

## GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA ENERGIA TÉRMICA

**Rodrigo de Sousa e Silva** – rodrisilva@cefetmg.br

**Yan Ambrósio de Oliveira** – yanambrosio@hotmail.com

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG  
Av. Monsenhor Luiz de Gonzaga, 103  
37250-000 – Nepomuceno – Minas Gerais

**Resumo:** *Uma das principais preocupações da sociedade atual tem sido o desenvolvimento de fontes alternativas de energia elétrica. Produzir eletricidade a partir de meios que não agredam o meio ambiente ou aproveitem outras modalidades de energia, tornou-se um campo fértil de pesquisas. Recentes estudos têm-se voltado para uma forma alternativa de produção de energia elétrica, que consiste em aproveitar e converter o calor gerado por sistemas em energia elétrica. Para tal, faz-se uso de um fenômeno denominado Efeito Seebeck, presente em módulos termoelétricos. Ele converte o calor proveniente de uma região em uma diferença de potencial. Diante do exposto, é apresentado um estudo sobre uma forma de conversão de energia térmica em energia elétrica, utilizando o princípio do Efeito Seebeck. O trabalho exhibe por meio de simulações e análises de resultados, que é possível utilizar módulos termoelétricos para geração de energia elétrica, invertendo-se apenas o fluxo de potência. Por fim, é mostrado que os valores de tensões e correntes obtidos a partir do módulo termoelétrico em conjunto com um conversor Boost CC/CC, são suficientes para o acionamento de um motor de corrente contínua.*

**Palavras-chave:** *Conversor boost. Gerador termoelétrico. Efeito seebeck.*

### 1 INTRODUÇÃO

Devido à crescente limitação de recursos energéticos, torna-se cada vez mais necessário a pesquisa de formas alternativas de se produzir energia elétrica. Aliado a isso, segue também a necessidade do uso racional de eletricidade (ANTUNES, 2011). A busca por fontes alternativas de energia se une com o conceito mais amplo de conservação de energia e reaproveitamento energético, relacionado principalmente ao uso do calor dissipado em processos industriais. Dentro do meio industrial há uma excessiva quantidade de perda de energia na forma de calor. Dentro desse cenário surgem algumas formas de se reaproveitar a energia dissipada na forma de calor para a produção de energia elétrica. Existem na literatura especializada dois efeitos que se enquadram nessa perspectiva de fontes alternativas de energia. São os Efeitos Peltier e Seebeck (BASTOS, 2010).

O Efeito Peltier é o mais conhecido e utilizado pela indústria. Ele consiste em converter energia elétrica em energia térmica para refrigerar sistemas, tais como: bebedouros de água e minigeladeiras. O outro fenômeno considerado é o Efeito Seebeck, tema principal do projeto. Esse efeito é basicamente o inverso do Efeito Peltier.

O Efeito Seebeck foi observado pela primeira vez em 1821 pelo físico Johann Seebeck. Ao unir dois fios de metais diferentes para formar um circuito, ele descobriu que aquecendo um lado a uma temperatura elevada e o outro mantido a uma temperatura mais fria, gerava-se um campo elétrico ao redor do circuito de diferentes temperaturas. O Efeito Seebeck é, em termos gerais, a aplicação de um gradiente de temperatura nos lados do módulo termoeletrico e nos terminais de acesso, o surgimento de uma diferença de potencial elétrico. Pelo fato de não utilizar dispositivos móveis (tais como nos geradores convencionais), os termogeradores baseados no Efeito Seebeck têm despertado o interesse de diversos pesquisadores de várias áreas (FERNANDES, 2012).

Os chamados efeitos termoeletricos permitem que a energia térmica e energia elétrica possam ser convertidas de uma forma para a outra pela simples inversão do fluxo de potência. O campo de aplicação dessa técnica é o mais variado possível. Fazendo-se a configuração correta dessas células (em série ou paralelo) podem-se ter tensões e correntes em diversos valores. Pode-se aproveitar o calor produzido em processos industriais e convertê-lo em energia elétrica para alimentar outras cargas industriais. A corrente produzida CC pelo módulo termoeletrico é facilmente convertida em corrente CA através do uso de inversores. Pode-se utilizar o calor produzido em certas regiões do motor de um automóvel e com isso carregar uma bateria e eliminar a necessidade do uso do alternador, o que diminuiria significativamente o peso do automóvel.

