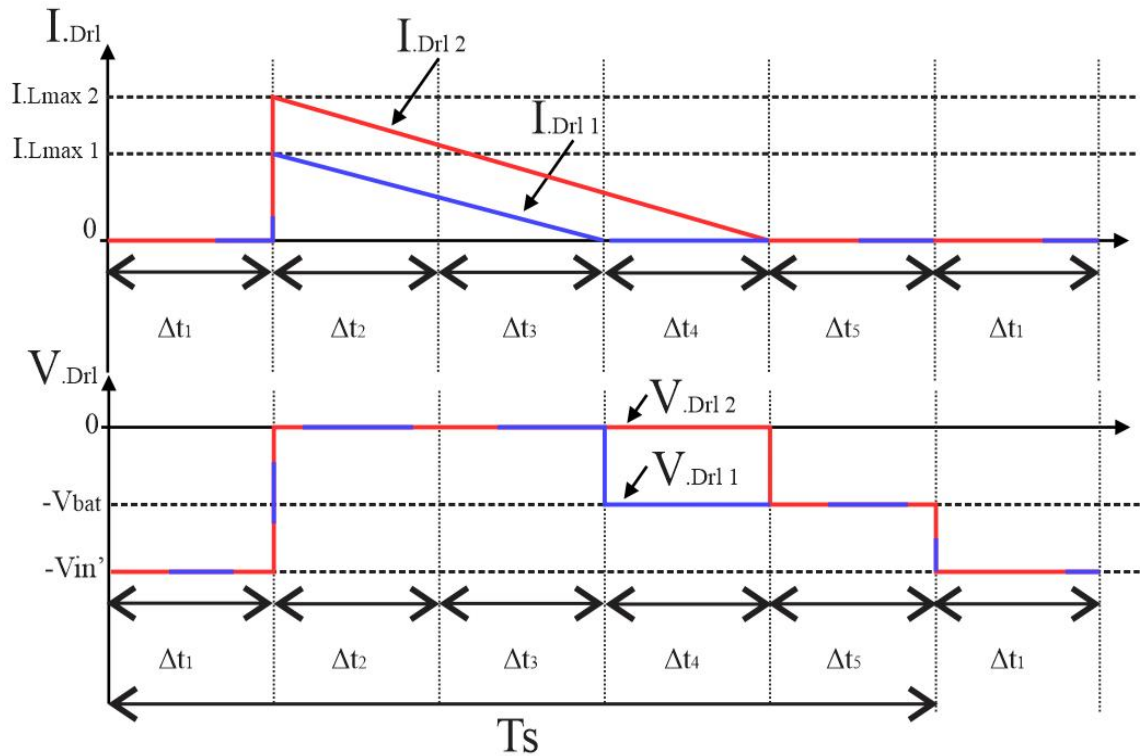
Fonte: Autoria própria.

Figura 25 – Tensão e corrente nos diodos retificadores para o período desbalanceado



Fonte: Autoria própria.

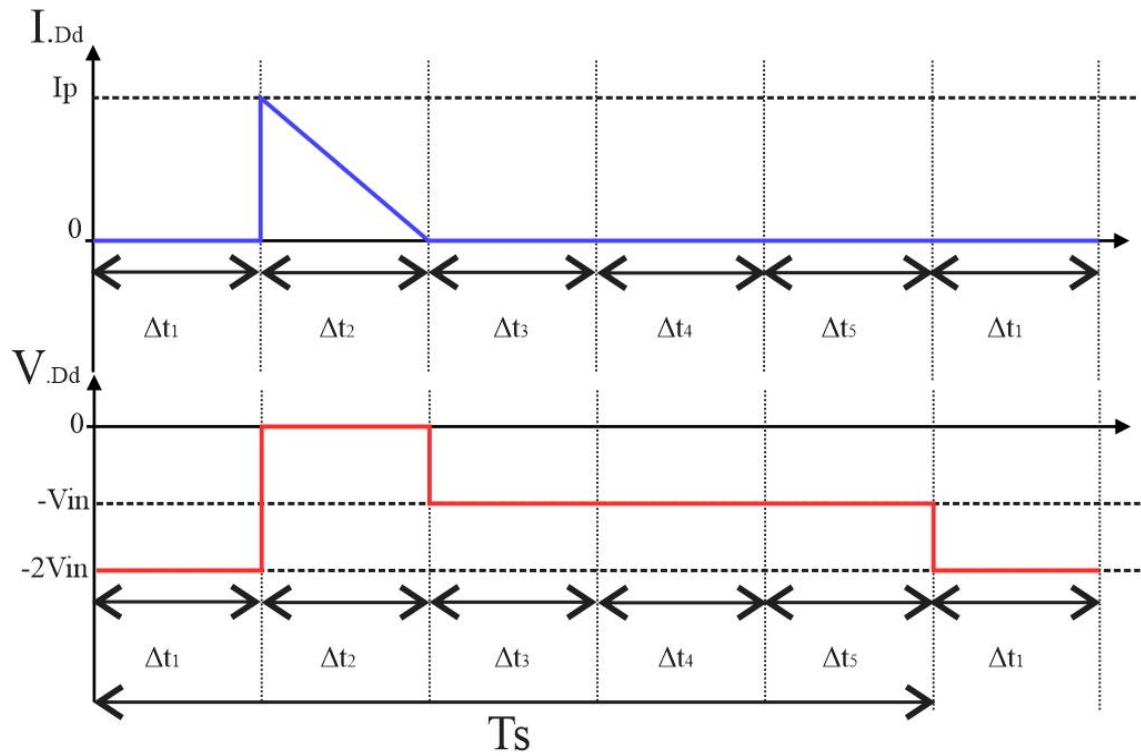
Figura 26 – Tensão e corrente nos diodos de roda livre para o período desbalanceado



Fonte: Autoria própria.

