

Use of the Seebeck Effect for Energy Harvesting

O. H. Ando Junior, A. L. O. Maran, N. C. Henao, E. A. Silva and L. Schaeffer

Abstract— The article presents the results of research that aims at training and consolidation of knowledge and their use for thermoelectric energy harvesting. Therefore, we present a modeling for design and dimensioning of micro electric power generating sources, from theoretical performance curves of thermoelectric modules and temperature gradients for future applications in industrial processes. The final result appears very attractive, since the developed experimental analysis shows promising results, given that many processes generate energy harvesting and, in addition, the cogeneration of power using thermoelectric modules is totally clean, which prevents the emission of gaseous pollute to the environment.

Keywords— Energy Harvesting, Thermoelectricity and Green Energy.

I. INTRODUÇÃO

NOS dias atuais, juntamente com os avanços tecnológicos tem-se o crescimento da demanda de energia e consequentemente a necessidade de se ampliar a oferta de eletricidade [1]. Diante deste cenário pesquisas recentes apontam a necessidade de se buscar alternativas que reduzam a dependência dos combustíveis fósseis na matriz energética [2]. Destaca-se a busca por novas fontes alternativas que permitam a diversificação da matriz e gerar um acréscimo na oferta de energia[3]. Além disso, conforme [4] devem-se empreender esforços pela melhoria da eficiência energética dos processos industriais e pela redução das perdas, ou seja, aproveitamento de energias residuais. Dentre as possibilidades, surge como uma alternativa promissora a utilização de materiais termoelétricos, que através do efeito Seebeck, possibilitam converter diretamente energia térmica em energia elétrica [5]. Os materiais termoelétricos apresentam rendimentos entre 5% e 7% em sua conversão termoelétrica [6]. O rendimento está vinculado à Figura de Mérito (ZT) que depende de três fatores: Coeficiente de Seebeck (α); alta condutividade elétrica (σ) e baixa condutividade térmica (k) [7]. Estudos recentes obtiveram rendimentos superiores a 20% com a utilização de terras raras no desenvolvimento dos materiais termoelétricos [8].

O. H. Ando Junior, Departamento de Engenharia de Energias, Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), Foz do Iguaçu - PR, Brasil, oswaldo.junior@unila.edu.br

A. L. O. Maran, Departamento de Engenharia de Energias, Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), Foz do Iguaçu - PR, Brasil, anderson.maran@aluno.unila.edu.br

N. C. Henao, Departamento de Engenharia de Energias, Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA), Foz do Iguaçu - PR, Brasil, nelson.henao@aluno.unila.edu.br

E. A. Silva, Departamento de Engenharia Mecatrônica, Faculdade SATC, Criciúma - SC, Brasil, eder.silva@satc.edu.br

L. Schaeffer, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre - RS, Brasil, schaeffer@ufrgs.br

Materiais termoelétricos são normalmente usados na forma de módulos termoelétricos. Estes são dispositivos compostos

de séries de pares termoelétricos dopados alternadamente com excesso de elétrons ou lacunas. Tais dispositivos são microgeradores de estado sólido, podendo ser empregados em diversos processos de aproveitamento de calor residual que variam desde usinas termoelétricas a sistemas de exaustão de gases quentes de automóveis. A vantagem de sua utilização reside no fato de que são dispositivos que operam de forma estática, não demandam grandes esforços de manutenção, nem tampouco envolvem nenhum fluido de trabalho no processo de transferência de calor.

Logo, a presente pesquisa consiste em verificar o comportamento de módulos termoelétricos sendo apresentada a validação e a caracterização dos módulos 1261G-7L31-24CX1 da *Custom Thermoelectric*. O presente trabalho, vislumbra futuras aplicações o de microgeradores de estado sólido que possibilitarão a melhoria do rendimento global de processos de conversão a partir da captação de energia residual [9].

II. MATERIAIS TERMOELÉTRICOS

A termoeletricidade é a relação entre temperatura e a diferença de potencial. O efeito *Seebeck*, descoberta de Thomas Johann Seebeck, trata-se da geração de diferença de potencial entre duas junções bimetálicas quando elas estão em diferentes temperaturas [10]. Alguns anos depois um físico chamado Jean Charles Athanase Peltier descobre que uma junção metálica pode produzir calor ou frio quando submetida a uma diferença de potencial, processo inverso ao de Seebeck.

Os materiais semicondutores mais utilizados são: telúrio, antimônio, germânio e prata, altamente dopados para criação de semicondutores tipo-n e tipo-p agrupados como pares, que agirão como condutores dissimilares [11].

A. Módulos Termoelétricos:

Os módulos termoelétricos são formados de blocos de materiais termoelétricos dopados que por sua vez são soldados em um sanduíche de duas placas de cerâmica, assegurando a transferência de calor e uma resistência mecânica suficiente. A Fig. 1 mostra a formação do arranjo, com junções *p-n* ligadas em série ou em paralelo.

Através da aplicação de um gradiente de temperatura entre as faces do módulo gera-se um fluxo de corrente constante sobre o material semicondutor, e, por conseguinte, uma tensão formada pela associação de vários termoelementos.

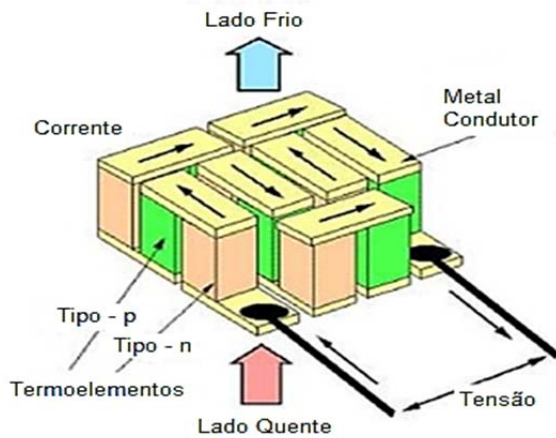


Figura 1. Estrutura interna do módulo termoeletrônico [5].

Os módulos termoeletrônicos convencionais apresentam diversas especificações de acordo com a aplicação. Suas dimensões são variadas e suas faixas para a taxa de calor podem variar de 1 Watt até 125 Watts, com estudos sendo realizados que podem aumentar esta faixa. O gradiente de temperatura entre o lado quente e o lado frio pode alcançar até 200°C. Em sua maioria são compostos por 3 a 127 termopares. Estes termopares, em algumas aplicações, são distribuídos em série, funcionando em cascata a fim de se obter diferenciais de temperaturas maiores, que podem chegar a cerca de 250°C. As temperaturas alcançadas também podem ser negativas, tendo-se verificado experimentalmente, valores de até -100°C [12].