Já os conversores CC/CC chaveados são circuitos eletrônicos amplamente utilizados em aplicações onde se faz necessário o processamento de energia elétrica com maior eficiência, isso graças a utilização de uma elevada frequência de comutação do interruptor associado a diferentes estruturas. Cabe destacar que a natureza não linear desse circuito eletrônico torna sua análise, tanto qualitativa quanto quantitativa, mais complexa se comparada a estruturas de circuitos do tipo linear (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 1989). Portanto, especial atenção é exigida neste estudo investigativo relacionado ao projeto de tais elementos de circuito, afim de garantir a correta especificação dos mesmos tanto em nível de simulação quanto prático (RASHID, 1999).

No projeto do conversor *boost* são considerados aspectos extremamente importantes, tais como: frequência de comutação, ganho de tensão, modo de operação (condução contínua, condução descontínua ou condução crítica), ondulação de tensão na saída, corrente e potência a serem utilizados no processamento de energia. Posteriormente, com o intuito de validar as Equações de projeto obtidas através da análise teórica e matemática são apresentados vários resultados de simulação, analisados em detalhe por meio de gráficos e tabelas. Além disso, são exibidos resultados experimentais incluindo sinais de tensão e corrente no interruptor e também tensão e corrente no diodo.

Importante destacar que um dos subsídios do ponto de vista prático para o desenvolvimento deste trabalho de iniciação científica, foi um outro projeto de Bic-Jr (VAZ; OLIVEIRA, 2018), cujo protótipo encontra-se disponível em perfeitas condições operacionais no laboratório de Eletrônica Geral e Industrial do CEFET-MG, unidade de Nepomuceno.

## 2 ANÁLISE TEÓRICA E MATEMÁTICA

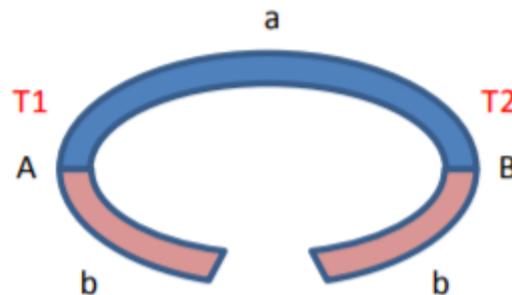
### 2.1 Efeito Seebeck

O efeito Seebeck pode ser descrito através do ponto de vista de um termopar. Um termopar (transdutor – junção bimetálica que não necessita de qualquer fonte de alimentação externa, e que produz por si próprio um sinal analógico de corrente ou tensão, quando estimulado por alguma forma de energia como, por exemplo, variação de temperatura), nada

mais é do que uma junção metálica de duas substâncias diferentes, ou ligas metálicas. Os termopares geram pequenas diferenças de potencial, da ordem de microvolts por grau de variação de temperatura ( $\mu\text{V/K}$ ). Este efeito é medido por comparação da localização da junção num ambiente mais quente (ou mais frio) em relação à temperatura ambiente e é ligado eletricamente a uma carga resistiva (FERNANDES, 2012).

A Figura 1 exibe um circuito formado por dois condutores distintos. No circuito, A e B formam uma junção de dois metais ou ligas metálicas, que se encontram em temperaturas distintas, designadas T1 e T2.

Figura 1 – Esquema básico de um termopar.



Fonte: Fernandes, 2012.

onde:

A e B – junções;

a – condutor do tipo a;

b – condutor do tipo b.

Considerando a relação entre as temperaturas de um termopar, ou seja, supondo  $T1 > T2$ , surgirá uma tensão U que é desenvolvida aos terminais do circuito (circuito aberto) e pode ser calculada em função da variação de temperatura, conforme a Equação 1.

$$U = \alpha \cdot (T1 - T2) \quad (1)$$

Em que U é a tensão em volts, T1 e T2 as temperaturas em kelvin das junções do circuito termopar, e  $\alpha$  o coeficiente de Seebeck. Pode-se também determinar o valor deste coeficiente em função das outras variáveis, conforme as Equações (2) e (4).

$$\alpha = \frac{U}{(T1 - T2)} \quad (2)$$

$$\Delta T = T1 - T2 \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{U}{\Delta T} \quad (4)$$

Este coeficiente para diferenças de temperatura pequenas é quase linear. Se a força eletromotriz criada circula no sentido dos ponteiros do relógio, então  $\alpha$  é positivo, caso contrário é negativo. O coeficiente de Seebeck é medido em (V/K) ou em ( $\mu\text{V/K}$ ) face à grandeza do valor da força eletromotriz. O coeficiente de Seebeck é uma propriedade do material. Este coeficiente pode tomar valores positivos ou negativos. A Tabela 1 exibe alguns dos principais metais/ligas e outros materiais e seu respectivo coeficiente de Seebeck.