Adicionalmente, a segunda etapa de operação representa somente a transferência de energia da indutância magnetizante para a fonte de entrada, sendo de menor importância na caracterização do funcionamento do conversor, que deve descrever detalhadamente a transferência de energia entre a entrada e saída do conversor.

Figura 27 – Tensão e corrente no diodo de desmagnetização para o período desbalanceado



Fonte: Autoria própria.

4 EQUAÇÕES DE PROJETO DO EQUALIZADOR

Esta seção trata da obtenção das equações de projeto para o dimensionamento do conversor Forward com duas baterias com cargas diferentes operando como equalizador de tensão. O objetivo é encontrar as equações de projeto que garantam a operação do conversor no MCD tanto para o caso balanceado como para o caso desbalanceado.

Ao se considerar o desequilíbrio de tensão V_{Δ} na saída, esta pode ser escrita como em (52). Sendo γ o número de baterias.

$$V_{bat} = \frac{V_{in}}{\gamma} - V_{\Delta} \quad (52)$$

Sendo:

V_{bat} = tensão na bateria;

V_{in} = Tensão de entrada nas baterias;

γ = Número de saídas do conversor

V_{Δ} = Desequilíbrio de tensão;

Se o conversor estiver operando sob tensões de saída desequilibradas, o intervalo da primeira etapa não é alterado, pois depende da razão cíclica, que é constante. Já os intervalos de tempo das etapas de operação sofrerão alterações calculadas pelas Equações (53) e (54). Se este fato for negligenciado no projeto do conversor, o mesmo poderá deixar de operar em condução descontínua durante o período desequilibrado.

$$\Delta t_{2d1} = \frac{D((E(n\gamma - 1)) + V_{\Delta}\gamma)}{E - V_{\Delta}\gamma} T_s \quad (53)$$

$$\Delta t_{2d2} = \frac{D((E(n\gamma - 1)) - V_{\Delta}\gamma)}{E + V_{\Delta}\gamma} T_s \quad (54)$$

Sendo:

Δt_{2d1} = Intervalo da segunda etapa para saída 1;

Δt_{2d2} = Intervalo da segunda etapa para saída 2;

Os intervalos da terceira etapa pode ser calculado pelas equações (55) a (56)

para os períodos desbalanceados e balanceados respectivamente.

$$\Delta t_{3d1} = \frac{D(E(n\gamma - 1)) + V_{\Delta}\gamma}{E - V_{\Delta}\gamma} T_s \quad (55)$$

$$\Delta t_{3d2} = \frac{E(1 - Dn\gamma) - V_{\Delta}\gamma}{E + V_{\Delta}\gamma} T_s \quad (56)$$

Sendo:

Δt_{3d1} = Intervalo da terceira etapa de operação para saída 1;

Δt_{3d2} = Intervalo da terceira etapa de operação para saída 2.

Devido à variação do intervalo de tempo da segunda etapa de operação, duas considerações devem ser abordadas para o correto projeto do conversor Forward:

1) Primeiramente o intervalo de tempo da segunda etapa de operação durante a condição desbalanceada é maior que o intervalo de tempo durante a condição balanceada. Isso significa que o intervalo de tempo da terceira etapa de operação durante a condição desbalanceada será menor. Se o conversor não for projetado adequadamente, durante a condição de desequilíbrio, o intervalo de tempo da terceira etapa de operação pode tender a zero e então o conversor pode operar no modo de condução contínuo (MCC);

2) Como o intervalo de tempo da segunda etapa de operação altera seu valor durante a condição de desequilíbrio, as tensões e as correntes nos lados secundários serão alteradas. O conhecimento desse comportamento é importante para o projeto dos indutores de saída e dos diodos de saída, como será demonstrado nas próximas seções.

4.1 RAZÃO CÍCLICA MÁXIMA

Os conversores que operam no MCD têm uma restrição no projeto para garantir a operação deste modo quando são submetidos a uma variação de parâmetro, como a

potência de saída.

Alternativamente, esta variação também pode ser expressa por meio da razão cíclica máxima. Para o conversor Forward convencional, as expressões para a razão cíclica máxima e a resistência de carga mínima são, tipicamente, apresentadas como em (57) e (58).

Ao se considerar o desequilíbrio de tensão V_{Δ} em uma das tensões de saída, a razão cíclica máxima pode ser determinada com a expressão apresentada em (59).

Sabendo que:

$$D_{max} = 1 - \left(\frac{2L_0 f_s}{R_0} \right) \quad (57)$$

$$R_0 = \frac{2L_0 f_s}{1 - D} \quad (58)$$

$$D_{max} = \frac{E - V_{\Delta} \gamma}{En\gamma} \quad (59)$$

Sendo:

D_{max} = Razão cíclica máxima;

L_0 = Valor da indutância;

R_0 = Valor da resistência;

Para a correta operação do conversor, o valor de razão cíclica nominal deve ser menor que o valor da razão cíclica máxima.

4.2 DIMENSIONAMENTO DO INDUTOR

O valor da indutância dos indutores de saída pode ser calculado pela (Equação (60)). Os valores máximos e médio da corrente no indutor são dadas pelas Equações (61), (62) e (63), respectivamente. Destaca-se que, ao se considerar a bateria com menor tensão, o valor máximo de corrente ocorrerá nesta saída,

$$L_i = \frac{E^2 D^2 (n\gamma - 1)}{f_s P_0} \quad (60)$$

$$I_{L1max} = \frac{D([E(n\gamma - 1)] + \gamma V_{\Delta 1})}{L_i f_s \gamma} \quad (61)$$

$$I_{L2max} = \frac{D([E(n\gamma - 1)] - \gamma V_{\Delta 1})}{L_i f_s \gamma} \quad (62)$$

$$I_{Lmed} = I_0 \quad (63)$$

Sendo:

L_i = Valor da indutância;

I_{L1max} = Corrente máxima no indutor 1;