B. Emprego do Efeito Peltier para Refrigeração

Um dos métodos utilizados para refrigeração é conhecido como o método de *Peltier*, onde materiais termoeletrônicos funcionam como refrigeradores quando submetidos a uma diferença de potencial, absorvendo assim calor a uma taxa Q_c desde um meio a ser resfriado que se encontra a uma temperatura qualquer.

A taxa de calor líquido que venha a ser dissipado na extremidade quente do material resume-se à soma da taxa de calor líquido absorvido na extremidade fria, mais a potência elétrica a ser aplicada. Não foram obtidos até o momento, resultados experimentais satisfatórios para o coeficiente de desempenho de sistemas de refrigeração utilizando materiais termoeletrônicos. Define-se o coeficiente de desempenho COP como sendo a taxa de calor líquido absorvido na extremidade fria dividida pela potência elétrica a ser aplicada. Note-se que o COP é uma grandeza adimensional em função das variáveis envolvidas durante seu cálculo.

$$COP = \frac{Q_c}{P_{in}} \quad (1)$$

Onde:

COP: Coeficiente de desempenho;
 Q_c [W]: Taxa de absorção de calor;
 P_{in} [W]: Potência de entrada.

Pode-se expressar a potência de entrada como o calor dissipado subtraído do calor líquido que fora absorvido.

$$P_{in} = Q_h - Q_c \quad [W] \quad (2)$$

Onde: Q_h [W]: Taxa de calor dissipado. Desta forma, pode-se expressar o COP como:

$$COP = \frac{Q_c}{Q_h - Q_c} \quad (3)$$

Sendo assim, o coeficiente de desempenho é função do calor dissipado e do calor absorvido.

Os coeficientes de desempenho apresentados em materiais termoeletrônicos têm sido inferiores aos comparados com os coeficientes do ciclo de Carnot, sendo este último o mais tradicionalmente utilizado em processos de refrigeração [21].

As diferenças são consideráveis, sendo que os materiais termoeletrônicos apresentam uma eficiência entre 5% e 10%, e os refrigeradores-compressor apresentam máxima eficiência em média de 45% [21].

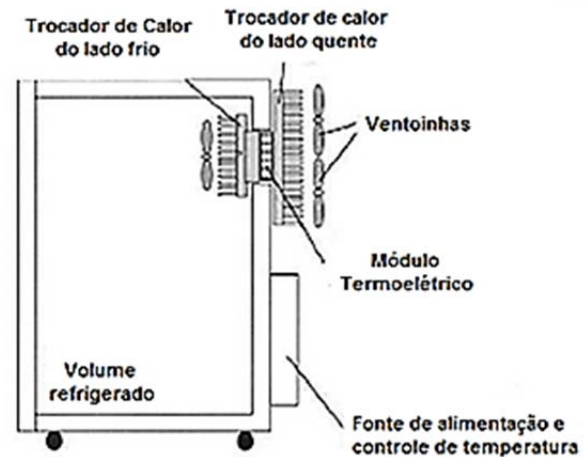


Figura 2. Esquema Refrigerador Termoeletrônico [4].

Já na parte de desenvolvimento, existem alguns estudos para a aplicação de fenômenos termoeletrônicos voltados para a fabricação de dispositivos *Peltier* para uso específico em refrigeração [13]. As eficiências entre um processo e outro podem ser comparadas com base na eficiência máxima alcançada em temperaturas de funcionamento. A Fig. 3 mostra graficamente as diferenças entre os desempenhos dos sistemas.

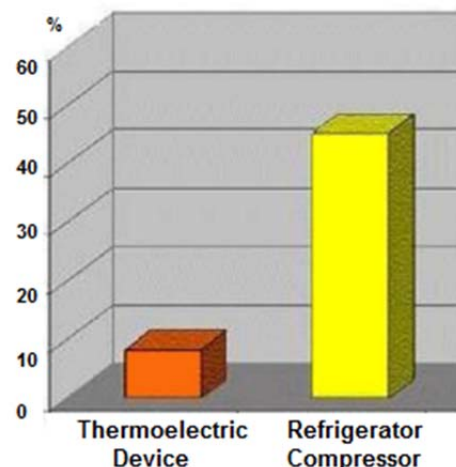


Figura 3. Comparativo dos desempenhos dos refrigeradores [21].

C. Emprego do Efeito Seebeck para Geração de Energia

O efeito Seebeck implica a aparição de uma diferença de potencial E_s entre duas junções de condutores ou semicondutores formando um circuito fechado quando submetidas a um gradiente de temperatura, produzindo assim uma corrente contínua no circuito [13].

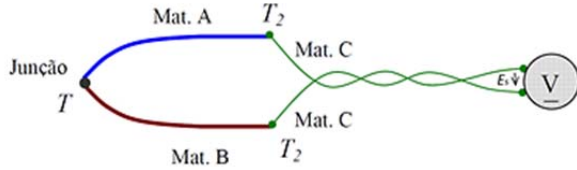


Figura 4. Efeito Seebeck [17].

A tensão de Seebeck - E_s - pode ser determinada facilmente uma vez conhecidas as propriedades dos materiais e as temperaturas das junções, como segue [18]:

$$E_s = \int_{T_{fria}}^{T_{quente}} \alpha_{A,B}(\Delta T) \quad [V] \quad (4)$$

Onde:

$$\alpha_{A,B} = S_B - S_A \quad \left[\frac{V}{^\circ C} \right] \quad (5)$$

Onde E_s é a tensão de Seebeck, $\alpha_{A,B}$ é o coeficiente diferencial de Seebeck, dT um diferencial de temperatura (variável de integração) e S_X o coeficiente de Seebeck do material X . Dado que os geradores termoeletricos disponíveis no mercado são fabricados pela associação em série de N termopares como o mostrado na Fig. 4, basta utilizar a equação (6) para obter a tensão de saída do módulo.

$$V = NE_s \quad [V] \quad (6)$$

Onde V é a tensão de saída do gerador termoeletrico, N o número de termopares internos que compõem o módulo e E_s a tensão de Seebeck de um único termopar.

