



ESTUDO DE CONVERSOR *BUCK* APLICADO À
ALIMENTAÇÃO DE ULTRACAPACITORES POR PAINEL
FOTOVOLTAICO

LEANDRO DA SILVA

Taubaté

2017



LEANDRO DA SILVA

Estudo de Conversor *Buck* Aplicado à Alimentação de Ultracapacitores por Paineis Fotovoltaicos

Taubaté – SP

2017



Leandro da Silva

Estudo de Conversor *Buck* Aplicado à Alimentação de Ultracapacitores por Painel Fotovoltaico

Trabalho de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Taubaté, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Abud Marcelino.

Taubaté

2017



**Ficha Catalográfica elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado
de Bibliotecas / UNITAU - Biblioteca das Engenharias**

S586e Silva, Leandro da
Estudo de conversor Buck aplicado à alimentação de ultracapacitores por painel fotovoltaico. / Leandro da Silva. – 2017.

42. : il; 30 cm.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica e Eletrônica) – Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, 2017
Orientador: Prof. Dr. Márcio Abud Monteiro,
Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica.

1. Iluminação autossustentável. 2. Painel solar. 3. Conversor Buck. 4. Ultracapacitores. 5. LED. I. Título.



ESTUDO DE CONVERSOR *BUCK* APLICADO À
ALIMENTAÇÃO DE ULTRACAPACITORES POR PAINEL
FOTOVOLTAICO

LEANDRO DA SILVA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE “GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA”

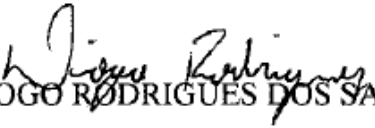
APROVADO PELA BANCA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
ELETRÔNICA

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. MARCIO ABUD MARCELINO

Orientador/UNITAU-DEE



Engo. DIOGO RODRIGUES DOS SANTOS

Membro externo



Engo. FÁBIO SOARES

Membro externo

Taubaté

2017

DEDICATÓRIA

De modo especial, quero dedicar à minha namorada, Gabriela, por todo apoio que foi dado durante toda trajetória desse trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

A esta Universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior, motivado pela confiança no mérito e ética aqui presentes.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcio Abud Marcelino, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos.

Aos meus familiares, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

E a todos que direta e indiretamente fizeram parte da minha formação.

SILVA, L. **Estudo de Conversor Buck Aplicado à Alimentação de Ultracapacitores por Painel Fotovoltaico.** 20 f. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica e Eletrônica – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Taubaté, Taubaté, 2017.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um conversor Buck aplicado à alimentação de ultracapacitores, utilizados no projeto de um poste de iluminação noturna autossustentável, que se mostra vantajoso uma vez que o sistema é alimentado por painéis fotovoltaicos, que geram energia limpa e renovável no período diurno, controlados para trabalhar no ponto de máxima potência. Esta energia é armazenada em um banco de ultracapacitores que permite eliminar inconvenientes ligados à tecnologia das baterias atuais, como a necessidade de manutenção preventiva, em média a cada 18 meses, além de resolver o problema da carga lenta, já que os ultracapacitores mantêm a característica de carga rápida, limitada exclusivamente à capacidade de geração do painel. A viabilidade desse poste aumenta quando se tem luminárias de LED, desenvolvidas de forma específica para o caso, buscando a maior eficiência luminosa, sendo alimentadas exclusivamente no período noturno. Para obter a garantia de que a alimentação dos ultracapacitores pelos painéis fotovoltaicos será adequada às exigências do projeto, observa-se a necessidade de um estudo aprofundado do circuito do conversor Buck, para poder aumentar o aproveitamento do painel fotovoltaico. Utiliza-se análise de circuitos elétricos, modelamento matemático buscando otimizar o uso dos painéis, sendo esse o principal desafio do trabalho, e os resultados foram comprovados por simulação computacional e uma dos principais resultados alcançados, foi a da não necessidade de resistor adicional em série com a bobina do conversor, o que, até a realização desse trabalho, era tida como certa.

PALAVRAS-CHAVE: Iluminação Autossustentável. Painel Solar. Conversor *Buck*. Microcontrolador. Ultracapacitores. LED.

SILVA, L. Buck Converter Study Applied to Photovoltaic Panel Ultracapacitor Feeding.
20 f. Graduate Work in Electrical Engineering - Departamento de Engenharia Elétrica,
Universidade Taubaté, Taubaté, 2017.

ABSTRACT

This work presents the development of a Buck converter applied to the charge of ultracapacitors used in the design of a self-sustaining nightly light pole, which is advantageous since the system is powered by photovoltaic panels that generate clean and renewable energy during the daytime period, controlled to work at the point of maximum power. This energy is stored in an ultracapacitor bank that eliminates the drawbacks associated with current battery technology, such as the need for preventive maintenance, on average every 18 months, as well as solving the problem of slow loading, since ultracapacitors maintain the characteristic of rapid loading, limited exclusively to the generating capacity of the panel. The feasibility of this pole increases when one has LED lamps, developed in a specific way for the case, seeking greater luminous efficiency, being charged exclusively at nighttime. To ensure that the power supply to the photovoltaic panels is adequate to the requirements of the project, a thorough study of the Buck converter circuit is necessary, to increase the efficiency of the photovoltaic panel. It was used electrical circuit analysis, mathematical modeling to optimize the use of panels, it was the main challenge of the work, and the results were proved by computational simulation and one of the main results achieved was the need for no additional resistor in series with the coil of the converter, which, until the realization of this work, was considered right.

KEYWORDS: Self-Sustaining Lighting. Solar panel. Buck Converter. Microcontroller. Ultracapacitors. LED.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.0 – Consumo de energia elétrica por classe (GWh) – estado de São Paulo – 2011...	12
Figura 1.1 – Curva de carga de um transformador tipicamente residencial.....	13
Figura 1.2 – Curva representativa de um transformador de iluminação pública.....	13
Figura 1.3 – Circuito de captação e armazenamento de energia solar.....	15
Figura 1.4 – Circuito de comando gerador do sinal PWM.....	16
Figura 1.5 – Conversor <i>Boost</i> utilizado para aumentar o nível de tensão de saída do banco de ultracapacitores para a utilização de luminária LED.....	16
Figura 1.6 – Circuito de controle PWM para o conversor <i>Boost</i>	17
Figura 1.7 – Sinal PWM a partir de uma onda dente de serra e um sinal de erro.....	18
Figura 2.0 – Demonstração das configurações série e paralelo.....	19
Figura 2.1 – Representação de célula, módulo e painel.....	19
Figura 2.2 – Curva $I \times V$ de uma célula de silício.....	20
Figura 2.3 – Curva de potência em relação à tensão numa célula de silício.....	20
Figura 2.4 – Relação entre componentes de armazenamento de energia pelo gráfico de Ragone.....	22
Figura 2.5 – Circuito equivalente de um ultracapacitor.....	23
Figura 3.0 – Circuito conversor <i>Buck</i>	24
Figura 3.1 – Circuito equivalente com chave fechada.....	24
Figura 3.2 – Circuito equivalente com chave aberta.....	25
Figura 3.3 – Gráfico da tensão em cima do diodo (V_i) e da saída (V_0).....	25
Figura 3.4 – Corrente do indutor.....	26
Figura 3.5 – Formas de onda no conversor <i>Buck</i>	26
Figura 3.6 – Função de transferência do conversor abaixador (<i>Buck</i>).....	28
Figura 4.0 – Circuito <i>Buck</i> com o <i>MOSFET</i> em curto.....	30
Figura 4.1 – Tensões nos componentes.....	31
Figura 4.2 – Código de programação para Scilab.....	34
Figura 4.3 – Gráfico da resposta da corrente x tempo.....	34
Figura 4.4 – Circuito do conversor com resistor de 1.227Ω	35
Figura 4.5 – Resposta da corrente x tempo do circuito do conversor com resistor de 1.227Ω	36
Figura 4.6 – Resposta da corrente x tempo do circuito do conversor com resistor de $0,038\Omega$	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodo emissor de luz)
PMP	Ponto de máxima potência
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect</i> (Transistor Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido Semicondutor)
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (modulação por largura de pulso)
GWh	Giga Watts por hora

LISTA DE SÍMBOLOS

V	Volts (unidade de tensão elétrica)
K	Kilo (equivalente a 10^3)
G	Giga (equivalente a 10^9)
Hz	Hertz (unidade de frequência)
u	micro (equivalente a 10^{-6})
s	segundos (unidade de tempo)
f	frequência
%	indicador de percentual
t1	representa o tempo em que o sinal permanece em nível alto
E	representa a energia armazenada no capacitor
C	representa o valor da capacitância do capacitor
Vc	representa o valor da tensão aplicada no capacitor
m	mili (equivalente a 10^{-3})
A	Ampère (unidade de corrente)
°C	Graus Celsius (unidade de temperatura)
Ω	Ohm (unidade de resistência elétrica)
F	Faraday (unidade de capacitância)
W	Watt (unidade de potência)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	OBJETIVO.....	12
1.2	JUSTIFICATIVA.....	12
1.3	MOTIVAÇÃO.....	14
1.4	ESTADO DA ARTE.....	14
1.4.1	Circuito de captação.....	14
1.4.2	Circuito de controle PWM do conversor Buck.....	15
1.4.3	Circuito conversor boost para alimentação dos LED's a partir do banco de ultracapacitores.....	16
1.4.4	Circuito de controle PWM do conversor boost.....	17
1.5	DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	PAINEL FOTOVOLTAICO.....	19
2.2	ULTRACAPACITORES.....	21
3	CONVERSOR BUCK.....	24
3.1	CALCULO DOS COMPONENTES DO CONVERSOR BUCK.....	25
4	DESENVOLVIMENTO.....	30
4.1	RESPOSTA DA CORRENTE DO CIRCUITO BUCK.....	30
4.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	37
5	CONCLUSÕES.....	38
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	39

1 INTRODUÇÃO

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é o estudo do circuito *RLC* (resistor, indutor e capacitor) de um sistema autônomo de iluminação a *LED* (*Light Emitting Diode*), composto por supercapacitores, como elementos de armazenamento de energia, para serem utilizados em iluminação pública. Esse circuito é um conversor *Buck* que faz a carga dos supercapacitores. Visando o aumento da eficiência do circuito o principal objetivo foi retirar a resistência do circuito e comprovar o funcionamento sem a mesma de forma que o painel fotovoltaico, que alimenta o circuito, consiga fornecer o pico de corrente.