I_{L2max} = Corrente máxima no indutor 2;

I_{Lmed} = Corrente média dos indutores;

I_0 = Corrente de saída do conversor;

4.3 DIMENSIONAMENTO DO TRANSISTOR

Para o transístor, o valor máximo de tensão e valores máximo, médio e eficaz de corrente podem ser calculados pelas Equações (64), (65), (66) e (67), respectivamente.

$$V_{Smax} = 2E \quad (64)$$

$$I_{Smax} = n(I_{L1max} + I_{L2max}) \quad (65)$$

$$I_{Smed} = \frac{n \cdot D(I_{L1max} + I_{L2max})}{2} \quad (66)$$

$$I_{Sef} = n(I_{L1max} + I_{L2max}) \cdot \sqrt{\frac{D}{3}} \quad (67)$$

Sendo:

V_{Smax} = Tensão máxima no transistor;

I_{Smax} = Corrente máxima no transistor;

I_{Smed} = Corrente média no transistor;

I_{Sef} = Corrente eficaz no transistor;

4.4 DIMENSIONAMENTO DO DIODO RETIFICADOR

Para os diodos retificadores, os valores máximos de tensão e valores máximos e médios de corrente podem ser calculados pelas Equações (68), (69) e (70), respectivamente.

$$V_{Drmax} = -(n.E + V_0) \quad (68)$$

$$I_{Dr1max} = I_{L1max} \quad (69)$$

$$I_{Drmed} = \frac{D.I_{L1max}}{2} \quad (70)$$

Sendo:

V_{Drmax} = Tensão máxima no Diodo Retificador;

I_{Drmax} = Corrente máxima no Diodo Retificador;

I_{Drmed} = Corrente média no Diodo Retificador;

4.5 DIMENSIONAMENTO DO DIODO DE RODA-LIVRE

Para os diodos de roda livre, os valores máximos de tensão e valores máximos e médios de corrente podem ser calculados pelas Equações (71), (72) e (73), respectivamente.

$$V_{Drlmax} = -n.E \quad (71)$$

$$I_{Drlmax} = I_{L1max} \quad (72)$$

$$I_{Drlmed} = \frac{D.(E.n - V_0)}{2.V_0} \quad (73)$$

Sendo:

V_{Drlmax} = Tensão máxima no Diodo Roda-Livre;

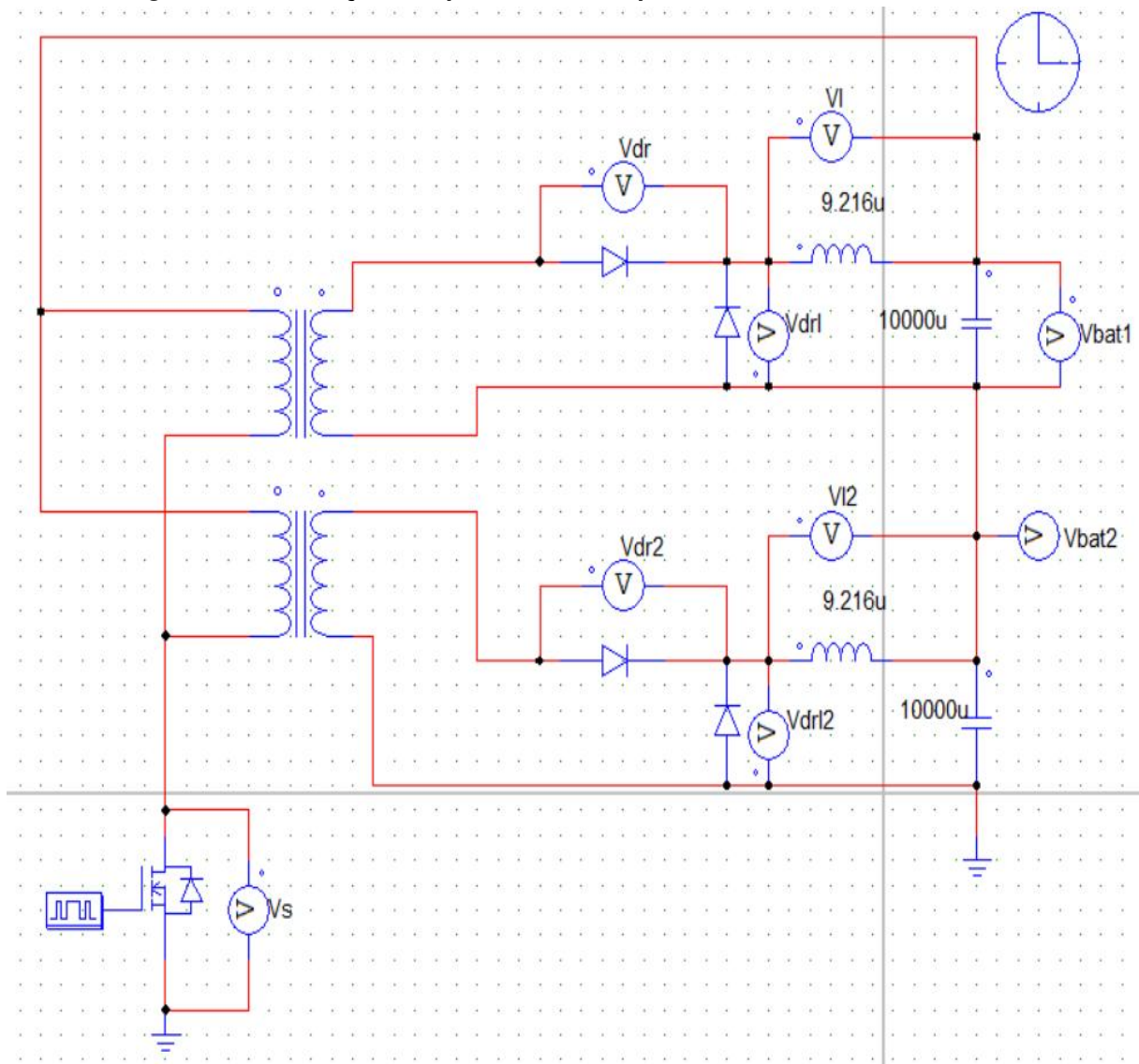
I_{Drlmax} = Corrente máxima no Diodo Roda-Livre;

