

LEANDRO GASPARI RODRIGUES

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE
UM CONVERSOR DC-DC DE
TOPOLOGIA BUCK PARA APLICAÇÃO
AEROESPACIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em
Sistemas de Energia e Automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Azauri Albano de
Oliveira Júnior

São Carlos
2007

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho, em especial, aos meus familiares, Marcio Aparecido Dias Rodrigues, Diva de Fátima Gaspari Rodrigues e Amanda Gaspari Rodrigues, por todo apoio dado durante todos estes anos.

Aos meus queridos amigos da Escola de Engenharia de São Carlos, que estiveram comigo em mais uma jornada. Aos que não fizeram parte de minha vida acadêmica, mas sempre estiveram presentes na vida pessoal.

Por fim, a todos que acreditaram e acreditam no meu potencial.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Azauri Albano de Oliveira Jr., pela orientação. Ao Prof. Dr. José Roberto Boffino de Almeida Monteiro, pelas inúmeras contribuições sobre conversores DC-DC. Ao Prof. Dr. Manoel Luis de Aguiar, pelas contribuições na área de controle.

Ao pessoal do Laboratório de Controle e Eletrônica de Potência pelo apoio na realização deste projeto.

À Agência Espacial Brasileira pelo financiamento prestado a esse projeto.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pelo suporte técnico prestado a esse projeto.

Ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica pelo convite para participar deste projeto.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	CONVERSORES DC-DC	3
2.1.	Topologia Step-down (Buck)	5
2.1.1.	Operação em modo contínuo	6
2.1.2.	Operação em modo descontínuo	7
2.1.3.	Circuito Real	10
2.2.	Topologia Step-up (Boost)	10
2.3.	Topologia Buck-Boost	11
2.4.	Topologia Cúk	12
2.5.	Topologia SEPIC	14
2.6.	Topologia Push-Pull	14
2.7.	Topologia Meia Ponte	16
2.8.	Topologia Ponte Completa	16
2.9.	Topologia Flyback	17
3.	ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DO CONVERSOR DC-DC DE TOPOLOGIA BUCK.....	19
3.1.	Equações de projeto.....	19
3.2.	Desenvolvimento do Protótipo	22
3.2.1.	Modelagens e Simulações Computacionais	22
3.2.2.	Circuito de potência	26
3.2.3.	Circuito de controle	27
3.2.4.	Circuito de acionamento do transistor (<i>Driver</i>)	29
3.2.5.	Circuito de limitação de corrente	30
4.	RESULTADOS.....	33
5.	CONCLUSÕES	39
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41
	APÊNDICE A - O PROGRAMA E AS ATIVIDADES AEROESPACIAIS NACIONAIS	43
1.1.	Organização	43
1.2.	Cenário Atual do Programa Aeroespacial Brasileiro	44
1.3.	Atividade do Programa Nacional de Atividades Espaciais	45
	APÊNDICE B - O PROJETO ITASAT	47
	APÊNDICE C - SUBSISTEMA DE SUPRIMENTO DE ENERGIA.....	51
1.1.	Painel Solar	52
1.2.	Baterias	53
1.3.	Reguladores	53

1.4. Conversores	54
1.5. Proteção.....	54
1.6. Compatibilidade Eletromagnética	54
1.7. PCU – Power Control Unit	55
1.8. PDU - Power Distribution Unit.....	55

APÊNDICE D - CRONOLOGIA RESUMIDA DO PROGRAMA ESPACIAL BRASILEIRO..	57
---	-----------

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Conversor Step-down (Buck) (extraído de Pomilio, 2005).....	5
Figura 2 - Modos de operação do Conversor Step-down (extraído de Pomilio, 2005).....	6
Figura 3 - Tensão em um indutor ideal (extraído de Pomilio, 2005)	6
Figura 4 - Característica estática do conversor Buck nos modos contínuo e descontínuo (extraído de Pomilio, 2005).....	9
Figura 5 - Característica de saída do conversor Buck nos modos contínuo e descontínuo (extraído de Pomilio, 2005).....	9
Figura 6 - Conversor Forward (Buck isolado) (extraído de Pomilio, 2005)	10
Figura 7 - Conversor Step-up (Boost) (extraído de Pomilio, 2005).....	11
Figura 8 - Formas de onda do conversor Boost em modo contínuo e descontínuo (extraído de Pomilio, 2005).....	11
Figura 9 - Conversor Buck-Boost (extraído de Pomilio, 2005).....	12
Figura 10 - Formas de onda do conversor Buck-Boost em modo contínuo e descontínuo (extraído de Pomilio, 2005).....	12
Figura 11 - Conversor Cuk (extraído de Pomilio, 2005)	13
Figura 12 - Formas de onda do conversor Cúk em modo contínuo e descontínuo (extraído de Pomilio, 2005).....	13
Figura 13 - Conversor Cúk isolado (extraído de Pomilio, 2005)	14
Figura 14 - Conversor SEPIC (extraído de Pomilio, 2005)	14
Figura 15 - Conversor Push-pull (extraído de Pomilio, 2005).....	15
Figura 16 - Formas de onda do conversor Push-Pull (extraído de Pomilio, 2005).....	15
Figura 17 - Conversor em Meia Ponte (extraído de Pomilio, 2005).....	16
Figura 18 - Conversor em Ponte Completa (extraído de Pomilio, 2005).....	17

Figura 19 - Conversor Flyback (extraído de Pomilio, 2005).....	17
Figura 20 - Forma de onda da corrente no indutor.....	21
Figura 21 - Esquemático utilizado para a simulação do conversor Buck.....	24
Figura 22 - Esquemático utilizado para a montagem do conversor Buck	25
Figura 23 - Esquemático utilizado para simulação do conversor Buck. – Circuito de potência	26
Figura 24 - Esquemático utilizado para a montagem do conversor Buck – Circuito de potência.....	27
Figura 25 - Esquemático utilizado para a simulação do conversor Buck – Circuito de controle	28
Figura 26 - Esquemático utilizado para a montagem do conversor Buck – Circuito de controle.....	28
Figura 27 - Esquemático utilizado para a simulação do conversor Buck – Circuito de acionamento do transístor	29
Figura 28 - Esquemático utilizado para a montagem do conversor Buck – Circuito de acionamento do transístor	30
Figura 29 - Esquemático utilizado para a simulação do conversor Buck – Circuito de limitação de corrente.....	30
Figura 30 - Esquemático utilizado para a montagem do conversor Buck – Circuito de limitação de corrente.....	31
Figura 31 - Tensão de saída do conversor DC-DC de topologia Buck	33
Figura 32 – Corrente de saída do conversor DC-DC de topologia Buck	33
Figura 33 - Tensão no resistor RS - Limitador de corrente.....	34
Figura 34 - Corrente no resistor RS - Limitador de corrente.....	34
Figura 35 - Sinal de rampa no capacitor CT.....	35
Figura 36 - Sinal interno ao circuito integrado LM3524 - Amplificador de erro	35

Figura 37 – Protótipo do Conversor DC-DC montado em placa padrão - 1	36
Figura 38 - Protótipo do Conversor DC-DC montado em placa padrão - 2.....	36
Figura 39 – Tensão de saída do conversor no início de operação.	37
Figura 40 – Tensão de saída do conversor durante operação em regime permanente.....	37
Figura 41 - Sinal da tensão rampa do controlador PWM.....	38
Figura 42 - Modelo da placa de circuito impresso 3D.....	38
Figura 43 - Atividades do Programa Nacional de Atividades Espaciais.....	46
Figura 44 - Diagrama em blocos dos Subsistemas de um Satélite.....	47
Figura 45 - Vista do Satélite Universitário UNOSAT da Universidade do Oeste do Paraná .	48
Figura 46 - Vista do Satélite Universitário AAUSATII da Aalborg University.....	49
Figura 47 - Diagrama em blocos do Subsistema de Suprimento de Energia de um Satélite	51
Figura 48 - Funcionamento de uma célula solar	52

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Topologias de Conversores DC-DC	4
Tabela 2 - Parâmetros para desenvolvimento do conversor Buck.....	19

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é estudar e desenvolver um conversor DC-DC de topologia Buck para aplicação aeroespacial. Desta forma, foi desenvolvido o circuito de potência, controle, acionamento de transístor (*driver*) e limitador de corrente. Para implementação destes, bem como a obtenção dos resultados apresentados, foram utilizados *softwares* específicos de desenvolvimento de esquemáticos, simulação de circuitos e manipulação de dados e gráficos.

Foi realizado um estudo sobre conversores DC-DC que poderão ser utilizados no projeto ITASAT. São apresentadas algumas topologias de conversores mais utilizadas e um detalhamento maior da topologia Buck.

Por fim, foi construído um protótipo, que depois de testado, teve seus resultados comparados com os obtidos nas simulações.

ABSTRACT

The aim of this work is the study of DC-DC converters, which can be used in the ITASAT project. In this way, it was developed the power circuit, control circuit, transistor driver and current limiter circuit. In order to design the circuits and obtain its responses it was used specific software.

The most used converters topologies and, specially the Buck topology, are covered.

Finally, a prototype was built and after its tests, had their results compared with those observed in simulations.

1. INTRODUÇÃO

Alguns equipamentos eletrônicos são compostos por diversos circuitos. Para cada circuito que compõe um equipamento eletrônico, muitas vezes, é exigido o suprimento de energia em um nível de tensão específico. Para isso, são utilizados dispositivos de conversão de energia, que podem converter um único nível de tensão em outros.

Quando o dispositivo de conversão energética realiza a transformação de um nível de tensão elétrica contínuo em outro contínuo, denomina-se conversor DC-DC.

O objetivo deste trabalho é estudar e desenvolver um conversor DC-DC de topologia Buck para aplicação aeroespacial. Desta forma, foi desenvolvido o circuito de potência, controle, acionamento de transístor (*driver*) e limitador de corrente. Para implementação destes, bem como a obtenção dos resultados apresentados, foram utilizados *softwares* específicos de desenvolvimento de esquemáticos, simulação de circuitos e manipulação de dados e gráficos.

Um satélite artificial é composto por equipamentos eletrônicos (cargas), que devem ser supridos por níveis de tensão específicos (Apêndice C). Para isso, podem ser utilizados os conversores DC-DC. O capítulo 2 apresenta uma abordagem sobre conversores DC-DC e suas principais topologias. É dado um detalhamento maior a topologia Buck, pois ela foi escolhida para o desenvolvimento do conversor apresentado no capítulo 3.

Os resultados deste trabalho estão apresentados no capítulo 4 e as conclusões encontram-se no capítulo 5.

O Apêndice A apresenta o contexto em que se encontra o programa aeroespacial brasileiro e suas atividades.

No Apêndice B é apresentado o objetivo e a estruturação do projeto ITASAT, incluindo os Subsistemas.

O Apêndice C contextualiza o Subsistema de Suprimento de Energia do satélite universitário. São apresentadas as suas divisões em Unidade de Controle de Potência (PCU) e Unidade de Distribuição de Potência (PDU).

No apêndice D, é apresentada a cronologia do Programa Espacial Brasileiro.

2. CONVERSORES DC-DC

Os conversores DC-DC são dispositivos eletrônicos utilizados para converter uma fonte de tensão contínua de um nível para outro. Trata-se de uma classe de conversores de potência que utilizam comutação de sinal e armazenamento de energia através de elementos semicondutores e armazenadores (indutor ou capacitor), respectivamente. Devido à característica de comutação, também são conhecidos como reguladores chaveados ou fontes chaveadas (Chryssis, 1984).

O advento dos semicondutores de potência, especificamente transístores e diodos, foi fundamental para a prática da conversão por comutação (Sedra, 2000).

A conversão é realizada através do armazenamento temporário da energia de entrada e da liberação na saída com uma tensão diferente. Esse método de conversão é mais eficiente em relação à regulação linear de tensão, alcançando valores superiores a 80% de eficiência. Sendo assim, aumenta-se o tempo de operação de dispositivos supridos por bateria.

A utilização desta técnica também proporciona uma redução do tamanho dos dispositivos em relação aos lineares. Atualmente, estão disponíveis versões de conversores DC-DC na forma de circuito integrado, implicando em redução de componentes adicionais.

Por outro lado, a desvantagem da utilização de conversores DC-DC inclui maior custo, complexidade e emissão de ruídos.

A conversão pode ser realizada para diminuir a tensão de saída em relação à tensão de entrada ou o contrário. São chamados de *step-down* e *step-up*, respectivamente. Além disso, pode-se variar a polaridade entre entrada e saída (Luo, 2003).

Os conversores DC-DC são largamente utilizados em dispositivos eletrônicos portáteis, pois tais dispositivos eletrônicos frequentemente contêm diversos subcircuitos que exigem diferentes níveis de tensão em relação ao fornecido pela bateria.

Estas características possibilitam a utilização de uma única bateria para gerar múltiplas tensões controladas. Com isso economiza-se espaço em relação a utilização de múltiplas baterias para abastecer as diferentes partes dos dispositivos eletrônicos.

Existem diversas topologias de conversores DC-DC. Cada uma possui características específicas, cabendo ao projetista determinar aquela que melhor se aplica. A Tabela 1 apresenta algumas das topologias mais utilizadas.

Tabela 1 - Topologias de Conversores DC-DC

	<i>Forward</i>	<i>Flyback</i>
Sem Transformador	Step-down (Buck)	Não inversor: Step-up (Boost) SEPIC
		Inversor: Buck-Boost Cúk
Com Transformador	Forward (Buck Isolado) Push-Pull Meia Ponte Ponte Completa	Flyback Cúk Isolado

Conversores que utilizam transformadores são chamados de isolados, ao contrário dos não isolados, que não apresentam transformadores. A classificação em *Forward* e *Flyback* é feita, pois no Forward a energia percorre o elemento magnético e a carga simultaneamente. Já no Flyback, a energia é transferida para o elemento magnético e num segundo estágio é liberada para a carga. Além disso, os conversores podem ser classificados em Inversores e Não Inversores de polaridade.

As características e o funcionamento das topologias apresentadas na Tabela 1 serão abordas nos próximos tópicos deste capítulo. Como o foco do trabalho é o conversor de topologia Buck, será dado um detalhamento maior deste conversor.

Para as análises serão considerados que os conversores apresentam rendimento 100% (ausência de perdas), os elementos comutadores (transístores e diodos) são ideais, o que implica em tensão nula na condução e corrente zero quando cortados. Além disso, a transição de um estado a outro é instantânea.

Os circuitos apresentados são básicos e realizam a função de, a partir de uma fonte de tensão fixa na entrada, fornecer uma tensão de valor fixo na saída. Neste caso existe um filtro na saída, de modo a manter, sobre ele, uma tensão estabilizada e de ondulação desprezível.

As análises irão considerar uma dada frequência de comutação dos elementos semicondutores, cujo período será designado por τ , sendo o tempo de condução do transístor igual a t_T . O ciclo de trabalho (*duty-cycle*), também conhecido como razão cíclica ou largura de pulso, é dado pela relação $\delta = t_T / \tau$.

Será considerada a condição de regime permanente e a imposição de que, em cada período de comutação, a tensão média em um indutor é nula, ou ainda de que a corrente média em um capacitor é nula. (Pomilio, 2007)

2.1. Topologia Step-down (Buck)

A figura 1 apresenta a topologia de um conversor DC-DC Step-down. O transístor T, ao ser comutado, recorta a tensão de entrada E. Pela ação de filtragem suficientemente eficaz do capacitor de saída, considera-se V_o praticamente constante. Sendo assim, a ondulação da corrente que passa pela carga R_o é desprezível, mantendo apenas o nível DC.

No período em que o transístor conduz, o diodo D segue cortado, ocasionando uma transferência de energia da fonte para o indutor L, aumentando i_o , e para o capacitor, quando $i_o > V_o / R_o$.

Quando T passa para o estado de corte, o diodo conduz, mantendo a corrente na carga constante. A carga e o capacitor recebem a energia armazenada em L. O capacitor será carregado enquanto o valor instantâneo da corrente pelo indutor for maior do que a corrente da carga. Quando a corrente for menor, o capacitor se descarrega a fim de manter constante a corrente na carga, supondo constante a tensão V_o . A tensão E deve ser suportada, tanto pelo transístor quanto pelo diodo.

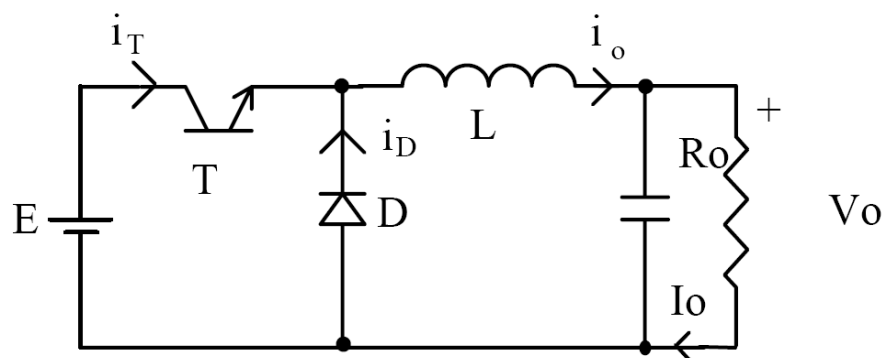


Figura 1 - Conversor Step-down (Buck) (extraído de Pomilio, 2005)

Se a corrente do indutor não se anula durante a condução do diodo, diz-se que o circuito opera no modo contínuo. Caso contrário tem-se o modo descontínuo. O modo contínuo é bastante utilizado, pois, neste caso, há uma relação bem determinada entre a largura de pulso e a tensão média de saída. A figura 2 mostra as formas de onda típicas de ambos os modos de operação.