1.2 JUSTIFICATIVA

Em 2011 foram consumidos quase 130 mil GWh de energia elétrica em todo o estado de São Paulo e dentre as classes de consumo de energia elétrica existentes, a iluminação pública respondeu por 2,3% desse total, ou seja, cerca de 3 mil GWh, conforme quadro mostrado na Figura 1.0 (ILUMINAÇÃO PÚBLICA, 2013).

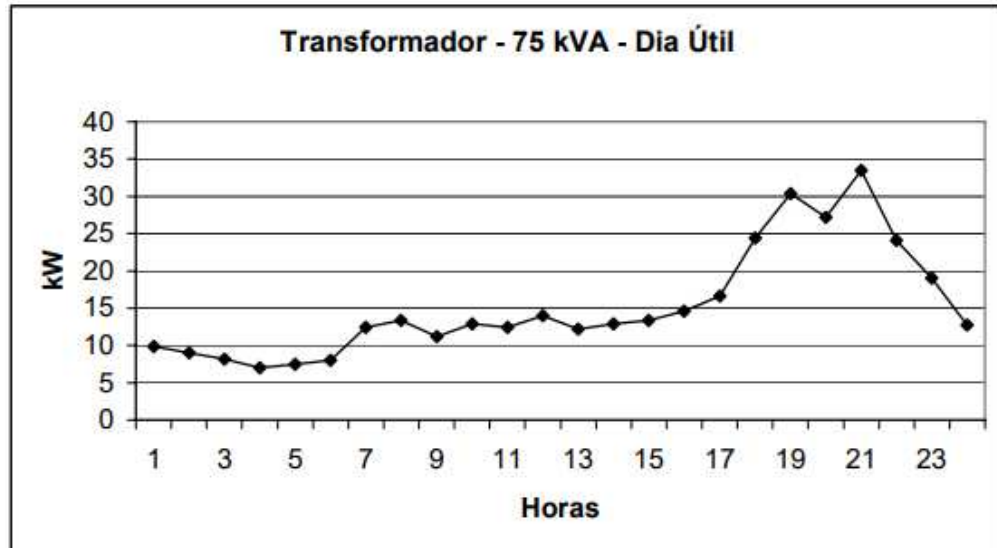
Figura 1.0 – Consumo de energia elétrica por classe (GWh) – Estado de São Paulo – 2011.

Classe	Consumo de Energia Elétrica – 2011	
	[GWh]	[%]
Industrial	55.721	42,9
Residencial	35.931	27,7
Comercial	24.261	18,7
Serviço Público	5.016	3,9
Iluminação Pública	3.007	2,3
Poder Público	2.941	2,2
Rural	2.836	2,2
Consumo Próprio	165	0,1
Total	129.878	100

Fonte: (ILUMINAÇÃO PÚBLICA, 2013).

Também existe o problema da distribuição de carga durante o dia como está apresentado na Figura 1.1.

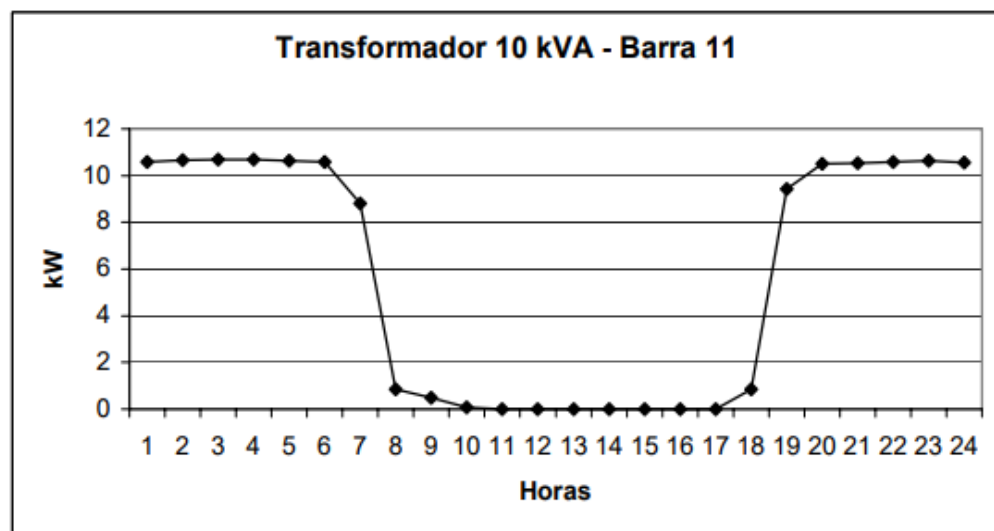
Figura 1.1 – Curva de carga de um transformador tipicamente residencial.



Fonte: (FRANCISQUINI, 2005).

Há um maior consumo entre 17 horas e 22 horas que é o horário em que a iluminação pública é ligada, como pode-se ver na Figura 1.2.

Figura 1.2 – Curva representativa de um transformador de iluminação pública.



Fonte: (FRANCISQUINI, 2005).

A iluminação é ligada quando já existe um aumento de carga no sistema devido ao consumo de energia nas residências com a chegada da noite.

Diante desse quadro pode-se ver que é viável a aplicação de sistemas autossuficientes em iluminação pública afim de diminuir essa participação no consumo de energia elétrica, diminuindo a carga em um horário crítico que o sistema elétrico já tem uma demanda de outras cargas e também diminuir os gastos uma vez que essa energia provem de fonte gratuita e disponível, tendo um custo de investimento inicial considerável, porém com custo de manutenção baixo.

1.3 MOTIVAÇÃO

O que motiva este trabalho é a possibilidade de aplicar os conhecimentos adquiridos ao longo do curso no desenvolvimento de um projeto a fim de proporcionar um futuro mais sustentável para a humanidade.

Outra motivação é a oportunidade de desenvolver habilidades na solução de problemas e aprender sobre uma tecnologia avançada de geração de energia, presente nos painéis fotovoltaicos, além do armazenamento dessa energia em ultracapacitores, tecnologias que são tendências mundiais.

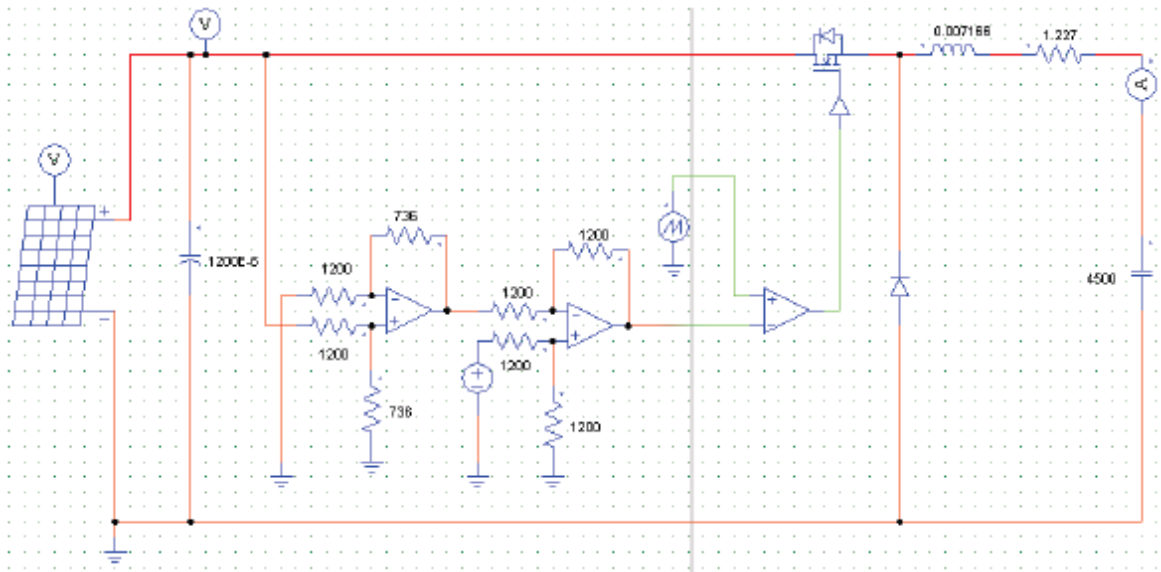
1.4 ESTADO DA ARTE

O projeto apresentado neste trabalho de Graduação no depósito de pedido de patente “SISTEMA DE ILUMINAÇÃO AUTOSSUFICIENTE UTILIZANDO PAINEL FOTOVOLTAICO, ULTRACAPACITOR E LED EM CONFIGURAÇÕES OTIMIZADAS TRABALHANDO NO PONTO DE POTÊNCIA MÁXIMA”, com foco no estudo do circuito do conversor para o processo de carga do banco de ultracapacitores com rastreamento do ponto de máxima potência do painel fotovoltaico (MARCELINO, 2016). Com isso foi feita uma análise do momento atual do projeto.

1.4.1 Circuito de captação

A Figura 1.3 representa o sistema de controle apresentado por Navarro (2015).

Figura 1.3 – Circuito de captação e armazenamento de energia solar.



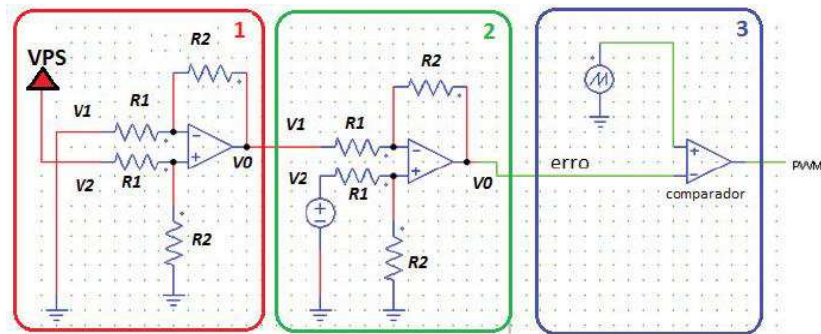
Fonte: (NAVARRO, 2015).