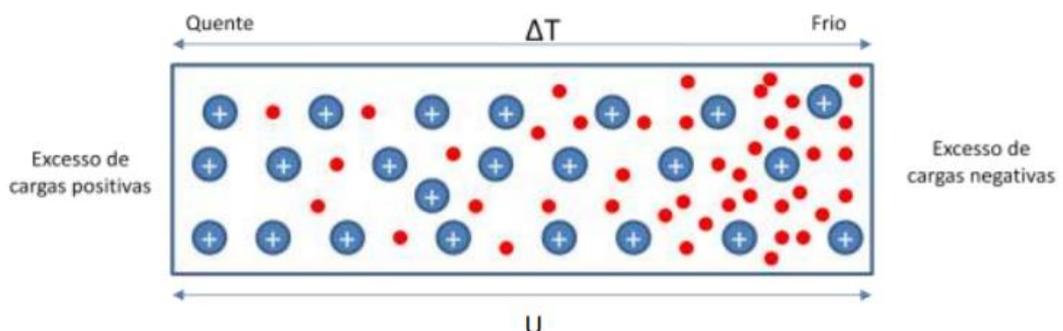
Tabela 1 – Coeficientes de Seebeck para ligas e metais.

Metais/Ligas e outros materiais	Coeficiente de Seebeck ( $\mu\text{V/K}$ )
Antimônio	47
Níquel crômio	25
Cádmio	7,5
Ouro	6,5
Prata	6,5
Cobre	6,5
Alumínio	3,5
Platina	0
Sódio	-2

Fonte: Fernandes, 2012.

O surgimento da força eletromotriz é fundamentado no deslocamento de elétrons da camada de valência de uma substância (condutora – metal ou liga metálica), de um local com temperatura mais elevada para um local com temperatura mais baixa. Atente-se na Figura 2.

Figura 2 – Deslocação de elétrons de uma fonte quente para uma fonte fria.



Fonte: Fernandes, 2012.

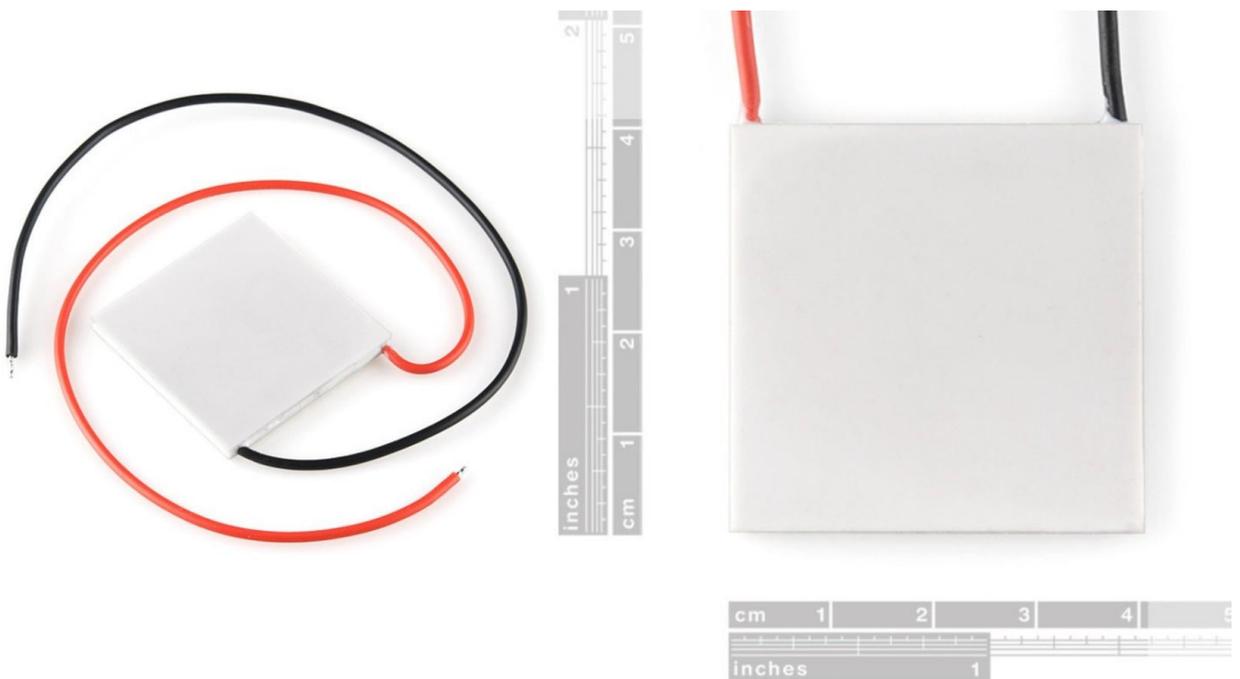
O condutor (metal, liga ou semiconductor) é aquecido numa das extremidades. A energia calorífica é transmitida aos elétrons do nível de valência, que ao saltarem de suas órbitas, tornam-se elétrons livres, iniciando-se assim um processo de deslocamento para as zonas mais frias do condutor, onde encontram-se níveis de energia mais baixos. A zona aquecida fica