Dentre as aplicações em escala industrial destaca-se a utilização pela NASA da microgeração mediante material termoeletrico no espaço, especificamente nas sondas espaciais *Pioneer*, *Galileo*, *Cassini*, *Viking* e *Voyager*. Esta última é mostrada na Fig. 5. A utilização destes no espaço ocorre devido à necessidade de fornecimento de energia, de forma simples e com pouco peso, apesar da baixa eficiência [6].



Figura 5. Sonda Espacial *Voyager* [5].

Atualmente existem estudos utilizando os módulos termoeletricos em automóveis cujos motores a combustão possuem um rendimento máximo de 33%, ou seja, suas perdas totalizam 67%, sendo que as perdas térmicas são de no mínimo 62% (calor dissipado 24% e exaustão de gases 38%) [6].

Considerando o gradiente de temperatura entre o escapamento, que transporta os gases de exaustão em alta temperatura, e os arredores do veículo, é possível captar cerca de 5% (rendimento do módulo) a mais de energia a partir do combustível queimado no motor, obtendo assim um incremento no rendimento global do automóvel de 8,67% [6].

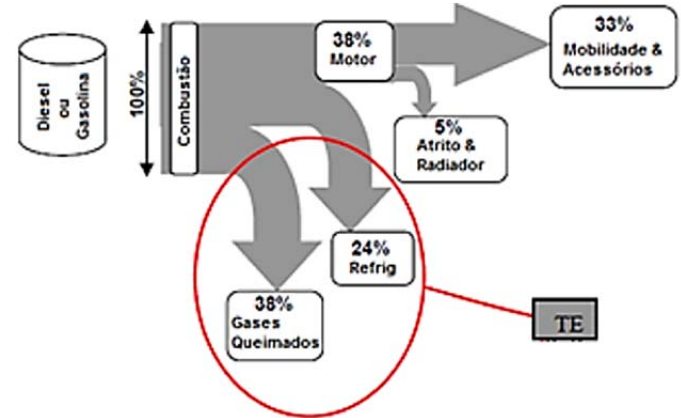


Figura 6. Aplicação de Material Termoeletrico em Automóveis [6].

III. MODELAGEM MATEMÁTICA

A transferência de calor do módulo para o ambiente, no caso da refrigeração, e do ambiente para o módulo, no caso da geração, é representada por uma modelagem matemática, considerando, separadamente, condução, convecção e radiação. A condução de calor é o fenômeno que ocorre entre sólidos que se apresentam a diferentes temperaturas e em contato um para com o outro. A equação (7) [15] descreve o que *Fourier* usou como equação fundamental quando estudava sua teoria analítica do calor, apresentando a taxa de transferência de calor por condução. É importante lembrar que é muito difícil quantificar o calor transferido por radiação já que tal processo acontece simultaneamente à condução entre os poros dos sólidos [3].

$$Q_{cond} = kA \frac{\Delta T}{L} \quad [W] \quad (7)$$

Onde:

Q_{cond} : Taxa de calor transferido por condução;

k : condutibilidade térmica do material;

A [m^2]: Área de contato;

$\Delta T/L$ [$^\circ C/m$]: Distribuição de temperatura.

A troca de calor para com o ambiente dá-se, principalmente, através dos mecanismos de condução e convecção. Não está sendo considerada a troca de calor com possíveis ventoinhas que refrigerariam o módulo termoeletrico. A troca de calor por convecção ocorre baseada na Lei de resfriamento de *Newton*, dada pela equação (8) [15].

$$Q_{conv} = hA(T_s - T_\infty) \quad [W] \quad (8)$$

Onde:

Q_{conv} : Taxa de calor transferido por convecção;
 h [W/m²K]: coeficiente de convecção;
 A [m²]: Área exposta;
 T_s [K]: Temperatura de superfície;
 T^∞ [K]: Temperatura ambiente.

D. Balanço de Energia (Efeito Peltier):

O balanço de energia é relacionado com a taxa de calor absorvido, a potência de entrada e a quantidade de calor dissipada [10]. Logo, o valor do calor dissipado é:

$$Q_h = Q_c + Pin \quad [W] \quad (9)$$

Onde:

Q_h [W]: Taxa de calor dissipado;
 Q_c [W]: Taxa de calor absorvido;
 Pin [W]: Potência de Entrada.

De acordo com Moretto [16], visando melhorar o desempenho do módulo, o efeito Joule deve ocorrer em cada placa de forma simétrica e com magnitude igual à metade do efeito Joule total [10]. Tendo em vista que o processo está relacionado ao efeito termoelétrico, necessita-se a inclusão do efeito termoelétrico (Q_c) no balanço de energia.

Considerando que as propriedades dos materiais independem da temperatura e que a metade do calor é gerado por efeito Joule, verifica-se a equação (10).

$$Q_c = 2N \left(\alpha I T_c - I^2 \frac{R}{2} \right) - k(T_h - T_c) \quad [W] \quad (10)$$

Onde:

N : Número de termopares do módulo;
 α : Coeficiente de Seebeck do material;
 I : Corrente elétrica;
 R : Resistência elétrica;
 k : Condutividade do material;
 T_h [°C]: Temperatura do lado quente;
 T_c [°C]: Temperatura do lado frio.

Conforme [12], de acordo com a corrente elétrica gerada pode-se ter o maior valor do COP. Dessa forma, ao ser considerada uma corrente de otimização (I_{otm}) do COP é possível determinar uma potência de otimização (P_{otm}) associada à potência real do dispositivo (P_{real}) mediante o ganho (η), isto verifica-se na equação (11).

$$P_{real} = \frac{P_{otm}}{\eta} \quad [W] \quad (11)$$

Onde:

P_{real} [W]: Potência real;
 P_{otm} [W]: Potência Otimizada;
 η : Ganho.