Navarro considerou a necessidade de um resistor em série com a bobina do conversor *Buck*, com valor acima de 1Ω , para proteger o painel fotovoltaico contra picos de correntes.

1.4.2 Circuito de controle PWM do conversor Buck

Segundo Navarro (2015, p. 68): O circuito que controla a abertura e fechamento da chave é feito através de amplificadores operacionais que geram um sinal PWM de acordo com o valor da tensão de entrada do circuito, ou seja, este circuito monitora a entrada do conversor *Buck* com o intuito de manter constante a tensão de saída do painel fotovoltaico no valor que corresponde ao ponto de máxima potência. A Figura 1.4 mostra o circuito de controle para gerar o sinal PWM na porta do MOSFET que é composto por três partes, que na Figura 1.4 estão enumeradas de 1 a 3. A parte 1 tem a função de multiplicar a tensão de saída do painel solar, V_{PS} , por um fator K , este valor é a razão entre o valor da tensão de saída pela tensão de entrada do circuito conversor *Buck*. No circuito, esse fator limita o ciclo ativo (*duty cycle*) do sinal PWM em um valor de K , ou seja, o MOSFET irá conduzir durante $K \cdot 100\%$ do período e, para este caso, K é de aproximadamente $0,62$ ($10,8/17$). Logo, o *duty cycle* máximo do sinal PWM é de 62% .

Figura 1.4 – Circuito de comando gerador do sinal PWM.

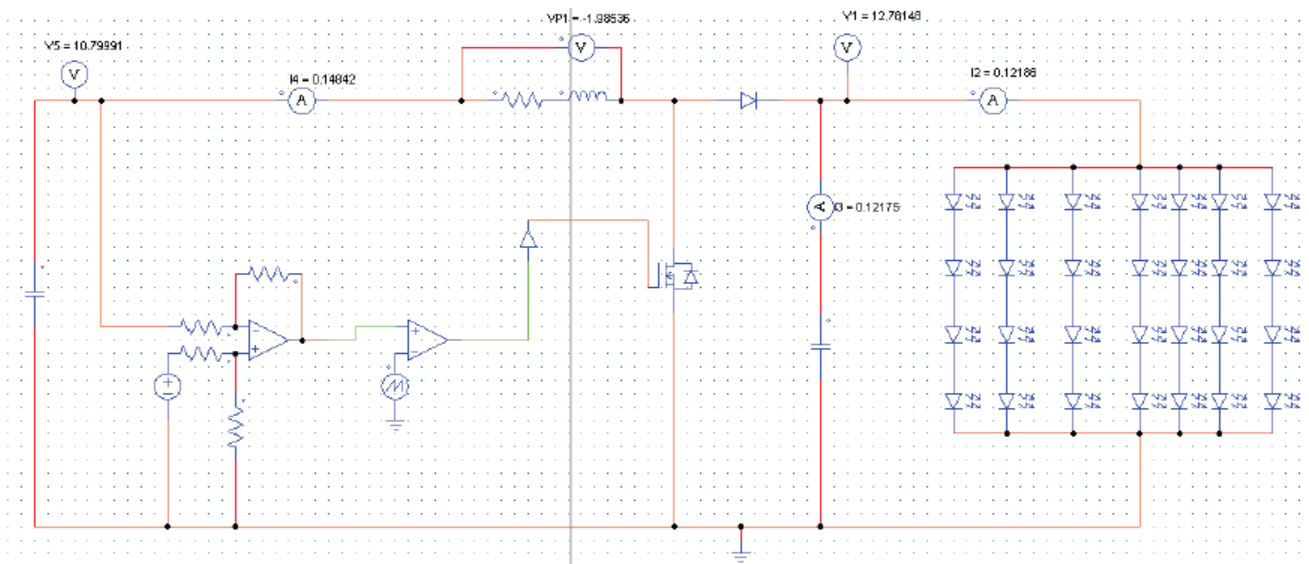


Fonte: (NAVARRO, 2015).

1.4.3 Circuito conversor Boost para alimentação dos LED's a partir do banco de ultracapacitores

A Figura 1.5 apresenta o conversor *Boost* que eleva a tensão de saída do banco de ultracapacitores a fim de atingir a tensão nominal de funcionamento da luminária de LED (NAVARRO, 2015).

Figura 1.5 – Conversor Boost utilizado para aumentar o nível de tensão de saída do banco de ultracapacitores para a utilização na luminária LED.

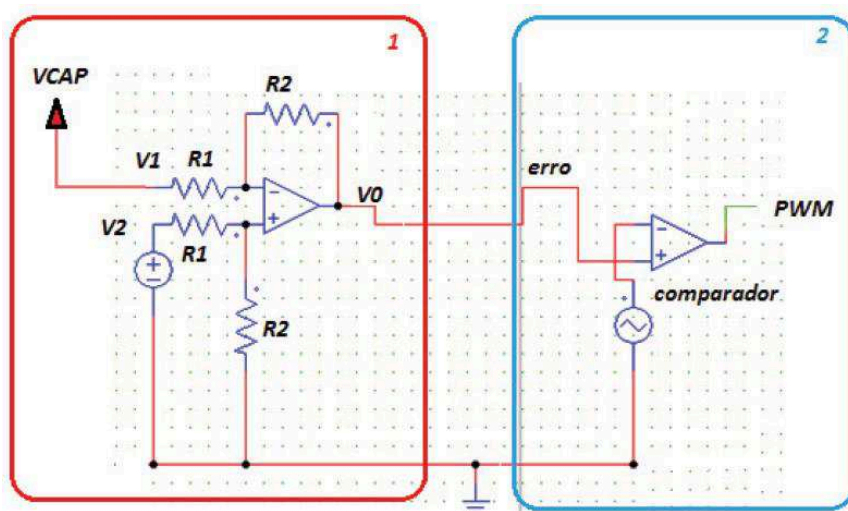


Fonte: (NAVARRO, 2015).

1.4.4 Circuito de controle PWM do conversor boost

O circuito que controla a abertura e fechamento da chave do *MOSFET* é feito através de amplificadores operacionais que geram um sinal PWM de acordo com o valor da tensão de saída do banco de ultracapacitores. A ideia é fazer com que a largura do pulso aumente à medida que a tensão no banco de ultracapacitores diminua devido à descarga. A Figura 1.6 apresenta o circuito de comando que gera o sinal PWM (NAVARRO, 2015).

Figura 1.6 – Circuito de controle PWM para o conversor *Boost*

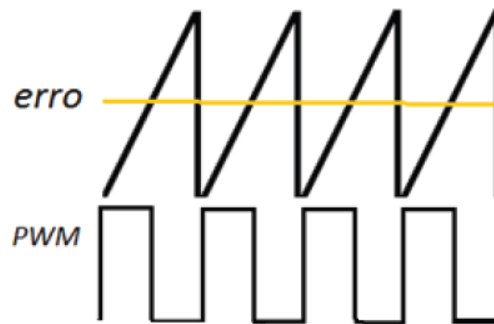


Fonte: (NAVARRO, 2015).

Pode-se observar que o circuito de controle para gerar o sinal PWM na porta do MOSFET é composto por duas partes, que na Figura 1.6 estão enumeradas de 1 a 2. A parte 1 do circuito faz a detecção do erro, que é a diferença entre o valor desejado na saída do conversor *Boost*, e o valor instantâneo da tensão no banco de ultracapacitores, VCAP (NAVARRO, 2015).

Conforme é possível visualizar na parte 2 do circuito, o comparador é utilizado de tal forma que, quando a onda dente de serra possui um valor de tensão inferior ao valor do erro, sua saída gera um sinal de tensão de zero Volts e no caso contrário, tem-se cinco Volts na saída, assim como está apresentado na Figura 1.7.

Figura 1.7 – Sinal PWM a partir de uma onda dente de serra e um sinal de erro.



Fonte: (NAVARRO, 2015).

À medida que a tensão do banco de ultracapacitores diminui, o erro vai aumentando e, com isso, a largura de pulso do sinal na saída do comparador vai aumentando, garantindo na saída do conversor *Boost* uma tensão constante.

Partindo-se desses resultados, busca-se fazer uma análise no circuito de capitação, utilizando o projeto do Navarro (2015), anterior ao desenvolvimento deste trabalho, para aumentar a eficiência na transferência de energia do painel para o banco de ultracapacitores.

1.5 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

O trabalho está apresentado da forma:

No capítulo dois há uma apresentação básica de alguns conceitos necessários para a compreensão dos conversores.

No capítulo três há uma descrição dos cálculos usados para definir os valores dos componentes usados no conversor *Buck*.

No capítulo quatro está presente a análise do sistema proposto de um conversor *Buck* responsável por transferir a energia gerada no painel fotovoltaico para ser armazenada no banco de ultracapacitores, de modo que diminua as perdas no processo de transferência.

No capítulo cinco estão as conclusões bem como as sugestões para futuros projetos.

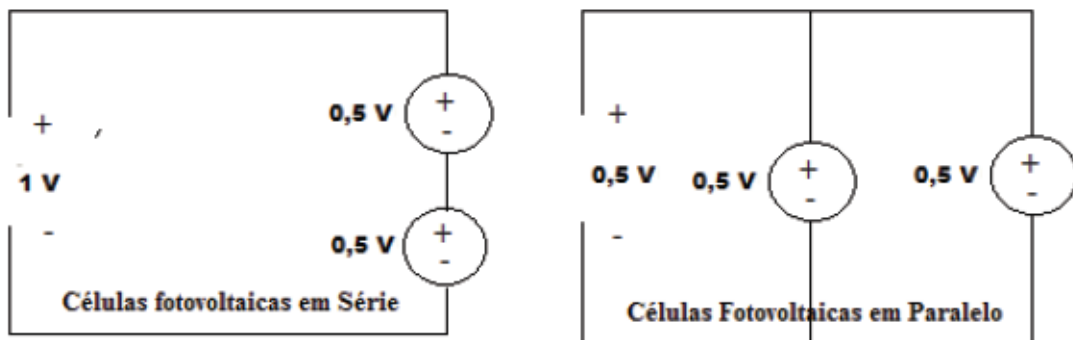
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica tem por objetivo garantir um conhecimento prévio básico ao leitor sobre elementos envolvidos no desenvolvimento do projeto, no entanto, com o objetivo de manter o foco central no projeto, somente as informações mais essenciais são citadas, como o painel fotovoltaico e o ultracapacitor.