I_{Drlmed} = Corrente média no Diodo Roda-Livre;

5 PROJETO E RESULTADOS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

O projeto foi elaborado considerando as especificações de projeto apresentadas na Tabela 1. O projeto foi simulado em software com a disposição apresentada anteriormente no capítulo 3 e contempla a associação em série de duas baterias de 12 V como apresentado na Figura 28. Admitiu-se que poderá haver um desequilíbrio máximo de 2 V, ou seja, a condição de pior caso é uma bateria com tensão de 14 V e, conseqüentemente, a outra com tensão de 10 V.

Figura 28 – Simulação computacional do equalizador Forward com 2 saídas



Fonte: Autoria própria.

Tabela 1 – Especificações de projeto

Especificações	Valor
Tensão de Entrada - V_{in}	24 V
Tensão de Saída (na bateria) - V_0	12 V
Potência de Saída - P_0	100 W
Frequência de Comutação - f_s	50k Hz
Razão Cíclica Nominal - D	0,40
Número de Saídas - γ	2
Desequilíbrio de Tensão - V_{Δ}	2 V

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 2 encontram os valores calculados, com base nas equações de projeto apresentadas anteriormente. Para uma relação de transformação unitária, a máxima razão cíclica é igual a 0,412; como a razão cíclica nominal é igual a 0,40, o projeto é factível.

Tabela 2 – Valores calculados para projeto

Parâmetros	Valor
Relação de Transformação - n	1
Razão Cíclica Máxima - D_{max}	0,412
Período de Comutação - T_s	20 us
Tempo da Primeira Etapa - Δt_{1d}	8 us
Tempo Máximo da 2ª Etapa Desbalanceada - Δt_{2d1}	11,20 us
Tempo Máximo da 2ª Etapa Balanceada - Δt_{2d2}	5,714 us
Tempo Máximo da 3ª Etapa Desbalanceada - Δt_{3d1}	0,8 us
Tempo Máximo da 3ª Etapa Balanceada - Δt_{3d2}	6,286 us
Indutância dos Indutores - L_1, L_2	9,216 uH
Máxima Corrente nos Indutores - L_1, L_2	12,153 A
Máxima Tensão no Transistor - V_S	48 V
Máxima Corrente no Transistor - I_S	2,08 A

Fonte: Autoria própria.

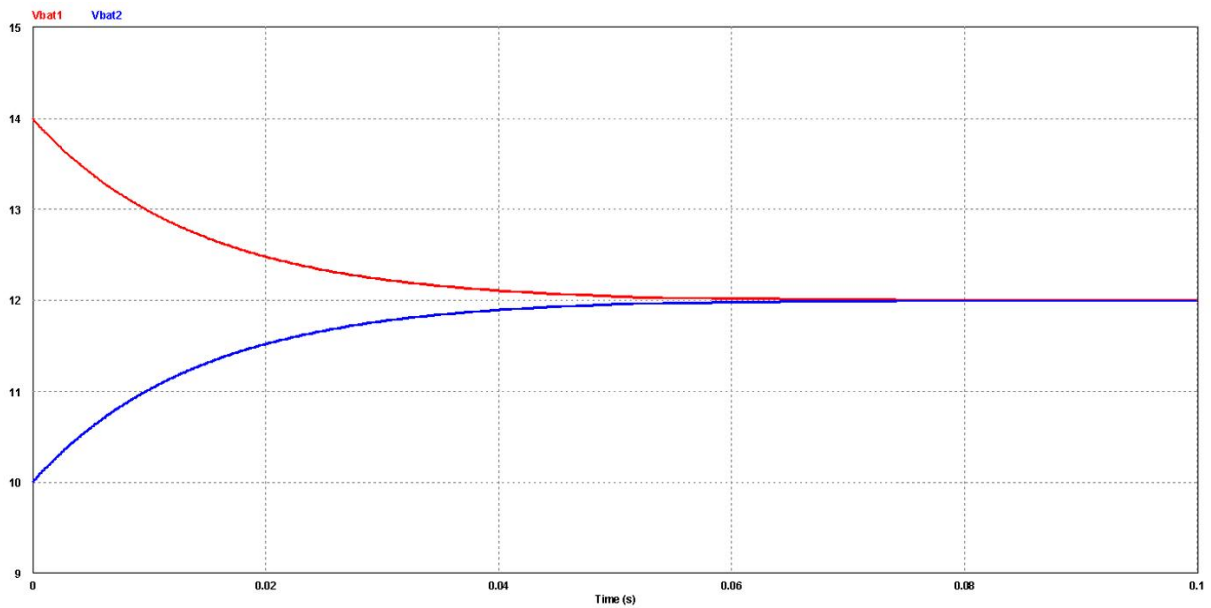
Observa-se também na Tabela 2 que, o tempo da etapa descontínua é pequeno, de valor igual a 0,8 us, mas o suficiente para garantir o conversor operando da forma desejada, em MCD.

Para realizar a simulação numérica, modelou-se as baterias, simplificada, por um capacitor de elevado valor. Desse modo, pode-se simular os desbalanços de tensão a partir das condições iniciais de tensão nesses capacitores.

A Figura 29 apresenta as formas de onda das tensões nas baterias. Observa-se que, inicialmente, as baterias estão com tensões desequilibradas (14 V e 10 V) e que há o equilíbrio de tensão com o passar do tempo (LINDEN; REDDY, 2010).