Sendo que a potência real pode ser escrita como RI^2_{real} e a potência de otimização escrita como RI^2_{otm} , substituindo assim na equação (11), chega-se na equação (12).

$$RI^2_{real} = \frac{RI^2_{otm}}{\eta} \quad [W] \quad (12)$$

Assim, isolando I_{real} , é possível determinar a corrente real que leva ao aumento do COP.

$$I_{real} = \frac{I_{otm}}{\sqrt{\eta}} \quad [A] \quad (13)$$

Substituindo (10) em (9), verifica-se a equação (14).

$$Q_h = 2N \left(\alpha I T_c - I^2 \frac{R}{2} \right) - k(T_h - T_c) + Pin \quad [W] \quad (14)$$

Logo, substituindo (14) e (10) em (2), o Pin pode ser expresso como mostrado na equação (15).

$$Pin = (Q_h - Q_c) = 2N(I^2 R + \alpha I(T_h - T_c)) \quad [W] \quad (15)$$

Com as expressões (10) e (15) encontradas quando relacionadas a (1), pode-se calcular o COP na equação (16). Tal valor, significa a relação entre a refrigeração e o calor absorvido pelo lado frio, sendo vantajoso dispor de um COP máximo [3].

$$COP = \frac{\alpha I T_c - I^2 \frac{R}{2} - k(T_h - T_c)}{I^2 R + \alpha I(T_h - T_c)} \quad [W] \quad (16)$$

E. Balanço de Energia (Efeito Seebeck):

Neste caso o balanço de energia é semelhante ao do módulo funcionando como refrigerador, mas considerando o Trabalho de Saída W em lugar da Potência de Entrada Pin como segue [14]:

$$W = Q_H - Q_L \quad [W] \quad (17)$$

Onde W é o trabalho elétrico na saída do módulo, Q_H a energia em forma de calor absorvida na face exposta à fonte quente e Q_L o calor dissipado em direção ao reservatório de energia em baixa temperatura.

Por outro lado, considerando o fato de que qualquer quantidade de energia sem importar o quão insignificante seja deve sempre justificar-se durante um processo [14], é necessário incluir a variação da energia interna do material, onde o trabalho elétrico real do TEG é expresso por (18):

$$W = Q_H - Q_L - \Delta U \quad [W] \quad (18)$$

Com ΔU , a variação da energia interna do módulo, dada pela equação (19).

$$\Delta U = m C_p \Delta T \quad [W] \quad (19)$$

Onde m é a massa do módulo, C_p o calor específico e ΔT a variação de temperatura.

Caso seja considerado um módulo termoelétrico operando em equilíbrio termodinâmico, a sua eficiência pode ser calculada como segue [14]:

$$\eta_T = \frac{W}{Q_H} * 100 = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} * 100 = \left[1 - \frac{Q_L}{Q_H} \right] * 100 \quad [\%] \quad (20)$$

Onde η_T é a eficiência térmica total, W o trabalho elétrico realizado, Q_H a quantidade de calor fornecido pelo reservatório de alta temperatura e Q_L é a quantidade de calor cedida para o reservatório de baixa temperatura.

F. Cálculo de Rendimento

Para analisar o comportamento do rendimento de um módulo termoeletrico existem alguns passos a serem seguidos. O procedimento de cálculo para o referido trabalho é baseado na tecnologia Seebeck a partir de uma carga térmica e o gradiente de temperatura, determinando pontos de operação considerados satisfatórios e uma estimativa do desempenho para o sistema, uma vez que este não apresenta comportamento linear[2].

As características elétricas e térmicas dos módulos termoeletricos 1261G-7L31-24CX1 apresentados na Fig. 8 são obtidas mediante análise gráfica do *datasheet* disponibilizado pelo fabricante[19]. Destaca-se que para cada aplicação devem-se analisar os diversos tipos de módulos e combinações a fim de se obter o melhor resultado para o sistema.

Juntamente com os dados de temperatura de trabalho do módulo, determina-se a carga térmica do sistema, sendo que poderá ser de dois tipos: a carga térmica ativa trata-se da energia térmica dissipada pelo dispositivo, enquanto a carga térmica passiva é a proveniente de radiação, convecção ou condução, ou ainda a combinação dos dois últimos [3].

Analisa-se nos dados técnicos do material termoeletrico a relação da corrente com o gradiente de temperatura, encontrando a relação de $I/I_{\max}$. Com o valor da relação de corrente pela corrente máxima admitida pelo material, encontra-se a corrente de operação do módulo.

$$\frac{I}{I_{\max}} = X \quad (21)$$

Onde, X: Valor extraído graficamente.

Com o valor da relação de corrente pela corrente máxima admitida pelo material, encontra-se a corrente de operação do módulo. Os limites de tensão para as especificações de carga térmica são obtidos através da curva $I \times V$ do dispositivo, sendo utilizado o valor da corrente encontrado anteriormente. Com os resultados de tensão de operação e corrente de operação, procede-se ao cálculo de potência gerada.

$$P = VI \text{ [W]} \quad (22)$$

Logo, tem-se conhecimento dos valores teóricos necessários para a análise do comportamento do material termoeletrico. [3]

G. Correspondente Elétrico da Geração Termoeletrica

Quando da utilização do módulo termoeletrico, fazem-se necessárias medições da energia proveniente do calor residual, de forma a se obter a máxima transferência de energia. Logo, um sistema de cogeração eficiente consiste de diversos equipamentos auxiliares onde os principais componentes que conformam o sistema de cogeração termoeletrica são [7]:

- Fonte Quente: Fonte de calor residual.
- Módulo Termoeletrico: Composto por materiais termoeletricos.
- Fonte Fria: Reservatório de energia de baixa temperatura, geralmente os arredores.

- Conversor DC – DC: Filtro nivelador.
- Controlador de Carga: Regula carga protegendo contra sobrecargas.

IV. ANÁLISE EXPERIMENTAL

A finalidade deste procedimento experimental é verificar a funcionalidade dos TEG's ao alimentar uma carga elétrica visando futuras aplicações em um sistema de microgeração baseado no *efeito Seebeck*, testar o desempenho de dois modelos diferentes e comparar os resultados com as informações fornecidas pelos fabricantes, visando perfilar o estudo da viabilidade de aplicação deste sistema em motores e escapamentos automotivos. Para tal fim, procedeu-se conforme as seguintes etapas:

- (i) Determinação da carga a ser alimentada;
- (ii) Determinação da quantidade e especificações dos módulos necessários;
- (iii) Escolha das fontes quente e fria para alimentar os geradores;
- (iv) Montagem e experimentação;
- (v) Coleta e interpretação dos dados.

Decidiu-se por adotar como carga uma luminária com seis pequenas lâmpadas LED de 1W de potência cada, totalizando uma potência de 6W, com uma tensão de alimentação de 17V.

Em um gerador termoeletrico, a tensão de saída é proporcional ao gradiente de temperatura [5]. Como, geralmente, as temperaturas das fontes fria e quente variam, e consequentemente varia a tensão de saída, para manter os 17V é necessário agregar ao sistema um conversor do tipo CC-CC. Um conversor CC-CC recebe uma tensão de entrada variável e a converte para um valor sempre constante na saída. Para este caso, optou-se por um conversor CC-CC *Buck-Boost*.