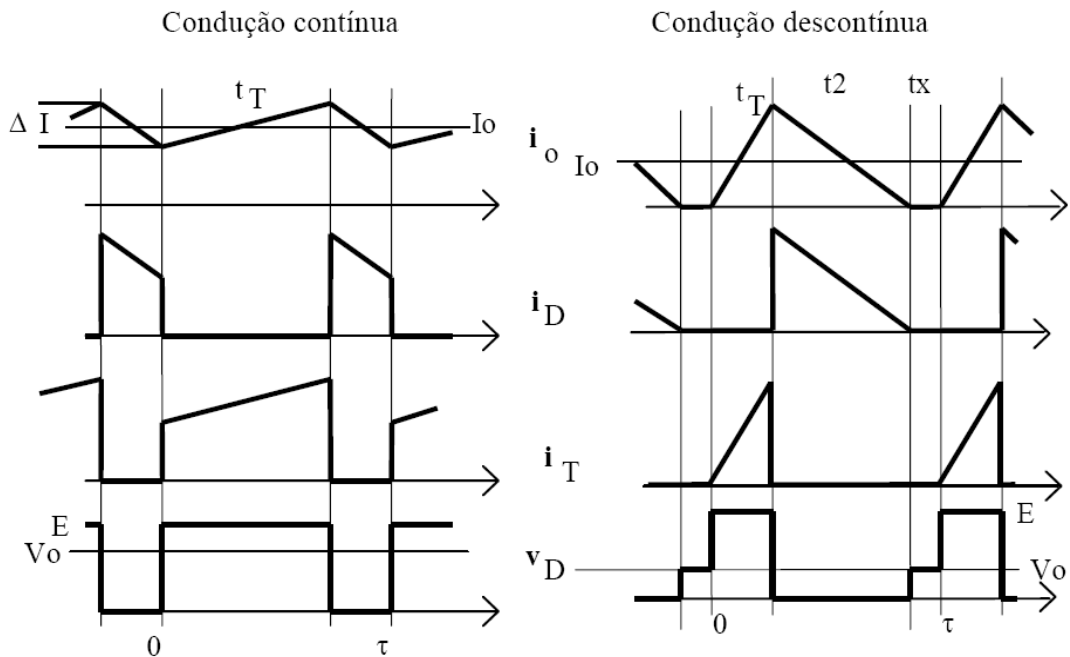


Figura 2 - Modos de operação do Conversor Step-down (extraído de Pomilio, 2005)

2.1.1. Operação em modo contínuo

Para obter a relação entre a entrada e a saída considera-se o comportamento do indutor ideal L . Em regime, a tensão média sobre ele será nula, como mostra a figura 3. No caso do conversor Buck, quando T está conduzindo, $v_L = E - V_o$, e quando D conduz, $v_L = -V_o$.

$$(E - V_o) \cdot t_T = V_o (t_T - \tau) \quad (1)$$

$$\frac{V_o}{E} = \frac{t_T}{\tau} \equiv \delta \quad (2)$$

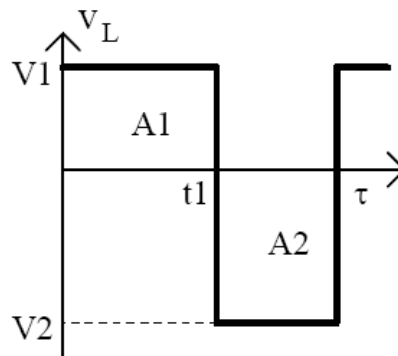


Figura 3 - Tensão em um indutor ideal (extraído de Pomilio, 2005)

2.1.2. Operação em modo descontínuo

A corrente será descontínua quando a corrente média no indutor for menor que metade de seu valor de pico ($I_o < \Delta I_o / 2$). Sendo assim, a condição limite para que isso ocorra é dada pela equação 3.

$$I_o = \frac{\Delta i_o}{2} = \frac{(E - V_o) \cdot t_T}{2 \cdot L} = \frac{(E - V_o) \cdot \delta \cdot \tau}{2 \cdot L} \quad (3)$$

Com a corrente sendo nula durante o intervalo t_x , tem-se as equações 4 e 5.

$$(E - V_o) \cdot t_T = V_o (t_T - \tau - t_x) \quad (4)$$

$$\frac{V_o}{E} = \frac{\delta}{1 - t_x / \tau} \quad (5)$$

Escrevendo em termos de variáveis conhecidas e sendo I_i a corrente média de entrada, tem-se as equações 6 e 7.

$$I_i = \frac{i_{o_{\max}} \cdot \delta}{2} \quad (6)$$

$$i_{o_{\max}} = \frac{(E - V_o) \cdot t_T}{L} \quad (7)$$

Considerando as potências de entrada e saída iguais, chega-se às equações 8, 9 e 10.

$$\frac{V_o}{E} = \frac{I_i}{I_o} = \frac{i_{o_{\max}} \cdot \delta}{2 \cdot I_o} = \frac{(E - V_o) \cdot \delta^2 \cdot \tau}{2 \cdot I_o \cdot L} \quad (8)$$

$$\frac{V_o}{E} = 1 - \frac{2 \cdot L \cdot I_i}{E \cdot \delta^2 \cdot \tau} \quad (9)$$

$$\frac{V_o}{E} = \frac{E \cdot \delta^2 \cdot \tau}{2 \cdot I_o \cdot L + E \cdot \delta^2 \cdot \tau} \quad (10)$$

A equação 11 define o parâmetro K, que se relaciona com a descontinuidade.

$$K = \frac{L \cdot I_o}{E \cdot \tau} \quad (11)$$

Por fim, a relação entre saída e entrada para o modo descontinuo é apresentada na equação 12 e o ciclo de trabalho crítico, no qual há a passagem do modo de condução contínuo para o descontinuo pela equação 13.

$$\frac{V_o}{E} = \frac{\delta^2}{\delta^2 + 2 \cdot K} \quad (12)$$

$$\delta_{crítico} = \frac{1 \pm \sqrt{1 - 8 \cdot K}}{2} \quad (13)$$

A característica estática do conversor, para diferentes valores do parâmetro K, está representada na figura 4. A variação da tensão de saída em relação à corrente de carga é apresentada na figura 5. Observa-se, que para baixos valores de I_o o conversor tende a operar no modo descontinuo, logo, para que isso não ocorra, deve-se garantir um consumo mínimo de corrente.

Além disso, acima do limite mínimo de I_o a condução será sempre contínua e a tensão de saída não se altera pela corrente, sendo essa uma característica de uma boa regulação, mesmo em malha aberta.

Vale ressaltar que o equacionamento apresentado só é válido para uma corrente de carga constante. Caso contrário ele deve ser feito levando em consideração a nova característica (Pomilio, 2007).

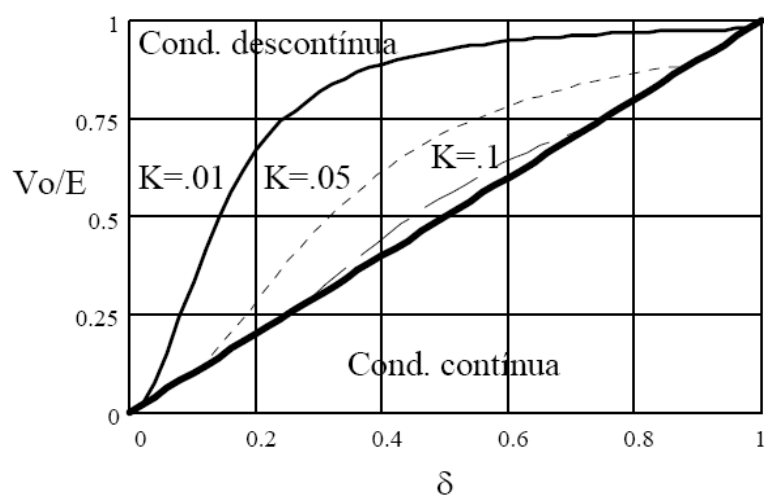


Figura 4 - Característica estática do conversor Buck nos modos contínuo e descontínuo (extraído de Pomilio, 2005)

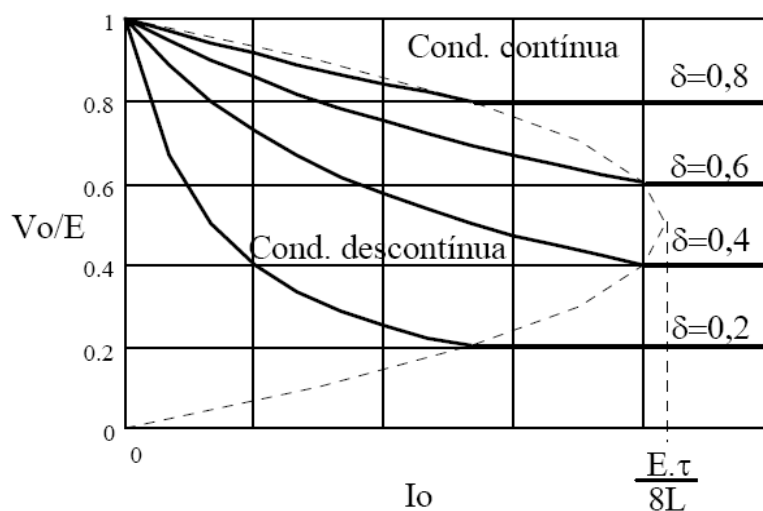


Figura 5 - Característica de saída do conversor Buck nos modos contínuo e descontínuo (extraído de Pomilio, 2005)

Caso seja incluído um transformador com o intuito de isolamento entre entrada e saída do conversor, este passará a receber o nome de Buck isolado ou Forward, como é comumente conhecido. A figura 6 apresenta a configuração típica do conversor Forward.

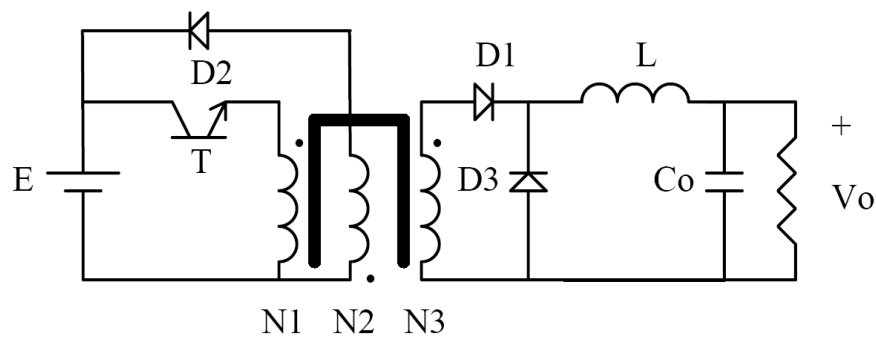


Figura 6 - Conversor Forward (Buck isolado) (extraído de Pomilio, 2005)

2.1.3. Circuito Real

Os estudos e análises realizadas anteriormente supunham o caso ideal. Em determinados projetos de conversores é exigido uma maior atenção quanto aos seguintes aspectos:

- A. O capacitor de saída não é capaz de eliminar toda a ondulação (*ripple*) da tensão de saída.
- B. As tensões sobre o transístor e o diodo não são nulas, e devem ser levadas em consideração em caso de projetos refinados.
- C. Devido à comutação no transístor e no diodo ocorrem perdas, que em determinados casos devem ser determinadas com intuito de minimizá-las.
- D. As perdas relacionadas ao circuito de controle podem ser desconsideradas, porém em relação ao circuito de potência não devem.

O não cumprimento destes requisitos, em determinados projetos, pode acarretar em perda de eficiência e mau funcionamento do dispositivo. Sendo assim, cabe ao projetista avaliar a necessidade de se levar em conta estas questões.

No contexto deste trabalho, tratando-se do estudo e desenvolvimento de um conversor Buck, não serão levadas em consideração todas estas características realísticas citadas anteriormente, podendo ser uma proposta para um trabalho futuro.

2.2. Topologia Step-up (Boost)

O conversor Step-up (Boost) é conhecido como elevador de tensão, pois sua tensão de saída é maior que a de entrada. Ele é composto por, no mínimo, um transístor, um diodo e um elemento de armazenamento de energia. Filtros compostos de indutores e capacitores

são adicionados para aumentar o desempenho. A figura 7 apresenta a topologia do conversor Boost.

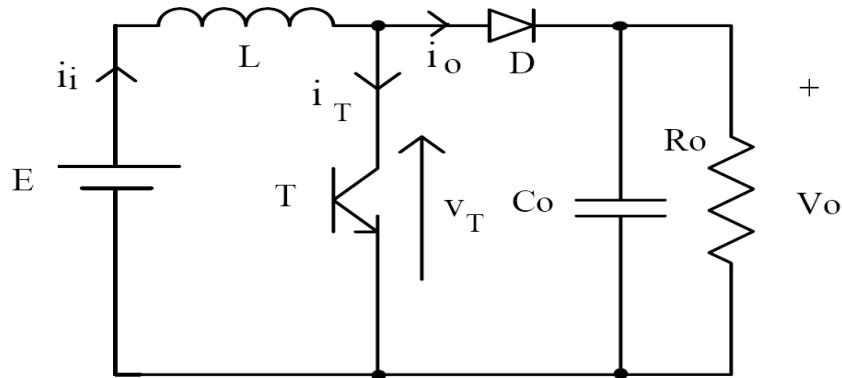


Figura 7 - Conversor Step-up (Boost) (extraído de Pomilio, 2005)

Trata-se de um conversor não isolado, pois não utiliza transformador. A saída possui a mesma polaridade que a entrada. A figura 8 apresenta as formas de onda do conversor Boost em condução contínua e descontínua.

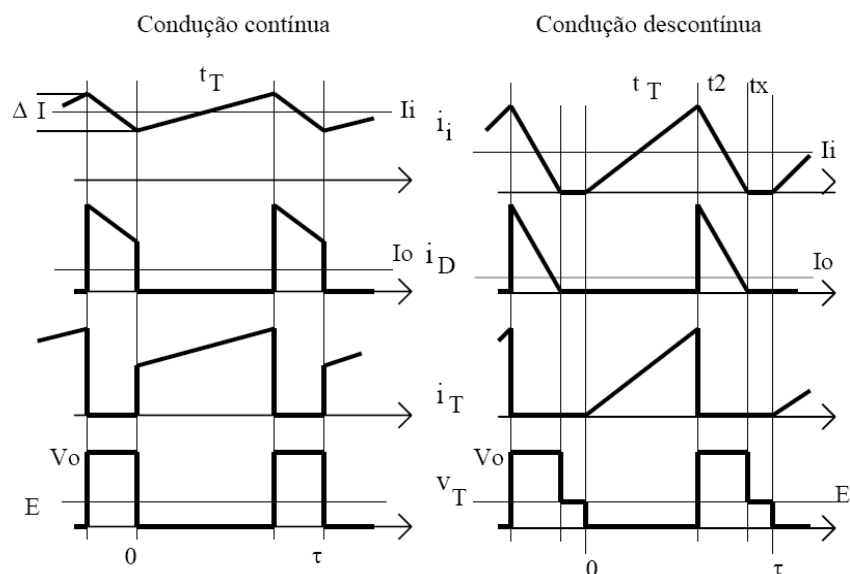


Figura 8 - Formas de onda do conversor Boost em modo contínuo e descontínuo (extraído de Pomilio, 2005)

2.3. Topologia Buck-Boost

O conversor Buck-Boost é conhecido como abaixador-elevador de tensão, pois a tensão de saída pode ser menor ou maior que a de entrada. A saída é ajustada baseada no ciclo de trabalho do transístor comutador. O circuito é similar ao Buck e ao Boost. A figura 9 apresenta a configuração desta topologia.

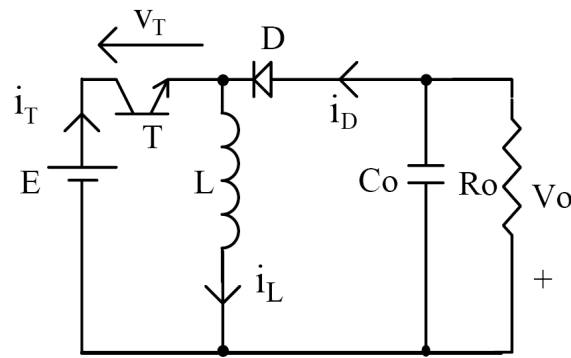


Figura 9 - Conversor Buck-Boost (extraído de Pomilio, 2005)

Neste conversor, a tensão de saída tem polaridade oposta à de tensão de entrada. Com isso, surge uma desvantagem, pois a tensão que o transístor deve suportar é soma da entrada com a saída. A figura 10 apresenta as formas de onda do conversor Buck-Boost em condução contínua e descontínua.