com mais átomos e sem elétrons na camada de valência, ou seja, com excesso de cargas positivas (prótons), enquanto as zonas mais frias ficam com um excesso de elétrons livres. Esta migração de elétrons livres termina, quando é atingido o equilíbrio, ou seja, quando a tensão ( $U$ ) for superior à energia que os elétrons possuem para se movimentar. Esta diferença de potencial continuará a existir até que se atinja um estado de equilíbrio dinâmico entre os elétrons que fluem pelo gradiente de temperaturas e a repulsão eletrostática devido ao excesso de cargas negativas na parte fria. Se for mantido a fonte de calor, a migração de elétrons continuará (condução térmica) até que seja atingido o equilíbrio do gradiente térmico (FERNANDES, 2012).

## 2.2 Pastilha Termoelétrica Peltier

A Figura 3 exibe uma pastilha termoelétrica peltier (modelo: TEC1-12706). Apesar do nome atrelado ao fenômeno físico Peltier, sua versatilidade permite também sua utilização para o Efeito Seebeck. Ela será utilizada na próxima etapa do projeto para a confecção do sistema de módulos termoelétricos. Suas especificações também podem ser observadas a seguir.

Figura 3 – Pastilha Termoelétrica Peltier TEC1-12706.



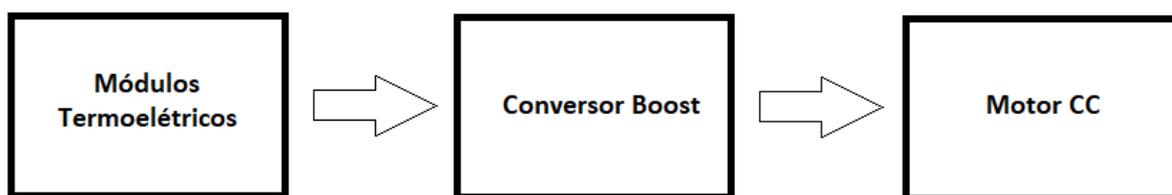
Fonte: Autores, 2019.

- Faixa de temperatura:  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- Tensão de operação: 0 - 15,2 VCC;
- Corrente de operação: 0 - 6 A;
- Potência máxima: 60 W;
- Dimensões: 40 mm x 40 mm.

Os primeiros testes experimentais realizados foram considerados satisfatórios, exibindo níveis de tensão e corrente suficientes para o acionamento de um motor de corrente contínua de pequeno porte. Neste caso, não houve a necessidade da inclusão do circuito auxiliar do tipo elevador de tensão, o *Boost*.

A próxima etapa do projeto será a montagem de um protótipo de pastilhas peltier associados em série, pois obteve os melhores resultados de aproveitamento energético. O sistema idealizado será composto da seguinte maneira: serão utilizadas duas tubulações paralelas e isoladas fisicamente entre si. De um lado da tubulação passará um fluido quente e do outro um frio. As pastilhas serão colocadas entre as tubulações, obedecendo corretamente as faces quente/fria estabelecidas. As tubulações serão feitas de cobre que possui um excelente custo benefício e significativo coeficiente de Seebeck (conforme Tabela 1). Serão isoladas do meio externo por meio de um material térmico isolante ainda não definido. A vedação é de extrema importante, a fim de manter a variação de temperatura entre as faces por um maior período de tempo. A diferença de potencial gerada pelo sistema, será acoplada a entrada do conversor *Boost*, conforme Figura 4.