A fonte de calor utilizada foi um fogão elétrico de 2 bocas enquanto a fonte fria é um bloco de alumínio sobre o qual flui água a temperatura ambiente, sendo essa entregue ao bloco refrigerador com ajuda de uma bomba.

Para a escolha dos módulos termoeletricos, comparou-se os *datasheets* de alguns modelos e fabricantes, tendo-se optado pelo módulo 1261G-7L31-24CX1 da empresa *Custom Thermoelectric*. Este modelo resiste a uma temperatura máxima de 300°C em sua face quente. Foram utilizadas 6 unidades do mesmo. A montagem do sistema ilustrada na Fig. 7, ocorreu de acordo com as seguintes etapas:

- (i) Posicionamento do fogão elétrico sobre uma bancada;
- (ii) Colocação de uma chapa de ferro sobre uma das bocas do fogão;
- (iii) Aplicação de 6 peças de alumínio;
- (iv) Acomodação dos módulos termoeletricos em um arranjo em série;
- (v) Montagem do bloco de resfriamento sobre os módulos termoeletricos.

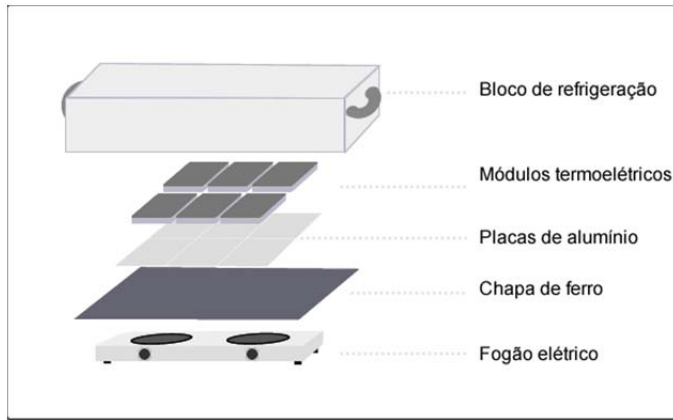


Figura 7. Esquema do arranjo experimental.

Como a troca de calor entre a parte quente e a parte fria, tanto por condução quanto por radiação, é muito grande, foi colocada uma camada de lã de rocha entre o fogão e o bloco refrigerador, em volta dos módulos termoelétricos, criando assim um isolamento térmico entre os dois.

Nas duas primeiras etapas, com o fogão em funcionamento, sua potência foi ajustada até atingir uma temperatura de 250°C sobre a placa metálica, para evitar o risco de danificar o módulo termoelétrico. A evolução da montagem experimental até esse ponto pode ser observada na Fig. 8.

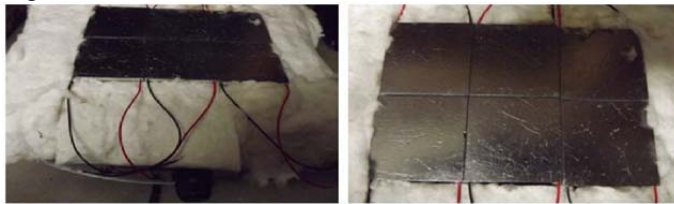


Figura 8. Disposição dos módulos termoelétricos 1261G-7L31-24CX1.

A finalidade de se colocar uma placa de ferro sobre o queimador do fogão, é obter uma maior área para acomodar os módulos termoelétricos, além de obter uma distribuição relativamente homogênea de temperatura na face quente do gerador.

A temperatura da chapa metálica, estabilizou-se em 230°C, e a partir daí procedeu-se com a colocação dos módulos ligados em série e das chapas de alumínio na respectiva face fria do arranjo.

Com a alocação do bloco de alumínio sobre os módulos termoelétricos, a bomba foi acionada fazendo circular água fria sobre ele, refrigerando-o. Instantaneamente, a temperatura do lado quente diminuiu e se estabilizou próximo a 170°C.

Analisando a curva de tensão em relação à diferença de temperatura fornecida pelo fabricante[19], verificou-se que com 250°C na face quente do módulo e 30°C no lado frio poder-se-ia alcançar uma tensão de 3,5 V na saída de cada módulo. Logo, com 6 módulos em série, a tensão resultante seria igual a 21V. A Fig. 9 mostra o gráfico da Tensão versus Temperatura no lado quente em função da temperatura do lado frio.

A carga, como já apresentado, tem potência de 6W. Assim, o valor de corrente esperado era de 350mA, pois a tensão da carga era de 17V. Esta corrente encontrada é a que atravessa a

saída do conversor, porém a corrente máxima, na entrada do conversor, é obtida quando a tensão é mínima, i.e, igual a 3,5V.

Portanto, sabendo que a potência de saída é igual à potência de entrada, a corrente estimada que circula nos módulos termoelétricos é de aproximadamente 1,7A. Analisando o gráfico da corrente fornecido pelo fabricante [19] nota-se que com as mesmas temperaturas para a tensão dada, a corrente máxima que o módulo suporta é maior que 2A, suprimindo facilmente a necessidade da carga.

A Fig. 10 mostra a curva de descida da temperatura quando o bloco de refrigeração entra no sistema, sendo que a curva em vermelho corresponde à temperatura do lado quente, a curva em azul à temperatura do lado frio e a verde à diferença entre estas temperaturas.

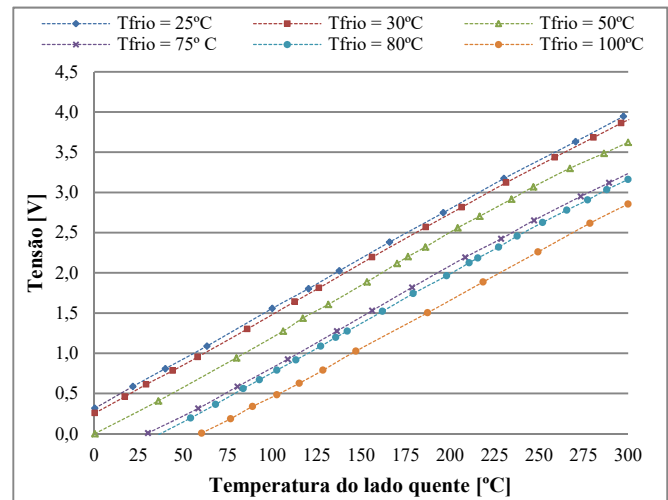


Figura 9. Curva de tensão em função da temperatura referente ao módulo termoelétrico 1261G-7L31-24CX1 [19].