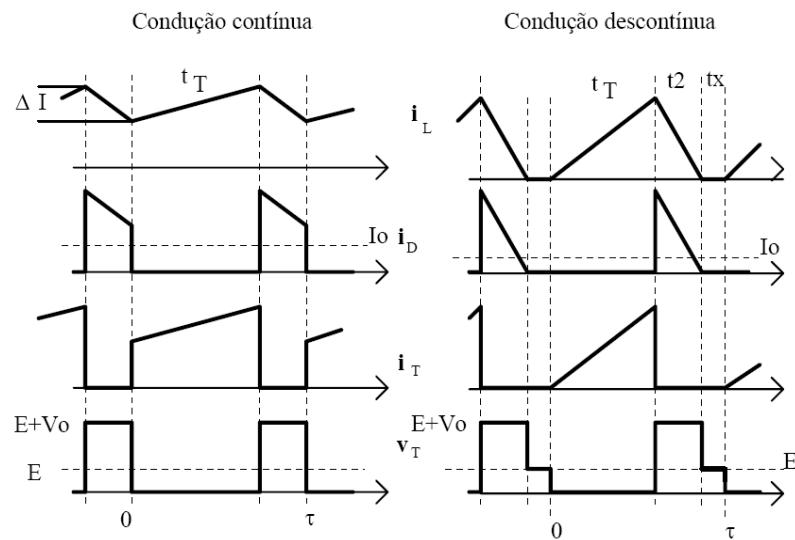


Figura 10 - Formas de onda do conversor Buck-Boost em modo contínuo e descontínuo (extraído de Pomilio, 2005)

2.4. Topologia Cúk

No conversor Cúk, a transferência de energia da fonte para a carga é realizada através de um capacitor. Sendo assim, é necessário o uso de semicondutores que suportem correntes relativamente elevadas.

Devido à presença dos indutores L1 e L2, tanto a corrente de entrada quanto a de saída podem ser contínuas. Além disso, ambos indutores estão sujeitos ao mesmo valor

instantâneo de tensão, de modo que é possível construí-los em um mesmo núcleo. O possível acoplamento magnético permite, com projeto adequado, eliminar a ondulação de corrente em um dos enrolamentos (Severns, 1985). A figura 11 apresenta a configuração da topologia Cúk.

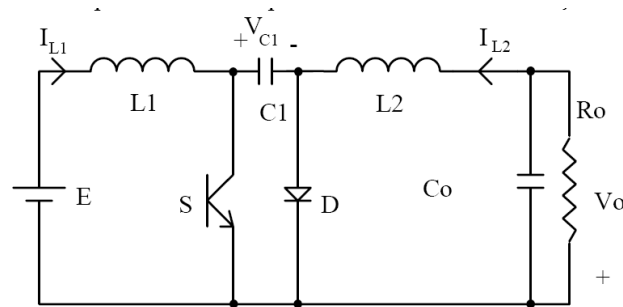


Figura 11 - Conversor Cúk (extraído de Pomilio, 2005)

Os interruptores devem suportar a soma das tensões de entrada e saída. A tensão de saída apresenta-se com polaridade invertida em relação à tensão de entrada. A figura 12 apresenta as formas de onda do conversor Cúk em condução contínua e descontínua.

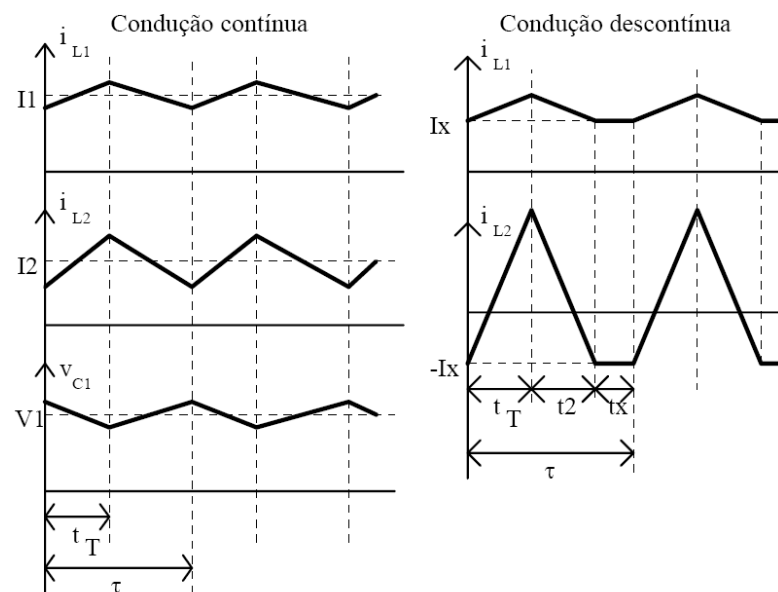


Figura 12 - Formas de onda do conversor Cúk em modo contínuo e descontínuo (extraído de Pomilio, 2005)

A isolamento entre entrada e saída pode ser feita através de um transformador no circuito. Utilizam-se 2 capacitores para a transferência da energia da entrada para a saída. A figura 13 ilustra o conversor Cúk isolado.

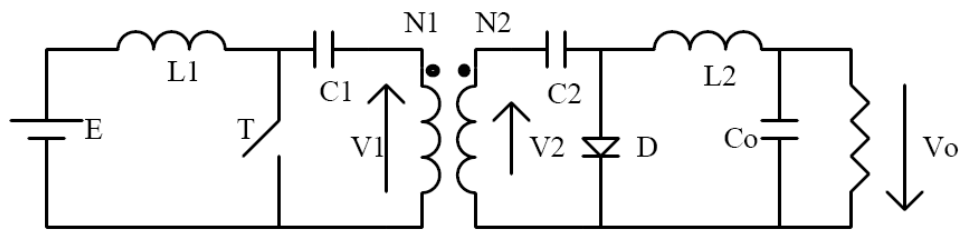


Figura 13 - Conversor Cúk isolado (extraído de Pomilio, 2005)

2.5. Topologia SEPIC

O conversor SEPIC (*Single Ended Primary Inductor Converter*) permite que a tensão de saída seja menor, maior ou igual a entrada. Assim como no Buck-Boost, a saída é ajustada baseada no ciclo de trabalho do transistor comutador. A figura 14 apresenta a configuração típica de um conversor SEPIC.

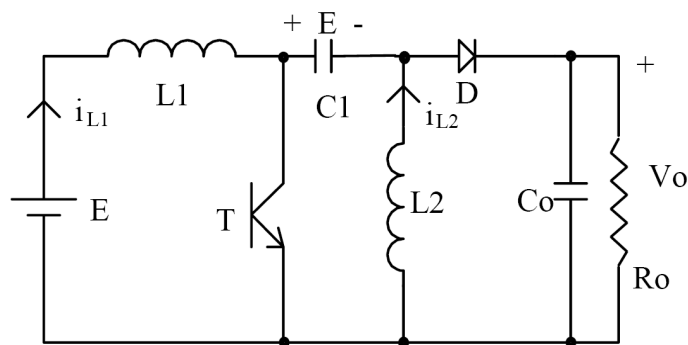


Figura 14 - Conversor SEPIC (extraído de Pomilio, 2005)

A grande vantagem do conversor SEPIC em relação ao Buck-Boost está em sua saída não inversora.

A tensão a ser suportada pelo transistor e pelo diodo é igual à $V_o + E$, e a transferência de energia da entrada para a saída é feita através de um capacitor.

2.6. Topologia Push-Pull

O conversor Push-Pull é um arranjo de 2 conversores Forward, trabalhando em contra-fase. A figura 15 apresenta a configuração deste circuito.

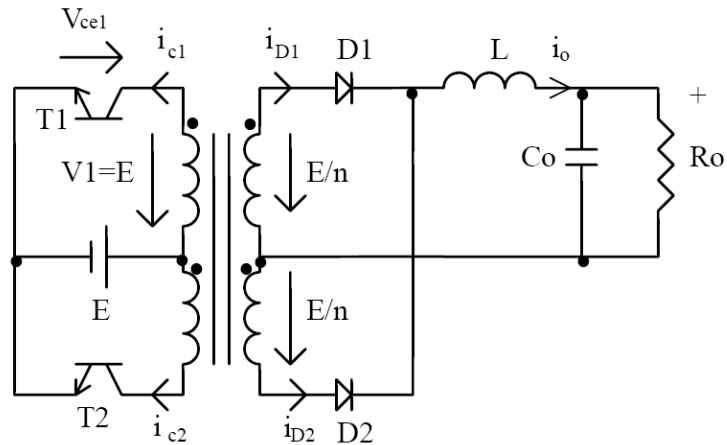


Figura 15 - Conversor Push-pull (extraído de Pomilio, 2005)

Nesta topologia, para que não ocorra saturação do transformador, a condução dos transístores deve ser idêntica, garantindo que a tensão média aplicada ao primário seja nula.

A relação de espiras do transformador é dada pela letra n . Os transístores devem suportar uma tensão com o dobro do valor da tensão de entrada. A figura 16 apresenta as formas de onda típica deste conversor.

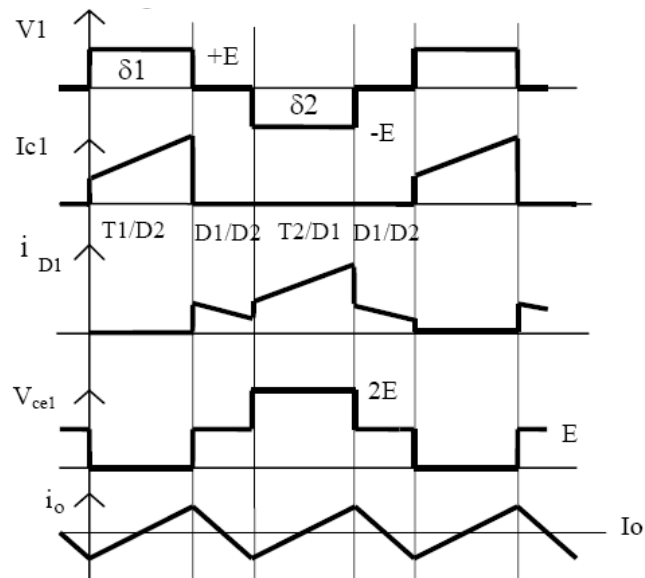


Figura 16 - Formas de onda do conversor Push-Pull (extraído de Pomilio, 2005)

2.7. Topologia Meia Ponte

O conversor Meia Ponte é uma alteração do Push-Pull, que permite contornar os inconvenientes em relação à queda de tensão sobre os transístores e à necessidade de condução idêntica. A figura 17 ilustra o conversor Meia Ponte.

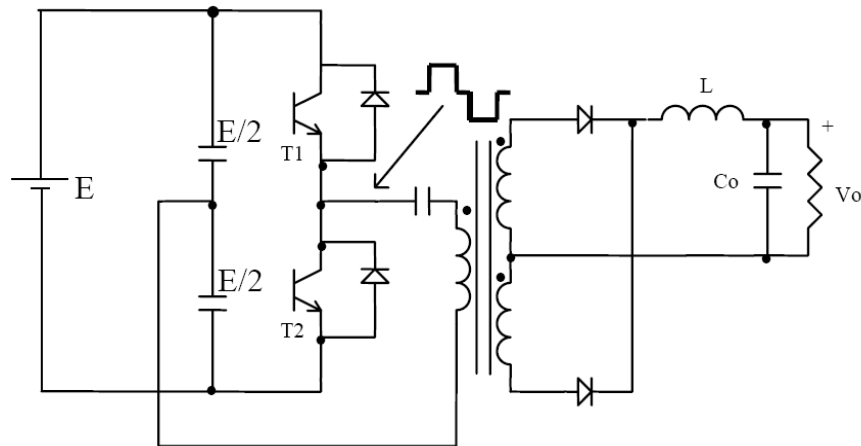


Figura 17 - Conversor em Meia Ponte (extraído de Pomilio, 2005)

Com a utilização de um divisor capacitivo, cria-se um ponto médio na alimentação, que faz com que os transístores tenham que suportar 50% da tensão do caso anterior, porém a corrente será duplicada.

Para solucionar o problema da necessidade de condução idêntica dos transístores, utiliza-se um capacitor de desacoplamento, que deve ser minuciosamente escolhido de modo a evitar ressonância com o indutor de saída (Severns, 1985).

2.8. Topologia Ponte Completa

Para eliminar o problema da elevada corrente que circula pelos transístores do conversor Meia Ponte (Severns, 1985), utiliza-se o conversor em Ponte Completa, porém, este necessita de 4 transístores, como ilustra a figura 18.

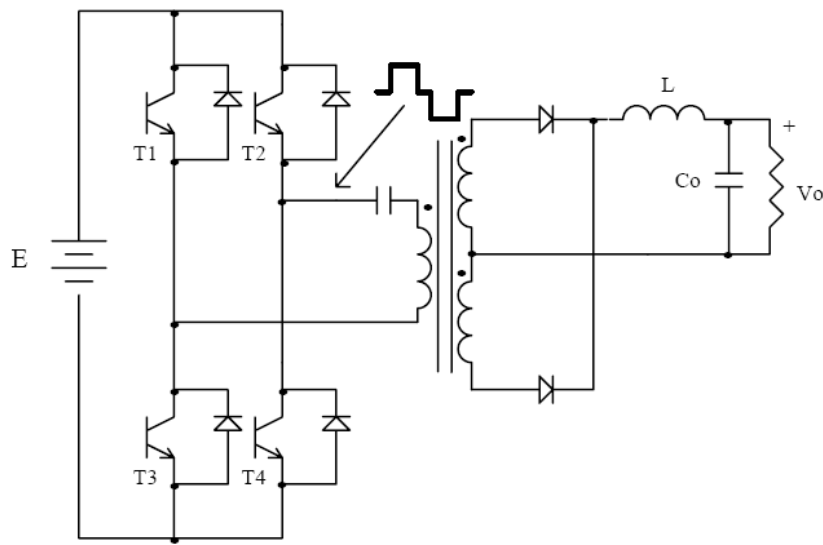


Figura 18 - Conversor em Ponte Completa (extraído de Pomilio, 2005)

2.9. Topologia Flyback

O conversor Flyback utiliza um transformador que se comporta como um indutor bifilar.

Quando o transístor está conduzindo, a energia é armazenada no campo magnético da indutância do primário. Neste mesmo período o diodo fica reversamente polarizado. Quando o transístor entra em corte, ocorre uma perturbação no fluxo, que faz gerar uma tensão. Esta fará com que surja uma corrente, que leve a manter a continuidade do fluxo. A energia acumulada no campo magnético é enviada à saída. A figura 19 mostra o circuito do conversor Flyback.

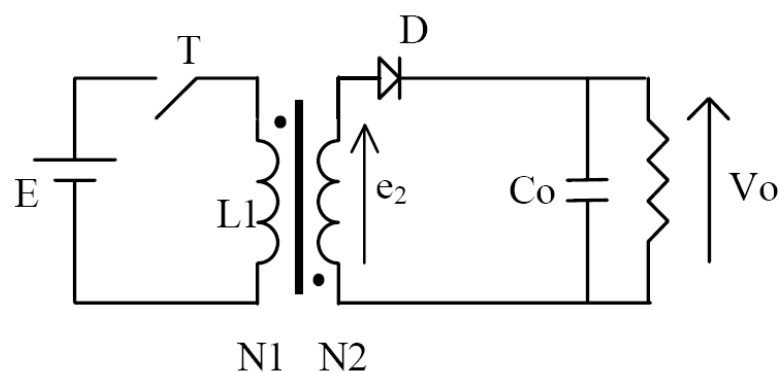


Figura 19 - Conversor Flyback (extraído de Pomilio, 2005)

3. ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DO CONVERSOR DC-DC DE TOPOLOGIA BUCK

Conhecidas as diversas topologias de conversores foi possível determinar qual a melhor opção de forma que estivesse em concordância com o escopo do Projeto ITASAT. Sendo assim, a escolha da topologia Buck foi baseada nos seguintes requisitos:

- A. Informações advindas do corpo técnico do INPE e literaturas provenientes do próprio Instituto propõem a topologia Buck como uma alternativa, que mesmo com sua simplicidade em relação a outras topologias, proporciona resultados de eficiência bastante satisfatórios (Magalhães, 2003);
- B. A consulta ao mercado de dispositivos comerciais para aplicação aeroespacial, especificamente os conversores DC-DC, em busca de uma topologia bastante utilizada.

Desta forma, o estudo e o desenvolvimento do conversor DC-DC foi focado na topologia Buck, possibilitando um conhecimento detalhado e o desenvolvimento de um protótipo do dispositivo.

O desenvolvimento do protótipo foi dividido em subprojetos como serão apresentados nos itens 3.2.2 a 3.2.6. Os requisitos e parâmetros do conversor foram definidos pelo corpo técnico do INPE e estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros para desenvolvimento do conversor Buck

Tensão de entrada (V_i)	22V a 36V
Tensão de saída (V_o)	5V
<i>Ripple</i> de tensão de saída (ΔV_o)	10mV _{pp}
Corrente de saída (I_o)	200mA
<i>Ripple</i> de corrente no Indutor (ΔI_o)	80mA
Carga (R_L)	25 Ω
Comutação do transistor	Modulação por largura de pulso (PWM)
Frequência de PWM (f_{PWM})	100kHz
Operação	Modo Contínuo

3.1. Equações de projeto

O escopo deste trabalho desconsidera a necessidade de seguir os requisitos de um projeto refinado, como foi tratado em 2.1.3. Para o desenvolvimento do protótipo, que será tratado

posteriormente, foram utilizadas algumas equações de projeto baseadas na teoria apresentada em 2.1 e concordantes com a Tabela 2.

