



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Faculdade de Engenharia

# **Modelização e análise de desempenho de geradores termoelétricos aplicados no aproveitamento da energia do corpo humano**

**Joice Magna Castelo Francisco Manuel**

**Versão final após a defesa**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Bioengenharia**

(2º Ciclo de estudos)

Orientadora: Prof. Doutora Maria do Rosário Alves Calado

**Covilhã, Dezembro de 2022**

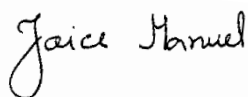
## Declaração de Integridade

Eu, Joice Magna Castelo Francisco Manuel, que abaixo assino, estudante com número de inscrição M10527 de Bioengenharia da Faculdade de Engenharia, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com **o Código de Integridade da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, e que em particular atendi à exigida referência de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assim assumo na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 20 / 12 / 2022

Assinatura



## **Dedicatória**

Dedico este trabalho primeiramente à Deus pai todo-poderoso por ajudar-me nessa caminhada, pela proteção, por ouvir as minhas orações, pela orientação, pelo livramento do mal existente no Mundo.

Dedico este trabalho, aos meus Pais, Júlio e Ana Alice e aos meus familiares pelo apoio moral, conselhos e amor que sentem por mim, que apesar da distância fizeram parte dessa trajetória e sempre acreditaram em mim, o meu muito obrigada a todos.

Aos meus tios Jorge Santa Rosa e Amadeu Santa Rosa pelo carinho, pela confiança, pela aposta em mim, pelo apoio financeiro e moral, pois sem a vossa ajuda tudo isso não seria possível. Aos meus avôs Domingos Santa Rosa por deixar os seus a fazeres e ajudar-me com as documentações e Domingos Castelo Francisco, por cuidar de mim como uma filha.

Ao meu namorado José Bambi, pela motivação, pelo apoio moral, pelo apoio financeiro, ou seja, pelo suporte incondicional, o meu muito obrigada meu amor.

E por fim aos meus amigos, em particular Arlézia e Joab, por serem incríveis e por estarem presentes quando preciso.

## **Agradecimentos**

A realização deste trabalho foi possível graças à contribuição de várias pessoas. Quero agradecer àqueles que me apoiaram na realização deste trabalho.

Agradeço, em primeiro lugar, à minha orientadora professora Doutora Maria do Rosário Alves Calado por ter aceitado trabalhar comigo, pela sua ajuda em conhecimentos e orientações, disponibilizados no decorrer do ano letivo, que contribuíram para o desenvolvimento e aperfeiçoamento deste trabalho. Agradeço eternamente à minha querida mãe, pelas orações, por estar sempre presente, agradeço pelos conselhos, pelo amor, pela motivação, por fazer tudo por mim.

Agradeço a Deus, aos meus familiares, namorado e amigos por tudo de bom que fizeram por mim.

## Prefácio

Este trabalho tem como tema a *modelização e análise de desempenho de geradores termoelétricos aplicados no aproveitamento da energia do corpo humano*. Estes geradores permitem-nos captar energia através dos processos fisiológicos humanos, como a movimentação ou a temperatura corporal.

Primeiramente far-se-á uma revisão de literatura geral, onde veremos a captura de energia, os parâmetros que influenciam o desempenho de um TEG e alguns modelos já desenvolvidos. Em seguida abordará a história dos sistemas de energy harvesting, que se baseia na captura de energia do ambiente inutilizável, associada a sistemas concebidos para outro fim, para convertê-la em energia utilizável, onde vê-se algumas vantagens e alguns sistemas como solar, sistema com base no som, sistemas à base de vibrações e efeitos termoelétricos. Estes últimos consistem na conversão direta de uma diferença de temperatura numa tensão elétrica e vice-versa. Nestes existem três tipos de efeitos como o efeito de Seebeck, o efeito de Peltier e o efeito de Thomson. Seguidamente far-se-á uma abordagem sobre o estado de arte de aproveitamentos termoelétricos no corpo humano, onde veremos como é feita a produção de calor humano, partes do corpo humano adequadas para medição da temperatura corporal e que tipo de dispositivos podem ser alimentados com o calor resultante do corpo humano e da temperatura ambiente. Após isso veremos caracterização dos diferentes parâmetros do gerador e análise da sua influência no desempenho energético, onde veremos a temperatura, coeficiente de Seebeck, resistência de carga entre outros. Dando continuidade, será vista alguns modelos de gerador termoelétrico, todos eles diferentes um do outro. Ainda será vista alguns programas de simulação de modelos, como Matlab, ANSYS, CONSOL, ANOVA entre outros. Para terminar será focado neste trabalho uma proposta e análise de um sistema de geração de energia termoelétrica a partir da temperatura corporal.

## **Resumo**

O elevado custo de energia, a poluição ambiental e o aquecimento global são alguns dos grandes problemas que a humanidade tem enfrentado atualmente. Para minimizar, de alguma forma, estes problemas, os cientistas têm concentrado as suas atividades na procura de formas alternativas de obtenção de energia e de realizar a sua captura. O efeito termoelétrico converte energia térmica em eletricidade. Na Bioengenharia, é possível conceber aplicações com módulos termoelétricos que aproveitam a energia térmica do corpo humano para a converter em energia elétrica, que possam alimentar dispositivos microeletrónicos e sensores autónomos. Os desempenhos dos módulos termoelétricos dependem dos vários parâmetros. A correta avaliação e simulação desses desempenhos é fundamental tanto no seu desenvolvimento quanto na sua aplicação em sistemas completos.

## **Palavras-chaves**

Modelização, energy harvesting, geradores termoelétricos, parâmetros dos geradores termoelétricos, temperatura corporal.

## **Abstract**

The high cost of energy, environmental pollution and global warming are among the major problems that the humanity is currently facing. To somehow minimize these problems, scientists have focused their activities on finding alternative ways of obtaining energy and harvesting it. The thermoelectric effect converts thermal energy into electricity. In Bioengineering, it is possible to design applications with thermoelectric modules that take advantage of the thermal energy of human body to convert it into electrical energy, which can be used to feed microelectronic devices and autonomous sensors. The performance of thermoelectric modules depends on the various parameters and its evaluation and simulation are fundamental in the development and in its application in complete systems.

## **Keywords**

Modeling, energy harvesting, thermoelectric generators, parameters of thermoelectric generators, body temperature.

## **Anexos**

Anexo 1- Código utilizado para criação da Figura 26.....	66
Anexo 2- Código utilizado para criação da Figura 27.....	66
Anexo 3- Código utilizado para criação da Figura 28.....	67
Anexo 4- Código utilizado para criação da Figura 29.....	67
Anexo 5- Código utilizado para criação da Figura 30.....	68

## Índice

1. Introdução.....	14
2. Revisão da literatura .....	15
3. História dos sistemas de energy harvesting.....	18
3.1. Sistema solar.....	18
3.2. Sistema com base no som .....	19
3.3. Sistema à base de vibrações.....	20
3.4. Efeito Termoelétrico .....	21
3.4.1. Efeito de Seebeck.....	21
3.4.2. Efeito de Peltier .....	22
3.4.3. Efeito de Thomson .....	23
3.4.4. Arrefecedor Peltier .....	24
3.4.4.1. Arrefecimento Peltier com semicondutores do tipo n .....	27
3.4.4.2. Arrefecimento Peltier com semicondutores do tipo p.....	27
3.4.4.3. Arrefecimento Peltier com semicondutores do tipo p e n.....	28
4. Estado da arte de aproveitamentos termoelétricos no corpo humano .....	29
5. Caracterização dos diferentes parâmetros do gerador e análise da sua influência no desempenho energético.....	33
6. Modelização do gerador termoelétrico .....	37
6.1. Modelo Matemático.....	37
6.2. Modelo iterativo dependente da temperatura do gerador termoelétrico, incluindo perdas térmicas nos elementos passivos.....	38
6.3. Modelo Dinâmico .....	41
6.4. Modelo Analítico.....	43
6.5. Modelização de um sistema completo .....	44
6.6. Simulação de um Modelo TEG com base no Simulink.....	46
7. Caracterização do gerador através da utilização de programas de simulação.....	46
8. Proposta e análise energética de um sistema de geração de energia termoelétrica a partir da temperatura do corpo.....	49
8.1. Simulação do Modelo no Matlab/Simulink.....	49
8.1.1. Avaliação da influência das temperaturas.....	50
8.1.2. Avaliação da influência do coeficiente de Seebeck.....	53
8.1.3. Avaliação da influência da resistência de carga.....	55
9. Conclusão .....	59
10. Bibliografia.....	60

## Lista de figuras

Figura 1 - Diagrama de blocos do sistema de captação de energia solar usando controle: (a) PWM e (b) MPPT .....	19
Figura 2 - Esquema da captação de energia sonora .....	20
Figura 3 - Efeito Seebeck.....	21
Figura 4 - Efeito de Peltier .....	22
Figura 5 - Efeito Thomson.....	23
Figura 6 - Módulo TEG típico.....	25
Figura 7 - Circuito elétrico equivalente do TEG .....	26
Figura 8 - Arrefecimento Peltier com semicondutor do tipo n . .....	27
Figura 9 - Arrefecimento Peltier com semicondutor do tipo p .....	28
Figura 10 - Arrefecimento Peltier com pares de semicondutores n e p .....	28
Figura 11 - Arrefecimento Peltier com vários “pellets”.....	29
Figura 12 - Temperatura da pele humana para diferentes pontos do corpo com base nas temperaturas ambientais variáveis [31]. .....	30
Figura 13 - Resistências parasitas que afetam o desempenho do TEG .....	31
Figura 14 - Sistema de geração termoelétrica utilizando o corpo humano.....	32
Figura 15 - Modelo matemático.....	37
Figura 16 - Fluxograma para desenvolvimento de modelo no domínio do tempo e espaço .....	38
Figura 17 - Algoritmo de ciclos iterativo.....	39
Figura 18 - Modelo dinâmico. Diagrama do sistema de geração de energia termelétrica em cascata (a); diagrama esquemático tridimensional (b); configuração do modelo (c) .....	42