2.1 PAINEL FOTOVOLTAICO

Uma célula fotovoltaica tem capacidade de geração de aproximadamente 0,5 V de tensão. Assim sendo, para que a utilização dessa energia seja conveniente são feitas associações entre essas células formando módulos fotovoltaicos, obtendo níveis de tensão e corrente suficientes para algumas aplicações. As associações em série das células garantem uma soma das tensões enquanto as associações em paralelo geram a soma das correntes, assim como apresentado a Figura 2.0.

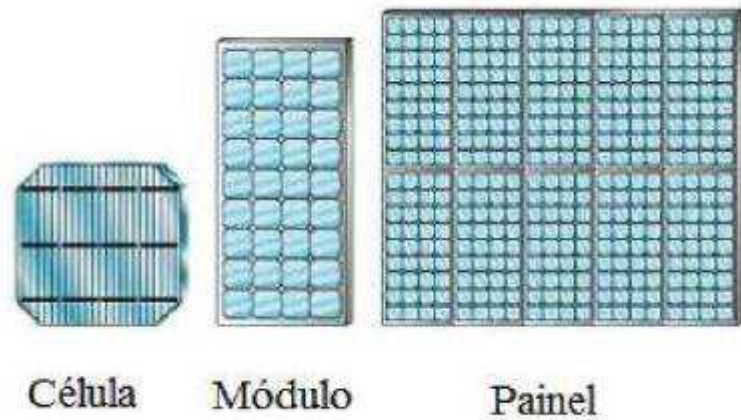
Figura 2.0 – Demonstração das configurações série e paralelo.



Fonte: (NAVARRO, 2015).

Os painéis fotovoltaicos são produzidos pela conexão de módulos em série, em paralelo ou em ambas as configurações para garantir a condição necessária para a aplicação específica, como está exemplificado na Figura 2.1.

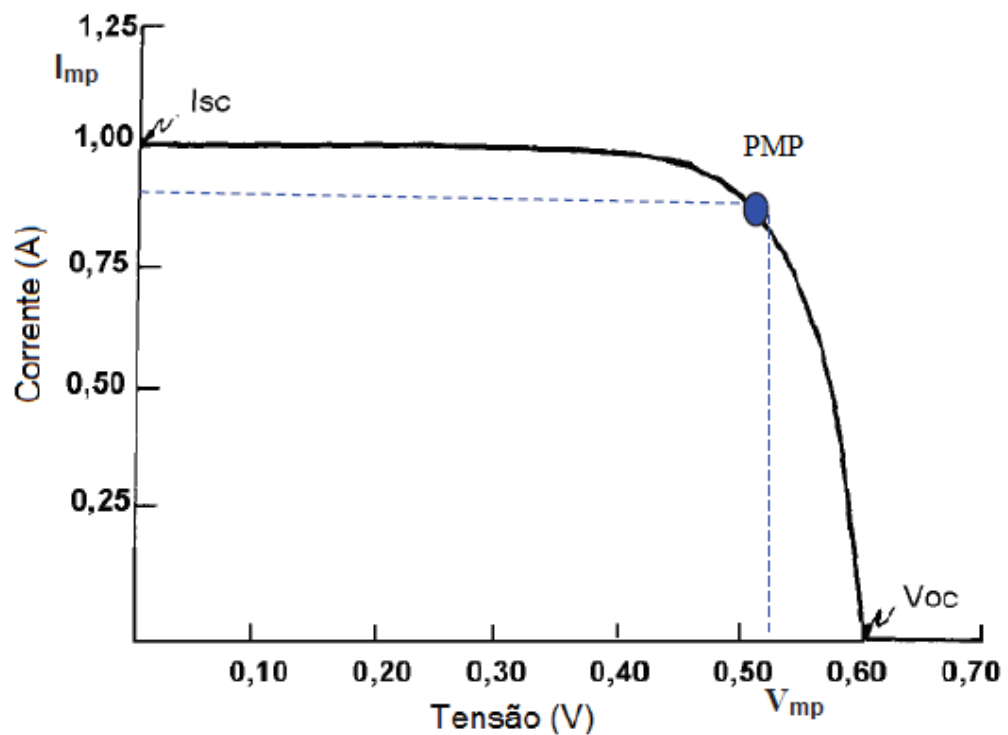
Figura 2.1 – Representação de célula, módulo e painel.



Fonte: (CARVALHO, 2012).

A carga conectada ao painel fotovoltaico define os parâmetros de tensão e corrente presentes nos terminais de saída, porém a característica da curva se mantém conforme ilustra a Figura 2.2.

Figura 2.2 – Curva I x V de uma célula de silício.



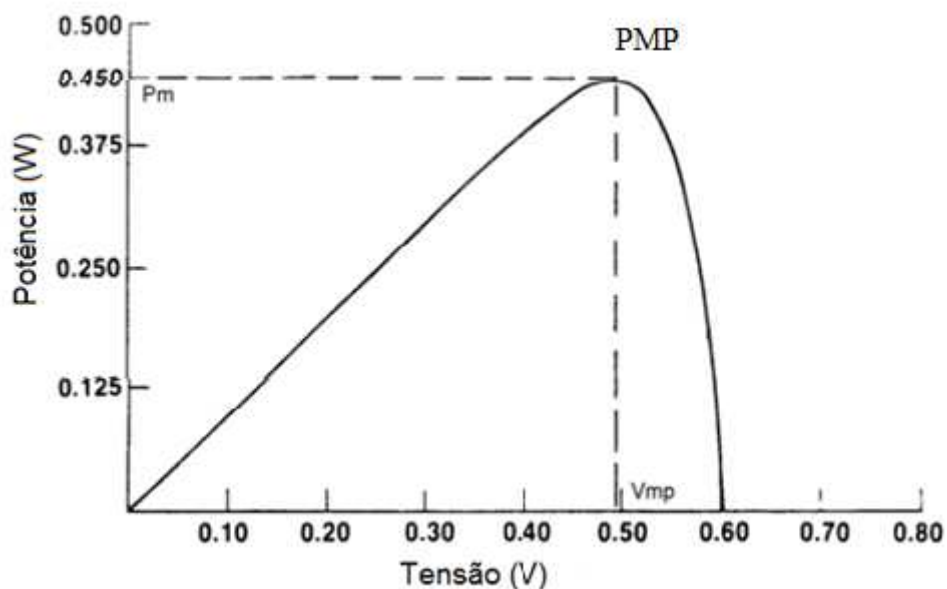
Fonte: (CRESESB, 2004).

A corrente I_{sc} representa a corrente no caso de o painel ser curto circuitado enquanto a tensão V_{oc} é a tensão entre os terminais em caso do circuito em aberto.

Na Figura 2.2 nota-se que a corrente permanece quase constante antes de atingir o ponto de máxima potência (PMP), caracterizando o painel como fonte de corrente. Diferente do trecho após o PMP em que a corrente cai abruptamente com uma tensão aproximadamente constante caracterizando o painel como fonte de tensão.

Com a multiplicação entre a corrente e a tensão do gráfico da Figura 2.2, a Figura 2.3 apresenta a relação entre a potência e a tensão no painel.

Figura 2.3 – Curva de potência em relação à tensão numa célula de silício.



Fonte: (CRESESB, 2004).

O gráfico representado pela Figura 2.3 expressa a existência do ponto de máxima potência no painel (PMP), e é nele que se deseja trabalhar em qualquer nível de radiação solar.

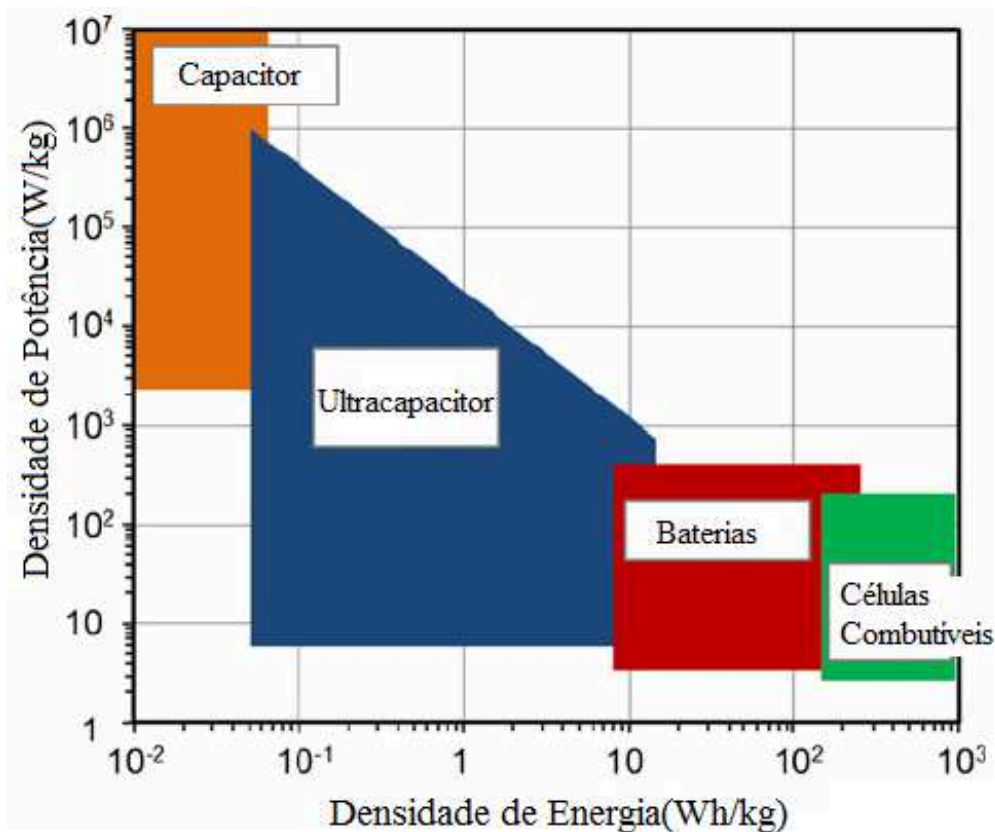
2.2 ULTRACAPACITORES

Para o armazenamento de grande quantidade de energia elétrica geralmente são utilizadas baterias, que possuem uma capacidade de armazenar lentamente uma grande quantidade de energia, porém sua liberação também deve ser lenta, caracterizando uma baixa potência em função de possuir uma resistência em série de valor elevado.