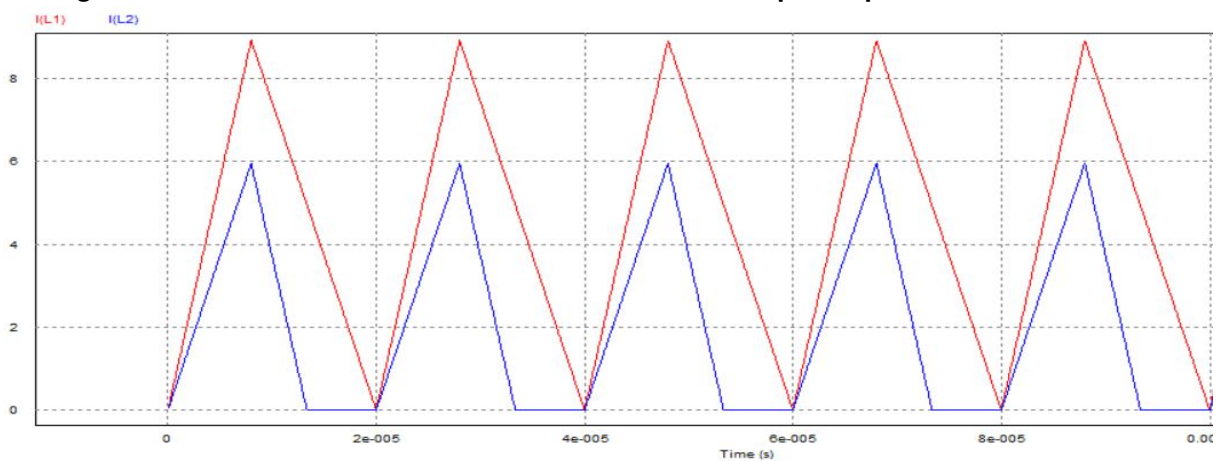
Na Figura 30 tem-se as formas de onda das correntes nos indutores para o período desbalanceado. O conversor opera em MCD, sendo o período de descontinui-

Figura 29 – Equalização de tensão entre duas baterias de lítio



Fonte: Autoria própria.

Figura 30 – Formas de onda das correntes nos indutores para o período desbalanceado.

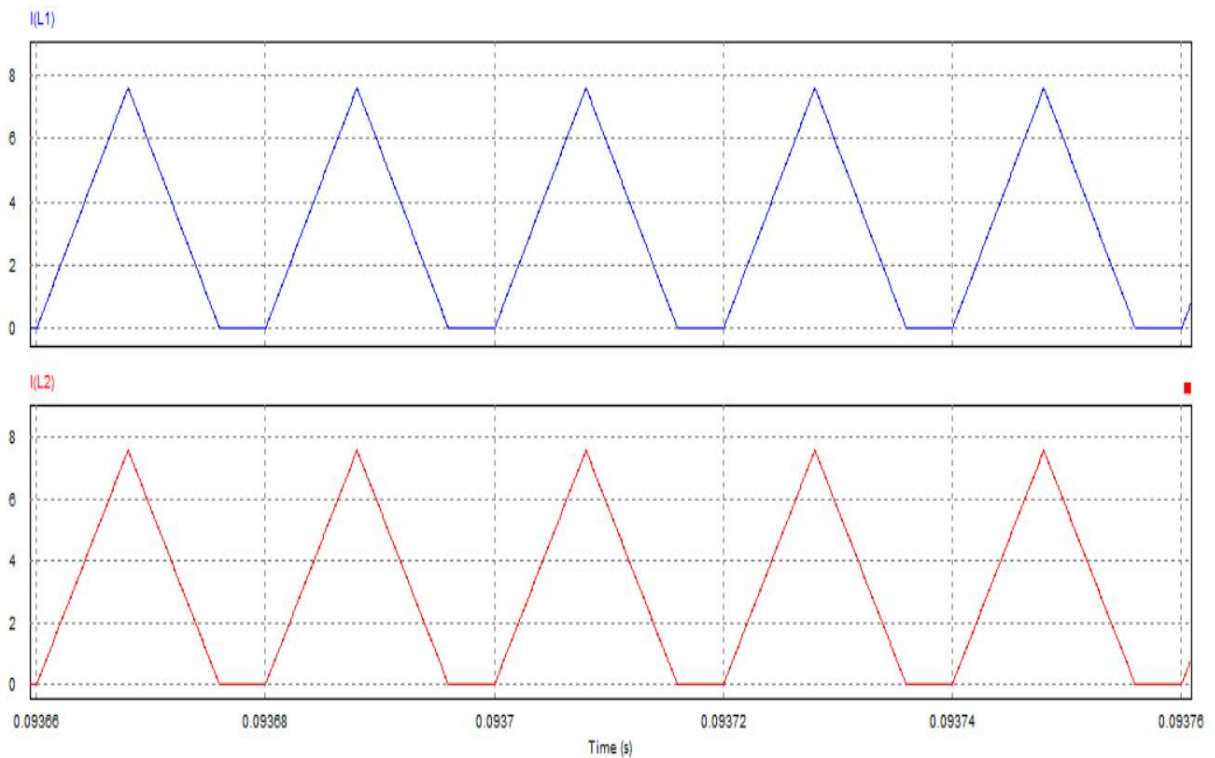


Fonte: Autoria própria.

dade menor para a bateria que tem menor tensão. Observa-se que os valores máximos de corrente estão de acordo com os valores teóricos apresentados na Tabela 2.

Na Figura 31, apresenta-se novamente a corrente nos indutores, porém, para o período balanceado. As correntes nos indutores são iguais e apresentam a descontinuidade de corrente característica da operação do conversor em MCD.