Figura 19 - Configuração do modelo. (a) protótipo; (b); dispositivo para medição da resistividade elétrica; (c) configuração esquemática de medição completa e tamanhos de amostra .....	44
Figura 20 - Configuração para avaliação experimental do conversor de potência .....	45
Figura 21 - Fluxograma do algoritmo de modelização do sistema proposto de gerador termoelétrico mencionado acima .....	45
Figura 22 - Diagrama de blocos Simulink do modelo TEG.....	46
Figura 23 - Diagrama de blocos do modelo.....	49
Figura 24 - Diagrama completo do Modelo, adaptado .....	50
Figura 25 - Influência da temperatura no desempenho do modelo.....	53
Figura 26 - Influência do coeficiente de Seebeck, para $T_c$ maior do que $T_h$ .....	54
Figura 27-Influência do coeficiente de Seebeck, para $T_c$ menor do que $T_h$ .....	55
Figura 28-Influência da resistência de carga no desempenho do sistema, quando $\alpha = 0.0185$ e $R_{in} = 7\Omega$ . .....	56
Figura 29 - Influência da Resistência de carga no desempenho do sistema, para $\alpha=0.027$ e $R_{in}=0.47\Omega$ . .....	58
Figura 30 - Influência da Resistência de carga no desempenho do sistema, para $\alpha = 0.0517$ e $R_{in} = 3\Omega$ . .....	58

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Resultados da influência das temperaturas no desempenho do sistema .....	51
Tabela 2 - Resultados da influência do coeficiente de Seebeck, para $T_c$ maior do que $T_h$ .....	54
Tabela 3 - Resultados da influência do coeficiente de Seebeck, para $T_c$ menor do que $T_h$ .....	55
Tabela 4 - Resultados da influência da resistência de carga no desempenho do sistema .....	56
Tabela 5 - Resultados da influência da resistência de carga no sistema, considerando dois coeficientes de Seebeck e duas resistências internas.....	57

## **Lista de Abreviaturas e Acrónimos**

UBI	Universidade da Beira Interior
TEG	Thermoelectric generator
TEM	Módulo Termelétrico
FEM	Finite Element Method
fem	Força eletromotriz
PID	Proporcional Integral Derivativo

## Lista de símbolos e Nomenclatura

$ZT$	Figura de mérito
$\Delta T$	Diferença de temperatura
$V$	Potencial elétrico
$K$	Condutividade térmica
$k_{tem}$	Condutância Térmica
$Q_{peltier}$	Calor total absorvido ou rejeitado pelo sistema
$I$	Corrente que passa pelo elemento termoelétrico
$R_L$	Resistência de carga
$E$	Força eletromotriz
$V_{oc}$	Tensão de circuito aberto
$V_{out}$	Tensão de saída do TEG
$R_{in}$	Resistência interna do TEG
$I_{out}$	Corrente de saída
$P_{out}$	Potência de saída do sistema
$Q_{in}$	Fluxo de calor
$N$	Número de módulos
$n$	Elemento termoelétrico tipo n
$p$	Elemento termoelétrico tipo p
$R_0$	Resistência elétrica do conjunto dos módulos
$R_{0th}$	Resistência térmica do conjunto dos módulos
$R_{ext}$	Resistência térmica parasita do conjunto dos módulos (contatos térmicos, permutadores, etc.)
$R_{TEM}$	Resistência do módulo termoelétrico
$T_h$	Temperatura externa do lado quente
$T_c$	Temperatura externa do lado frio
$K_p$	Elementos parasitas térmicos

$A_{n(p)}$	Área de seção transversal dos pares n-p
$\delta T_h$	Perda de temperatura do lado quente
$\delta T_c$	Perda de temperatura do lado frio
$Q_h$	Fluxo de calor do lado quente
$Q_c$	Fluxo de calor do lado frio
$P_{max}$	Potência máxima
$P_{fan}$	Potência resultante da fonte de calor
$P_t$	Potência total do circuito
$MS_{Parametro}$	Quadrado médio do parâmetro
$MS_E$	Erro Quadrático médio

## **Símbolos**

$\alpha$	Coefficiente de Seebeck
$\sigma$	Condutividade elétrica
$\Pi_{AB}$	Coefficiente de Peltier
$\mu$	Coefficiente de Thomson
$\eta$	Eficiência do sistema
$\eta_{max}$	Eficiência máxima

## 1. Introdução

O elevado custo de energia, a poluição ambiental e o aquecimento global correspondem a alguns dos grandes problemas que a humanidade tem enfrentado atualmente [1] [2]. Para minimizar os seus efeitos, os cientistas estão concentrados em melhorar os geradores de energia com base em fontes alternativas e otimizar a sua captura [1]. Os sistemas baseados em *energy harvesting* poderão satisfazer alguns requisitos energéticos de sistemas mais simples e menos exigentes do ponto de vista energético. Este termo (*energy harvesting*) está associado à captação de pequenas quantidades de energia através de sistemas que foram originalmente concebidos para um outro propósito, que não o da produção de energia, sendo por isso interessante aproveitar a energia do seu funcionamento. Podemos referir e englobar neste contexto os seguintes sistemas: solar, com base no som, à base de vibrações ou baseados em processos fisiológicos humanos como a movimentação ou a temperatura corporal [3] [4]. O sistema baseado nas vibrações tem sido alvo de um considerável interesse, sendo encarado como um potencial candidato nas aplicações para alimentar sensores sem fios, pois oferece flexibilidade, facilidade de implementação e capacidade de modernizar sistemas, sem o custo e o inconveniente do cabeamento [5]. Além disso, ao se removerem os fios, existe a possibilidade de incorporar sensores em locais anteriormente inacessíveis. Atualmente, a maioria dos sensores sem fios é simplesmente alimentada por uma bateria. Neste trabalho, o conceito de *energy harvesting* está associado à disponibilização de energia térmica por parte do corpo humano, uma vez que, existe um gradiente de temperatura em relação à temperatura ambiente [6] [7]. Através de dispositivos termoelétricos, essa energia poderá ser captada e armazenada, utilizando para o efeito sistemas eletrónicos de condicionamento [4]. São diversos os fatores que influenciam o bom funcionamento destes geradores e também o seu desempenho e a energia produzida [1] [8], como por exemplo a temperatura, a resistividade elétrica, a condutividade térmica, o efeito de Seebeck, entre outros [8].

O estudo destes sistemas, a sua modelização e a análise do seu desempenho são tarefas muito importantes para que se obtenha um sistema que seja interessante do ponto de vista de produção de energia. A modelização será usada para descobrir de forma rápida como o produto ou a aplicação do gerador termoelétrico (TEG) funcionará antes mesmo de ser construído.

## 2. Revisão da literatura

São vários os fenómenos que ocorrem no TEG e a captação de energia pode ser feita a partir de várias fontes de calor, para além do corpo humano, como por exemplo o calor do sistema de escape de automóveis [2]. A energia residual do funcionamento dos sistemas é diretamente convertida em energia elétrica [9].

Para melhorar o desempenho destes geradores, foram feitos diversos estudos com base na sua modelização, onde os fenómenos intrínsecos ao funcionamento dos TEGs são representados por parâmetros. Nos trabalhos [2], [10], o desempenho do material termoelétrico é definido pela sua Figura de mérito ( $ZT$ ), e o modelo desenvolvido foi baseado na análise do sistema através do método dos elementos finitos (FEM), utilizando o software COMSOL Multiphysics. O modelo adotado consistia em 98 pares de semicondutores do tipo p-n, e teve em consideração os efeitos de Seebeck, Peltier e Thomson. O aumento da produção de energia e da eficiência do TEG foi conseguido otimizando a geometria das pernas dos módulos, usando os métodos de Taguchi e ANOVA para controlar vários parâmetros, como o comprimento da perna, a área de seção transversal e a resistência de carga e levando em consideração as diferentes perdas de energia, sob as condições isotérmica e isofluxo [10]. O método de Taguchi utiliza conjunto de matrizes ortogonais predefinidas para dimensionar experiências ou otimizar processos. A escolha das matrizes depende do número de fatores a analisar e da profundidade dessa análise, ou seja, do número de níveis para cada fator de controlo, permitindo reduzir o número total de execuções experimentais. O método de ANOVA, ou análise da variância, é um método estatístico que separa os dados de variância observados em diferentes componentes para serem usados em testes adicionais.

As geometrias das pernas influenciam o desempenho do TEG [11]. Em [11], os autores consideraram três geometrias diferentes, retangular, em cone e em formato de diamante, sendo a retangular usada como referência. Em todas as experiências, foram realizados cálculos numéricos em condições de estado estacionário, com as placas de cerâmica quente e fria em contato com as junções a 393 K e 293 K, respetivamente. Para as três configurações, foram geradas malhas para os modelos FEM, sendo que para o cone e para o diamante se utilizaram malhas mais grossas e para o modelo retangular uma malha mais fina, por esta possuir tensão mais alta em comparação com as outras. Na análise às grandezas elétricas, os modelos em forma de cone e em diamante produziram diferenças de potencial mais elevadas que o retangular. A avaliação das tensões térmicas foi realizada com base na relação das tensões térmicas e

estruturais às temperaturas empregues nas junções quentes e frias; a tensão máxima para o modelo em forma de diamante era menor em comparação com as tensões máximas nas formas retangular e em cone [11].

A análise do desempenho do sistema com TEGs pode também ser efetuada com base nas interações entre os componentes do módulo termoelétrico e do conversor DC-DC [12]. Em [12] desenvolveu-se um modelo composto por um sistema de aquisição de dados que continha o ADC AD7705 de baixa frequência de 16 bits, com duas medições de tensão de entrada totalmente diferentes nos canais ADC0 e ADC1. A combinação do ADC e da fonte de tensão AD441 forneceu a precisão de 1mV nas medições.

Ainda, poder-se-á melhorar o desempenho do sistema através da combinação de mais do que um TEG. A aplicação de três módulos TE, com diferentes materiais para desenvolvimento de um TEG em cascata (CTEG), foi apresentado em [13], onde se demonstrou um aumento da eficiência do sistema em 21.56% em comparação com o sistema TEG em estágio único.

Os autores de [9] desenvolveram modelos matemáticos com várias dimensões (zero, 1D e 3D). As pernas do modelo de dimensão zero incluem equações algébricas e rejeitam equações diferenciais, no módulo TEG de par único nenhum calor chega ao dissipador além das resistências de carga, o modelo 3D consistia em 12 pares de termopares, cada um contendo semicondutores tipo p, tipo n e condutor elétrico de cobre. A simulação do TEG foi feita no ANSYS, tendo a análise numérica sido feita variando a resistência de carga e o comprimento da perna [9].

Há estudos em que alguns efeitos são considerados e outros negligenciados, como é o caso do modelo *total e completo do gradiente de baixa temperatura*, que se baseia num modelo analítico levando em consideração os efeitos de Seebeck, Peltier e o circuito simplificado, negligenciando o efeito de Thomson e o aquecimento de Joule. No entanto, o estudo reportado em [12] obteve um erro de 9%.