Figura 4 – Diagrama esquemático do projeto.



Fonte: Autores, 2019.

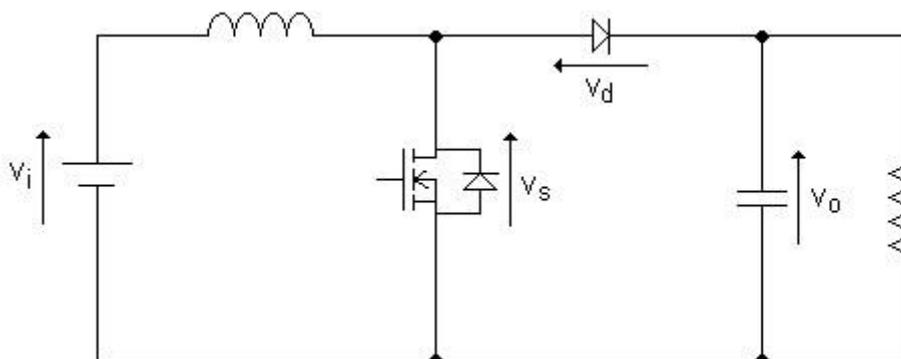
Por fim, idem aos resultados de simulação obtidos, deseja-se obter níveis de tensão e corrente suficientes para o acionamento de um motor CC/CC de médio porte.

### 2.3 Conversor *Boost* CC/CC

Esta subseção tem como objetivo fazer uma abordagem teórica da estrutura do conversor CC/CC do tipo elevador de tensão, o *Boost*. Análise da literatura técnica especializada revela a existência de uma certa carência de maiores informações relacionadas ao projeto dos elementos do circuito de potência do conversor *Boost*, fundamental no caso do projeto proposto a fim de garantir níveis de tensão do sistema constante.

Seu princípio de funcionamento está baseado no carregamento de energia num indutor e a posterior transferência de energia juntamente com a fonte de tensão de entrada, para a saída do circuito (LANDER, 1996). Análise de pequenos detalhes são indispensáveis no projeto otimizado dos elementos de filtro e semicondutores do circuito de potência do conversor, os quais resultam em um melhor aproveitamento da eficiência energética desse tipo de circuito. A Figura 5 exhibe a estrutura do conversor *Boost* CC/CC.

Figura 5 – Estrutura do conversor *boost* CC/CC.



Fonte: Vaz; Oliveira, 2018.

Ao longo desta etapa são desenvolvidas Equações de projeto para a especificação dos elementos do circuito de potência do conversor *Boost*. No entanto, devido a limitação de espaço, neste artigo serão apresentados somente as Equações finais do desenvolvimento teórico e matemático (VAZ; OLIVEIRA, 2018).

## 2.4 Ganho estático

O cálculo do ganho estático pode ser obtido através da relação entre a tensão de saída ( $V_o$ ) e a tensão de entrada ( $V_i$ ) do circuito. Alternativamente, o ganho também pode ser calculado através da relação do tempo de carga ( $t_c$ ) e descarga ( $t_d$ ) do indutor. Matematicamente, o ganho pode ser expresso através da Equação (1).

$$G = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{t_c}{t_d} \quad (5)$$

## 2.5 Tempo de carga ( $t_c$ ) e descarga ( $t_c$ ) do indutor

O tempo de carga e descarga do indutor, pode ser calculado através de parâmetros de entrada pré-estabelecidos, tais como: período de comutação do interruptor ( $T_s$ ), razão cíclica de operação do indutor ( $D_I$ ), indicado em (2) e também do ganho estático ( $G$ ), descrito em (1). Matematicamente, o cálculo do tempo de carga e descarga pode ser expresso através das Equações (7) e (8), respectivamente.