Para o cálculo do indutor L utilizou-se a propriedade do indutor em regime permanente, em que a corrente média é nula (2.1.1). As equações 14 e 15 expressam $\Delta I_{L_{on}}$, que corresponde à corrente no indutor durante o período de condução do transístor, t_{on} , e $\Delta I_{L_{off}}$, que corresponde a corrente no indutor durante o período de corte do transístor, t_{off} . (Magalhães – 2003).

$$\Delta I_{L_{on}} = \frac{(V_i - V_o)}{L} \cdot t_{on} \quad (14)$$

$$\Delta I_{L_{off}} = \frac{V_o}{L} \cdot t_{off} \quad (15)$$

A partir delas, foram determinadas as expressões para t_{on} e t_{off} , como apresentado pelas equações 16 e 17, respectivamente.

$$t_{on} = \frac{\Delta I_{L_{on}} \cdot L}{V_i - V_o} \quad (16)$$

$$t_{off} = \frac{\Delta I_{L_{off}} \cdot L}{V_o} \quad (17)$$

Conhecidos t_{on} e t_{off} e sabendo que a soma destes tempos equivale ao período de comutação, T_{PWM} , foi possível determinar a equação 18. Nela foi considerado que $\Delta I_{L_{on}} = \Delta I_{L_{off}} = \Delta I_o$. (Magalhães, 2003)

$$t_{on} + t_{off} = T_{PWM} = \frac{\Delta I_o \cdot L}{V_i - V_o} + \frac{\Delta I_o \cdot L}{V_o} \quad (18)$$

Isolando L na equação 18 determina-se a expressão para o cálculo do indutor, como mostra a equação 19 (Mello, 1987).

$$L = \frac{V_o \cdot (V_i - V_o)}{V_i \cdot \Delta I_o \cdot f_{PWM}} \quad (19)$$

Quanto ao capacitor de saída, ele pode ser definido a partir da variação da tensão admitida, lembrando-se que enquanto a corrente pelo indutor for maior que I_o (corrente na carga, suposta constante) o capacitor se carrega e, quando for menor, o capacitor se descarrega, levando a uma variação de tensão ΔV_o .

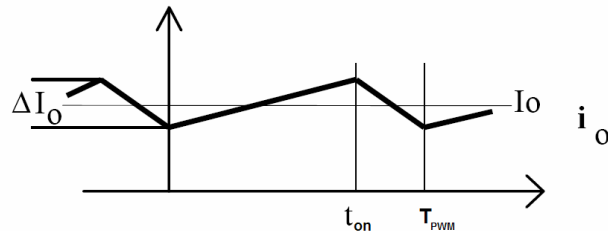


Figura 20 - Forma de onda da corrente no indutor.

Através da figura 20 foi possível determinar a equação 20, que expressa a variação de carga do capacitor, ΔQ .

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{t_{on}}{2} + \frac{T_{PWM} - t_{on}}{2} \right] \cdot \frac{\Delta I_o}{2} = \frac{T_{PWM} \Delta I_o}{8} \quad (20)$$

A expressão de ΔI_o , dada pela equação 21.

$$\Delta I_o = \frac{(V_i - V_o) \cdot t_{on}}{L} = \frac{V_i \cdot T_{PWM} \cdot \delta \cdot (1 - \delta)}{L} \quad (21)$$

Substituindo as equação 20 e 21 na expressão do capacitor, equação 22, e isolando o termo C, chega-se à equação de projeto do capacitor de saída do conversor, equação 23 (Mello, 1987).

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{V_i \cdot \delta \cdot (1 - \delta)}{8 \cdot L \cdot C \cdot f_{PWM}^2} \quad (22)$$

$$C = \frac{V_o \cdot (1 - \delta)}{8 \cdot L \cdot \Delta V_o \cdot f_{PWM}^2} \quad (23)$$

3.2. Desenvolvimento do Protótipo

O desenvolvimento do protótipo do conversor DC-DC de topologia Buck foi proposto com o intuito de concretizar os estudos. Ele foi dividido em subprojetos que serão detalhados nos próximos tópicos deste trabalho.

Como uma ferramenta de auxílio ao desenvolvimento, foi utilizado um recurso computacional para modelar e simular alguns circuitos específicos do conversor, assim como o próprio conversor por completo. Os resultados destas simulações serão apresentados conforme o desenvolvimento.

3.2.1. Modelagens e Simulações Computacionais

Através da modelagem e simulação computacional de componentes comerciais, obteve-se a concretização de alguns parâmetros necessários para a implementação em *hardware* do conversor DC-DC. Dentre os parâmetros, citam-se os valores do indutor e do capacitor que foram calculados através das equações de projeto e parâmetros de controle do conversor.

Tratando-se de uma ferramenta virtual, o problema de danos devido ao mau dimensionamento de componentes externos, ou até mesmo pelo uso errôneo, não acarreta em perda excessiva de materiais. Além disso, foi possível analisar diferentes configurações de operação do conversor.

Um fator relevante foi a utilização de *software* livre¹ para realizar as etapas de simulação do projeto, eliminando a necessidade de aquisição de licenças, acarretando baixo custo de desenvolvimento.

Para o desenvolvimento dos diagramas esquemáticos eletrônicos foi utilizado o *software* gEDA Gschem². Esta ferramenta possibilita tanto a produção de esquemáticos como a associação ou edição de símbolos ou componentes eletrônicos. A partir do esquemático elétrico, o *software* gEDA Gnetlist³ foi solicitado para converter o esquemático em entrada compatível com o *software* de simulação e análise GnuCap⁴, no ambiente Linux.

O GnuCap tem seu funcionamento idêntico a um *software* Spice-like para Windows, constando de arquivos de entrada na forma texto, onde os componentes do circuito são dispostos e localizados através dos seus nós de conexão, assim como todas as formas de análises são por observação entre nós. A saída do GnuCap é em forma de texto, mas utilizou-se o pacote de geração de gráficos Gnuplot⁵, que fornece a saída gráfica de tensão ou corrente para os nós ou componentes especificados.

O circuito utilizado para simular o conversor DC-DC de topologia Buck está apresentado na figura 21. Foi possível modelar o circuito integrado LM3524 através de circuitos simples utilizando componentes, tais como resistores, capacitores e chaves ideais.

Para a montagem do conversor foi gerado um novo esquemático com todos os componentes e blocos do circuito, representados na figura 22.

¹ Mais informações disponíveis <http://www.geda.seul.org/>

² Mais informações disponíveis em <http://www.geda.seul.org/tools/gschem/index.html>

³ Mais informações disponíveis em <http://www.geda.seul.org/tools/gnetlist/index.html>

⁴ Mais informações disponíveis em <http://www.gnu.org/software/gnuCap/>

⁵ Mais informações disponíveis em <http://www.gnuplot.info>

Figura 21 - Esquemático utilizado para a simulação do conversor Buck

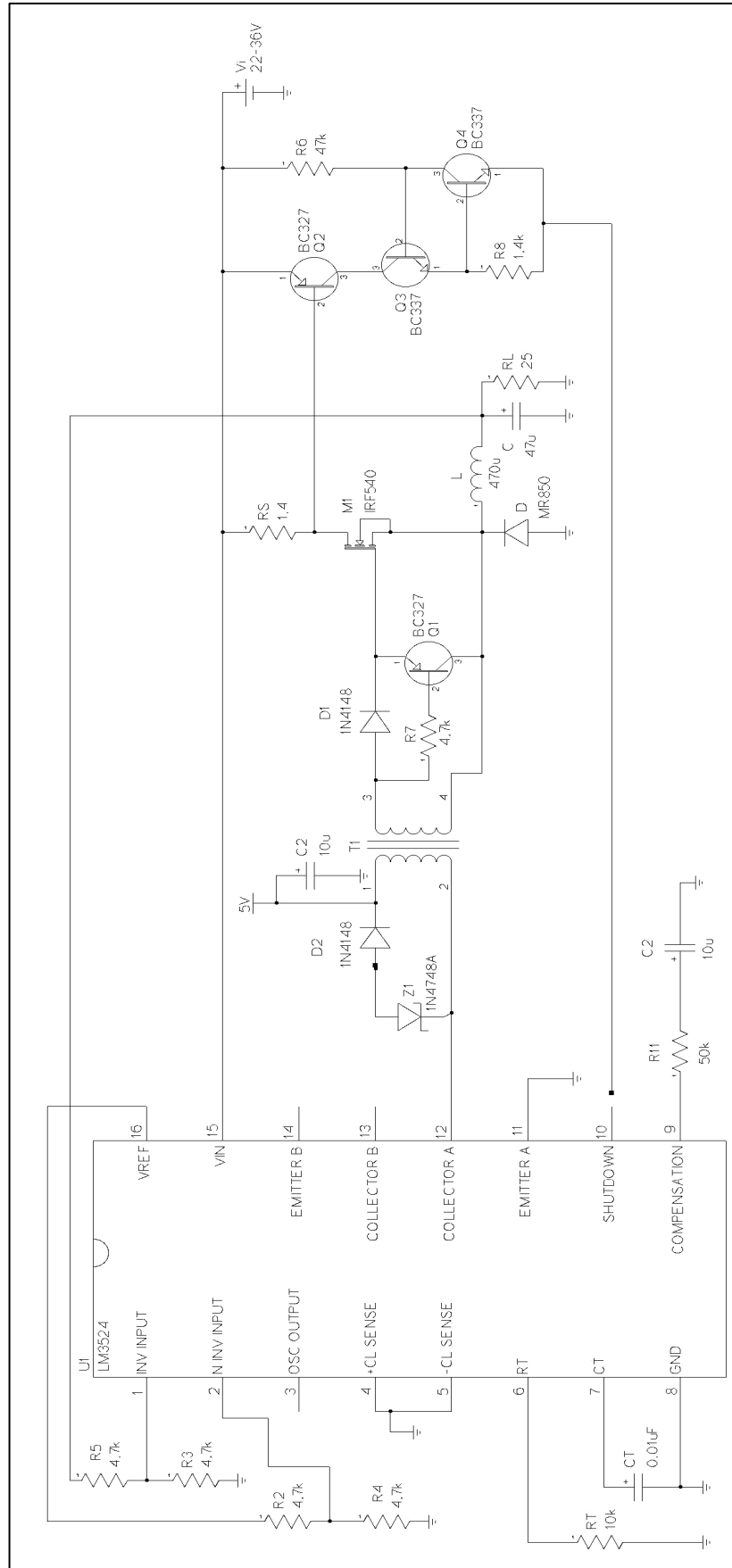


Figura 22 - Esquemático utilizado para a montagem do conversor Buck

3.2.2. Circuito de potência

O circuito de potência é composto pelo transístor comutador, diodo, indutor e capacitor de saída. Estes componentes foram modelados computacionalmente para serem utilizados nas simulações. A figura 23 apresenta o circuito de potência (detalhe em vermelho) utilizado para simulação. A chave S5 foi utilizada para simular o transístor e D é um diodo ideal.

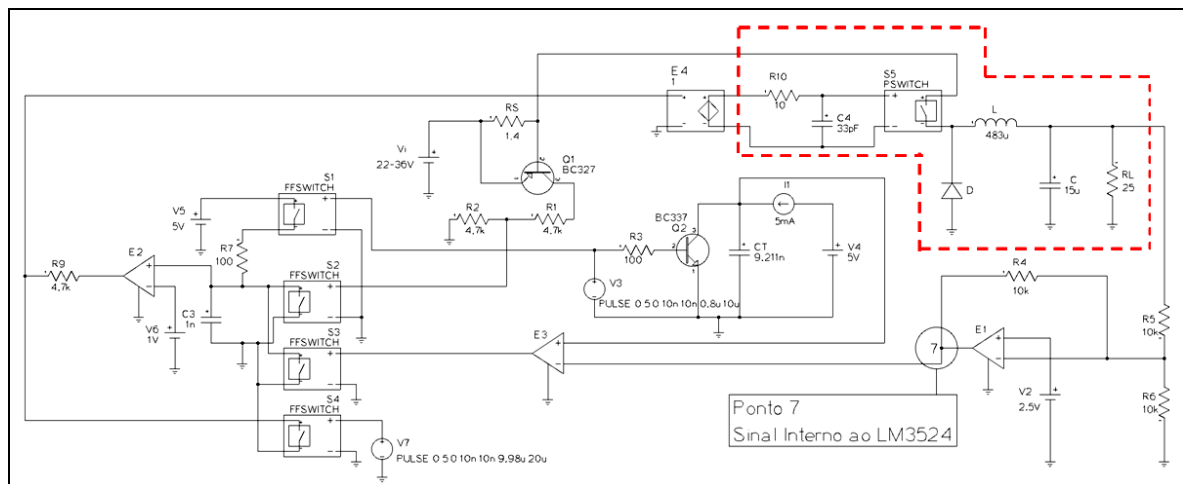


Figura 23 - Esquemático utilizado para simulação do conversor Buck. – Circuito de potência

Tanto o indutor quanto o capacitor foram calculados utilizando as equações 19 e 23, respectivamente, e os valores são: $L=483\mu\text{H}$ e $C=15\mu\text{F}$. Para o circuito montado utilizaram-se valores próximos aos calculados: $L=470\mu\text{H}$ e $C=47\mu\text{F}$. O transístor utilizado na montagem foi o IRF540⁶. Trata-se de um MOSFET com as seguintes características:

- A. $V_{\text{DSS}} = 100\text{V}$;
- B. $R_{\text{DS(on)}} = 44\text{m}\Omega$;
- C. $I_{\text{D}} = 33\text{A}$.

Optou-se por ele, pois estava disponível no laboratório onde o protótipo foi desenvolvido e, além disso, atende suficientemente os parâmetros de tensão e corrente do conversor. Assim como no caso do transístor, o diodo MUR805⁷ foi escolhido por atender as condições do conversor e estar disponível onde o protótipo foi desenvolvido.

⁶ Datasheet disponível em <http://www.irf.com>

⁷ Datasheet disponível em <http://www.onsemi.com>

C. Possui tensão de referência interna.

A modelagem computacional deste circuito integrado foi de fundamental importância para o desenvolvimento do protótipo, pois possibilitou a simulação completa do conversor. O circuito integrado modelado e utilizado na simulação está representado pela figura 25.

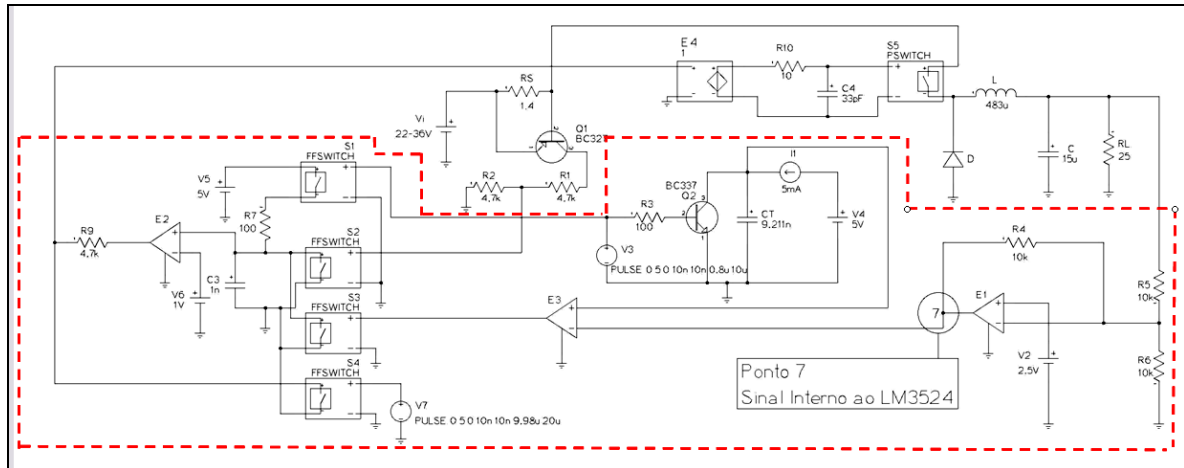


Figura 25 - Esquemático utilizado para a simulação do conversor Buck – Circuito de controle

Além disso, o fato de poder simular este componente permitiu que sinais internos do componente pudessem ser observados durante a simulação do conversor, o que não é possível ser feito para o protótipo. A figura 26 apresenta o circuito de controle no esquemático utilizado para a montagem do conversor.

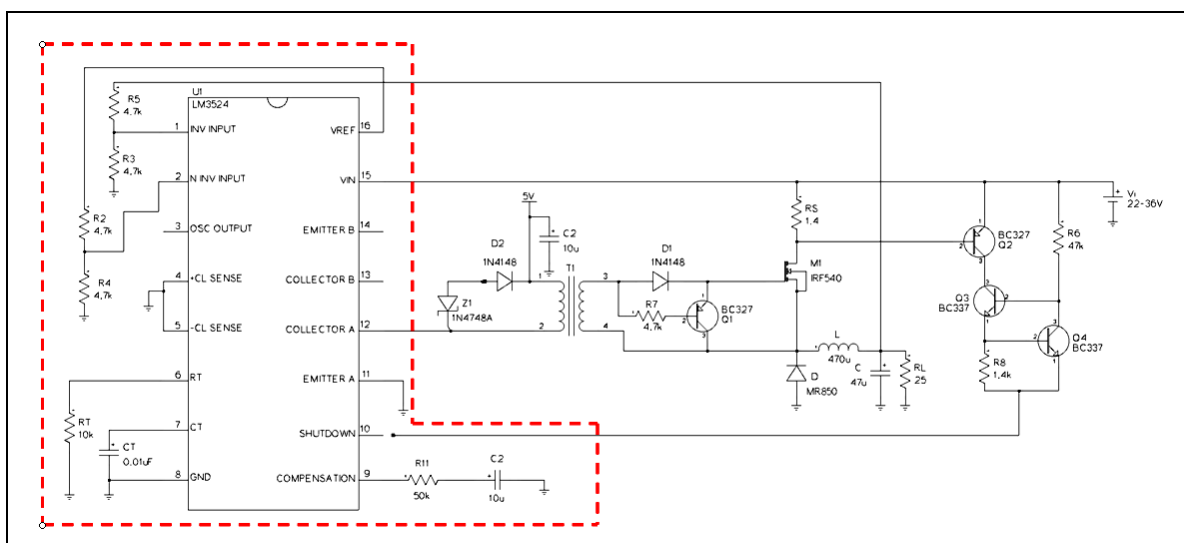


Figura 26 - Esquemático utilizado para a montagem do conversor Buck – Circuito de controle

3.2.4. Circuito de acionamento do transístor (*Driver*)

Como apresentado em 3.2.3, fez-se necessário o desenvolvimento de um circuito de acionamento do transístor.