Os autores de [8] propuseram um método iterativo implementado no MATLAB para resolver as equações básicas, levando em consideração as perdas de temperatura devido a elementos passivos térmicos e elétricos e a propriedades dependentes da temperatura, e calculando as temperaturas reais nos elementos termoelétricos. Consideraram os efeitos de Thomson, Peltier e aquecimento de Joule. Fizeram as simulações baseadas no método de elementos finitos, tendo utilizado o COMSOL e o ANSYS para estudar a viabilidade de integração de um módulo TE num gerador.

Para analisar o desempenho de um TEG, pode ter-se em consideração a convecção de calor da superfície lateral (SSHC) e as propriedades do material dependentes da temperatura (efeito de Seebeck, figura de mérito, parâmetro de coordenadas, resistividade elétrica, condutividade térmica). Os autores em [14] derivaram a

temperatura para estudar a eficiência da conversão de energia e observaram que a eficiência diminui à medida que a altura aumenta. O efeito de Thomson foi ignorado no modelo de propriedades constantes (CPM). No entanto, os resultados dos CPM apresentaram boas margens de erro na eficiência [14].

Em [15] foi desenvolvido um modelo analítico para avaliar o desempenho do TE considerando tanto a resistência de contacto entre a perna e o eléctrodo, quanto as propriedades do material dependentes da temperatura. Derivaram as expressões para calcular a eficiência e a potência de saída de um único par de pernas do TE, tendo feito a sua validação no ANSYS. A análise do desempenho de TE foi feita através do método de perturbação para obter a solução analítica, considerando a temperatura dependente do modelo de propriedades (TDPM), levando em consideração a junção p-n completa. Observaram que: o aumento das resistências de contato elétrico e térmico reduzirá a eficiência e a potência de saída; à medida que a área da seção transversal aumenta, a eficiência primeiro aumenta rapidamente, atinge máximo e, em seguida, diminui lentamente; conforme a área da seção transversal aumenta, a potência de saída aumenta rapidamente; o comprimento ideal da perna diminui à medida que a condutância do contato térmico aumenta; o comprimento ideal da perna não tem relação com a resistência de contato elétrico [15].

No trabalho [16], mostra-se a aplicação de um gerador termoelétrico, com um lado do módulo termoelétrico em contacto com a pele humana e o outro em contacto direto com o meio ambiente, através de um dissipador. Foram criados dois modelos, o primeiro um modelo térmico e elétrico do TEG, onde se desprezam as perdas por efeito de Joule e o fluxo de calor devido ao efeito de Seebeck, em comparação com o fluxo de calor principal. Relativamente ao modelo térmico as duas fontes de temperaturas são consideradas como “fontes infinitas de temperatura”, ou seja, não são afetados pela presença do TEG. Os semicondutores dos tipos n e p são conectados termicamente em paralelo e constituem o TEG. Relativamente ao modelo elétrico, o TEG comporta-se como uma força eletromotriz (fem) e os semicondutores são conectados eletricamente em série. O segundo modelo foi o modelo de dissipador de calor, que foi adicionado por forma a melhorar o acoplamento térmico entre o lado frio do TEG e o ar ambiente. O desempenho foi melhorado pelo comprimento da perna, área de superfície de captação do TEG e altura do dissipador de calor.

Neste trabalho vamos abordar a modelização e análise de desempenho de TEGs aplicados no aproveitamento do calor do corpo humano. Dado que a maioria dos trabalhos publicados e dos modelos estudados na captação de energia é feita a partir de outras fontes, que não o calor do corpo humano, ir-se-á basear este trabalho nos estudos desses TEGs.

### 3. História dos sistemas de energy harvesting

O *energy harvesting* tornou-se um interessante tema de investigação devido ao seu potencial para ser utilizado numa ampla área de sistemas com alimentação própria. O seu conceito associa-se à captura de energia do ambiente inutilizável, associada a sistemas concebidos para outro fim, para convertê-la em energia utilizável [17].

As principais vantagens destes sistemas residem na portabilidade, no facto de ser uma energia limpa, redução da dependência de bateria e na capacidade de oferecer soluções a longo prazo [17].

O *energy harvesting* está associado à captura de pequenas quantidades de energia através de vários sistemas que foram originalmente concebidos para um outro propósito, sendo por isso interessante aproveitar a energia disponível do seu funcionamento. Podemos referir como exemplos o sistema solar, os sistemas com base no som, o sistema à base de vibrações ou sistemas com base em processos fisiológicos humanos, como a movimentação ou a temperatura corporal [3] [4].

#### 3.1. Sistema solar

Relativamente ao sistema solar o *energy harvesting* pode captar grandes ou pequenas quantidades de energia dependendo do clima.

A energia solar aparece como a maior fonte de energia ambiente, desde que haja luz suficiente [18]. Uma célula solar, ou célula fotovoltaica, é um dos promissores coletores de energia verde, convertendo a energia solar infinita em eletricidade por efeito fotovoltaico [19]. Em 1839, Edmund Becquerel descobriu o efeito fotovoltaico enquanto fazia experiências com uma célula eletrolítica composta por dois elétrodos de metal, mas a primeira célula solar de grande área foi construída em 1894 por Charles Fritts, que revestiu uma camada de selénio com uma fina camada de ouro [20].

Um sistema básico de captação de energia solar consiste num painel solar, um conversor DC-DC, uma bateria recarregável, um circuito de proteção de carga da bateria, denominado sistema de gestão de bateria (BMS) e uma unidade de controlo do conversor DC-DC. Geralmente, existem dois tipos de métodos de controlo de conversor DC-DC: (1) Controlo por modulação da largura de pulso (PWM) e (2) Controlo por procura do ponto de máxima potência (MPPT) [21]. A Figura 1 mostra estes sistemas.

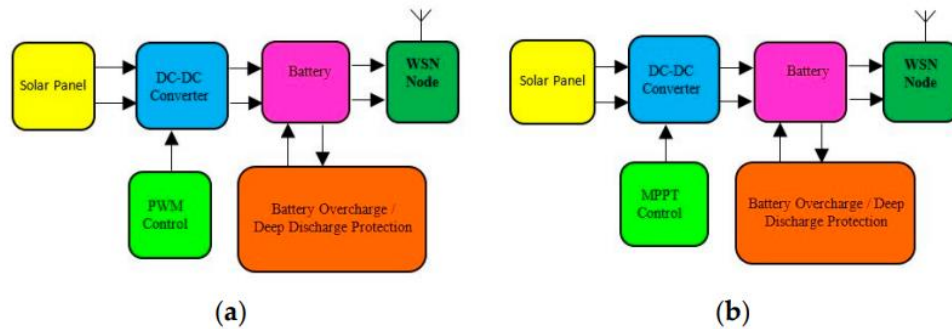


Figura 1 - Diagrama de blocos do sistema de captação de energia solar usando controle: (a) PWM e (b) MPPT [21].

### 3.2. Sistema com base no som

As fontes de energia sonora têm grande aceitação para aproveitamento de energia devido à sua abundância e ao facto de ser uma energia limpa, mas têm baixa densidade de energia. A energia sonora pode ser usada como fornecimento de energia para dispositivos de baixo consumo energético e também para resolver problemas de ruído [22].

A tecnologia de colheita de energia sonora consiste em captar e amplificar uma onda de som do meio ambiente por um ressonador ou metamateriais acústicos (sistemas compostos projetados para controlar, dirigir e manipular ondas sonoras a certas frequências de uma forma que não sejam observadas). A energia é convertida em energia elétrica por um método de conversão de energia específica, dependente do tipo de sistema (piezoelétrico, eletromagnético ou triboelétrico). Para aplicações de eletrónica de potência, onde as grandezas elétricas são AC, exigem-se processos de retificação, regulação e armazenamento de energia [22]. A Figura 2 representa graficamente a colheita de energia sonora.

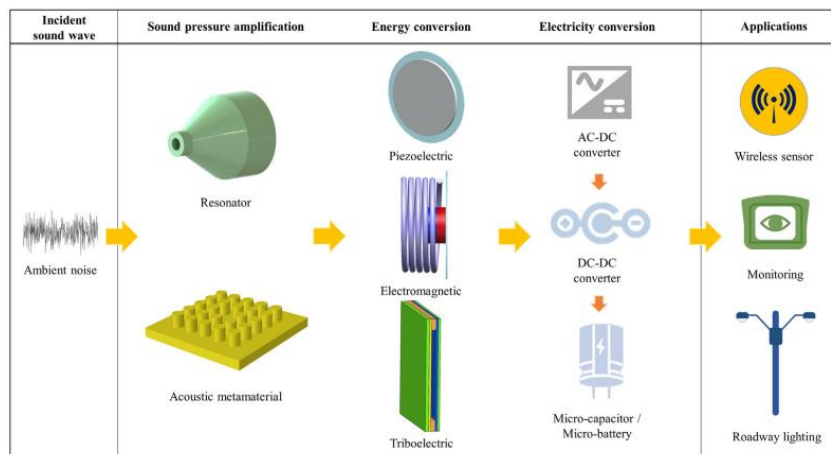


Figura 2 - Esquema da captação de energia sonora [22].

A captação de energia sonora típica geralmente consiste num ressoador, uma membrana e um material piezoelétrico. A função do ressoador é produzir uma oscilação sonora na sua frequência de ressonância, A membrana, que de um lado está ligada ao ressoador e do outro ligado ao material piezoelétrico, oscila em consonância. O material piezoelétrico converte a energia mecânica em energia elétrica [22].

### 3.3. Sistema à base de vibrações

Os sistemas de captação de energia à base de vibrações são possíveis devido ao efeito piezoelétrico (conversão de energia mecânica em energia elétrica [19]). A palavra piezoelectricidade significa eletricidade resultante da pressão. O efeito piezoelétrico foi observado pela primeira vez em 1880 por Pierre e Jacques Curie que previram e provaram experimentalmente que certos cristais exibiam uma carga superficial quando sujeitos a stress mecânico [20]. Existem dois tipos de efeito piezoelétrico, o direto e o inverso. O direto tem a capacidade de criar uma carga elétrica em resposta a um stress mecânico, ao passo que o inverso tem a capacidade de criar uma deformação mecânica em resposta a um potencial elétrico [23].

### 3.4. Efeito Termoelétrico

O efeito termoelétrico converte diretamente a diferença de temperatura em tensão elétrica e vice-versa. A termoeletricidade circunscreve três efeitos descritos separadamente, o efeito de Seebeck, de Peltier e o efeito de Thomson.