$$D_I = \frac{t_c + t_d}{T_s}, D_I \in [0,1] \quad (6)$$

$$t_c = \frac{(G - 1)}{G} \cdot D_I \cdot T_s \quad (7)$$

$$t_d = \frac{D_I \cdot T_s}{G} \quad (8)$$

## 2.6 Indutor de filtro ( $L$ )

O cálculo do indutor de filtro pode ser descrito matematicamente através da Equação (9). Além dos parâmetros descritos anteriormente, para obtenção do seu valor é necessário conhecer a potência de entrada do circuito ( $P_i$ ) e o valor mínimo de corrente no indutor ( $K$ ).

$$L = \frac{V_i \cdot t_{c(max)}}{\left[ \frac{2 \cdot P_i \cdot T_s}{V_i \cdot (t_{c(max)} + t_{d(max)})} - 2 \cdot K \right]} \quad (9)$$

## 2.7 Capacitor de filtro ( $C$ )

Para o cálculo do capacitor de filtro do circuito de potência do conversor *Boost* CC/CC é necessário levar em consideração duas situações de projeto. No primeiro caso, quando o valor mínimo de corrente no indutor ( $K$ ) for menor que a corrente média de saída ( $I_o$ ), deve-se utilizar para cálculo do capacitor de filtro a equação (10). Por outro lado, se o valor mínimo de corrente no indutor for maior ou igual que a corrente média de saída, deve-se utilizar a equação (11). Outro parâmetro importante a ser considerado no cálculo do capacitor de filtro é

a máxima ondulação de tensão através do capacitor ( $\Delta V_{c(max)}$ ), definido nas especificações do projeto.

$$C_o = \frac{1}{\Delta V_{c(max)}} \cdot \frac{[V_i \cdot t_{c(max)} + L \cdot (K - I_o)]^2}{2 \cdot L \cdot (V_o - V_i)} \quad (10)$$

$$C_o = \frac{1}{\Delta V_{c(max)}} \cdot \left[ \frac{(V_i \cdot t_{c(max)})^2}{2 \cdot L \cdot (V_o - V_i)} + \frac{(V_i \cdot t_{c(max)}) \cdot (K \cdot I_o)}{(V_o - V_i)} \right] \quad (11)$$

## 2.8 Interruptor

As Equações para cálculo da corrente média ( $I_{SWmed}$ ), corrente eficaz ( $I_{SWef}$ ) e tensão máxima ( $V_{SWmax}$ ) no interruptor, podem ser descritas matematicamente em (12), (13) e (14), respectivamente. Além dos parâmetros descritos anteriormente é considerado no cálculo o valor do estresse tensão adicional no interruptor ( $X$ ) e a ondulação da corrente no indutor ( $\Delta I$ ).

$$I_{SWmed} = \frac{t_c}{T} \cdot \left( K + \frac{\Delta I}{2} \right) \quad (12)$$

$$I_{SWef} = \sqrt{\frac{t_c}{T} \cdot \left( K^2 + K\Delta I + \frac{\Delta I^2}{3} \right)} \quad (13)$$

$$V_{SWmax} = V_o + X \quad (14)$$

## 2.9 Diodo

Análogo a análise do interruptor, as Equações para cálculo da corrente média ( $I_{Dmed}$ ), corrente eficaz ( $I_{Def}$ ) e tensão máxima ( $V_{Dmax}$ ) no diodo, podem ser descritas matematicamente nas Equações (15), (16) e (17), respectivamente.

$$I_{Dmed} = \frac{t_d}{T} \cdot \left( K + \frac{\Delta I}{2} \right) \quad (15)$$

$$I_{Def} = \sqrt{\frac{t_d}{T} \cdot \left( K^2 + K\Delta I + \frac{\Delta I^2}{3} \right)} \quad (16)$$

$$V_{Dmax} = V_i \quad (17)$$

## 3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Os resultados de simulação apresentados a seguir foram obtidos através do *software* de simulação *Psim*. Para tal, foram associadas quatro pastilhas em série a fim de se obter um valor de tensão de entrada aproximado para a simulação. Com o sistema ainda em fase de testes e de acordo com as medições realizadas, obteve-se em média 5,5 V.

É importante destacar que para garantir a operação estável em regime permanente da estrutura analisada (Figura 5), foi necessário a inclusão de um resistor de entrada ( $0,15\Omega$ ). Isso porque tal resistor permite o amortecimento da oscilação natural do sistema e pouco afeta a operação do sistema em termos de perdas.