O uso dos capacitores para armazenar energia resolve o problema de baixas potências devido à velocidade com que conseguem liberar a energia armazenada, no entanto, capacitores tem baixa capacidade de armazenamento, comparado às baterias.

O ultracapacitor fornece as características intermediárias entre a bateria e o capacitor, como apresentado na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Relação entre componentes de armazenamento de energia pelo gráfico de Ragone.



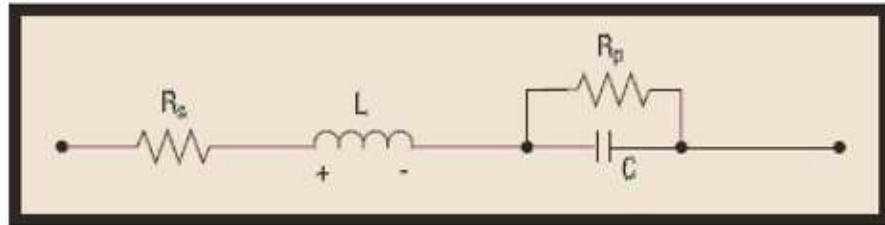
Fonte: (KÖTZ e CARLEN, 2000).

O ultracapacitor é uma solução tecnológica que supre necessidades intermediárias entre capacitores e baterias, com uma vantagem adicional referente à sua vida útil que é extremamente longa.

Um dos motivos do ultracapacitor ganhar bastante notoriedade, além de preencher o espaço entre as baterias e os capacitores, é o fato de terem uma vida útil muito alta, podendo suportar de quinhentos mil a um milhão de ciclos de carga/descarga antes que se deteriorem consideravelmente e de não auto descarregarem de forma rápida assim como a bateria (BURKE, 2000).

Para se modelar o ultracapacitor pode se utilizar o circuito apresentado na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Circuito equivalente de um ultracapacitor.



Fonte: (MARCELINO, 2014).

O ultracapacitor segue as características de um capacitor comum, com uma capacitância muito elevada, assim sendo, a energia armazenada é dada pela equação (2.0).

$$E = \frac{1}{2} C V_c^2 \quad (2.0)$$

Em que:

E: representa a energia armazenada no capacitor.

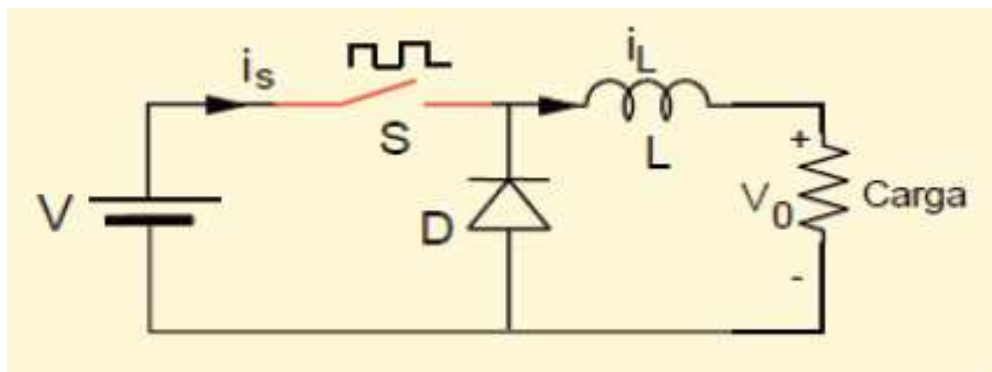
C: representa o valor da capacitância do capacitor.

V_c: representa o valor da tensão aplicada no capacitor.

3 CONVEROR BUCK

O conversor *Buck*, apresentado na Figura 3.0, é utilizado quando se deseja diminuir o nível de tensão DC de uma fonte para uma dada aplicação.

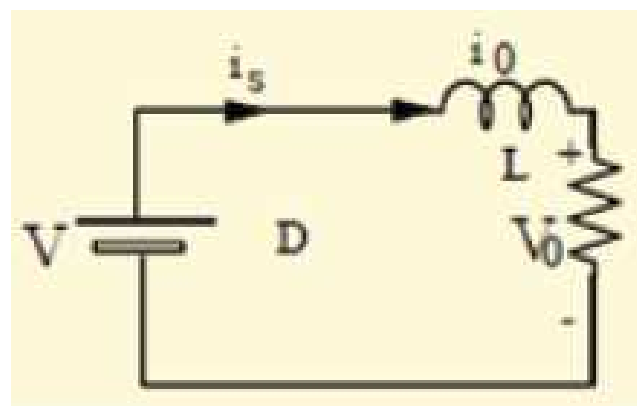
Figura 3.0 - Circuito conversor Buck.



Fonte: (ANTUNES, 2012).

Este circuito funciona em duas etapas. A primeira é quando a chave está fechada. A segunda é quando a chave está aberta. Atualmente o MOSFET é utilizado como chave na maioria das aplicações de baixas tensões e potências intermediárias. Com a chave fechada, tem-se um circuito equivalente apresentado na Figura 3.1 (ANTUNES, 2012).

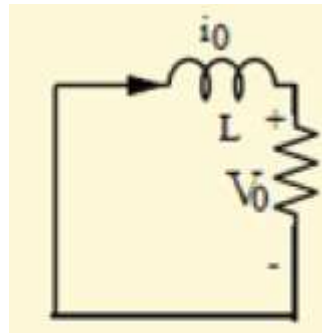
Figura 3.1 - Circuito equivalente com chave fechada.



Fonte: (ANTUNES, 2012).

O indutor L e o capacitor C armazenam certa quantidade de energia durante o período que a chave está fechada t_1 , determinado pelo circuito de controle que comanda a abertura e o fechamento da chave. Quando a chave abre, tem-se um circuito equivalente ao apresentado na Figura 3.2.

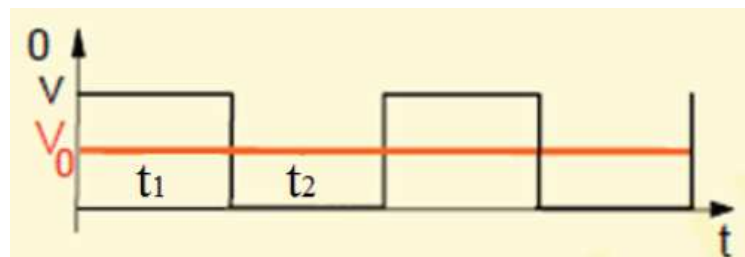
Figura 3.2 Circuito equivalente com chave aberta.



Fonte: (ANTUNES, 2012).

Como a corrente tende a variar bruscamente devido à abertura da chave, a tensão no indutor L é invertida, passando a fornecer tensão para a carga por um tempo t_2 , também determinado pelo circuito de controle da chave. O capacitor C diminui a tensão de *ripple* causada pela variação de tensão do indutor sobre a carga. Essas duas etapas de chaveamento se repetem, resultando em um nível de tensão média mais baixo na saída V_0 . Como apresentado na Figura 3.3.

Figura 3.3 Gráfico da tensão em cima do diodo (V_i) e da saída (V_0).

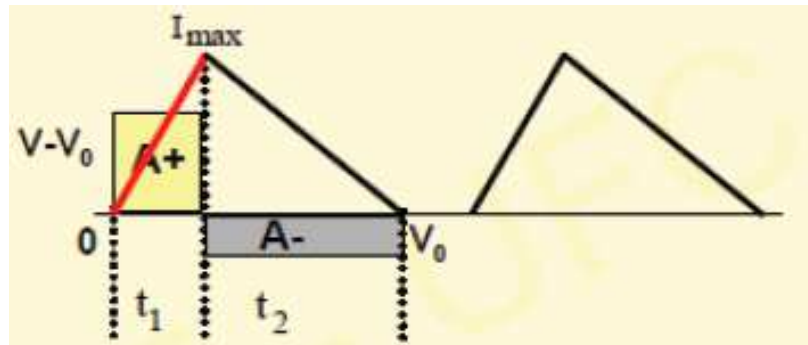


Fonte: (ANTUNES, 2012).

3.1 CÁLCULO DOS COMPONENTES DO CONVERSOR BUCK

Para se calcular os valores dos componentes L e C do circuito regulador *Buck*, é necessário considerar algumas características de funcionamento desses componentes. A Figura 3.4 apresenta o gráfico da corrente no indutor do circuito regulador *Buck* em função do tempo.

Figura 3.4 Corrente do indutor.



Fonte: (ANTUNES, 2012).

A indutância L do circuito da Figura 3.0 absorve energia durante o tempo t_1 em que a chave está fechada. (ANTUNES, 2012)

Considerando a diferença de tensão $(V - V_0)$ no indutor, sendo V_0 a tensão no diodo, e sabendo que em um indutor a corrente $i(t) = (1/L) \int_{-\infty}^t v(t) dt$, a corrente através do indutor com a chave fechada, mostrada na Figura 3.4 é expressa pela expressão (3.0).

$$i = \frac{(V - V_0)t}{L} \quad (3.0)$$

No instante t_1 a chave S abre e a corrente atinge seu valor máximo, dado pela expressão (3.1).