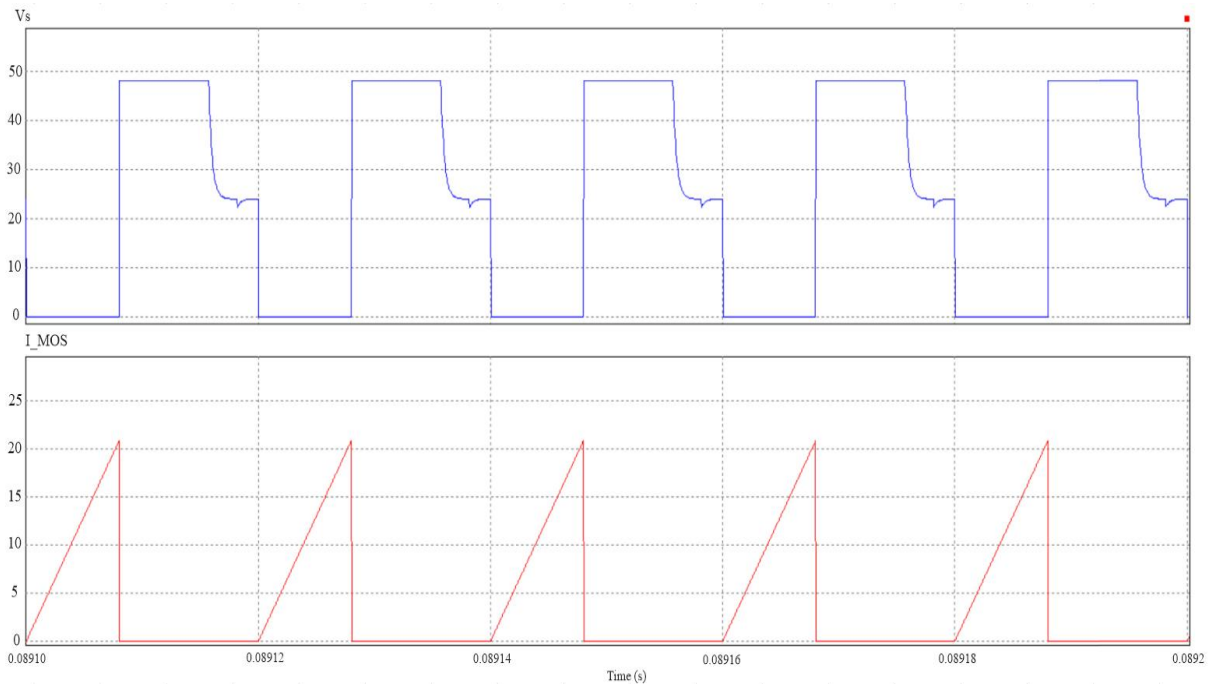
Figura 31 – Formas de onda das correntes nos indutores para o período balanceado.



Fonte: Autoria própria.

As formas de onda da tensão e da corrente no transistor são apresentadas na Figura 32. Os valores máximos de tensão e de corrente neste componente não se alteram durante o período desbalanceado.

Figura 32 – Formas de onda da corrente e da tensão no transistor.

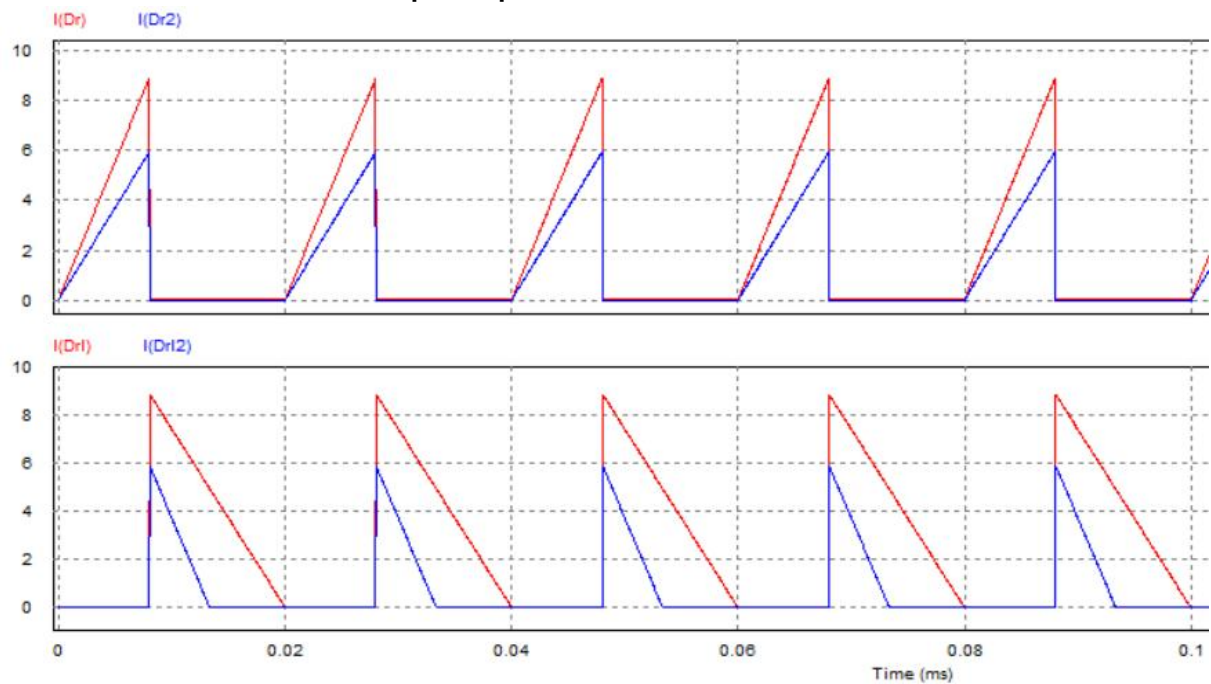


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 33 tem-se as formas de onda das correntes nos diodos retificadores e nos diodos de roda livre, para o período desbalanceado. Observa-se que os diodos que estão no secundário conectado a bateria de menor tensão são submetidos a valores maiores de corrente, como esperado. O conhecimento deste comportamento é fundamental para que os diodos sejam corretamente dimensionados.