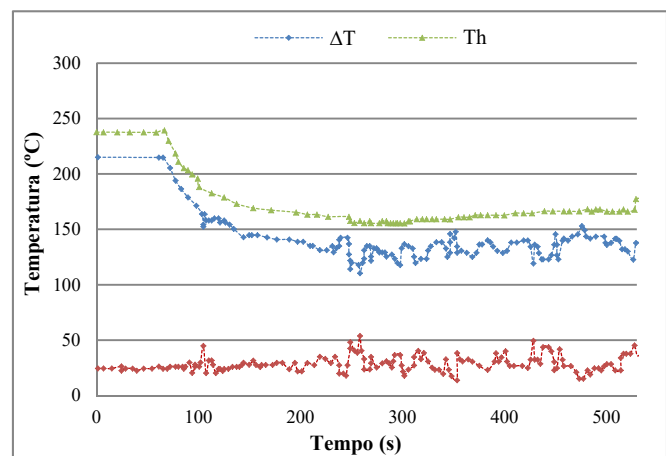


Figura 10. Gráfico da temperatura no momento em que o bloco de refrigeração é inserido ao sistema.

Na Fig. 10, nota-se também que a temperatura do lado frio ficou estabilizada com valores próximos a 30°C. Afirma-se então que as temperaturas de equilíbrio do sistema foram 170°C e 30°C. Na Fig. 11 pode-se observar a foto térmica do processo em equilíbrio.

Após cumprir todas as etapas enunciadas, os módulos começaram a gerar eletricidade. Inicialmente a tensão de saída

total dos módulos foi de 5V, tornando-se possível alimentar o conversor CC-CC. Ao atingir 17 V na saída do conversor a luminária foi conectada ao sistema, permanecendo acesa durante todo o processo. Por ter atingido o equilíbrio térmico, o comportamento do sistema manteve-se inalterado. Na Fig. 12 visualiza-se a foto com a lâmpada acesa alimentada pelo conversor.

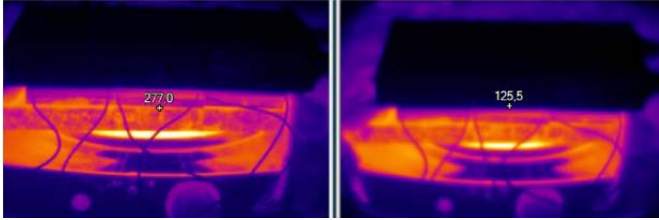


Figura 11. Demonstrativo da imagem térmica do experimento.

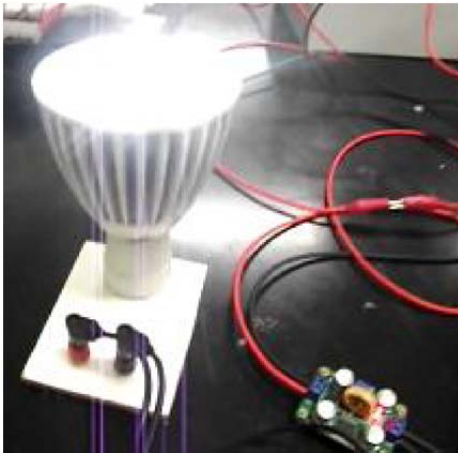


Figura 12. Foto da validação do experimento.

No início, o gradiente de temperatura foi maior, consequentemente a tensão também era mais elevada (5V). Esta, por sua vez, foi diminuindo gradativamente conforme a diferença de temperatura se reduzia. Quando a tensão medida estava próxima a 4V a carga (lâmpada) entrou no sistema. Instantaneamente a tensão foi reduzida para valores em torno de 2,8V, fazendo com que a corrente fosse elevada.

Na Fig. 13, referente à variação de tensão, visualiza-se como o valor da tensão foi reduzindo conforme a diferença de temperatura diminuía, validando a informação de que a tensão gerada por um módulo termoeletrico está diretamente ligada ao gradiente de temperatura. Neste mesmo gráfico percebe-se uma variação de aproximadamente 1V da tensão no momento em que a lâmpada é acesa e logo após a estabilização do sistema, conforme citado anteriormente.

No gráfico da corrente, presente na Fig. 14, é visto o oposto do que ocorreu com a tensão. Nesta, vê-se uma elevação da corrente na hora em que a carga é ligada. Esta elevação é proporcional ao decréscimo da tensão, já que a potência na saída do conversor é igual à potência de entrada, logo com uma menor diferença de potencial na entrada a corrente será maior. Após a entrada da carga, também se nota que a corrente permanece constante com o sistema em equilíbrio térmico.

Após as medições de tensão, corrente e potência o sistema seguiu operando por cerca de 30 minutos, mantendo-se o

aquecimento e resfriamento, e a lâmpada permaneceu acesa. Vale reforçar que em sistemas reais as variações de temperatura são frequentes, por isso fez-se necessário o uso de um conversor CC-CC cuja eficiência é de 95%.

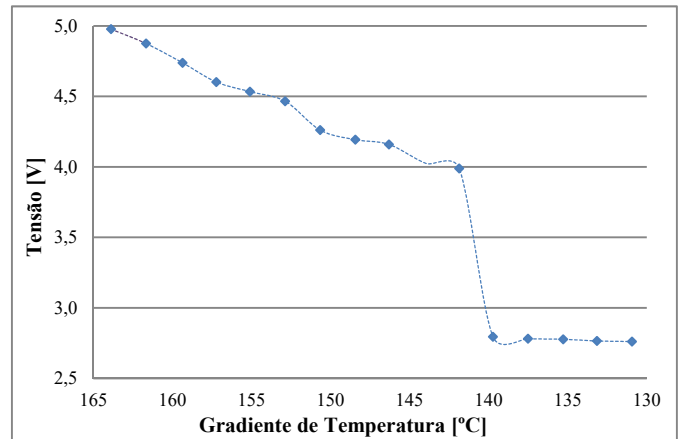


Figura 13. Gráfico referente à variação da tensão em função do gradiente de temperatura.