Neste caso, tem-se o conversor operando no modo de condução contínuo. Considerando os dados de entrada da Tabela 2 e utilizando as Equações de projeto, resulta os parâmetros de simulação da Tabela 3.

Tabela 2 - Parâmetros de entrada.

Parâmetro	Valor
$V_i$	5,5 V
$V_o$	50 V
$f$	25 kHz
$P$	300 W
$K$	2 A
$D_I$	1
$\Delta V_o$	0,5 V

Fonte: Autores, 2019.

Tabela 3 - Parâmetros de simulação.

Parâmetro	Valor
$t_c + t_d$	40 $\mu s$
$t_c$	35,60 $\mu s$
$t_d$	4,4 $\mu s$
$I_o$	6 A
$\Delta I$	105,09 A
$G$	9,09
$L$	1,86 $\mu H$
$C$	427 $\mu F$

Fonte: Autores, 2019.

Análise dos valores apresentados revela que nesse caso o circuito opera no modo de condução contínuo, conforme previsto inicialmente. Além disso, o nível da tensão de saída  $V_o$  alcançado estão de acordo com o esperado, ou seja, suficiente para o acionamento de um motor de corrente contínua de porte médio. Em contrapartida, a grande variação de corrente no indutor ( $\Delta I$ ) pode colocar em risco todo funcionamento do sistema.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A comparação entre os resultados teóricos e matemático com os simulados, permitem validar parcialmente o estudo proposto nesse projeto. Importante ressaltar que quando o conversor opera abaixo da sua potência nominal, tanto o nível de estresse de tensão no interruptor quanto o nível de potência dissipada pelo circuito *snubber* são inferiores aos seus respectivos níveis relacionados à operação do conversor com potência nominal.

Por fim, vale destacar a importância de um projeto criterioso para o indutor, pois só assim será possível garantir sua operação na região linear da curva de histerese de seu núcleo magnético. Algo imprescindível para o correto funcionamento do conversor *Boost CC/CC*.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG pelo apoio financeiro durante a produção deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ANTUNES, Joaquim Adérito Araújo. **Reaproveitamento de Calor para Geração de Energia Eléctrica no Automóvel**. 2011. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado). Universidade Do Minho. Braga.
- BASTOS, Sérgio André Machado. **Pulseira para Geração de Energia**. 2010. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado). Universidade Do Minho. Braga.
- FERNANDES, Alberto Emanuel Simões dos Santos. **Conversão de energia com células de Peltier**. 2012. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- LANDER, Cyril W. **Eletrônica Industrial: teoria e aplicações**. 4ª edição, São Paulo: Makron Books, 1996. 647p.
- MOHAN, Ned; UNDELAND, Tore M.; ROBBINS, William P. **Power Electronics: Converters, Applications and design**. 1ª edição, New York: J. Wiley, c1989. 667p.
- RASHID, Muhammad H. **Eletrônica de Potência: Circuitos, Dispositivos e Aplicações**. 1ª edição, São Paulo: Makron Books do Brasil, c1999. 828p.
- VAZ, Alexandre Rodrigues; OLIVEIRA, Yan Ambrósio. Projeto Otimizado dos Elementos de Filtro e Semicondutores do Circuito de Potência do Conversor *Boost* CC/CC. In: XXX Congresso de Iniciação Científica do Inatel, 2018, Santa Rita do Sapucaí. **Anais**. Santa Rita do Sapucaí, 2018.

## GENERATION OF ELECTRICAL ENERGY FROM THERMAL ENERGY

**Abstract:** One of the main concerns of today's society has been the development of alternative sources of electricity. Producing electricity from environments that do not harm the environment or take advantage of other forms of energy has become a fertile field of research. Recent studies have turned to an alternative form of electric energy production, which consists of harnessing and converting the heat generated by systems into electric energy. For this, a phenomenon called Seebeck Effect is used, present in thermoelectric modules. It converts the heat coming from a region into a potential difference. In view of the above, a study is presented on a form of conversion of thermal energy into electric energy, using the principle of the Seebeck Effect. The work shows through simulations and analysis of results, that it is possible to use thermoelectric modules for electric power generation, reversing only the power flow. Finally, it is shown that the values of voltages and currents obtained from the thermoelectric module in conjunction with a Boost DC / DC converter are sufficient for the drive of a DC motor.

**Key-words:** Converter boost. Thermoelectric generator. Seebeck effect.