Por fim, as Figuras 34 e 35 apresentam as formas de onda das correntes nos diodos retificadores e nos diodos de roda livre para o período balanceado.

Figura 33 – Formas de onda das correntes nos diodos retificadores e nos diodos de roda-livre para o período desbalanceado.



Fonte: Autoria própria.

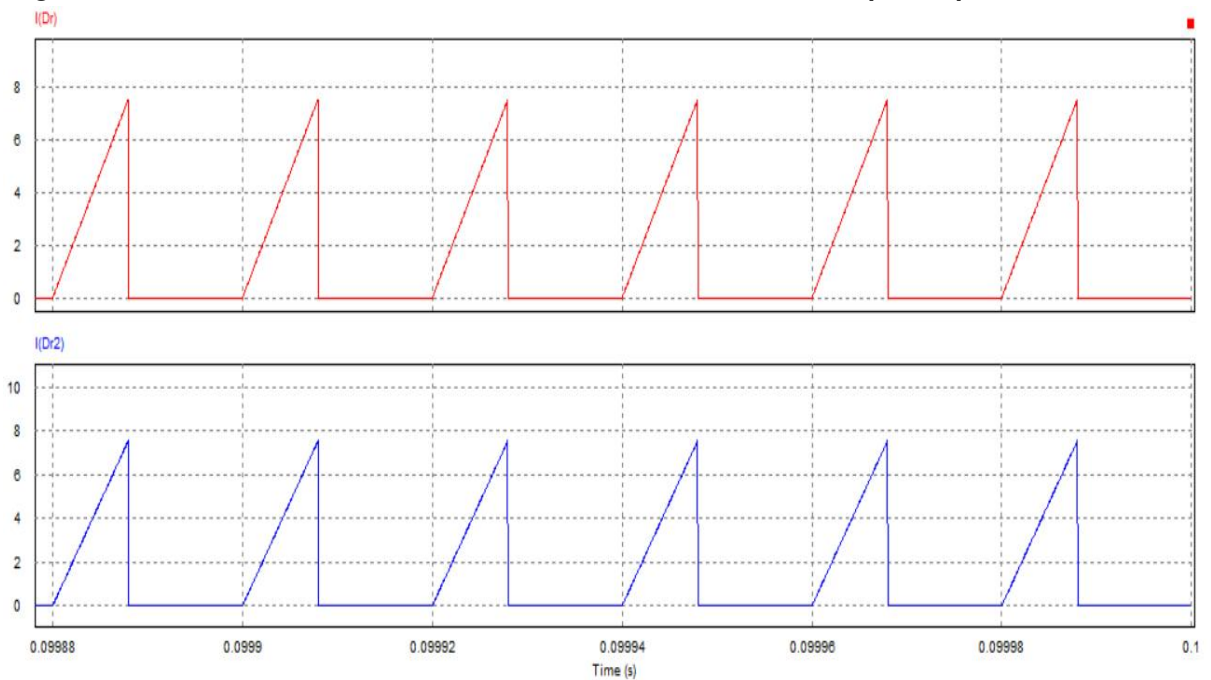
Apresenta-se na Tabela 3 uma comparação entre os valores teóricos e os valores obtidos pela simulação computacional, para as principais grandezas de projeto dos componentes do conversor. Observa-se que os erros encontrados são baixos, o que indica que as equações de projeto obtidas estão corretas.

Tabela 3 – Percentual de erro%

Parâmetro	Teórico	Projeto	Erro%
Máxima Corrente nos Indutores - I_{Lmx}	12,153 A	12,152 A	0,008
Máxima Corrente no Transistor - I_{Smx}	20,833 A	20,832 A	0,004
Corrente Média no Transistor - I_{Smd}	4,167 A	4,409 A	5,48
Corrente Eficaz no Transistor - I_{Seff}	7,607 A	7,833 A	2,88
Máxima Tensão no Transistor - V_s	48,000 V	48,000 V	0
Máxima Tensão nos Diodos Retificadores - V_{Drmx}	-36,000 V	-37,997 A	5,25
Corrente Média no Diodos Retificadores - I_{Drmed}	2,431 A	2,576 A	5,63
Corrente Média no Diodos de Roda-Livre - I_{Drmed}	2,431 A	2,576 A	5,63

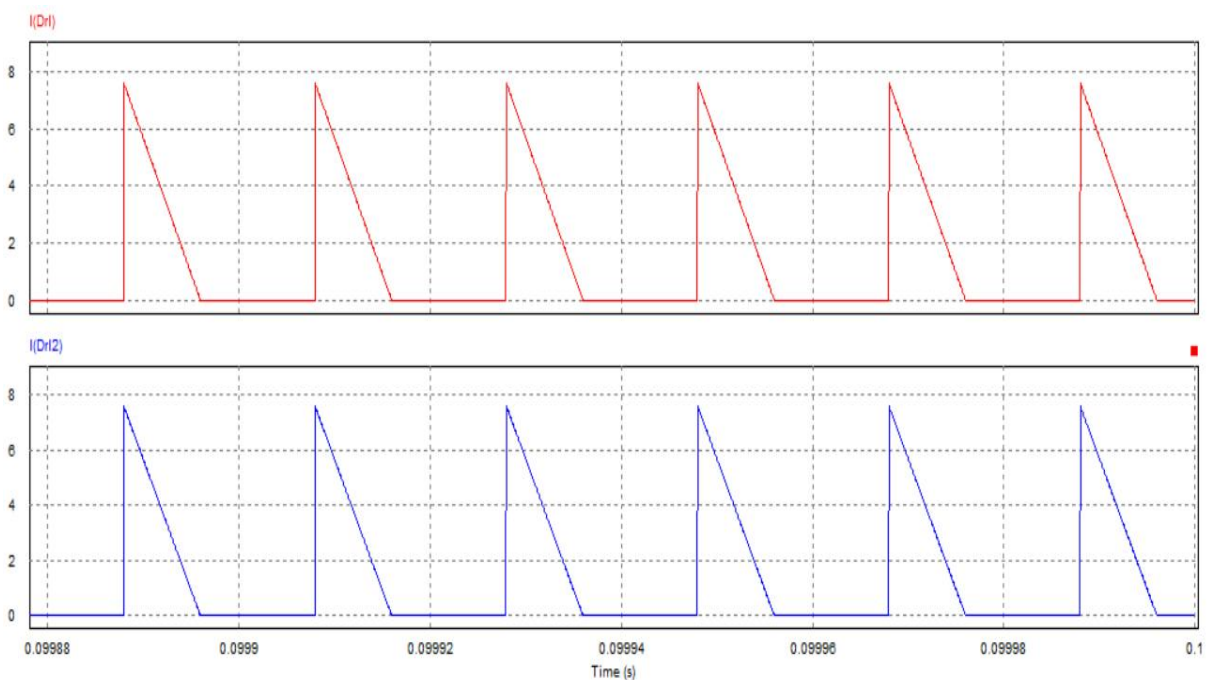
Fonte: Autoria própria.