Este circuito é composto por diodos, transístores, resistores e um transformador e tem como principal função acionar o transístor comutador. Para isso ele recebe o sinal PWM do controlador LM3524 e através de seu funcionamento transfere o comando, de abrir ou fechar, para a chave semicondutora.

Para simular o transístor foi utilizada uma fonte de tensão controlada por tensão (E4). A figura 27 apresenta o circuito de acionamento do transístor no esquemático utilizado para a simulação do conversor.

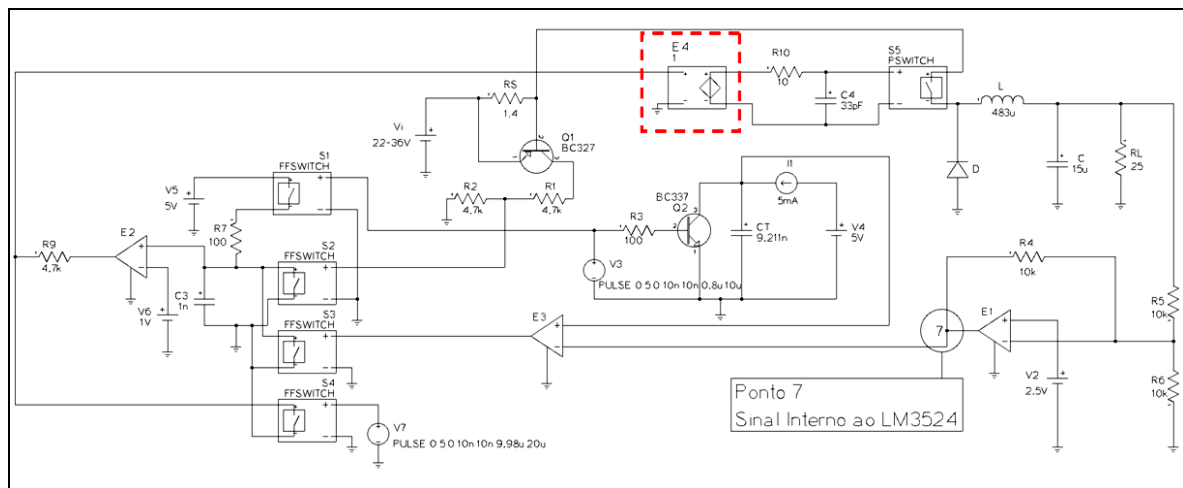


Figura 27 - Esquemático utilizado para a simulação do conversor Buck – Circuito de acionamento do transístor

No protótipo os transístores, diodos e resistores utilizados são de uso geral. Sendo assim, necessitam apenas atender aos requisitos da frequência do PWM, já o transformador necessitou ser confeccionado.

A princípio seria utilizado um núcleo toroidal para a confecção, porém informações fornecidas pelo INPE estabeleciam que em aplicações aeroespaciais utilizam-se núcleos do tipo P por possuírem uma maior blindagem eletromagnética em relação a outros. Sendo assim, utilizou-se o núcleo de ferrite NP 30/19 IP6⁹. A figura 28 apresenta o circuito de acionamento do transístor no esquemático utilizado para a montagem do conversor.

⁹ Datasheet disponível em <http://www.thornton.com.br>

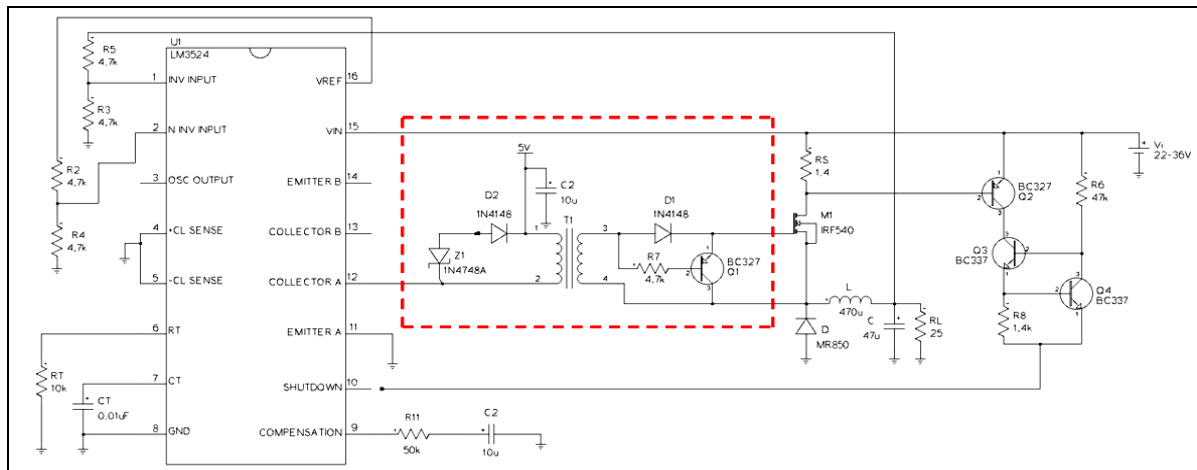


Figura 28 - Esquemático utilizado para a montagem do conversor Buck – Circuito de acionamento do transistor

3.2.5. Circuito de limitação de corrente

Os conversores DC-DC do tipo Buck podem apresentar em seu circuito de potência picos de correntes. Este efeito costuma ocorrer no início de operação do circuito, podendo ser observado devido algum problema de funcionamento.

Para evitar danos ao dispositivo devido a este fenômeno, utilizou-se o recurso do circuito integrado LM3524, que permite realizar este controle com a ajuda de um circuito adicional de limitação de corrente. Este circuito adicional é composto por um sensor resistivo, alguns transistores de uso comum e resistores. A figura 29 apresenta o circuito de limitação de corrente no esquemático utilizado para a simulação do conversor.

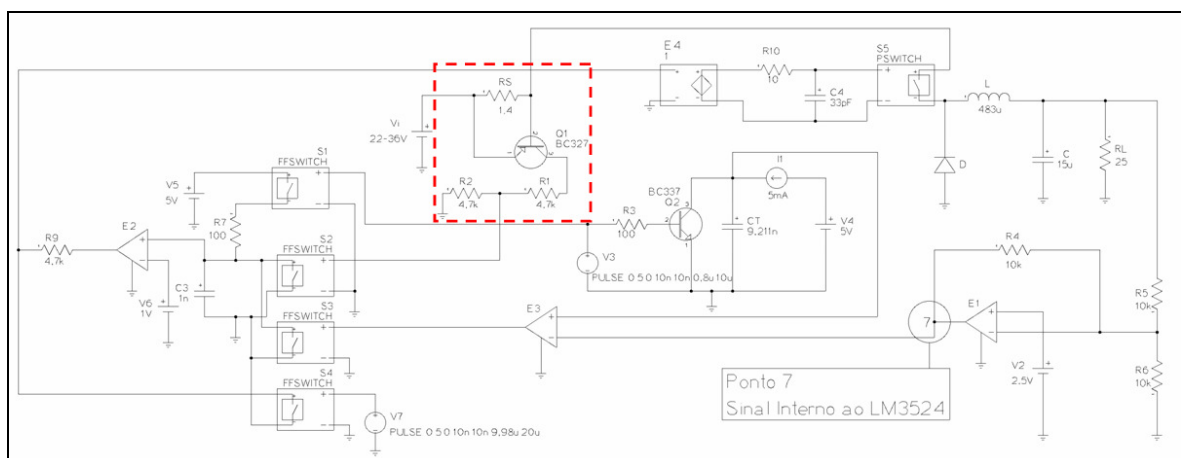


Figura 29 - Esquemático utilizado para a simulação do conversor Buck – Circuito de limitação de corrente

Quando a corrente de entrada ultrapassa um valor pré-determinado, o sensor resistivo polariza um conjunto de transístores que enviam um sinal para um pino do circuito integrado. Este por sua vez corta o sinal de PWM até que a corrente de entrada estabilize abaixo do nível pré-determinado.

A figura 30 apresenta o circuito de limitação de corrente no esquemático utilizado para a montagem do conversor.

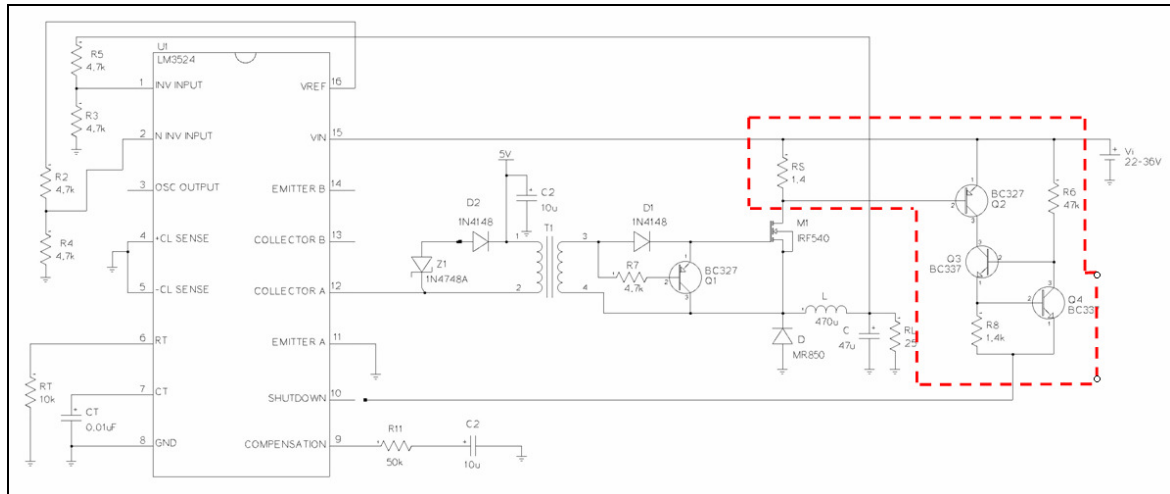


Figura 30 - Esquemático utilizado para a montagem do conversor Buck – Circuito de limitação de corrente

4. RESULTADOS

Utilizando o esquemático de simulação e os softwares citados no capítulo 3 foi possível gerar resultados. A tensão e corrente de saída do conversor estão representadas nas figuras 31 e 32, respectivamente. Todos os gráficos referente as simulações foram gerados a partir do esquemático de simulação do conversor (figura 21).

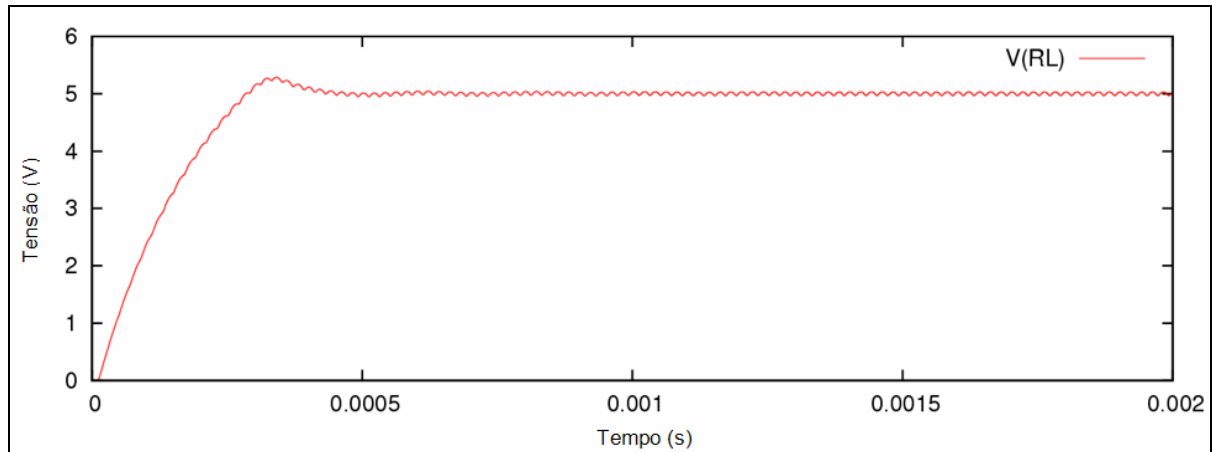


Figura 31 - Tensão de saída do conversor DC-DC de topologia Buck

Da figura 31 observa-se que o nível de tensão na saída do conversor se estabiliza em 5V com uma pequena ondulação (prevista nos parâmetros do conversor). Para a corrente de saída do conversor também ocorre uma estabilização em 200mA com uma pequena ondulação, como mostra a figura 32.

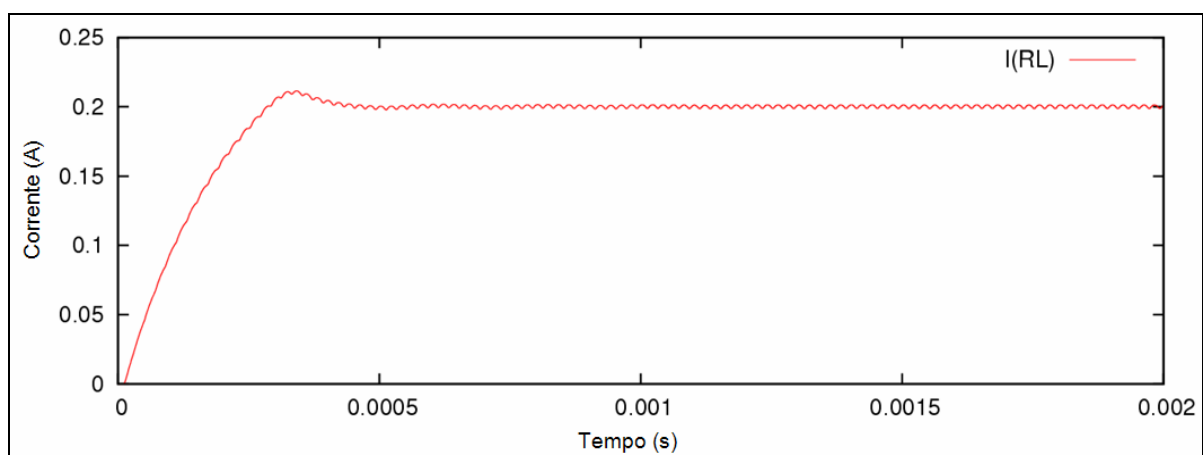


Figura 32 – Corrente de saída do conversor DC-DC de topologia Buck

A tensão e a corrente medida sobre o resistor R_S apresentam a limitação durante o início de operação do conversor, como mostra a figura 33 e 34, respectivamente. Quando a corrente

a corrente de entrada atinge o valor de 500mA a tensão sobre o resistor RS é de 0,7V. Desta forma, o transistor Q1 envia um sinal ao circuito integrado LM3524, que desligará o PWM durante este período atual de condução. O PWM voltará a funcionar no próximo período de condução.

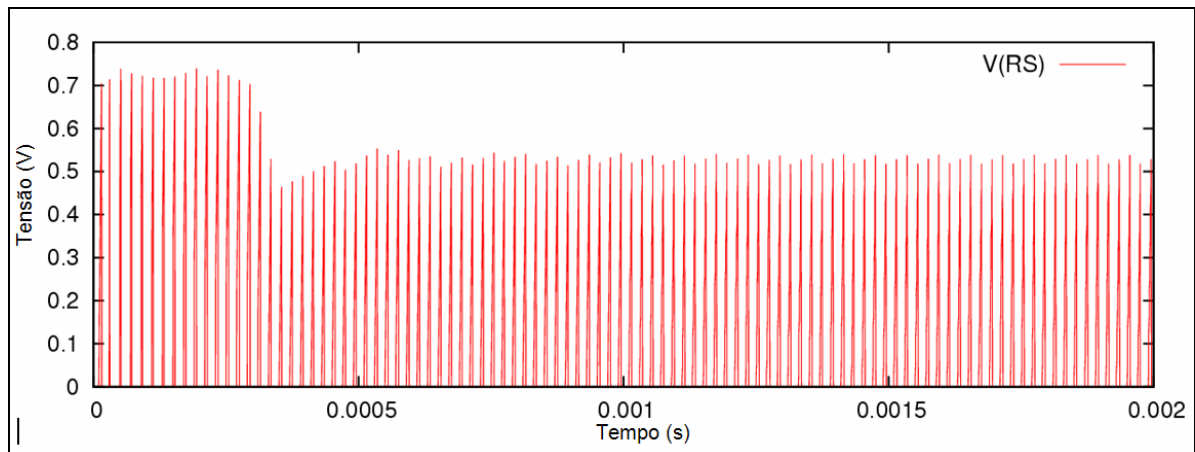


Figura 33 - Tensão no resistor RS - Limitador de corrente

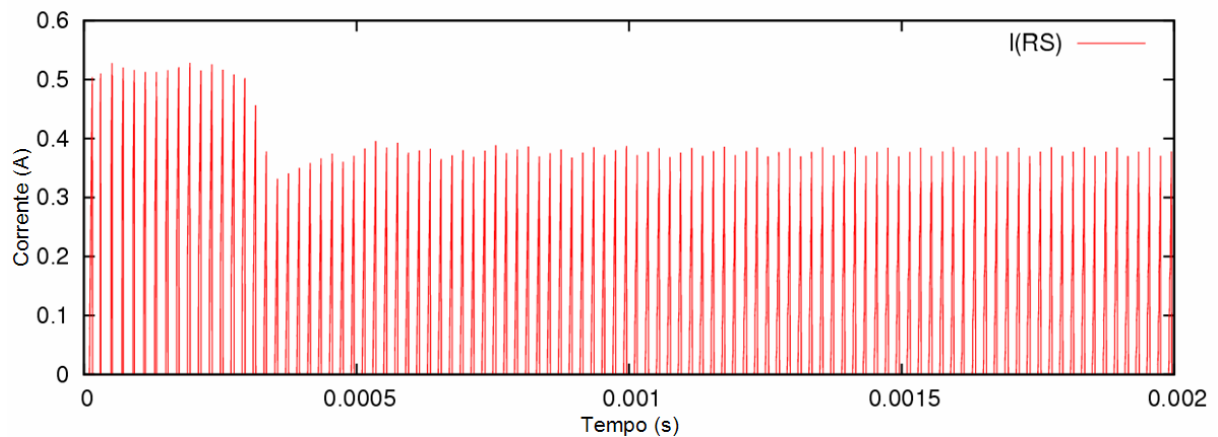


Figura 34 - Corrente no resistor RS - Limitador de corrente

O sinal de rampa gerado pelo capacitor CT é necessário para o funcionamento do LM3524. Este sinal, representado pela figura 35, é utilizado por um bloco interno do circuito integrado responsável pela realimentação do conversor.