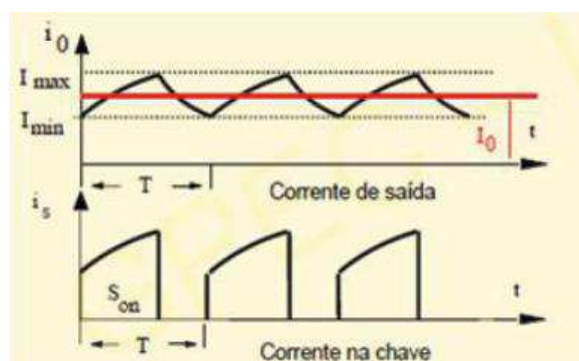
$$i_{m\acute{a}x} = (V - V_0) \frac{t_1}{L} \quad (3.1)$$

A energia armazenada na indutância em $t = t_1$ é dado pela expressão (3.2).

$$W = \frac{1}{2} L I^2_{max} \quad (3.2)$$

A Figura 3.5 apresenta o gráfico da corrente no indutor e a corrente na chave.

Figura 3.5 - Formas de onda no conversor Buck.



Fonte: (ANTUNES, 2012).

Quando a chave abre, e a tensão na indutância cai para o valor constante V_0 , devido ao diodo, a corrente então cai numa taxa constante, conforme a equação (3.3).

$$(3.3) \quad i = i_{m\acute{a}x} - \frac{V_0 t}{L}$$

A corrente cai para zero em t_2 , quando a indutância transfere toda sua energia para a carga. Um novo ciclo pode então ser iniciado.

Como a energia armazenada é igual à energia transferida, conforme Figura 3.5, as áreas A_+ e A_- são iguais.

Assim: $A_+ = A_- \rightarrow (V - V_0) t_1 = V_0 t_2$, resultando na equação (3.4).

$$t_2 = \frac{(V - V_0)t_1}{V_0} \quad (3.4)$$

Onde:

V: tensão de entrada [V];

V_0 : tensão de saída média [V];

t_1 : tempo em que a chave está ON [s];

t_2 : tempo em que a chave está em OFF [s].

A chave opera em alta frequência, a corrente na indutância varia entre i_{max} e i_{min} , com valor médio sendo dado pela equação (3.5).

$$i_0 = \frac{i_{max} + i_{min}}{2} \quad (3.5)$$

Enquanto a corrente de carga é contínua variando em torno de um valor médio, a corrente da fonte é pulsante. O valor médio dos pulsos de corrente da fonte i_{smed} é dado pela equação (3.6).

$$i_{smed} = i_0 \frac{t_1}{T} \quad (3.6)$$

onde:

i_{smed} : valor médio dos pulsos de corrente da fonte [A];

i_0 : corrente média na indutância [A];

T: período do sinal de chaveamento [s];

Pela lei da conservação de energia, a energia que entra no conversor é aproximadamente igual à que sai, assim a equação (3.7) expressa essa relação.

$$i_{smed} = V_0 i_0 \rightarrow \frac{i_0}{i_{smed}} = \frac{V}{V_0} \quad (3.7)$$

como:

$$V_0 = k V \quad (3.8)$$

e:

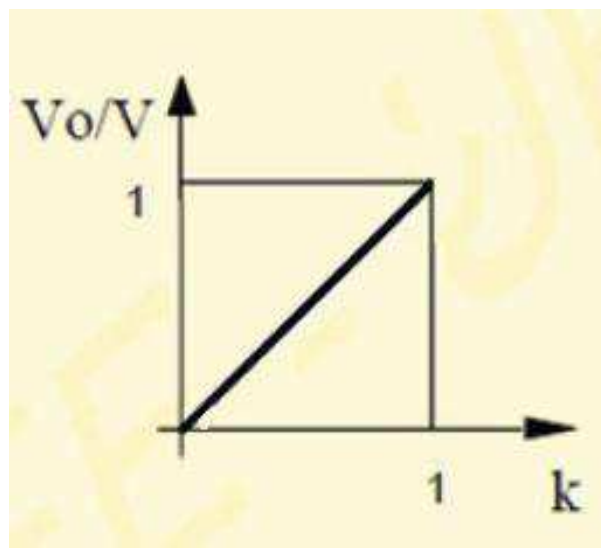
$$\frac{V}{V_0} = k = \frac{t_1}{T} \quad (3.9)$$

então:

$$\frac{i_0}{i_{smed}} = \frac{1}{k} \quad (3.10)$$

A função de transferência está apresentada na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Função de transferência do conversor abaixador (Buck).



Fonte: (ANTUNES, 2012).

As equações (3.9) e (3.10) sugerem que o conversor pode ser considerado como um transformador de corrente contínua, onde o ciclo de trabalho k é equivalente à relação de transformação (relação entre espiras) em corrente alternada (ANTUNES, 2012).

O valor da corrente de *ripple* na saída do conversor é dado pela equação (3.11).

$$\Delta i_L = \frac{(1-k)V}{Lf} \quad (3.11)$$

onde:

i_L : corrente no indutor [A];

V: tensão de entrada [V];

k: ciclo de serviço = t_1/T , $0 < k < 1$ [adimensional];

L: valor da indutância [H];

f: frequência do sinal de chaveamento [Hz].

A presença do capacitor em paralelo com a carga garante um menor *ripple* na tensão de saída. A tensão de *ripple* varia na proporção inversa do valor do capacitor e da frequência de chaveamento.

Em montagens práticas, quando se deseja um circuito com pequenas dimensões, aumenta-se o valor da frequência de chaveamento. Quanto maior essa frequência de chaveamento, menor o *ripple* na carga. A tensão de saída conserva a polaridade da tensão de entrada (ANTUNES, 2012).

O valor da tensão de *ripple* na saída do conversor é dado pela equação (3.12).

$$\Delta V_0 = \frac{Vk(1-k)}{8LCf^2} \quad (3.12)$$

onde:

C: valor da capacitância [F];

4 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo está presente a análise do circuito do conversor BUCK quanto aos cálculos das equações que descrevem o comportamento da corrente durante o chaveamento do MOSFET.

4.1 RESPOSTA DA CORRENTE DO CIRCUITO BUCK

De acordo com Navarro (2015), para calcular a resistência do circuito RLC, considerando que o banco de ultracapacitores de 4500 F vai ser carregado dentro de um período de 6 horas, levando em conta que se tem uma alta insolação no período das 10 horas da manhã até 16 horas, o valor da resistência a ser utilizada, de acordo com a equação (4.0).

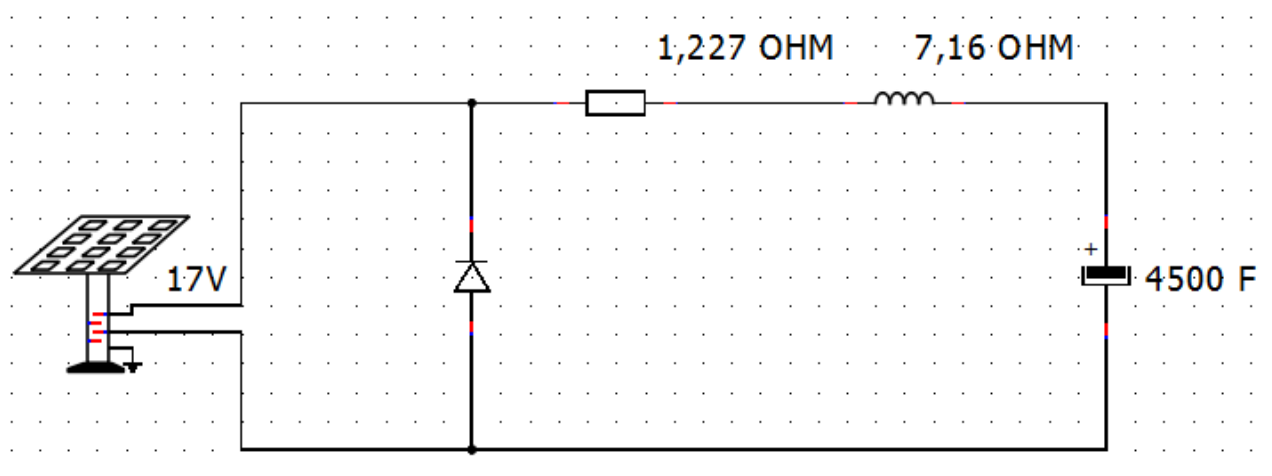
$$t. carga = 3,91RC \rightarrow 6.3600 = 3,91 \cdot R \cdot 4500 \quad (4.0)$$

Então:

$$R = 1,227 \Omega$$

Portanto o circuito RLC do conversor BUCK, desconsiderando a resistência série do indutor, fica com os valores mostrados na Figura 4.0.

Figura 4.0 - Circuito *Buck* com o *MOSFET* em curto.



Fonte: Autor.

Com a potência do painel definida em 40W, com insolação máxima, tem-se uma corrente de 2,35 A.

A equação (4.1) apresenta a potência no resistor.

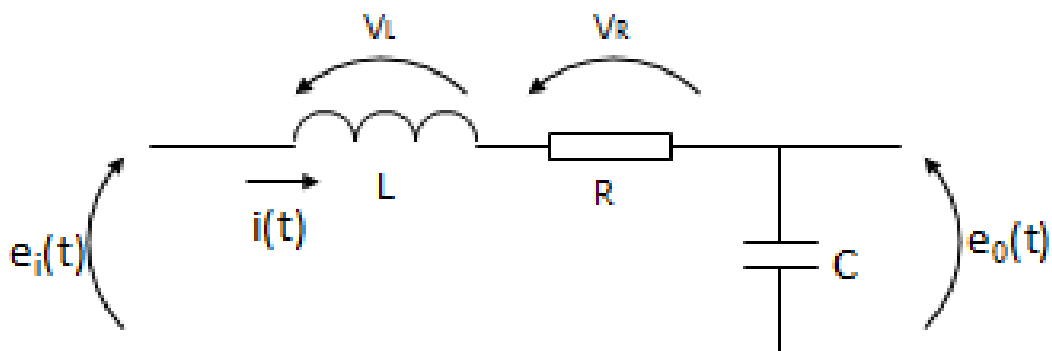
$$P = R \cdot I^2 \quad (4.1)$$

Tem-se então uma potência dissipada no resistor de 6,8 W.