Figura 34 – Formas de onda das correntes nos diodos retificadores para o período balanceado



Fonte: Autoria própria.

Figura 35 – Formas de onda das correntes nos diodos de roda-livre para o período balanceado



Fonte: Autoria própria.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve por finalidade o estudo das etapas de operação e o dimensionamento dos componentes de um conversor Forward aplicado como equalizador de tensão de baterias conectadas em série. O conversor foi projetado para operar no modo de condução descontínuo, para que a equalização de tensão ocorra em malha aberta, ou seja, para que não precise ser inserido um sistema de controle dedicado a esta necessidade.

Ao tomar como base as equações do conversor Forward em regime permanente e trabalhá-las a fim de obter equações para um modo de condução descontínuo, nota-se que ao confrontá-las com os resultados gerados por simulação tem-se um percentual de erro de aproximadamente 5 % e em alguns componentes, um erro praticamente inexistente em outros. Pelos resultados obtidos, nota-se que há uma grande confiabilidade nos resultados das equações elaboradas para tal modo de operação, podendo, futuramente serem implementadas na prática. Como demonstrado por simulações gráficas, esta topologia revelou-se plausível para implementação prática e com os resultados esperados. Uma vez obtidos e validados os equacionamentos para duas baterias com uma diferença de até 2 volts.

Esta topologia mostrou-se adequada para futuras comparações com conversores de energia operando no mesmo modo, para que se possa comparar suas vantagens e desvantagens quanto seu tempo de equalização, sua eficiência e seu custo de implementação.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista que este trabalho teve por finalidade a comprovação das equações para o conversor Forward operando como equalizador propõem-se que seja implementado na prática para validação prática dos resultados, e levantamento de custos para viabilidade e, na sequência, a comparação com demais conversores operando como equalizador de tensão.

REFERÊNCIAS

- ASSEF, A. A. **Eletrônica de potência**. Notas de aula, Disciplina Eletrônica de Potência–ET66B, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em: <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/amauriassef/disciplinas/eletronica-de-potencia/apresentacoes/Eletr_Pot1_1.pdf/at_download/file>. Acesso em: 10 de maio de 2022.
- BARBI, I; MARTINS, D. C. **Eletrônica de potência: conversores CC-CC básicos não isolados**. Edição do autor: Florianópolis, SC, 2000.
- BARBI, I. **Eletrônica de potência: projeto de fontes chaveadas**. Edição do autor: Florianópolis, SC, 2014.
- BARSUKOV, Y. **Battery cell balancing: what to balance and how**. Texas Instruments, p. 2–1, 2009.
- CHATZINIKOLAOU, E.; ROGERS, D. J. A comparison of grid-connected battery energy storage system designs. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 32, n. 9, p. 6913–6923, Sept. 2017.
- COSTA, G. D.; ILLA FONT, C. H.; BARBI, I. Comprehensive analysis of a flyback converter for voltage equalization of battery strings. In: 13th - INDUSCON, IEEE International Conference on Industry Applications. **Anais**, 2018, pp. 1200–1207.
- COSTA, G. D. **Equalização ativa da tensão em baterias conectadas em série, aplicando o conversor CC-CC Flyback no modo de condução descontínua**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Automação e Sistemas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, Florianópolis, 2018.
- HART, D. W. **Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos**. McGraw Hill Brasil, 2016.
- ILLA FONT, C. H. **Desenvolvimento de sistemas de gerenciamento de energia para baterias de lítio com equalização de tensão**. 2019. Relatório de Pós-Doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2019.
- ILLA FONT, C. H. **Conversores CC-CC não isolados**. Notas de aula, Disciplina Eletrônica de Potência2–EN02G, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, p 1-9, 2020.
- LAWDER, M. T. et al. Battery energy storage system (BESS) and battery management system (BMS) for grid-scale applications. **Proceeding of the IEEE**, v. 102, n. 6, p. 1014–1030, June 2014.
- LINDEN, D.; REDDY, T. B. **Linden’s handbook of batteries**. Mcgraw-Hill Professional, 2017.

PAGLIOSA, M. A. **Conexão série de conversores modulares: metodologia para análise do auto-equilíbrio das tensões e estudo do conversor Flyback a duas chaves**. 2018. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2018.

YANG, Y. et al. Balancing strategy of lithium-ion batteries based on change rate of SOC. In: 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). **Anais**, 2017, pp. 3223–3228.

YOSHIO, M.; BRODD, R. J.; KOZAWA, A. **Lithium-ion batteries**. Springer, 2009. v. 1.