#### 3.4.1. Efeito de Seebeck

O efeito de Seebeck foi descoberto em 1821 por Thomas J. Seebeck. Ele demonstrou que quando um circuito é constituído por dois materiais diferentes, produz-se uma força eletromotriz entre as junções dos materiais, quando as junções de dois materiais são mantidas a temperaturas diferentes [24] [25]. O efeito Seebeck está ilustrado na Figura 3.

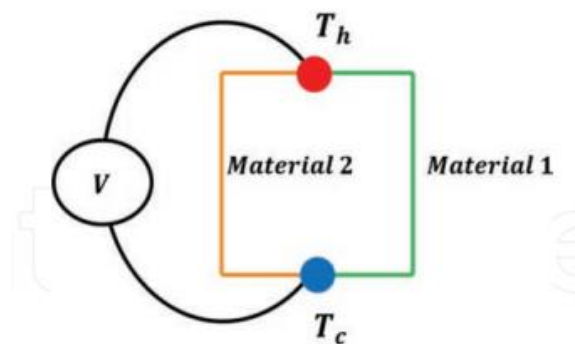


Figura 3 - Efeito Seebeck [26].

A força eletromotriz originada pelo efeito Seebeck aumenta em amplitude quando o coeficiente Seebeck dos materiais condutores e/ou a diferença de temperatura entre as suas conexões aumenta [26]. A tensão induzida pelo efeito de Seebeck é definida como na equação (1) [11], [25], [26]:

$$V = \alpha \Delta T \quad (1)$$

Onde:

- $V$  é o potencial elétrico produzido pela diferença de temperatura  $\Delta T$  entre a junção quente e a junção fria;
- $\alpha$  é o coeficiente de Seebeck.

### 3.4.2. Efeito de Peltier

O efeito de Peltier foi descoberto em 1834 por Jean Peltier [24] [25], quando demonstrou que na presença de uma corrente no circuito, e dependendo do sentido dessa corrente, vários materiais condutores absorvem ou emitem calor nas suas junções. A propriedade dos dois diferentes materiais condutores e a temperatura da junção determinam a capacidade de absorção ou dissipação de calor. A Figura de mérito ( $ZT$ ), um parâmetro adimensional, que é utilizado para especificar o desempenho termoelétrico de um determinado material, é dado pela expressão (2) [24]:

$$ZT = \frac{\alpha^2}{K} \sigma \Delta T \quad (2)$$

Onde:

- $ZT$  é a figura de mérito;
- $\sigma$  é a condutividade elétrica;
- $K$  é a condutividade térmica;
- $\alpha$  é o coeficiente de Seebeck;
- $\Delta T$  é a diferença de temperatura.

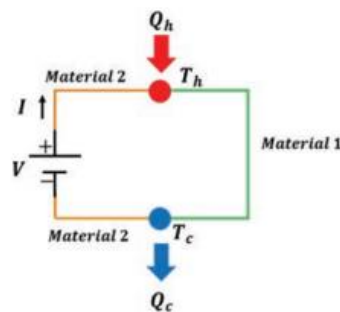


Figura 4 - Efeito de Peltier [26].

O efeito Peltier é o oposto do efeito de Seebeck [25], descreve a dissipação ou absorção de calor na conexão de dois materiais condutores, quando a corrente flui através da junção, conforme mostrado na Figura 4. Dependendo da direção do fluxo da corrente, o calor é absorvido ou dissipado na conexão [26]. O efeito de Peltier pode ser expresso matematicamente na forma mostrada na equação (3):

$$Q_{peltier} = \Pi_{AB}I \quad (3)$$

Onde:

- $\Pi_{AB}$  é o coeficiente de Peltier;
- $Q_{peltier}$  é o calor total absorvido ou rejeitado pelo sistema;
- $I$  é a corrente que passa pelo elemento termoelétrico [25].

### 3.4.3. Efeito de Thomson

O efeito de Thomson foi descoberto em 1851 por William Thomson. Está relacionado com a taxa de calor gerado (reversível) devido à corrente num condutor único. Este é considerado uma versão contínua do efeito de Peltier [24]. Este efeito descreve a dissipação ou absorção de calor, quando a corrente elétrica passa por um circuito composto de um único material, que apresenta variação de temperatura ao longo de seu comprimento, conforme mostrado na Figura 5.

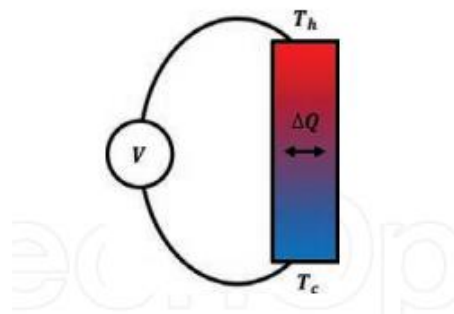


Figura 5 - Efeito Thomson [26].

O coeficiente de Thomson pode ser expresso matematicamente pela expressão (4) [26]:

$$\mu = T \frac{d\alpha}{dT} \quad (4)$$

Onde:

- $\mu$  é o coeficiente de Thomson;
- $T$  é a temperatura;
- $\alpha$  é o coeficiente de Seebeck.

#### 3.4.4. Arrefecedor Peltier

O princípio do efeito Peltier é descrito da seguinte forma: quando a corrente flui através de uma interface (dois condutores diferentes), dependendo do sentido do fluxo de corrente, a junção dos dois condutores absorverá (arrefecimento) ou libertará calor (aquecimento). O efeito do arrefecedor Peltier foi considerado pela primeira vez em 1911 por Altenkirch. As primeiras tentativas de criar arrefecedores termoelétricos não tiveram sucesso devido à falta de materiais de alto desempenho. Os materiais escolhidos para produção do efeito de Peltier são os semicondutores (geralmente telureto de bismuto ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ )) [27]. Este material pode ser utilizado para construir um dispositivo Peltier (módulo termoelétrico) simples em torno de um único *pellet* de semicondutor que é soldado a um material condutor de eletricidade em cada extremidade (geralmente cobre) e são colocados entre duas placas de cerâmica, no topo e na parte inferior [25], que conduzem calor, mas que se comportam como isolantes da corrente elétrica [26], [27].

O efeito termoelétrico é produzido por uma série de pares termoelétricos constituída por semicondutor do tipo n e do tipo p, conectados eletricamente em série e termicamente em paralelo. O calor externo é absorvido na extremidade quente, flui paralelamente à direção da perna e atinge a extremidade fria. Parte do calor é convertido em energia elétrica devido ao efeito termoelétrico, parte é dissipada por convecção nas superfícies laterais e a maior parte é removida por um sistema de arrefecimento na extremidade fria, como mostra a Figura 6 [15].

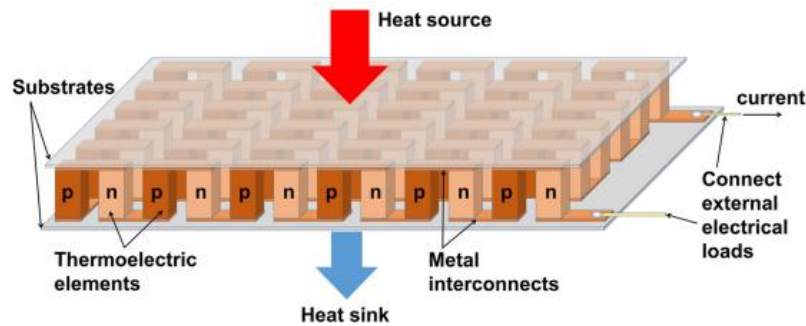


Figura 6 - Módulo TEG típico [15].

Os materiais termoelétricos mais usados na fabricação de TEs são os semicondutores  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  e suas ligas com metais de transição, como o antimônio (Sb), o estanho (Sn) e o chumbo (Pb) [2], [24], [28], cerâmicas como as de silício-germânio (SiGe) e o antimoniato de Cobalto ( $\text{CoSb}_3$ ) [2] [24] e polímeros (polianilina, polipirrol e poli (3,4-etilenodioxitiofeno) -poliestireno sulfonato) [24] [28]. O mais utilizado é o  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  com valor de ZT igual a 1, à temperatura ambiente [25].

As cerâmicas (óxidos metálicos) apresentam uma série de superioridades como maior estabilidade química, resistência à oxidação, menor toxicidade e menor custo em comparação com ligas TE, pois a sua utilização permite a construção de instrumentos com alta durabilidade [24].

Um sistema termoelétrico gera energia utilizando um número ou vários módulos termoelétricos. Para tal, deve haver grande diferença de temperatura em ambos os lados do gerador termoelétrico (TEG) [25]. O sistema usa permutadores de calor para aumentar a quantidade de calor que entra no módulo TE [25].

Os TEGs são sistemas de geração de energia interessantes, porque são sólidos, silenciosos, estáticos, ecológicos, com fontes de calor entre pequena a considerável e altamente fiáveis [11], [14], [15], [26].

A Figura 7 mostra o esquema de um circuito elétrico equivalente do gerador termoelétrico. Este permite entender o objetivo fundamental do TEG [11]. Se não houver ligação a uma carga, a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) é dada pela expressão (5):

$$V_{oc} = \alpha \Delta T \quad (5)$$

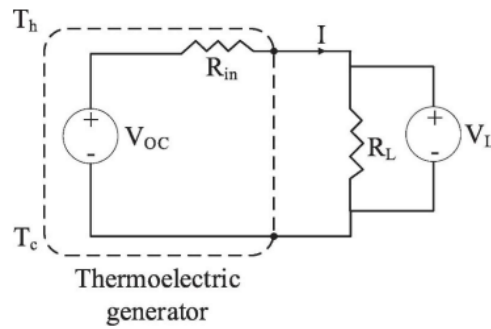


Figura 7 - Circuito elétrico equivalente do TEG [11].

Quando a resistência de carga ( $R_L$ ) é anexada, a tensão de saída do TEG ( $V_L = V_{out}$ ) é dada pela expressão (6):

$$V_{out} = V_{oc} - R_{in}I = R_L I \quad (6)$$

Onde:

- $R_{in}$  é a resistência interna do TEG;
- $I$  é a corrente do TEG.

A corrente é então calculada através da equação (7):

$$I = \frac{V_{oc}}{R_{in} + R_L} = \frac{\alpha \Delta T}{R_{in} + R_L} \quad (7)$$

A potência de saída do sistema  $P_{out}$  pode ser calculada através de (8):

$$P_{out} = V_{out}I = R_L I^2 = \frac{R_L \alpha^2 \Delta T^2}{(R_{in} + R_L)^2} \quad (8)$$

A eficiência do sistema é dada pela relação (9):

$$\eta = \frac{P_{out}}{Q_{in}} \quad (9)$$

Onde:

- $Q_{in}$  é o fluxo de calor;

### 3.4.4.1. Arrefecimento Peltier com semicondutores do tipo n

O material semiconductor do tipo n é usado para fabricar o sedimento, de modo que os elétrons (com carga negativa) sejam os transportadores de carga responsáveis pelo surgimento da maior parte do efeito Peltier.