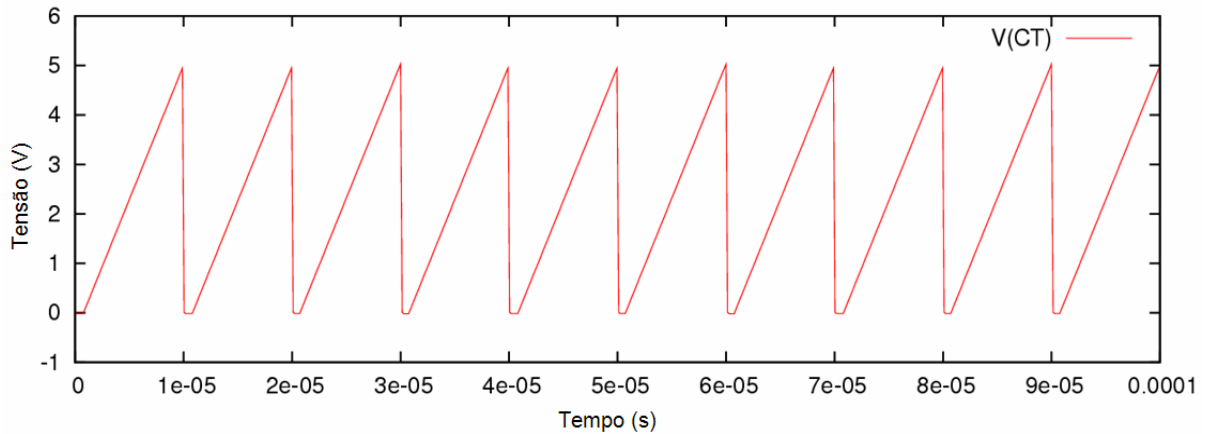


Figura 35 - Sinal de rampa no capacitor CT

Através da simulação foi possível observar o sinal do bloco amplificador de erro interno ao circuito integrado LM3524. Para uma análise comparativa foram incluídos no mesmo gráfico os sinais de tensão e corrente de saída do conversor, conforme mostra a figura 36. Com isso, pôde-se observar que no início de operação ele se mantém em seu valor máximo (máximo ciclo de trabalho) e vai se reduzindo até 2,5V conforme o conversor tende ao regime permanente. Este sinal, representado pela figura 35, é utilizado por um bloco interno do circuito integrado responsável pela realimentação do conversor (ponto 7 do esquemático da figura 21).

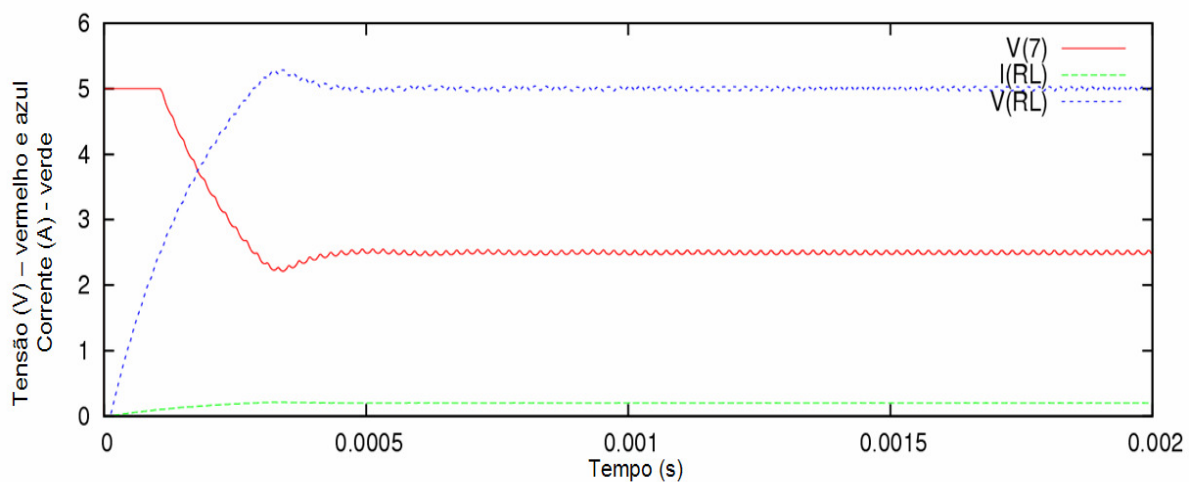


Figura 36 - Sinal interno ao circuito integrado LM3524 - Amplificador de erro

Com a conclusão da fase de simulação, foi possível desenvolver a montagem do protótipo, como ilustram as figuras 37 e 38.

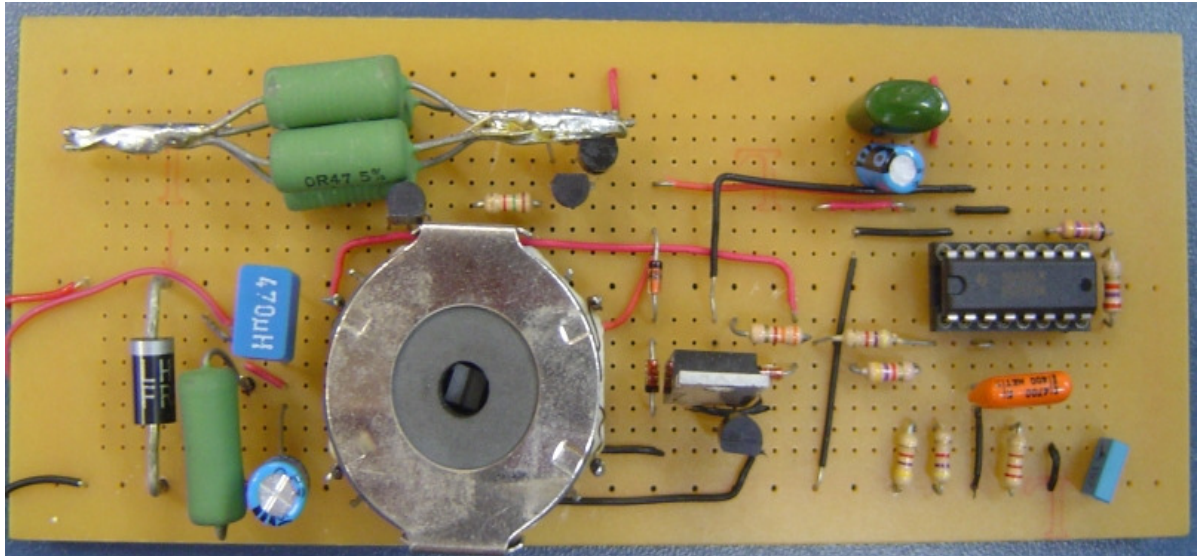


Figura 37 – Protótipo do Conversor DC-DC montado em placa padrão - 1

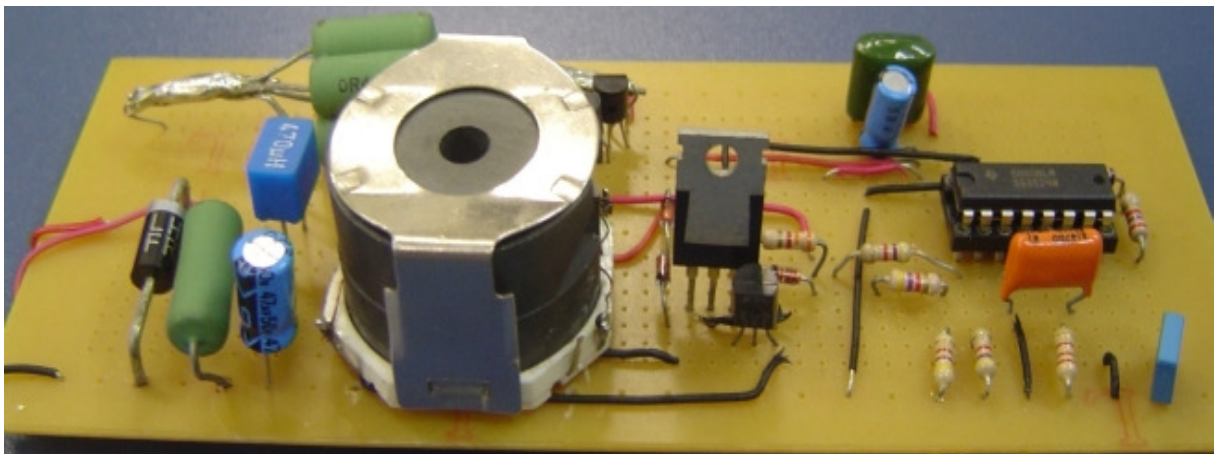


Figura 38 - Protótipo do Conversor DC-DC montado em placa padrão - 2

Os resultados obtidos com a implementação do protótipo foram observados utilizando o osciloscópio. As figuras 39 e 40 apresentam, respectivamente, os sinais de início de operação e regime permanente do conversor DC-DC de topologia Buck. Os resultados das simulações para ambos os casos de operação apresentaram coerência com os resultados práticos. Para a operação em regime permanente, tanto a simulação quando o resultado prático mostraram uma tensão de saída em nível constante de 5V.

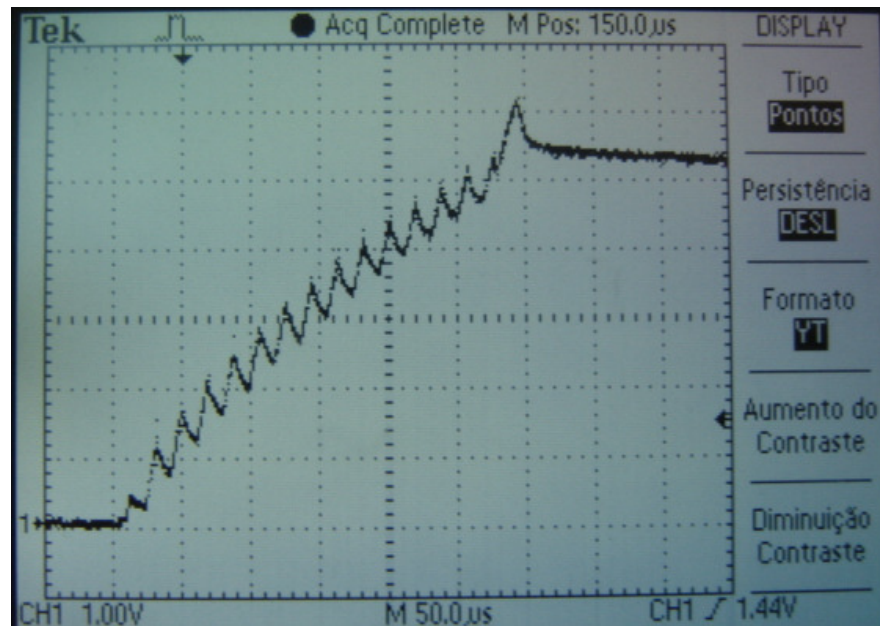


Figura 39 – Tensão de saída do conversor no início de operação.

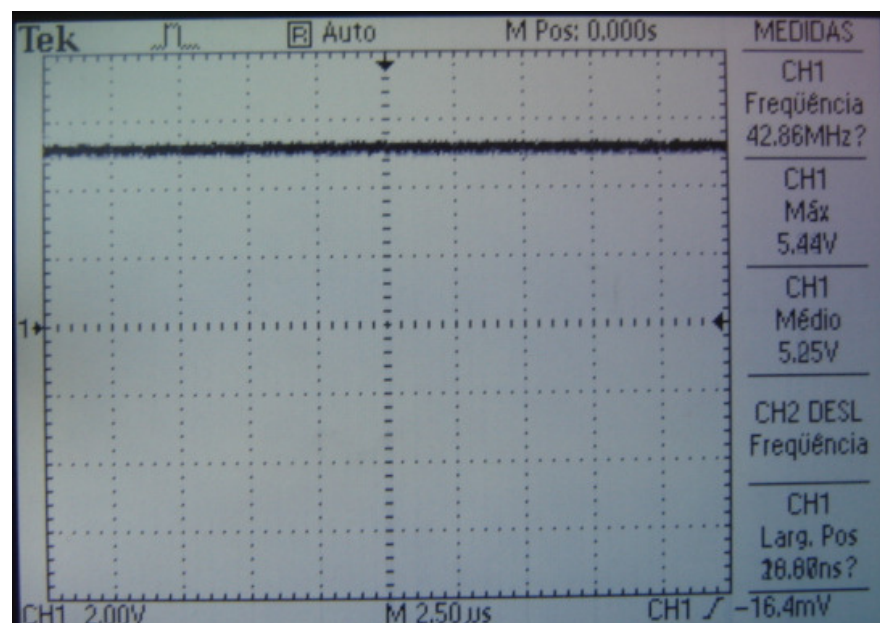


Figura 40 – Tensão de saída do conversor durante operação em regime permanente.

A figura 41 apresenta o sinal de rampa obtido do resistor C_T , referente ao esquemático de montagem apresentado na figura 22.

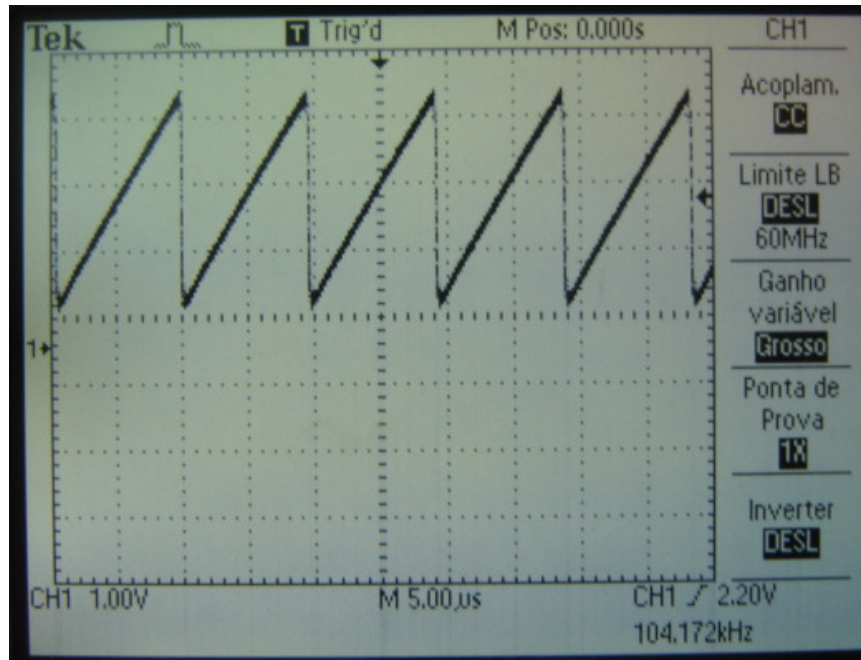


Figura 41 - Sinal da tensão rampa do controlador PWM.

O sinal de rampa da figura 42 coincide com o sinal que foi observado nas simulações. Com isto, concluiu-se a etapa de desenvolvimento do protótipo do conversor DC-DC de topologia Buck.

Como início para uma nova fase de desenvolvimento que poderá ser realizada futuramente, foi desenvolvido em um *software* específico o modelo da placa de circuito impresso em 3D, conforme mostra a figura 42.