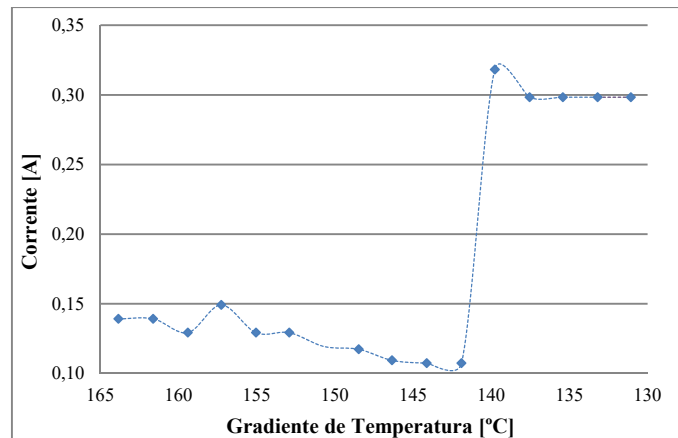


Figura 14. Gráfico referente à variação da corrente em função do gradiente de temperatura.

No teste para validação da aplicação do sistema, algumas dificuldades foram encontradas. Em primeiro lugar, o gradiente de temperatura não foi o mais elevado possível, provavelmente devido às resistências térmicas de condução e de contato entre as placas metálicas, fazendo com que a temperatura na face quente do arranjo de geradores fosse menor à temperatura registrada no queimador.

Quando as temperaturas se estabilizaram, a diferença entre o lado quente e o lado frio ficou em 140°C. Mesmo com esta diferença de temperatura, a resposta referente à tensão do sistema ficou muito abaixo do esperado, já que com as temperaturas lidas cada módulo teria que gerar um pouco mais de 2V, conforme apresenta o fabricante [19], que somadas iriam resultar numa tensão superior a 12V. Acredita-se que essas divergências nos valores tenham sido causadas pela imprecisão nas medidas das temperaturas lidas pelo termopar.

Adicionalmente, fez-se a caracterização de um dispositivo de geração termoeletrica, modelo INBC1-127.0HTS do fabricante *Watronix Inc.* Os sistemas de aquecimento e arrefecimento foram aproveitados nesta aplicação e as temperaturas nas faces quente e fria foram medidas. Os

módulos foram testados sem carga, tendo atingido valores de tensão próximos aos fornecidos pelo fabricante [20], porém todos os valores de tensão ficaram abaixo, como se verifica na Fig. 15. Essa diferença pode ser justificada pela resistência de contato entre as faces do dispositivo e as superfícies quente e fria, que prejudicam a transferência de calor e, portanto, diminuem os valores de tensão obtidos.

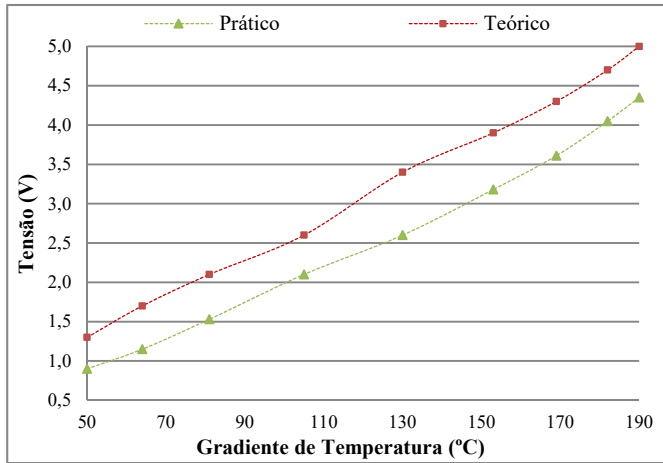


Figura 15. Tensão em função do gradiente de temperatura dos módulos INBC - 127.0HTS sem carga.

V. CONCLUSÕES

Foram avaliados dois modelos distintos de módulos termoeletrônicos comerciais. No primeiro caso, o aparato experimental foi capaz de alimentar uma luminária mostrando a funcionalidade de dispositivos termoeletrônicos baseados no efeito Seebeck. No segundo caso, módulos termoeletrônicos foram submetidos ao mesmo sistema de aquecimento e arrefecimento e foram medidos os valores de tensão a vazio obtidos para diferentes gradientes de temperatura. Os resultados são ligeiramente menores aos informados pelo fabricante, e sugerem que a influência das resistências à transferência de calor é significativa.

Baseado nos estudos e nas informações expostas pode-se afirmar que a cogeração de energia com o uso de módulos termoeletrônicos é uma fonte promissora que apresenta resultados interessantes para sua utilização. Destaca-se que foram analisados apenas alguns sistemas em que este modelo de cogeração possa ser aplicado.

Considera-se também que estudos e pesquisas são feitos constantemente para melhoria da eficiência dos mesmos e que as exigências para redução da emissão de gases causadores do aquecimento global, assim como a necessidade da utilização de fontes renováveis estão aumentando, fazendo com que as aplicações dos módulos termoeletrônicos se tornem cada vez mais interessantes e mais procuradas, pois desperta o interesse do governo e das indústrias.

Finaliza-se enfatizando que existem outros segmentos industriais com grande potencial para captação de energias residuais para cogeração de energia. Entre estes estão as usinas termoeletrônicas (8,5% da geração de energia nacional), processos de fundições e olarias, e principalmente a frota de ônibus e caminhões.