Com uma fonte de tensão DC ligada, como mostrado na Figura 8, os elétrons serão repelidos pelo polo negativo e atraídos pelo polo positivo da fonte; os elétrons no nível de Fermi movem-se em direção ao polo positivo, libertando calor e criando lacunas no nível de Fermi.

Devido ao fornecimento contínuo de corrente, os elétrons passam da faixa de valência (faixa de energia mais baixa) para o nível de Fermi, absorvendo energia da junção. Com os elétrons fluindo através do material do tipo n de baixo para cima, o calor é absorvido na junção inferior e transferido ativamente para a junção superior [29].

Assim, podemos dizer que, no arrefecedor Peltier usando semiconductor do tipo n, o calor é absorvido na junção perto do polo negativo e o calor é libertado na junção perto do polo positivo.

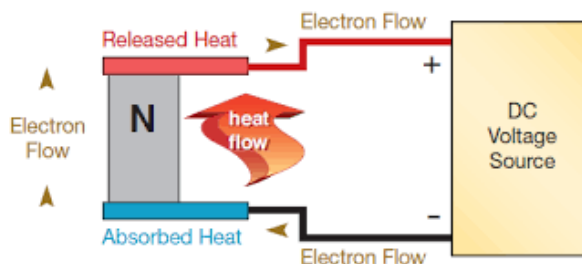


Figura 8 - Arrefecimento Peltier com semiconductor do tipo n [29].

### 3.4.4.2. Arrefecimento Peltier com semicondutores do tipo p

Quando a corrente DC é aplicada através do circuito, como mostra a Figura 9, as lacunas são atraídas para o polo negativo da fonte, libertando calor. Devido ao fornecimento contínuo de corrente, as lacunas da banda de condução movem-se para o nível de Fermi, absorvendo o calor da junção [29].

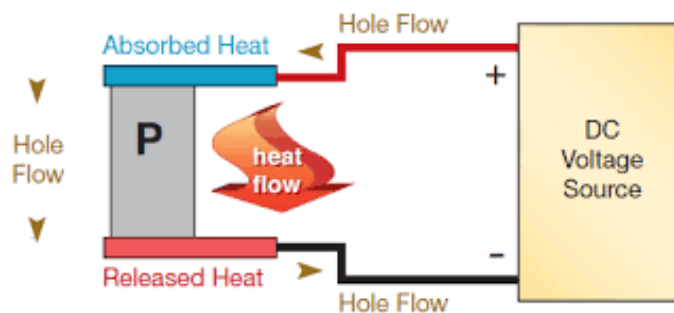


Figura 9 - Arrefecimento Peltier com semicondutor do tipo p [29].

### 3.4.4.3. Arrefecimento Peltier com semicondutores do tipo p e n

Através da organização das *pellets* (componentes termoelétricas) do tipo n e p num par, formando-se uma junção entre elas com uma aba de cobre revestida, é possível configurar um circuito em série que pode manter a transmissão de calor sempre no mesmo sentido. Como se mostra na Figura 10, a extremidade inferior da pastilha do tipo p é ligada ao potencial positivo e a extremidade livre (inferior) da pastilha do tipo n é ligada de maneira semelhante ao potencial negativo [29].

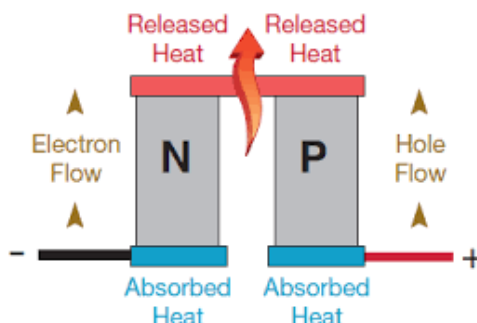


Figura 10 - Arrefecimento Peltier com pares de semicondutores n e p [29].

Ligando o circuito como se mostra na Figura 10, é possível libertar calor para um lado e absorver do outro lado. Usando essas propriedades especiais do par de semicondutores, é possível agrupar vários *pellets* em matrizes retangulares para criar módulos termoelétricos, como mostrado na Figura 11 [29].

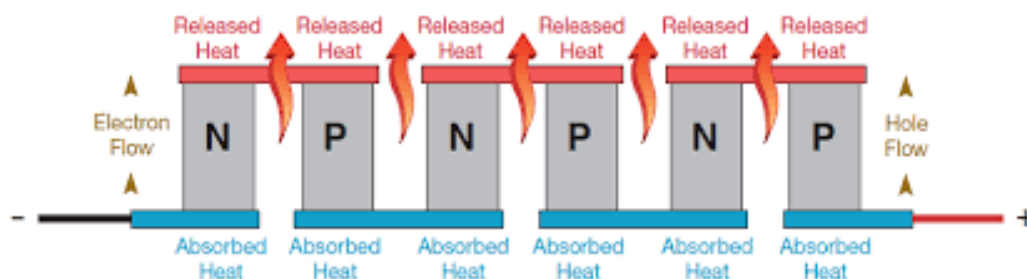


Figura 11 - Arrefecimento Peltier com vários “pellets” [29].

## 4. Estado da arte de aproveitamentos termoelétricos no corpo humano

Os dispositivos TEG surgiram como uma alternativa viável para certas aplicações de geração de energia [30]. Eles podem reduzir ou eliminar o uso de baterias em aplicações onde exista uma fonte de calor [30]. Uma vez que as baterias têm uma vida útil limitada antes de serem substituídas ou recarregadas, os TEGs oferecem a capacidade de produzir energia constante ao carregar ou substituir as baterias [30]. A energia obtida através do corpo humano é limpa e renovável [17], [31], [32].

O corpo humano produz calor como um subproduto das reações químicas metabólicas. Tanto a conversão de matéria orgânica em energia, quanto a transformação dessa energia em trabalho útil, contribuem para a temperatura corporal central. O calor é então distribuído para diferentes partes do corpo pelo fluxo sanguíneo e é libertado através da pele por radiação, convecção e evaporação do suor. À medida que a temperatura ambiente muda, o corpo regula o fluxo sanguíneo por meio da contração (vasoconstrição) e dilatação (vasodilatação) dos vasos sanguíneos [31].

A temperatura da pele é um fator importante que deve ser levado em consideração na escolha dos locais ideais para a captação de energia. A temperatura da pele é naturalmente mais alta nos locais do corpo onde os vasos sanguíneos estão mais próximos da superfície da pele, como mostra a Figura 12 [31].

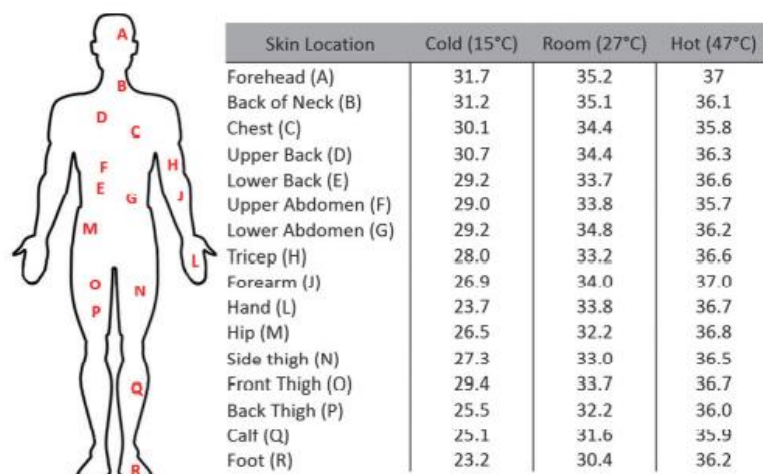


Figura 12 - Temperatura da pele humana para diferentes pontos do corpo com base nas temperaturas ambientais variáveis [31].

Pode-se observar que as temperaturas mais altas são medidas na testa e as temperaturas caem progressivamente em direção aos pés.

Os autores de [30] desenvolveram dispositivos TEG e colocaram-nos em diferentes locais no corpo, no pulso, no braço, no tórax e também numa camisa, para medir a quantidade de energia que pode se captada da temperatura corporal. Apesar de terem usado o mesmo dispositivo para o pulso e para o braço, o braço permitiu obter uma maior potência gerada. O braço e o tórax estão muito próximos do coração e são locais apropriados para medir os sinais da eletrocardiografia (EKG ou ECG). Um TEG no braço pode ser usado para alimentar um gravador de ECG vestível, permitindo a monitorização cardíaca contínua. O braço possui uma maior área, e mais lisa, em relação ao punho, o que permite melhor contato térmico do TEG com a pele. Também permite um fluxo de ar mais eficiente devido ao movimento natural do braço ao caminhar [30]. Por sua vez, o dispositivo usado para a camisa foi o mesmo que o usado para o tórax, mas o tórax permitiu obter uma energia superior à da camisa, mas inferior à do braço. Portanto, a maior geração de energia foi obtida colocando o dispositivo no braço devido à variabilidade do fluxo de ar e ao bom contato com a pele. O melhor local a seguir foi o punho, seguido do tórax e da camisa [30].

Os autores de [17] investigaram a geração de energia elétrica a partir da energia térmica humana em cinco partes do corpo: a perna, a parte superior do pulso, a parte inferior do pulso, a parte superior da mão e a palma da mão, variando a temperatura de 35.5 a 38.0 °C. No entanto, a perna cuja temperatura era de 35.5°C, forneceu tensão de saída inferior em relação às outras e à palma da mão, com temperatura de 38°C,

forneceu uma tensão superior. A potência gerada (24,7 mW) pela palma da mão foi capaz de alimentar LEDs.

A colheita bem-sucedida de calor do corpo humano depende da maximização do diferencial de temperatura, influenciada por várias resistências térmicas parasitas, o que acaba por ser uma tarefa desafiante [31].

A Figura 13 ilustra três resistências principais que afetam a eficiência desses dispositivos. Em primeiro lugar, a pele humana é um bom isolante térmico, o que leva a uma resistência térmica da pele entre o núcleo do corpo e o TEG. Em segundo lugar, existe uma grande resistência de contato térmico na interface pele-TEG devido à morfologia áspera da pele. Finalmente, existe uma resistência térmica na interface TEG-ambiente fortemente determinada pela convecção [31].