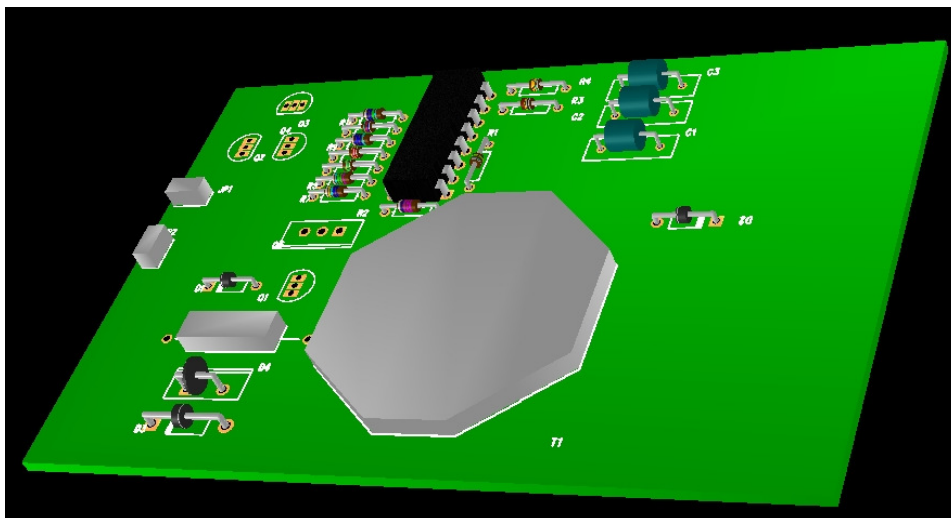


Figura 42 - Modelo da placa de circuito impresso 3D

5. CONCLUSÕES

O estudo de conversores DC-DC foi importante por se tratarem de dispositivos cada vez mais utilizados em substituição aos antigos conversores de energia (lineares).

Em aplicações aeroespaciais, são importantes componentes dos subsistemas de suprimento de energia, que condicionam os níveis de tensão para o fornecimento das diversas cargas.

Em relação ao desenvolvimento do conversor DC-DC de topologia Buck, conclui-se que a utilização de *software* possibilitou um maior aprendizado do assunto, pois a flexibilidade e didática proporcionaram diversas experiências e resultados que auxiliaram no aprendizado.

O conteúdo apresentado no capítulo 3 concretizou o objetivo proposto pelo título deste trabalho. Os resultados obtidos com as simulações foram concordantes com os adquiridos a partir do protótipo. Os níveis de tensão e corrente propostos nos parâmetros do conversor foram satisfeitos.

Como próximos passos, propõem-se a realização de análises e a aplicação de técnicas para aumento de eficiência do conversor assim como a confecção do protótipo em placa de circuito impresso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (AEB, 2005) Agência Espacial Brasileira, 2005, “Programa Nacional de Atividades Espaciais: PNAE / Agência Espacial Brasileira.”, Ministério da Ciência e Tecnologia, Agência Espacial Brasileira, Brasília, 114 p.
- (Chryssis , 1984) Chryssis, G., 1984, “High-frequency switching power supplies”, McGraw-Hill, Inc., 1ª Ed., 221p.
- (Luo, 2003) Luo, F. L. and Ye, H., 2003, “Advanced DC/DC Converters”, CRC Press LCC, 1ª Ed., 756p.
- (Magalhães, 2003) Magalhães, R. O., 2003, “Compensation design for switching power supply in buck topology and voltage mode control”, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, Brasil, pp7-17.
- (Mello, 1987) Mello, L. F. P., 1987, “Projeto de Fontes Chaveadas”, Érica, São Paulo, 292p.
- (Patel, 2005) Patel, M. R., 2005, “Spacecraft power systems”, CRC Press LCC, 1ª Ed., 693p.
- (Pomilio, 2007) Pomilio, J. A., 2007, “Fontes Chaveadas, Publicação FEEC 13/95.
- (Sedra, 2000) Sedra, Adel S., K.C. Smith, 2000 “Microeletrônica”, Makron 4ª. Ed c2000, 1270p.
- (Severns, 1985) Severns, R. P. and Bloom, G., 1985, “Modern DC-to-DC switchmode power converter circuits”, Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1ª Ed, 342p.

APÊNDICE A - O PROGRAMA E AS ATIVIDADES AEROESPACIAIS NACIONAIS

A atividade espacial contribui de maneira significativa para o projeto de desenvolvimento do Brasil, seja pelas informações que disponibiliza, sob a forma de imagens e dados coletados sobre o território nacional, seja pelo efeito indutor de inovação que decorre dos esforços na aquisição e no desenvolvimento de tecnologias e de conhecimentos críticos para atender às necessidades do Programa Nacional de Atividades Espaciais, os quais resultam em proveito para a indústria e para a sociedade.

A experiência brasileira com artefatos espaciais começa com o lançamento de pequenos foguetes da série Sonda, de propelente sólido, na década de 60. Até então, a dependência do exterior era total. Para simples prospecções atmosféricas e meteorológicas necessitava-se de material importado.

Em 1979 foi anunciada a Missão Espacial Completa Brasileira (MECB), que previa a implantação de toda a infra-estrutura para missões aeroespaciais, a construção de foguetes da série VLS (Veículo Lançador de Satélite) e o desenvolvimento e lançamento de satélites artificiais. Na década de 90, registraram-se alguns fracassos em lançamentos. E em 2003, houve o fatídico acidente no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) (AEB, 2005).

O Brasil desenvolveu e colocou em órbita satélites artificiais. São eles: os SCD-1 e 2, de coleta de dados ambientais, que foram lançados, respectivamente, em 1993 e 1998. Em 1999, uma parceria com a China resultou no lançamento do CBERS-1, e do CBERS-2, em 2003, utilizadas na observação e produção de imagens da Terra. Em 2007, foi lançado o CBERS-2B, e está previsto o lançamento dos satélites CBERS-3 e 4 em 2008 e 2011, respectivamente, como é apresentado na figura 1.

1.1. Organização

As atividades espaciais no Brasil se desenvolvem de acordo com o Sistema Nacional de Desenvolvimento das Atividades Espaciais (SINDAE), instituído pelo Decreto nº 1.953, de 10 de julho de 1996. O SINDAE resulta da congregação de várias instituições, as quais exercem papéis distintos:

- i. Como órgão de coordenação central, vinculado ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), a AEB; e, por intermédio do Conselho Superior da AEB, ministérios e outros órgãos do governo, bem como entidades da sociedade civil;

- ii. Como órgãos setoriais de execução, o INPE, vinculado à Subsecretaria de Controle das Unidades de Pesquisa (SCUP), do MCT, e o Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento (DEPED), órgão do Comando da Aeronáutica, do Ministério da Defesa. Subordinam-se ao DEPED: a) o Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), por intermédio do Centro Técnico Aeroespacial (CTA); b) o CLA; c) o Centro de Lançamento da Barreira do Inferno (CLBI);
- iii. Como órgãos e entidades participantes, dentre outros, o setor industrial e as universidades brasileiras que desenvolvem pesquisas e projetos na área espacial.

1.2. Cenário Atual do Programa Aeroespacial Brasileiro

O Programa Nacional de Atividades Espaciais conseguiu consolidar uma comunidade científica internacionalmente reconhecida. Trata-se de um grupo de competentes especialistas que constituem uma sólida base de profissionais de engenharia e de tecnologia espaciais e de pesquisadores especializados em ciências espaciais, sensoriamento remoto e meteorologia por satélite.

No âmbito das aplicações espaciais, o País exhibe, hoje, resultados bastante expressivos que decorrem de um trabalho de longo prazo, voltado para a implantação de uma infra-estrutura indispensável aos trabalhos, para a formação de pessoal e para o desenvolvimento de metodologias e ferramentas adequadas às demandas do Programa.

O esforço empregado no desenvolvimento de satélites foi contemplado pelo sucesso dos programas Coleta de Dados (SCD) e Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (CBERS), que têm contribuído de modo significativo para a utilização de informação espacial na gestão governamental e para o surgimento de novas oportunidades de negócio.

Encontra-se implantada, também, uma ampla infra-estrutura de apoio, na qual se destacam o CLA, o CLBI, o Laboratório de Integração e Testes (LIT), o Centro de Rastreamento e Controle de Satélites (CRC), a Usina de Propelentes Coronel Abner (UCA), além de numerosos observatórios e laboratórios de pesquisa, bem como nichos tecnológicos no setor privado.

A participação da indústria nacional também tem sido muito importante, pois contribui para o desenvolvimento de projetos do PNAE, demonstrando possuir técnicos competentes, com grau elevado de qualificação acadêmica, similar ao encontrado nos institutos de pesquisa do SINDAE.

1.3. Atividade do Programa Nacional de Atividades Espaciais

A atividade do PNAE, cuidadosamente planejada e focada em prioridades, exige esforço para o qual todos envolvidos – governo, academia e indústria - devem contribuir coordenadamente. Impõe-se, portanto, que se estabeleça uma estratégia de implementação do PNAE e que se baseie, concretamente, nos seguintes princípios (AEB, 2005):

- A. Foco no atendimento às necessidades dos usuários públicos de bens e serviços espaciais.
- B. Autonomia na área de pequenos satélites e respectivos veículos lançadores.
- C. Adoção de padrões de segurança e qualidade compatíveis com as normas internacionais.
- D. Busca da sustentabilidade do modelo de financiamento das atividades espaciais mediante a comercialização de bens e serviços espaciais.
- E. Integração da indústria e da academia ao conjunto das instituições envolvidas com a implementação do PNAE.
- F. Fortalecimento das instituições, direta ou indiretamente envolvidas com a implementação do PNAE, com ênfase em:
 - i. Formação, capacitação e alocação de recursos humanos de modo a favorecer a inovação tecnológica e o aperfeiçoamento da gestão;
 - ii. Utilização de métodos, técnicas e ferramentas de gestão do conhecimento gerado no âmbito destas instituições; e
 - iii. Utilização de métodos, técnicas e ferramentas de planejamento estratégico e tecnológico para a área espacial.

A figura 43 apresenta algumas atividades aeroespaciais já realizadas no Brasil. Algumas delas contaram com a parceria de outros países.

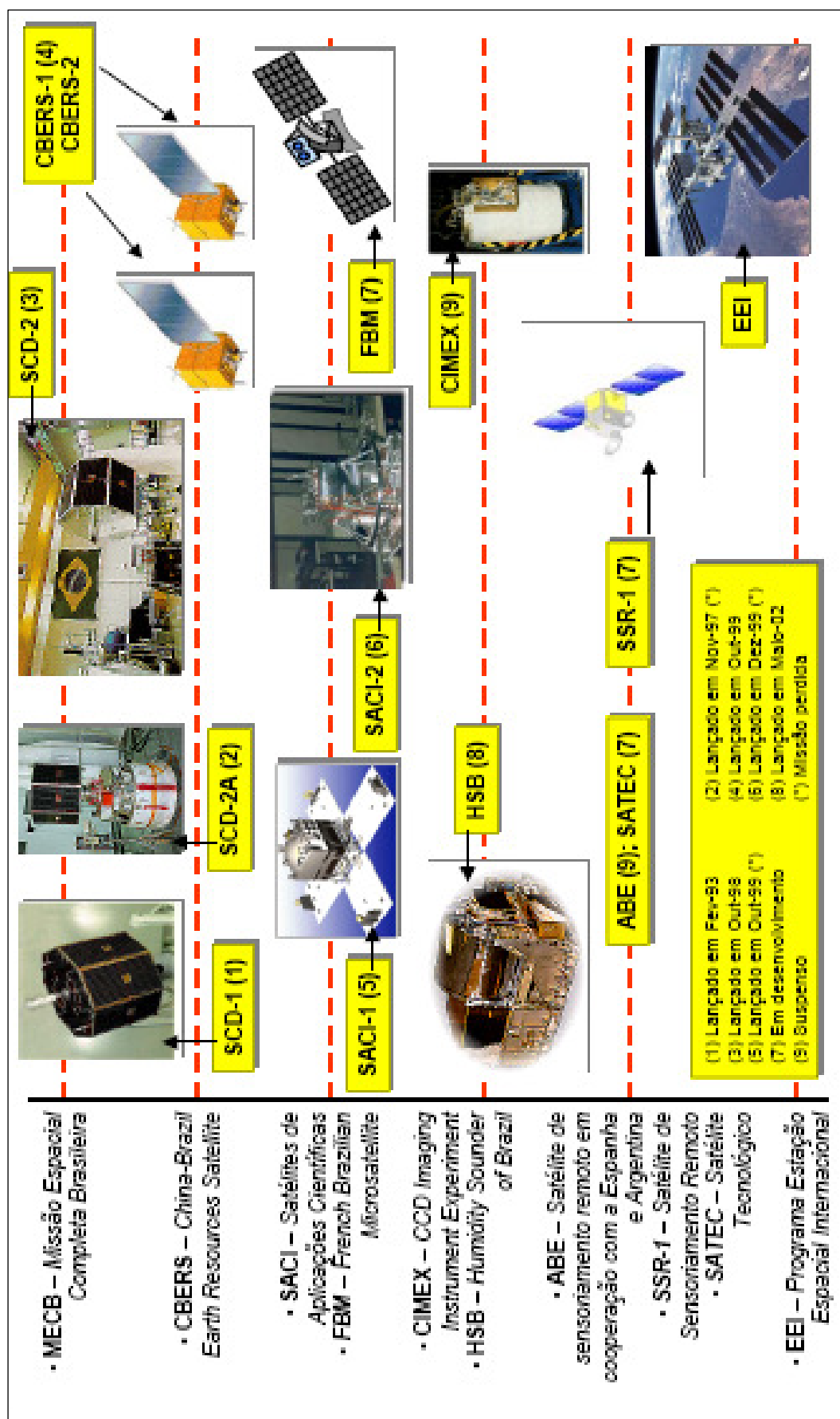


Figura 43 - Atividades do Programa Nacional de Atividades Espaciais

APÊNDICE B - O PROJETO ITASAT

O projeto do Satélite Universitário Brasileiro ITASAT foi constituído no contexto da atividade do PNAE. Trata-se de uma iniciativa acadêmica para o desenvolvimento de um satélite artificial de pequeno porte, com o intuito de utilizar métodos, técnicas e ferramentas em estudos para a área aeroespacial; formar, capacitar e, futuramente, alocar recursos humanos no setor.

Estão envolvidos no projeto: a Agência Espacial Brasileira e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais financiamento e coordenando o projeto; O Instituto Tecnológico de Aeronáutica, a Universidade de São Paulo, a Universidade Estadual de Campinas e a Universidade Estadual Paulista desenvolvendo estudos de tecnologias aeroespaciais.

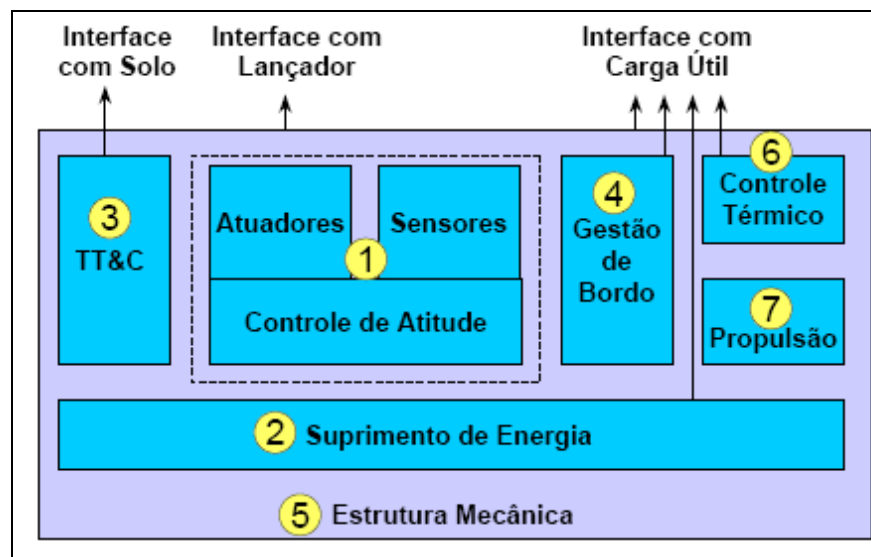


Figura 44 - Diagrama em blocos dos Subsistemas de um Satélite

No desenvolvimento de satélites, o sistema principal é dividido em outros subsistemas, conforme mostra a figura 44: Controle de Atitude (1), Suprimento de Energia (2), Telemetria, Rastreamento e Comando (3), Transponder PCD (3), Gestão de Bordo (4), Estrutura Mecânica (5), Controle Térmico (6) e Propulsão (7). No caso do ITASAT esta divisão se dá através de 10 Subsistemas, classificados em:

- Efeitos da Radiação - ERAD
- Suprimento de Energia – SSEN
- Telemetria, Telecomando e Processamento Digital de Sinais - TTCP

- Transponder de Coleta de Dados - DCS
- Computador de Bordo - Hardware - CB.HW
- Computador de Bordo – Software – CB.SW
- Computador de Bordo - Sensores e Atuadores - CB.SA
- Controle de Atitude - CAT
- Estrutura - EST
- Térmica - TER

Trata-se de um projeto bastante interessante já que a dimensão e a massa do satélite é limitada, restringindo a demanda de cargas úteis e, conseqüentemente, a potência elétrica. Desta forma, o Subsistema de Suprimento de Energia tem um papel fundamental dentro do projeto.