AGRADECIMENTOS

O presente artigo trata-se de um produto do “*Projeto e desenvolvimento de novos métodos para microgeração de energia através da captação de energias residuais (Energy harvesting)*” sendo desenvolvido na Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA) com a colaboração da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e a Faculdade SATC. O projeto conta com os investimentos da UNILA e do CNPq dos quais os autores gostariam de agradecer pela concessão de fomento (Edital PAIP 08/2014) e bolsas (Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação - PIBITI) para subsidio da presente pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] Sithan, M.; Loi-Lei Lai, "Application of green technologies in developing countries — Reduced carbon emission and conservation of energy," *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, vol., no., pp.1,7, 24-29 July 2011. doi: 10.1109/PES.2011.6039665
- [2] Smith, N.; McCann, R., "Investigation of a Multiple Input Converter for Grid Connected Thermoelectric-Photovoltaic Hybrid System," *Green Technologies Conference, 2012 IEEE*, vol., no., pp.1,5, 19-20 April 2012. doi: 10.1109/GREEN.2012.6200938
- [3] Benecke, S.; Ruckschloss, J.; Nissen, N.F.; Lang, K.-D., "Energy harvesting on its way to a reliable and green micro energy source," *Electronics Goes Green 2012+ (EGG), 2012*, vol., no., pp.1,8, 9-12 Sept. 2012.
- [4] Karabetoglu S., Sisman, A. "Characterization of a thermoelectric generator at low temperatures", *Energy Conversion and Managment: Elsevier Science*. Vol. 62, pp. 47-50, April 2012.
- [5] Wei-Hsin Chena, Chen-Yeh Liao, Chen-I Hung, Wei-Lun Huang. "Experimental study on thermoelectric modules for power generation at various operating conditions". *Energy: Elsevier Science*, Vol. 45, pp. 874-881, July 2012.
- [6] Gao Min, D.M. Rowe. Conversion Efficiency of Thermoelectric Combustion Systems. *IEEE Transactions on Energy*, v. 22, n. 2, p. 528-534, Jun. 2007.
- [7] Peter M. Attia, Matthew R. Lewis, Cory C. Bomberger, Ajay K. Prasad, Joshua M.O. Zide. "Experimental studies of thermoelectric power generation in dynamic temperature environments", *Energy: Elsevier Science*, pp. 453-456, August 2013.
- [8] Maharaj, S.; Govender, P., "A prototype thermoelectric co-generation unit," *Domestic Use of Energy (DUE), 2014 Proceedings of the Twenty-Second*, vol., no., pp.1,6, 1-2 April 2014. doi: 10.1109/DUE.2014.6827772
- [9] Ando Junior, O. H. et al. Proposal of a Thermoelectric Microgenerator based on Seebeck Effect to Energy Harvesting in Industrial Processes. *Renewable Energy & Power Quality Journal (RE&PQJ)*, v. 1, p. 227-333, 2014.
- [10] Ando Junior, O. H.; Ferro, J. L.; Schaeffer, L. . Design and Sizing Electric Micro Generator Using Thermoelectric Modules. *Journal of Energy and Power Engineering*, v. 1, p. 2373-2380, 2013.
- [11] Ando Junior, O. H.; et. al.. Analyze the Potential of Use Thermoelectric Materials for Power Cogeneration by Energy Harvesting in Brazil. *International Journal of Automation and Power Engineering (IJAPE)*, v. 2, p. 303-311, 2013.
- [12] Ando Junior, O. H.. Souza D. H., Protótipo de um microgerador termoeletrônico para captação de energias residuais baseado no efeito seebeck com sistema de transferência de calor intercambiável. 166f. Tese de Doutorado (Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- [13] Verás, J. C. Análise Experimental dos Efeitos de Ciclos Térmicos em Geradores Termoeletrônicos. Dissertação de mestrado (Engenharia Elétrica). Universidade Federal da Paraíba, 2014.
- [14] Sonntag R.E.; Van Wylen G.J.V. Fundamentos da termodinâmica clássica. São Paulo: Edgard Blucher, 1976.
- [15] Çengel Y. A.; Transferencia de Calor y Masa: Un enfoque práctico. México D.F: McGraw Hill Interamericana, 2007.

- [16] Ando Junior, O. H.; et. al.. "Acquisition and Monitoring System for TEG Characterization," International Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 2015, Article ID 531516, 7 pages, 2015. doi:10.1155/2015/531516.
- [17] Izidoro, C. L.; Ando Junior, O. H.; Carmo, J. P.; Schaeffer, L.. Characterization of thermoelectric generator for energy harvesting, Measurement, Available online 8 January 2016, ISSN 0263-2241, <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2016.01.010>.
- [18] J. Blatt, L. Foiles y D. Greig, Thermoelectric Power of Metals, New York: Plenum Press, 1976.
- [19] Custom thermoelectric, «<http://www.customthermoelectric.com/>», 2016. [On Line]. Available: http://www.customthermoelectric.com/powergen/pdf/1261G-7L31-24CX1_20140328_spec_sht.pdf [Último acesso: 14 02 2016]
- [20] Watronix Inc., «<http://www.inbthermoelectric.com/>», 2016.
- [21] Cool Chips PLC, "www.coolchips.gi/," [Online]. Available: <http://www.coolchips.gi/technology/ccalc.shtml>. [Acesso em 23 02 2016].



Oswaldo Hideo Ando Junior graduado em Engenharia Elétrica e Especialização em Gestão Empresarial pela Universidade Luterana do Brasil com Mestrado e Doutorado em Engenharia na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Professor do Curso de Engenharia de Energias da Universidade Federal da Integração Latino-Americana UNILA. Atualmente é consultor ad hoc da FAPESC e Revisor do PMAPS, Hindawi e Revista IEEE

América Latina. Atuando principalmente nas áreas: Captação de Energia, Conversão de Energia, Qualidade da Energia Elétrica e Sistemas Elétricos de Potência.



Anderson Luis Oliveira Maran estudante de engenharia de Energias pela Universidade Federal da Integração Latino-Americana, UNILA. Atualmente é bolsista no Programa de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, PIBITI - UNILA. Tem experiência na área de Processos Térmicos e Fontes de Energia Renovável, atuando principalmente nos seguintes temas: Modelagem numérica de sistemas energéticos, Captação de Energias Residuais e Eficiência Energética.



Nelson Calderón Henao estudante de engenharia de Energias pela Universidade Federal da Integração Latino-Americana, UNILA. Atualmente é bolsista no Programa de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, PIBITI - CNPq. Tem experiência na área de Processos Térmicos e Fontes de Energia Renováveis, atuando principalmente nos seguintes temas: Modelagem de sistemas energéticos, Captação de Energias Residuais e Eficiência Energética.



Eder Andrade Da Silva Bacharel em Engenharia Elétrica pela Faculdade SATC (2015), atualmente é mestrando no programa de pós-graduação em minas, metalurgia e materiais da UFRGS. Atua como professor na Faculdade SATC e na Faculdade Capivari. Tem experiência na área de Eletrônica Industrial, Sistemas e Controles Eletrônicos, atuando principalmente nos seguintes temas: Eletrônica Embarcada, Desenvolvimento de Hardwares de Medição,

Qualidade da Energia Elétrica, Sistemas Elétricos de Potência e Eficiência Energética.



Lirio Schaeffer doutorado em Conformação Mecânica - Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule/Aachen (1982). Professor na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Atualmente é consultor ad hoc da FAPERGS, CAPES, FAPERJ e CNPQ. Atuando principalmente nas áreas: forjamento, estampagem, metalurgia do pó, materiais biomédicos e materiais para energias alternativas.