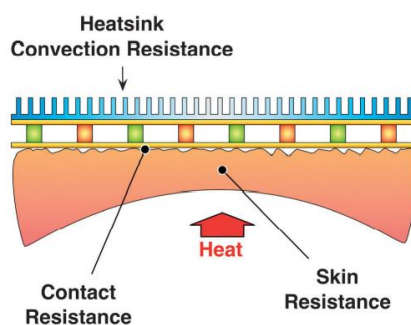


Figura 13 - Resistências parasitas que afetam o desempenho do TEG [31].

A geração termoelétrica consiste em colocar um lado de um módulo termoelétrico em contato com a pele humana e outro em contato direto com o meio ambiente, possivelmente por meio de um dissipador de calor [16]. A diferença de temperatura é usada para converter diretamente o calor em energia elétrica [16]. Esta diferença permanece relativamente baixa, principalmente em função do pequeno diferencial entre as duas fontes, bem como de um mau acoplamento térmico do gerador com seu ambiente como ilustra a Figura 14 [16], tornando a tensão de saída do TEG baixa.

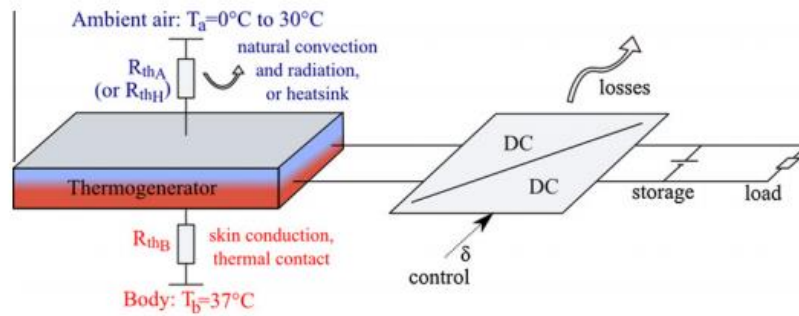


Figura 14 - Sistema de geração termoelétrica utilizando o corpo humano [16].

O dissipador de calor tem como vantagem permitir uma melhor dissipação de calor e arrefecimento por todo o dispositivo TEG, aumentando assim o seu desempenho geral para aplicações no corpo, bem como a durabilidade para ser usado em várias partes do corpo [30].

O calor corporal é uma fonte natural de energia que pode ser aproveitada por meio do efeito termoelétrico [17], [28], [30]. O corpo humano pode produzir em média aproximadamente  $10\text{-}30\mu\text{W}/\text{cm}^2$  de energia elétrica em clima moderado, em 24 horas [17]. O calor extraído do corpo humano é suficiente para alimentar sensores vestíveis e eletrônicos [30], [31], estimuladores e sensores implantáveis, como estimuladores cerebrais profundos, cócleas artificiais e monitores de saúde sem fios [28], [32], dispositivos de encefalografia (EEG), pulseira TEG em tecido de vidro [17], sensores corporais, como eletrocardiograma (ECG) e oxímetro de pulso [31].

Um TEG projetado para uso humano não deve interferir nos movimentos do usuário, devendo ser confortável e permitir a colheita de energia numa ampla área de superfície [32].

Geralmente, os dispositivos flexíveis utilizando tecnologia de sensores vestíveis, apresentam energias relativamente baixas. Este fato está relacionado com a estrutura do dispositivo, composição corporal, velocidade do ar em relação à pessoa, anatomia humana para homem e mulher, e colocação no corpo humano [30].

## **5. Caracterização dos diferentes parâmetros do gerador e análise da sua influência no desempenho energético**

Percebe-se que os módulos dos elementos termoelétricos são comparativamente ineficientes em relação aos outros sistemas de geração de energia, como por exemplo o fotovoltaico [11]. O uso de dispositivos termoelétricos é limitado por causa da baixa eficiência, já que estes funcionam em cerca de 10% de eficiência no ciclo de Carnot [9]. A eficiência depende do desempenho dos módulos termoelétricos (TEM).

O desempenho dos módulos termoelétricos depende de vários parâmetros. A sua correta avaliação e simulação é crucial, tanto no desenvolvimento dos módulos quanto na sua aplicação num sistema completo [8]. A modelização numérica pode ser útil para encontrar e otimizar parâmetros críticos, permitindo avaliar as perdas térmicas com boa precisão e estudar a viabilidade de integração de um módulo TE num gerador [8]. Um TEM é feito normalmente de elementos termoelétricos tipo n e p, conectados eletricamente em série e termicamente em paralelo. Os elétrodos grossos conectam o elemento por meio de uma resistência de contacto elétrico e outra de contacto térmico [8]. Em geral, os substratos de cerâmica proporcionam o isolamento elétrico e o suporte mecânico [8].

Em geral, os geradores termoelétricos apresentam baixa eficiência de conversão, no entanto eles podem ser soluções promissoras [26] se os seus desempenhos forem melhorados ao nível da tensão de saída, potência, corrente elétrica e eficiência [8], [25].

De entre os fatores que influenciam o desempenho energético podemos encontrar os seguintes:

- Parâmetro do material dependente da temperatura, ou seja, Figura de mérito ( $ZT$ ) que, como se viu atrás, depende do coeficiente de Seebeck, da condutividade térmica e da resistividade elétrica do material. Portanto, os materiais termoelétricos devem ser produzidos com alto coeficiente de Seebeck, alta condutividade elétrica e baixa condutividade térmica, por forma a aumentar a Figura de mérito [2], [9] [25]. Para cada diferença de temperatura a eficiência aumenta, à medida que o valor da temperatura aumenta [26];

- Geometrias das pernas (cilíndrica, retangular, cónica, trapezoidal, octaédrica, etc.) [8], [10], [11], [15]. Relativamente às dimensões das pernas, variando o comprimento da perna a potência de saída também varia, aumentando assim a produção de energia com a diminuição do comprimento da perna; na prática, será difícil manter o gradiente de temperatura para o comprimento da perna menor [9], [15]. Quando existir a convecção de calor na superfície lateral (SSHC), a eficiência e a potência de saída diminuirão com o aumento da SSHC [14]. O formato das pernas influencia a tensão de saída; por exemplo, quando se consideram dois modelos, o retangular e o diamante, no último a tensão de saída será maior [11] porque a área de seção circular minimiza o efeito SSHC [14]. À medida que a área de seção transversal aumenta, a eficiência primeiro aumenta rapidamente, atinge o máximo e, em seguida, diminui lentamente; a potência de saída aumenta rapidamente e, em seguida, atinge um determinado patamar, e a corrente aumenta [15]. A potência máxima de saída ocorre quando a resistência de carga for igual à resistência interna do par do elemento termoelétrico [12], [25];
- Número de módulos termoelétricos. Os fabricantes de módulos termoelétricos costumam disponibilizar soluções com diferentes alturas, áreas de seção transversal e diferentes números de elementos. Para cada aplicação pré-definida, não é óbvia a escolha do módulo ideal. Assim, para um projeto térmico completo com parâmetros fixos, poder-se-á selecionar um número de módulos que conduza à maximização da energia obtida. Um valor ideal do número de módulos ( $N$ ) maximiza a potência de saída e será dado pela expressão (10) [12]:

$$N = \frac{1}{\beta} \sqrt{\frac{1}{ZT+1}} \quad (10)$$

Onde o parâmetro adimensional ( $\beta$ ) se relaciona com o parâmetro adimensional ( $\gamma$ ) através de (11), sendo estes parâmetros calculados através de (12).

$$\beta = \frac{1}{\gamma} \quad (11)$$

Com

$$\gamma = \frac{R_L}{R_0}; \beta = \frac{R_{ext}}{R_{oth}} = \frac{R_{ext}}{NR_{in}} \quad (12)$$

Onde:

- $R_L$  é a resistência de carga que conduz ao máximo de potência;
- $R_0$  é a resistência elétrica do conjunto dos módulos;
- $R_{0th}$  é a resistência térmica do conjunto dos módulos;
- $R_{ext}$  é a resistência térmica parasita do conjunto dos módulos (contatos térmicos, permutadores, etc.);
- As propriedades dependentes da temperatura do elemento cerâmico (ou passivo) (condutividade térmica). Aumentando a corrente, a tensão de saída diminui [26]. O comprimento diminui à medida que a condutância de contacto térmico aumenta [15];
- As temperaturas externas (quentes e frias) [8], [10]. Quanto maior for a diferença de temperatura, melhor será o desempenho de energia do TEG [2]. No entanto, com aumento da temperatura no lado quente, a potência de saída aumenta [26];
- Os elementos parasitas térmicos e elétricos (resistência térmica e elétrica dos eletrodos, resistência de contato elétrico, colagem, camadas térmicas adicionais (almofada de silicone, grafite, pasta)) [8]. Na colagem de dois materiais diferentes, haverá sempre microfissuras ou defeitos na interface, o que, para módulos TEG, provocará inevitavelmente uma resistência de contato nessas interfaces imperfeitas [15]. Essas microfissuras interfaciais obstruirão o fluxo de calor através da interface, causando quedas repentinas de temperatura, afetando o desempenho do TEG [15]. Os valores da resistência de contato podem ser afetados pela pressão de contato aplicada, a rugosidade das superfícies, as propriedades do material da camada interfacial, métodos de fabrico e condições de operação [10]. O aumento das resistências de contato elétrico e térmico reduzirá a eficiência e a potência de saída [15]. A resistência térmica auxilia na determinação de transferência de calor através de placas de cerâmica, tiras de cobre e pernas semicondutoras do tipo n e p [26]. O stress térmico ocorre na área próxima das junções quentes e o maior ocorre em torno das bordas das pernas [11], [15]. O aumento da resistência de contato elétrico aumentará a resistência elétrica total do circuito e, assim, diminuirá a potência de saída [15]. O efeito das resistências de contato aumenta com a diminuição do comprimento do elemento, tornando o desempenho do TEC menor [15], [25]. Os efeitos Peltier, Joule e Thomson, quando incluídos na equação das camadas

térmicas, tornam o fluxo de calor mais elevado, o que faz aumentar a temperatura [8], [10]. Os valores da resistência térmica poderão ser modificados através da variação da espessura da pasta térmica, da altura e da condutividade dos elementos termoelétricos [8].

As equações do comportamento termoelétrico dos módulos TEG são não lineares, por causa das temperaturas externas e internas que dependem do fluxo de calor que, por sua vez, depende do gradiente de temperatura, das propriedades do material e da corrente elétrica. Estas são geralmente resolvidas através de métodos numéricos, considerando um circuito elétrico aberto [8].