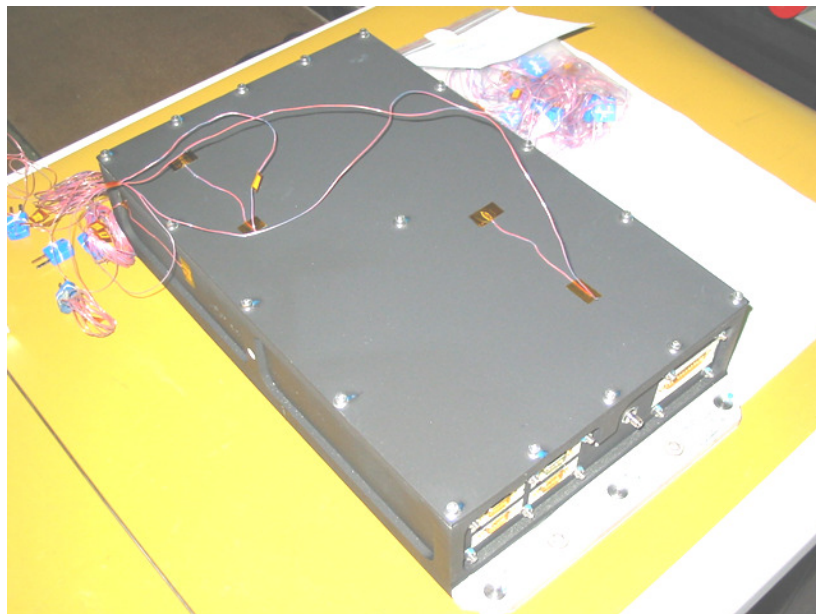


Figura 45 - Vista do Satélite Universitário UNOSAT da Universidade do Oeste do Paraná

O Projeto ITASAT não é pioneiro, pois no Brasil e em outros países já foram desenvolvidos semelhantes. Alunos de graduação da Universidade do Oeste do Paraná (UNOPAR) desenvolveram um nanosatélite chamado UNOSAT (*Undergraduate Student Satellite*), figura 45. Este estava a bordo do Veículo Lançador de Satélites (VLS 1-03) que explodiu, em 2003, no CLA. Na Dinamarca, alunos da Aalborg University desenvolveram o CUBESAT e, atualmente, está em fase de desenvolvimento o AAUSATII, figura 46, e AAUSATIII.

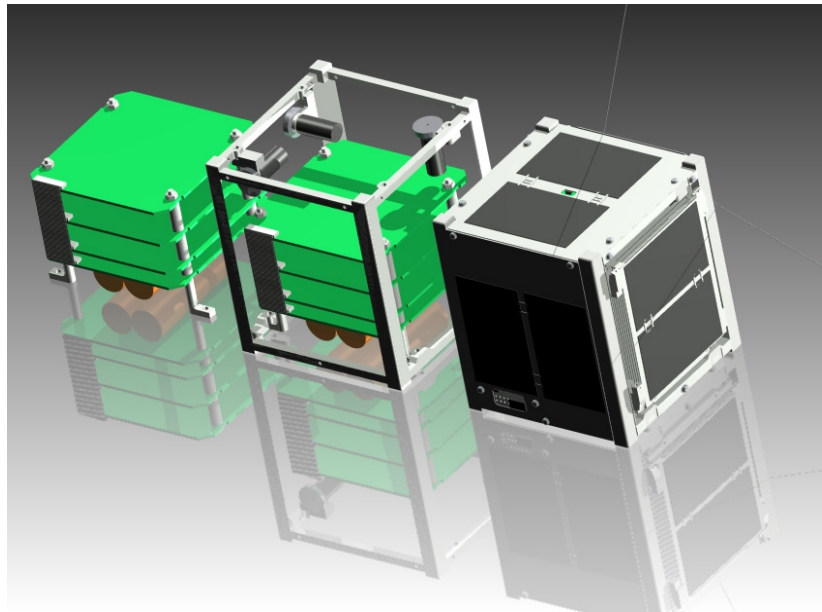


Figura 46 - Vista do Satélite Universitário AAUSATII da Aalborg University

APÊNDICE C - SUBSISTEMA DE SUPRIMENTO DE ENERGIA

O Subsistema de Suprimento de Energia tem como objetivo principal o fornecimento de energia elétrica através de painéis solares, o armazenamento de energia através de baterias, o condicionamento, a conversão e a regulação da potência elétrica e a distribuição da energia requisitada pelos outros subsistemas e equipamentos do satélite, conforme mostra a figura 47.

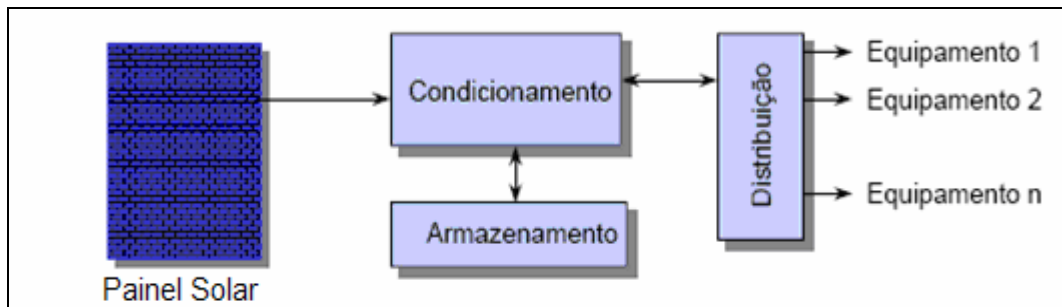


Figura 47 - Diagrama em blocos do Subsistema de Suprimento de Energia de um Satélite

Os Subsistemas de Suprimento de Energia são usualmente classificados em Estáticos (sem partes móveis) e Dinâmicos (com partes móveis) (Patel, 2005).

Em aplicações aeroespaciais pode-se contar com as seguintes fontes de energia elétrica:

- A. Baterias primárias: São lançadas carregadas e não aceitam recarga. São utilizadas para missões de curta duração, ou para executar tarefas específicas no início da vida da espaçonave.
- B. Baterias secundárias: Constituem a bancada de baterias recarregáveis que normalmente equipam os satélites. É a fonte de energia nas fases de eclipse e início da vida dos satélites.
- C. Dinâmico químico: Sistema que aciona um gerador a partir de um combustível (semelhante a uma unidade auxiliar de potência - APU) (Patel, 2005).
- D. Células de combustível tradicionais: São semelhantes às baterias primárias com a diferença que a energia está armazenada em um combustível que a alimenta. Ela fornece energia enquanto houver combustível.
- E. Células de combustível avançadas: Diferem das células tradicionais por serem regenerativas.

- F. Nucleares: Utiliza uma reação de fissão nuclear para gerar calor. O calor é depois aproveitado por um gerador Termoelétrico, Termiônico ou Dinâmico para gerar energia elétrica.

Para o projeto ITASAT as alternativas de fontes energéticas devem satisfazer alguns requisitos:

- A. Segurança: pessoal e de equipamentos;
- B. Alta densidade de potência: massa reduzida e volume reduzido;
- C. Compatibilidade com a espaçonave e sua missão;
- D. Disponibilidade no mercado a prazo razoável;
- E. Baixo custo.

Como forma de otimização do desenvolvimento, o Subistemas do projeto ITASAT está dividido em duas unidades: *Power Control Unit* (PCU) e *Power Distribution Unit* (PDU). Elas serão apresentadas posteriormente. O trabalho aqui descrito, assim como de todo o grupo da Universidade de São Paulo responsável pelo Subistema de Suprimento de Energia, concentra-se na PDU.

1.1. Painel Solar

A figura 48 apresenta o funcionamento de uma célula solar. Quando uma junção p-n é produzida em um cristal, elétrons do lado n difundem-se no lado p e lacunas do lado p difundem-se no lado n. Tanto uns quanto os outros acabam sendo neutralizados, mas contribuem para a manutenção de uma diferença de potencial, cujo campo elétrico é utilizado para a geração de energia.

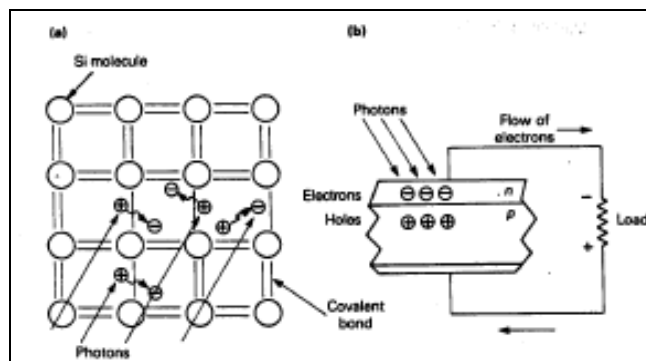


Figura 48 - Funcionamento de uma célula solar

Quando a luz solar é absorvida na região próxima à junção p-n da célula solar alguns elétrons e lacunas irão difundir na junção. Neste momento, as cargas serão separadas pelo campo elétrico da junção, criando assim uma corrente que pode circular por uma carga externa. Este método de conversão direta de luz em energia elétrica é denominado efeito fotovoltaico.

Os painéis solares são formados por um conjunto de células solares. Estes podem ser de Silício (Si) ou Arseneto de Gálio (GaAs). A montagem na estrutura do satélite dependem, basicamente, da missão.

1.2. Baterias

As baterias são utilizadas como fonte e, também, como forma de armazenamento de energia. No caso das baterias secundárias, o excesso de energia gerada pelo subsistema é armazenado enquanto os painéis são iluminados e abastece o satélite durante os eclipses (passagem do satélite por detrás da Terra).

Satélites utilizam baterias com diversas tecnologias. As mais comuns são Níquel-Cádmio (NiCd) e Níquel-Hidrogênio (NiH₂). Mais recentemente surgiram as de Lítio-Íon.

Baterias têm vida útil limitada, que depende da “Profundidade de Descarga” (DOD) de seus ciclos de operação. Quanto maior a DOD, menor a vida útil. O dimensionamento da bancada de baterias deve necessariamente considerar este efeito.

1.3. Reguladores

Para ampliar a vida das baterias e das células solares, bem como para garantir a segurança da operação, é necessário que a recarga das baterias seja feita em condições previamente especificadas para os limites de corrente. Para cumprir esta função existem dispositivos eletrônicos denominados reguladores.

São conhecidos dois tipos de reguladores:

- A. Regulador em série: é montado entre os painéis e as baterias e atua elevando a tensão elétrica para reduzir a potência que flui para as baterias. Pode ser do tipo Linear ou Seqüencial Linear (Patel, 2005).
- B. Regulador em paralelo (*shunt*): é montado em paralelo à linha que vai dos painéis às baterias. Pode ser do tipo Linear, Linear Parcial ou Linear Seqüencial (Patel, 2005).

1.4. Conversores

Os conversores são utilizados para adequar os níveis de tensão elétrica para os subsistemas do satélite. Os barramentos que transportam a energia das fontes até as cargas podem ser regulados em determinados níveis de tensão, ou não.

Em caso de barramentos não regulados, as cargas do satélite devem possuir conversor próprio, que ajuste o nível de tensão necessário. Já em barramentos regulados, os conversores ajustam os níveis do barramento de forma que este atenda as necessidades das cargas.

Sistemas regulados são caros e adicionam risco ao projeto, pois as cargas passam a depender da sua qualidade de regulação para seu bom funcionamento.

Sistemas não regulados são bastante comuns, particularmente nos casos em que as cargas e o Subsistema de Suprimento de Energia são projetados simultaneamente (Patel, 2005).

1.5. Proteção

A proteção é um recurso utilizado nos satélites para evitar que possíveis surtos elétricos, tanto no sistema de suprimento de energia quanto em alguma carga específica, afetem outros sistemas do satélite.

Para esta função são desenvolvidos sistemas de detecção e isolamento de surto. Alguns destes sistemas permitem telecomando, possibilitando que da Terra possa ser realizada alguma ação.

1.6. Compatibilidade Eletromagnética

É a capacidade de um sistema de funcionar sem degradação de desempenho devido ao ambiente eletromagnético no qual deve operar. Dois fenômenos estão presentes:

- A. Interferência Eletromagnética (*Electro Magnetic Interference*–EMI): Indica o quanto que um equipamento emite de ondas eletromagnéticas que podem potencialmente interferir em outros equipamentos.
- B. Compatibilidade Eletromagnética (*Electro Magnetic Compatibility*–EMC): Indica a capacidade de um equipamento continuar operando adequadamente quando imerso nas perturbações eletromagnéticas induzidas por outros equipamentos.

1.7. PCU – *Power Control Unit*

O objetivo da Unidade de Controle de Potência (PCU) é regular os níveis de potência fornecida pelo painel solar para que a energia possa ser armazenada em baterias ou entregue para a Unidade de Distribuição de Potência. Sendo assim, esta unidade é composta, basicamente, por Reguladores.

1.8. PDU - *Power Distribution Unit*

O objetivo da Unidade de Distribuição de Potência (PDU) é condicionar o nível de potência fornecido pela PCU. Para isto, são utilizadas algumas topologias de conversores DC-DC. Estes dispositivos podem condicionar o nível de tensão de um barramento que irá suprir diversas cargas ou um que será utilizado por uma única carga específica.

APÊNDICE D - CRONOLOGIA RESUMIDA DO PROGRAMA ESPACIAL BRASILEIRO

(Portal da Agência Espacial Brasileira: <http://www.aeb.gov.br>)
(Versão de novembro/2007)

1941

- Criação do MAer (Ministério da Aeronáutica).

1946

- Criação do CTA (como Centro Técnico de Aeronáutica, hoje Centro Técnico Aeroespacial).

1950

- Início do funcionamento do ITA (Instituto Tecnológico de Aeronáutica).

1954

- Criação do IPD (Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento).

1961

- Criação do GOCNAE (Grupo de Organização da Comissão Nacional de Atividades Espaciais).

1964

- Criação do GTEPE (Grupo de Trabalho de Estudos de Projetos Especiais).

1965

- Inauguração do CLBI (Centro de Lançamento da Barreira do Inferno).
- CLBI, GOCNAE e NASA lançam o primeiro foguete, um Nike-Apache, do CLBI.

1966

- O GTEPE passa a ser denominado GETEPE (Grupo Executivo e de Trabalho e Estudos de Projetos Especiais).

1967

- É lançado o primeiro protótipo do Sonda I a partir do CLBI.

1969

- O GETEPE é extinto e é criado o IAE (como Instituto de Atividades Espaciais).
- Criação da EMBRAER (Empresa Brasileira de Aeronáutica).

1971

- O GOCNAE é extinto e é criado o INPE (como Instituto de Pesquisas Espaciais).
- Criação da COBAE (Comissão Brasileira de Atividades Espaciais).

1976

- É lançado o primeiro Sonda III a partir do CLBI.

1978

- Início da elaboração da proposta para a MECB (Missão Espacial Completa Brasileira).

1980

- Aprovação da MECB.

1983

- É estabelecido o GICLA (Grupo de Implantação do Centro de Lançamentos de Alcântara).

1984

- Lançamento do Sonda IV a partir do CLBI, primeiro foguete nacional dotado de sistema de controle.

1985

- Criação do MCT (Ministério da Ciência e Tecnologia).

1988

- Assinatura do acordo que deu origem ao Programa CBERS.

1989

- O MCT é extinto e é criada a SCT (Secretaria Especial da Ciência e Tecnologia).
- Primeira operação de lançamento a partir do CLA, um Sonda IV.

1990

- O INPE torna-se Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

1991

- O IAE e o IPD fundem-se e é criado o IAE (como Instituto de Aeronáutica e Espaço).

1992

- A SCT é extinta e o MCT recriado.

1993

- Fevereiro: Lançamento do SCD-1 (Satélite de Coleta de Dados-1) com um foguete Pegasus.
- Vôo inaugural do VS-40 a partir do CLA.

1994

- Criação da AEB (Agência Espacial Brasileira).

1996

- Agosto: AEB aprova o PNAE 1996-2005.

1997

- Outubro: Brasil ingressa no Programa Estação Espacial Internacional (ISS).
- Novembro: Primeiro lançamento do VLS-1 (Veículo Lançador de Satélites), com o SCD-2A como carga útil, sem êxito.
- Dezembro: AEB aprova o PNAE 1998-2007.

1998

- Outubro: Lançamento do SCD-2 com um foguete Pegasus.

- AEB seleciona o primeiro astronauta brasileiro.

1999

- Outubro: Lançamento do CBERS-1 (China-Brazil Earth Resources Satellite) e do SACI-1 (Satélite Científico-1).
- Dezembro: Segundo lançamento do VLS-1, com o SACI-2 como carga útil, sem êxito.
- Centésimo lançamento de um foguete de sondagem pelo IAE (Operação São Marcos).
- Criação do Ministério da Defesa.

2000

- Lançamento do primeiro protótipo do foguete de sondagem VS-30/Orion a partir do CLA.

2002

- Maio: Lançamento do HSB (Humidity Sounder of Brazil) como parte do satélite Aqua da NASA.
- Realização das operações Pirapema e Cumã pelo IAE com o lançamento de um VS-30 e um VS-30/Orion.

2003

- Fevereiro: SCD-1 completa 10 anos em órbita
- Agosto: Acidente com o terceiro protótipo do VLS-1 no CLA, causando a morte de 21 técnicos, a perda da Torre de Lançamentos, do protótipo do lançador e dos satélites SATEC e UNOSAT (Operação São Luís).
- Outubro: Lançamento do CBERS-2 e início da distribuição gratuita pelo INPE das imagens CBERS do território brasileiro.
- AEB lança o Programa AEB Escola.

2004

- Março: Apresentação do “Relatório da investigação do acidente ocorrido com o VLS-1 V03, em 22 de agosto de 2003, em Alcântara, Maranhão”.

2005

- Setembro: AEB publica revisão do Programa Nacional de Atividades Espaciais (PNAE), para o período 2005-2014.

2006

- Março-Abril: É realizada entre os dias 29/março e 8/abril a Missão Centenário, que incluiu o lançamento de Marcos Pontes, o primeiro astronauta brasileiro, em uma nave Soyus para realizar 8 experimentos a bordo da ISS.

2007

- Lançamento do foguete VSB-30, Operação Cumã II com 9 experimento científicos, a partir do CLA.