Portanto se for possível retirar essa resistência, sem ultrapassar o valor limite da corrente do painel, tem-se um aumento no rendimento do circuito.

Para isso é necessário encontrar uma equação que descreva o comportamento da corrente em função do tempo. Analisando o circuito da Figura 4.1 e utilizando a Lei das malhas de Kirchhof, que consiste primeiramente em identificar as tensões nos componentes tem-se a equação (4.2).

Figura 4.1 - Tensões nos componentes.



Fonte: Autor.

$$e_i(t) - V_R(t) - V_L(t) - e_o(t) = 0 \quad (4.2)$$

onde:

e_i : tensão de entrada [V];

e_o : tensão do ultracapacitor [V];

V_R : queda de tensão no resistor[V];

V_L : queda de tensão no indutor[V];

Segundo Navarro (2015), o capacitor carregara a partir da metade da sua tensão nominal, e a energia armazenada, com a tensão do capacitor variando de zero até a metade da sua tensão nominal, é de apenas 25% da energia total, portanto, para o dimensionamento do painel fotovoltaico, esse tempo de carga do capacitor de zero até metade de sua tensão nominal é descontado, devido à pré-carga antes da instalação do sistema. Portanto e_o vale metade da tensão do capacitor que vale 10,8V. Portanto e_o varia de 5,4V a 10,8V.

Portanto foi considerado 11,6V como o valor de e_i , sendo e_i a tensão de entrada do painel, 17V, menos a tensão inicial de pré-carga do capacitor, 5,4V, que resulta em uma diferença de potencial de 11,6V.

Como as quedas de tensão são provocadas pela passagem da corrente pelos componentes, o segundo passo é substituir V_R , V_L e e_o , por equivalentes que contenham $i(t)$, por esse motivo foi equacionado o circuito da Figura 4.1, como mostrado na equação (4.3).

$$\frac{Ldi}{dt} + Ri(t) + \frac{1}{C} \int_0^t i(t)dt = e_i(t) \quad (4.3)$$

onde:

$$\frac{Ldi}{dt} = V_L;$$

$$Ri(t) = V_R;$$

$$\frac{1}{C} \int_0^t i(t)dt = e_o;$$

$e_i(t)$ = valor da tensão de entrada menos a tensão de pré-carga do capacitor.

E a equação (4.3) descreve o comportamento da corrente em função do tempo. Para a simulação foi usado o programa Scilab e a obtenção de um gráfico contendo uma curva de corrente pelo tempo. Para usar o programa foi preciso passar a equação (4.3) que está no domínio do tempo, para o domínio da frequência e aplicar os valores dos componentes a equação.

Aplicando Laplace em (4.3), tem-se a equação (4.4).

$$LSI(s) + RI(s) + \frac{I(s)}{CS} = E(s) \quad (4.4)$$

O valor da resistência do circuito não será nula devido à resistência do indutor. Os valores dos componentes foram retirados de Escudeiro (2017), que apresenta um cálculo mais aproximado de valores que podem ser usados para um protótipo do poste autossustentável, e para uma indutância de 14,05mH, tem-se uma resistência série de 0,038Ω.

Inserindo os valores dos componentes tem-se a equação (4.5).

$$0,0145I(S) + 0,038I(S) + \frac{I(S)}{3000S} = 11,6(S) \quad (4.5)$$

Portanto como função de transferência com os valores dos componentes tem-se a equação (4.6).

$$\frac{I(S)}{E(S)} = \frac{11,6S}{0,01405(s^2+2,7S+0,0237)} \quad (4.6)$$

Também é preciso calcular o tempo máximo em que o *MOSFET* irá conduzir. A corrente no circuito não deve atingir o valor de 2,35A, que é a corrente máxima do painel, dentro do tempo em que o *MOSFET* estiver conduzindo. O tempo máximo de condução depende de um fator K que é o *duty cycle* do sistema. Esse valor máximo se dá quando o circuito for alimentado com uma tensão de 17,6V, para manter o valor da tensão de saída em 10,8V, deve-se aplicar a equação (4.7).

$$duty\ cycle = \frac{10,8}{17,6} \cdot 100 = 62\% \quad (4.7)$$

O cálculo desse tempo é feito multiplicando o período T pelo fator K. O Período T vem da frequência de chaveamento do *MOSFET* que em Navarro (2015) foi estipulado em 25KHz. Portanto tem-se a equação (4.8).

$$t_1 = TxK \quad (4.8)$$

Portanto:

$$t_1 = TxK = \frac{1}{25 \cdot 10^3} \times 0,62 = 2,48 \cdot 10^{-5} \text{ segundos}$$

Portanto o *MOSFET* tem seu tempo máximo de condução de 24,8μs com insolação máxima.

Com esses valores calculados, usou-se o Scilab para simular a curva da corrente pelo tempo usando o código de programação contido na Figura 4.2.

Figura 4.2 - Código de programação para Scilab.

```

-->s=poly(0,'s');

-->n=11.6*s;

-->d=((s*s)+(s*2.7)+0.0237)*0.01405;

-->g=syslin('c',n,d)
g =

          11.6s
-----
0.0003330 + 0.037935s + 0.01405s2

-->t=0:0.00001:0.0001;

-->y=csim('step',t,g);

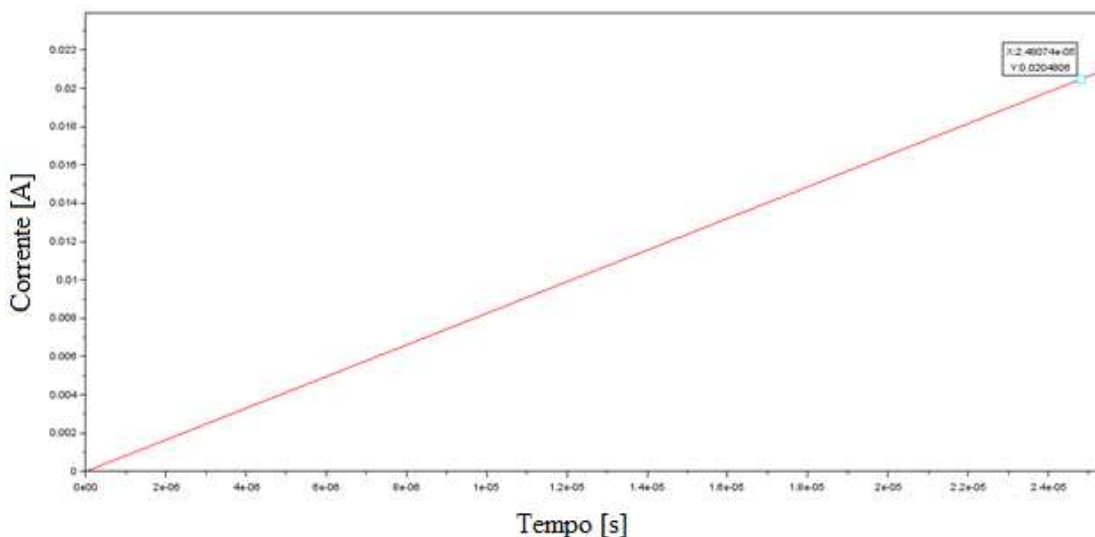
-->plot(t,y,'c')

```

Fonte: Autor.

Na primeira linha declara-se s como variável de um polinômio, na segunda linha declara-se o numerador da função, na terceira linha, o denominador da função, na quarta linha, g como função de n e d , na quinta linha, define-se t com intervalo de tempo e tempo máximo da simulação, na sexta linha, y será função de t e g , $csim$ é um comando para resposta temporal de um sistema linear e 'step' é função de Heaviside, e na sexta linha, plota-se o gráfico da Figura 4.3.

Figura 4.3 - Gráfico da resposta da corrente x tempo.



Fonte: Autor.

O gráfico da curva da Figura 4.3 apresenta que em $2,48.10^{-5}s$ a corrente chega a 0.02A, sendo bem menor que o valor de corrente máxima do painel.

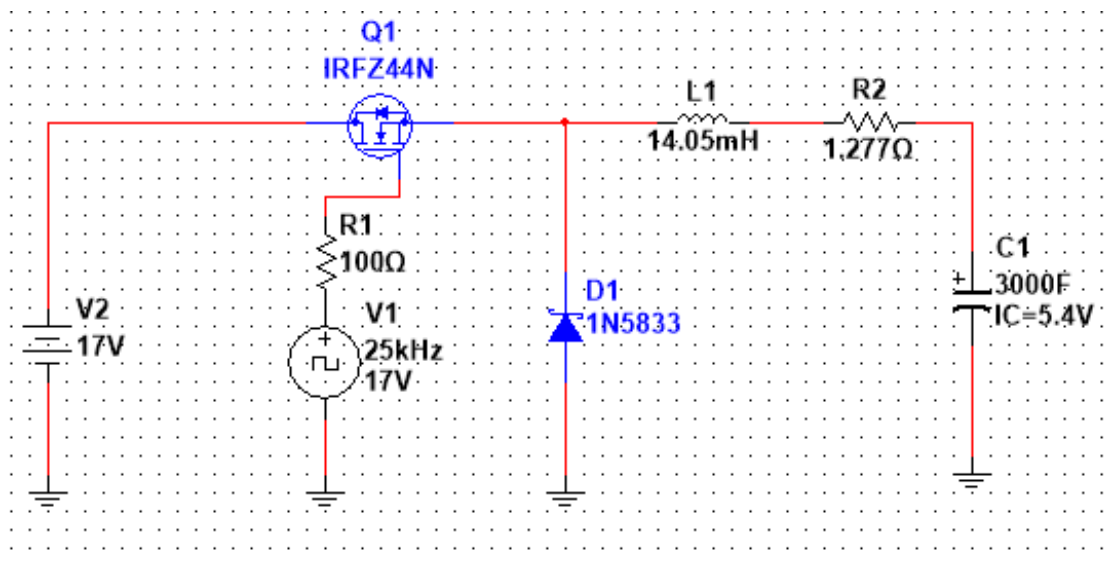
Outra análise que se fez necessária, uma vez que espera-se que a corrente aumente gradualmente com o circuito funcionando em chaveamento, foi comparar a resposta da corrente do conversor com um resistor de $1,227\Omega$ com a resposta da corrente do conversor que contém apenas a resistência série do indutor de 0.038Ω quando o circuito estiver operando em chaveamento.