## 6. Modelização do gerador termoelétrico

Neste Capítulo descrevem-se alguns modelos propostos na literatura para descrever o comportamento dos geradores termoelétricos.

### 6.1. Modelo Matemático

O modelo matemático desenvolvido é uma tentativa para considerar os efeitos ignorados pelos pressupostos independentes da temperatura e analisar o desempenho do TEM. Figura 15 e a Figura 16 [39].

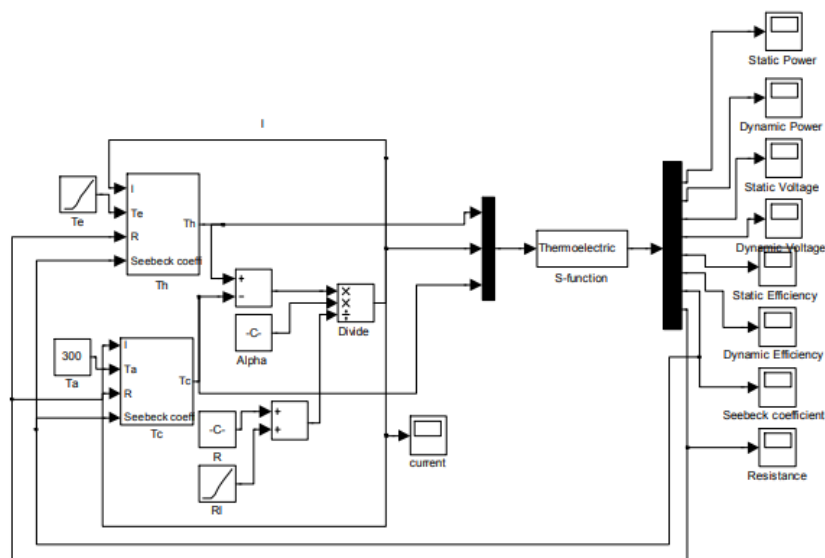


Figura 15 - Modelo matemático [39].

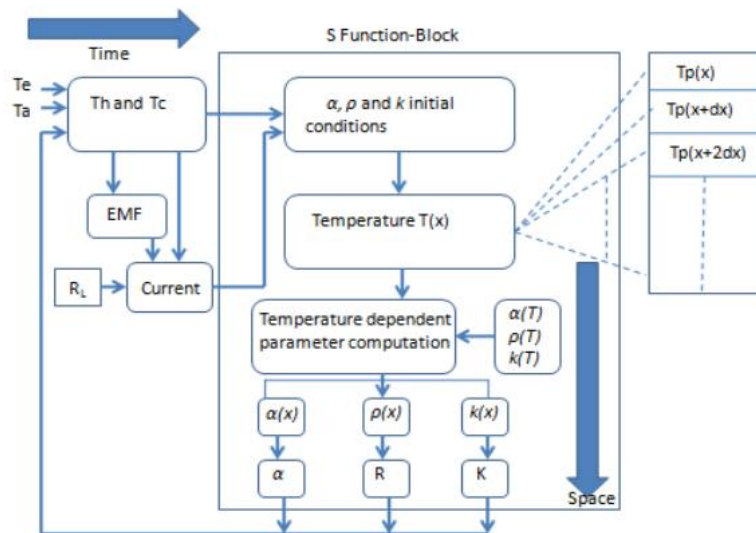


Figura 16 - Fluxograma para desenvolvimento de modelo no domínio do tempo e espaço [39].

Existem duas etapas de funcionamento do modelo: no domínio do tempo e no domínio do Espaço, como mostrado na Figura 16. Essas duas etapas não apenas se complementam, mas também acontecem em simultâneo e, portanto, dinamicamente afetam os parâmetros elétricos do TEM.

Relativamente à etapa do domínio no tempo, a variação da temperatura da fonte quente é considerada de acordo com a variação da temperatura da junção quente do TEM. Conforme mostrado na Figura 15.

Relativamente à etapa do domínio no espaço, este modelo é calculado no espaço por um passo de tempo para calcular os parâmetros dependentes da temperatura ao longo do comprimento do TEM. O Matlab simulink oferece a vantagem de escrever programas em função S definida pelo usuário. Neste modelo, S-Function 'Dynamic' pode computar um conjunto de programas e interlacá-lo com o modelo simulink para permitir mudanças dinâmicas através da passagem de parâmetros. As entradas para esta função são  $T_c$ ,  $T_h$  e  $I$ , respetivamente.

## 6.2. Modelo iterativo dependente da temperatura do gerador termoelétrico, incluindo perdas térmicas nos elementos passivos

Neste modelo foram usados dois módulos termoelétricos de telureto de bismuto comerciais (TEM1 e TEM2) com resistências térmicas significativamente diferentes: o primeiro, GM200-71-14-16, de dimensões 30mm x 30mm e o segundo, GM250-127-28-10, de dimensões 62 mm x 62 mm, respetivamente, de alta potência e alto fluxo de calor [8].

Para resolução das equações não lineares do comportamento do sistema, adota-se um processo iterativo. Consideram-se como parâmetros de entrada as dimensões geométricas, os parâmetros de material dependentes da temperatura, as propriedades dependentes da temperatura do elemento cerâmico ou passivo (condutância térmica,  $k_{tem}$ ), a temperatura externa ( $T_h$  e  $T_c$ ) e todos elementos parasitas térmicos ( $K_p$ ) e elétricos [8].

A aplicação desta metodologia baseia-se em dois ciclos de resolução: o ciclo inicial (ou ciclo de circuito aberto) e o ciclo principal, como mostra o fluxograma da Figura 17 [8].

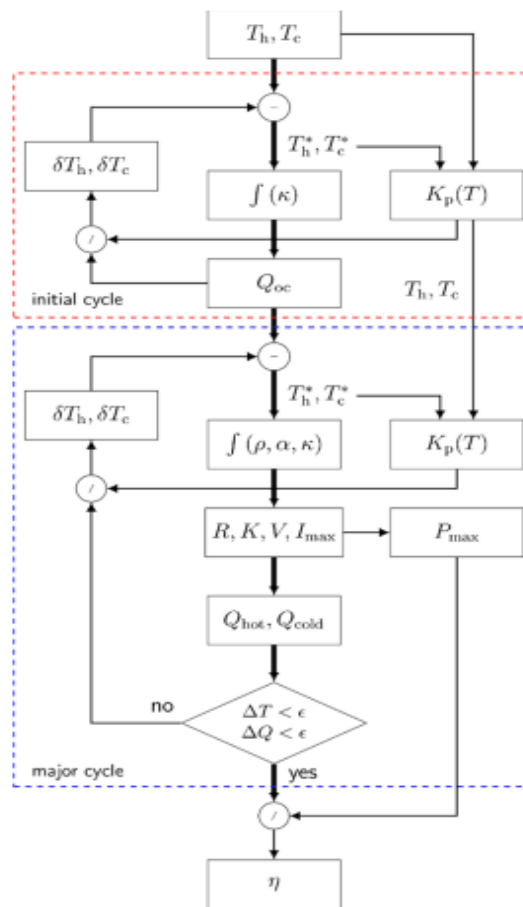


Figura 17 - Algoritmo de ciclos iterativo [8].

O ciclo de circuito aberto define as temperaturas, a condutância térmica dos pares n e p ( $k_{tem}$ ), os elementos parasitas térmicos e o fluxo de calor, não considerando a potência de saída ( $P_{out} = Q_{oc}$ ) [8]. Neste, o fluxo é dado apenas por calor condutor.

$$P_{out} = \left( \frac{1}{k_{tem}} + \frac{1}{k_p} \right)^{-1} \Delta T \quad (13)$$

Onde:

- $k_{tem}$  é obtido da etapa anterior pela integração de  $k_{n(p)}$  entre temperaturas quentes e frias.

$$k_{tem} = n \left( \int_{T_c^*}^{T_h^*} K_n dT \right) \frac{1}{\Delta T^*} \frac{A_n}{L} + n \left( \int_{T_c^*}^{T_h^*} K_p dT \right) \frac{1}{\Delta T^*} \frac{A_p}{L} \quad (14)$$

onde:

- $A_{n(p)}$  e  $L$  são parâmetros geométricos dos elementos termoeletricos, e

$$K_p = \left( \frac{1}{K_{ce} \frac{A_{ce}}{L_{ce}}} + \sum_i \frac{1}{K_i \frac{A_i}{L_i}} \right)^{-1} \quad (15)$$

Que está relacionado com a cerâmica ( $K_{ce}$ ,  $A_{ce}$  e  $L_{ce}$ ) e todos elementos passivos adicionados por condutância, área e espessura ( $K_i$ ,  $A_i$  e  $L_i$ ).

As perdas das temperaturas, que são correções de feedback, podem ser dadas de acordo com a equação 17.

$$\delta T_{h(c)} = \frac{P_{out}}{K_p(T)} \quad (16)$$

O resultado é usado para corrigir as temperaturas  $T_h$  e  $T_c$  em

$$T_h^* = T_h - \delta T_h, \quad T_c^* = T_c - \delta T_c \quad \text{e} \quad \Delta T^* = T_h^* - T_c^* \quad (17)$$

As temperaturas iniciais do lado quente e do lado frio,  $T_h$  e  $T_c$ , são corrigidas a cada iteração por subtração da nova aproximação de perdas de temperatura  $\delta T_h$  e  $\delta T_c$ . Em cada bloco, as equações relativas ao comportamento dos materiais e do módulo são função das temperaturas. O processo iterativo cessa quando os critérios de convergência para  $T$  e  $Q$  são verificados (erros relativos) [8].

Findo este processo, as temperaturas corrigidas dos dois lados do módulo são agora valores de entrada para o ciclo principal, o que acelera a execução quando comparada com um único ciclo [8].

O ciclo principal baseia-se no princípio de Stevens, no qual se considera que a resistência de carga iguala a resistência do módulo termoelétrico, o que evita a resolução de equações não lineares com temperaturas de junção desconhecidas. Para além disso, estabelece-se uma retroação do valor dos fluxos de calor,  $Q_h$  e  $Q_c$  (quente e frio), que inclui os efeitos de Peltier, Thomson e Joule [8].

O ciclo principal calcula os integrais das propriedades do material ( $\alpha$ ,  $\kappa$  e  $\rho$ ), a partir das temperaturas para obter a partir de fatores geométricos (áreas  $A_p$  e  $A_n$ , comprimento  $L$  e número de pares de módulos  $N$ ) a resistência  $R_{in}$ , a condutividade térmica,  $K$ , tensão de Seebeck  $V$  e a corrente elétrica  $I$  [8].