Espera-se encontrar o tempo em que os dois circuito alcançam a corrente de 2.35A, que é corrente máxima do painel fotovoltaico.

Para isso foi montado dois circuitos no simulador Multisim para obter-se dois gráficos de corrente x tempo.

O primeiro circuito foi configurado com um resistor de $1,227\Omega$, indutor de $14,05mH$, capacitor de $3000F$, com tensão inicial de $5,4V$ e o MOSFET com frequência de chaveamento de $25kHz$ e ciclo ativo de $0,62\%$, como apresentado na Figura 4.4.

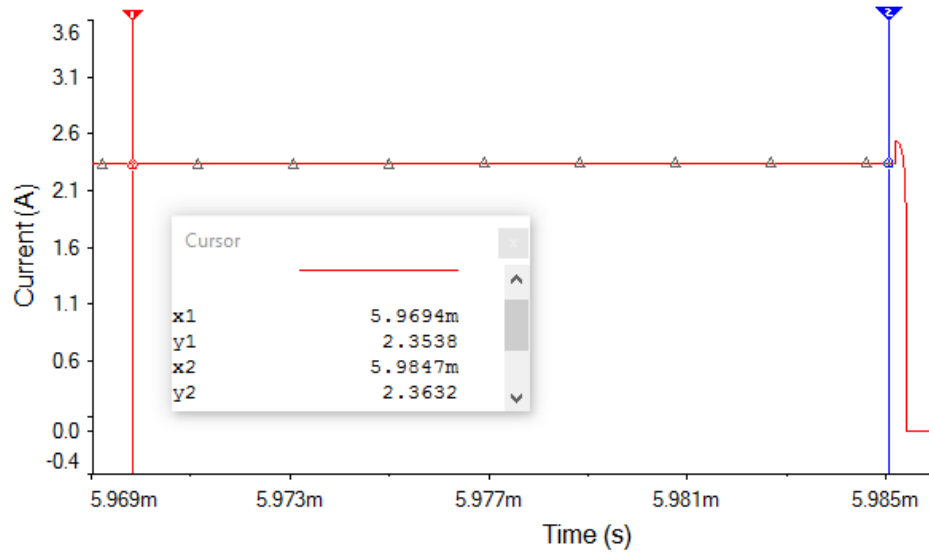
Figura 4.4 – Circuito do conversor com resistor de 1.227Ω .



Fonte: Autor.

Para o circuito da Figura 4.4 encontrou-se o gráfico apresentado na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Resposta da corrente x tempo do circuito do conversor com resistor de 1.227Ω .

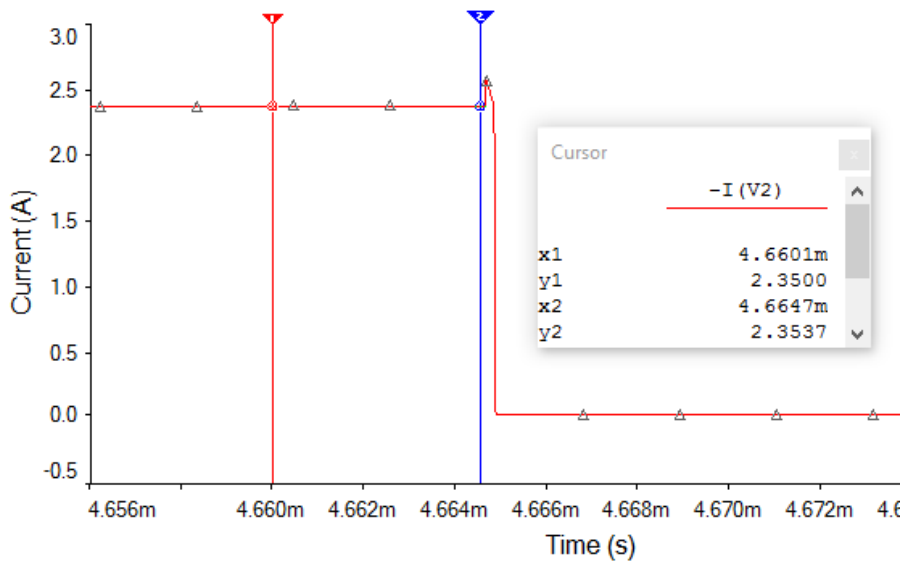


Fonte: Autor.

No gráfico da Figura 4.5, a corrente do circuito do conversor com resistor de 1.227Ω chega à 2.35A em 5,96ms.

O segundo circuito foi configurado como apresentado na Figura 4.4, com exceção do resistor que foi mudado para o valor de $0,038\Omega$. Com essa mudança encontrou-se o gráfico apresentado na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Resposta da corrente x tempo do circuito do conversor com resistor de $0,038\Omega$.



Fonte: Autor.

No gráfico da Figura 4.6, a corrente do circuito do conversor com resistor de $0,038\Omega$ chega à $2.35A$ em $4,66ms$.

Portanto analisando o gráfico da Figura 4.5 e 4.6, nota-se que há diferença apenas no tempo em que a corrente atinge seu máximo.

4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Pode-se analisar o comportamento do indutor, verificando a forma de onda de corrente produzida e, segundo suas propriedades, observa-se que o indutor tem a tendência de se opor a variações bruscas de corrente, respondendo com uma alta tensão entre seus terminais na tentativa de manter a corrente constante. O mesmo tipo de oposição pode-se constatar submetendo o indutor à variações bruscas de tensão. Nesse caso, sua reação também será no sentido de impedir variações rápidas da corrente, ou seja, ele tenta manter a corrente que o atravessa em um valor constante, retardando sua variação.

Portanto com o resultado das simulações do novo circuito sem a resistência inserida, verificou-se que não é necessária adição dessa resistência para o funcionamento do conversor, assim aumentando sua eficiência.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o sistema de iluminação autossuficiente se mostra uma alternativa eficaz para baratear os sistemas de iluminação pública. Os painéis fotovoltaicos têm apresentado constante redução de preços para os módulos de silício cristalino e também as células de filme fino. Atualmente o custo do sistema fotovoltaico é 60% dos painéis, cerca de 10% referente ao conversor e o restante à estrutura. Portanto é importante que busque-se o máximo de eficiência nos sistemas de conversão e armazenamento de energia a fim de aproveitar toda a energia gerada.

As simulações realizadas permitiram comprovar que mesmo com a retirada da resistência, o sistema proposto é viável. Aumentando assim sua eficiência já que não há perdas nessa resistência e também não há aquecimento pela passagem da corrente nesse componente.

Como sugestão para futuros trabalhos, permite sugerir-se a simulação do sistema a pulsos periódicos com uma fonte de carga limitada, variando sua tensão quando a corrente ultrapassar o valor máximo, a implementação de um segundo conversor *Buck* que funcione como complemento ao primeiro, trabalhando quando o primeiro estiver com seu MOSFET em estado de corte, isto é, não estiver capitando energia do painel a adaptação do projeto para componentes com valores comerciais, com a construção de um protótipo, permitindo também uma análise econômica da viabilidade do projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTUNES, F. L. M. Conversores CC-CC. 2012 Disponível em: <http://www.dee.ufc.br/~fantunes/Elet_Potencia/Aulas/Eletronica%20de%20Potencia%20unidade%206.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2012.

BURKE, A. Ultracapacitors: why, how and where is the technology. **Journal of Power Sources**, [s.l.], v. 91, p. 37-50, 2000.

CARVALHO, E. P. **Uma Nova Abordagem no Rastreamento do Poto de máxima Potência em Painéis Fotovoltaicos**. 2012. 134 f. Dissertação (mestrado) – Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica, 2012.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. 2001. **Energia solar – Princípios e aplicação**. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/tutorial_solar_2006.pdf. Acesso em: 04 ago. 2011.

ESCUDEIRO, G. A. **Dimensionamento e simulação de um poste de iluminação autossuficiente**. 2017. 12 f. Dissertação (mestrado) – Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Elétrica, 2017.

FRANCISQUINI, A. A. **Estimação de curvas de carga em pontos de consumo e em transformadores de distribuição**. 54 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus de Ilha Solteira, 2006.

ILUMINAÇÃO PÚBLICA – Dados enegeticos – Governo do Estado de São Paulo. **Imuminação pública guia do gestor**. Disponível em: http://dadosenergeticos.energia.sp.gov.br/portalsev2/intranet/BiblioVirtual/eletrica/Cartilha_Iluminacao_Publica.pdf. Acesso em: 29 ago. 2017.

KÖTZ, R; CARLEN, M. Principles and applications of electrochemical capacitors. **Electrochimica Acta**,[s.1], v.45, p. 2483-2498, 2000.

MARCELINO, M. A. **Sistemas de iluminação autossuficiente utilizando painel fotovoltaico, ultracapacitor e LED em configurações otimizadas trabalhando no ponto de potência máxima** (BR 10 2014 026215 6). Revista da Propriedade Industrial, v. 2363, p. 138, 2016.

NAVARRO, L. C. Sistema Autônomo de Iluminação Utilizando Energia Solar. 2015. 77 f. Trabalho de Graduação – Universidade Estadual Paulista, Júlio de Mesquita Filho Campus de Guaratinguetá, 2015.

PEREIRA, L. O. **Projeto de Conversor Buck Aplicado à Alimentação de Ultracapacitores por Painel Fotovoltaico.** 55 f. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica e Eletrônica – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Taubaté, Taubaté, 2016.