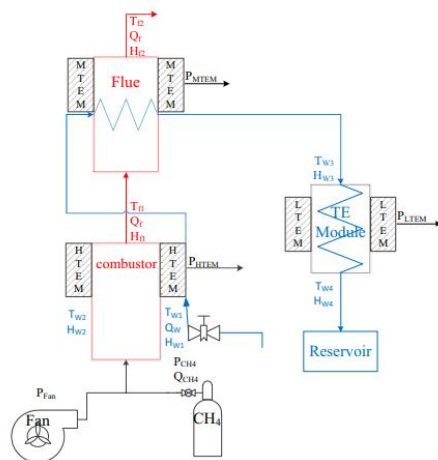
Por fim, quando o critério de convergência é verificado, a potência e a eficiência máximas,  $P_{max}$  e  $\eta_{max}$ , respetivamente, são calculados através das expressões (18) e (19).

$$P_{max} = R_{in} I^2 \quad (18)$$

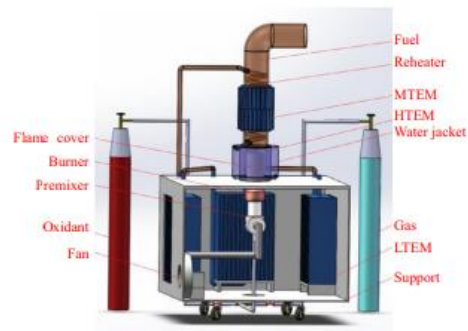
$$\eta_{max} = \frac{P_{max}}{Q_h} \quad (19)$$

### 6.3. Modelo Dinâmico

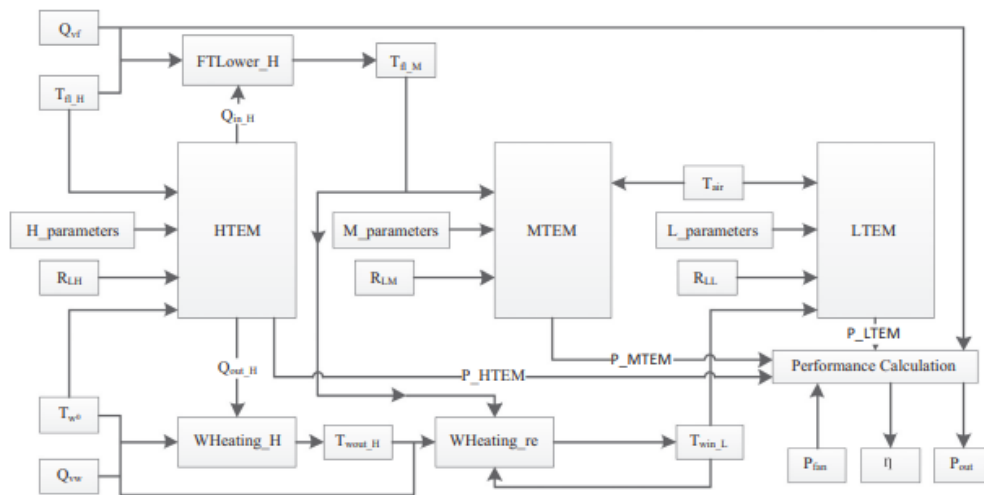
Neste modelo dinâmico adota-se um sistema de geradores termoelétricos em cascata (CTEG), como mostra a Figura 18. Para o seu desenvolvimento, combinou-se três módulos TE com diferentes materiais [13].



(a)



(b)



(c)

Figura 18 - Modelo dinâmico. Diagrama do sistema de geração de energia termelétrica em cascata (a); diagrama esquemático tridimensional (b); configuração do modelo (c) [13].

A potência resultante da fonte de calor ( $P_{fan}$ ) alimenta o módulo de geração de energia termoeétrica ( $P_{HTEM}$ ) de alta temperatura (HTEM). Em seguida, o gás de combustão de alta temperatura entra na combustão para fornecer calor para o próximo módulo, que é o de geração de energia termoeétrica ( $P_{MTEM}$ ) de média temperatura (MTEM). A água de arrefecimento que flui para fora do HTEM entra no permutador de calor para absorver o calor do gás de exaustão primeiro e, seguidamente, para a parte de energia de baixa temperatura para fornecer calor para o módulo de geração de energia termelétrica ( $P_{LTEM}$ ) de baixa temperatura (LTEM) [13].

A utilização do MTEM de forma direta e do LTEM de forma indireta, faz com que a capacidade do sistema seja aumentada em comparação com o TEG do sistema de estágio único [13]. Estes sistemas permitem ainda que a temperatura do gás de combustão de saída seja reduzida, sendo a perda de energia do sistema também reduzida, aumentando assim a eficiência [13].

#### 6.4. Modelo Analítico

O modelo analítico considera tanto a resistência de contacto entre a perna e o eléctrodo, como as propriedades dependentes do material para avaliar o desempenho do TE. Este modelo permite aos projetistas encontrar o comprimento e a área de seção transversal ideais da perna no desenvolvimento dos módulos TE, encontrar a faixa de resistência de contato aceitável na escolha dos materiais de interface adequados, e reduzir o tempo computacional necessário para o cálculo da eficiência e da potência de saída dos TEGs [15].

O material usado no TE foi o  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ . Os eléctrodos são de cobre e a amostra é fabricada num cilindro, conforme mostra a Figura 19(a). O cobre e o  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  são soldados juntos através de solda [15]. Os autores deste trabalho fabricaram dois protótipos com interfaces diferentes. Num utilizaram solda de uma liga composta por 42% de estanho e 58% de bismuto ( $\text{Sn}_{42}\text{Bi}_{58}$ ) e na outra prata condutora. A primeira interface com condutividades elétrica e térmica mais baixas em relação à segunda interface [15].

A Figura 19(c) mostra o tamanho de amostra e quatro pontos de medição I, II, III e IV, que são mostrados com termopares do tipo K para medir temperatura nos pontos. Quando o material está em regime estacionário, as temperaturas são medidas usando um termómetro (FLUKE 51II) e as diferenças de potencial elétrico entre as superfícies superior e inferior são medidas com um multímetro digital (FLUKE 17B +). A resistência elétrica é medida com base na medição de resistência de 4 fios, ou ponte de Kelvin (dois fios são usados para fornecer a corrente de alimentação ao componente de medição e os outros dois fios são usados para medir a queda de tensão no elemento de medição. Todo o dispositivo de medição é mostrado na Figura 19(b). A diferença de temperatura é gerada com uma placa de aquecimento HEATER-3040. O esquema da configuração de medição é mostrado na Figura 19(c) [15].

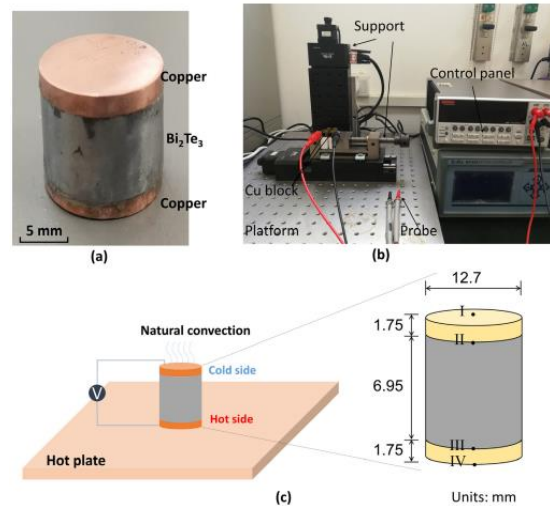


Figura 19 - Configuração do modelo. (a) protótipo; (b); dispositivo para medição da resistividade elétrica; (c) configuração esquemática de medição completa e tamanhos de amostra [15].

## 6.5. Modelização de um sistema completo

Este modelo usa um conversor DC-DC e a sua configuração é mostrada na Figura 20. Para replicar a saída do TEM, utiliza-se uma unidade de medição da fonte (SMU). Ao terminal referido como *Ch.1*, na Figura 20, está associada a saída do módulo TE, ligado em série com a resistência variável  $r$  e a entrada do conversor de potência. Este canal deve operar em modo de fonte de tensão, mantendo a tensão  $E$  constante e simultaneamente medindo a corrente atual gerada  $I_{in}$ . O dispositivo é controlado a partir de um PC de forma remota por meio de uma arquitetura de software de instrumentação virtual (VISA) durante a operação [33].

A saída do conversor de potência deve ser ligada ao segundo terminal (*Ch.2*) que mantém a tensão de saída  $V_{out}$  e mede a corrente de saída  $I_{out}$  atual. Este canal permite extrair a potência máxima de conversor, imitando assim a carga combinada do circuito de aplicação [33].

Esta configuração permite uma avaliação precisa da resistência  $R_L$  e da eficiência  $\eta$ , para um determinado conjunto de parâmetros configuráveis  $E = V$ ,  $r$  e  $V_{out}$ , substituindo as medidas de  $V$ ,  $I_{in}$ , e  $I_{out}$  nas equações (20) e (21):

$$R_L(V, r) = \frac{V}{I_{in}} - r \quad (20)$$

$$\eta(V, r) = \frac{V_{out} I_{out}}{V I_{in}} \quad (21)$$

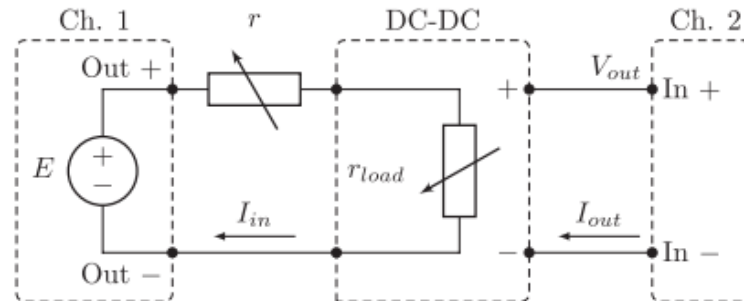


Figura 20 - Configuração para avaliação experimental do conversor de potência [33].

A Figura 21 mostra o fluxograma do algoritmo do modelo, onde os processos térmicos e elétricos estão interligados. Os efeitos de Seebeck e Peltier são considerados. O primeiro descreve a dependência da força eletromotriz  $E$  nas temperaturas do circuito térmico, enquanto o segundo provoca alterações na resistência termoelétrica, dependendo da resistência de entrada  $r_{load}$  do conversor DC-DC [33].

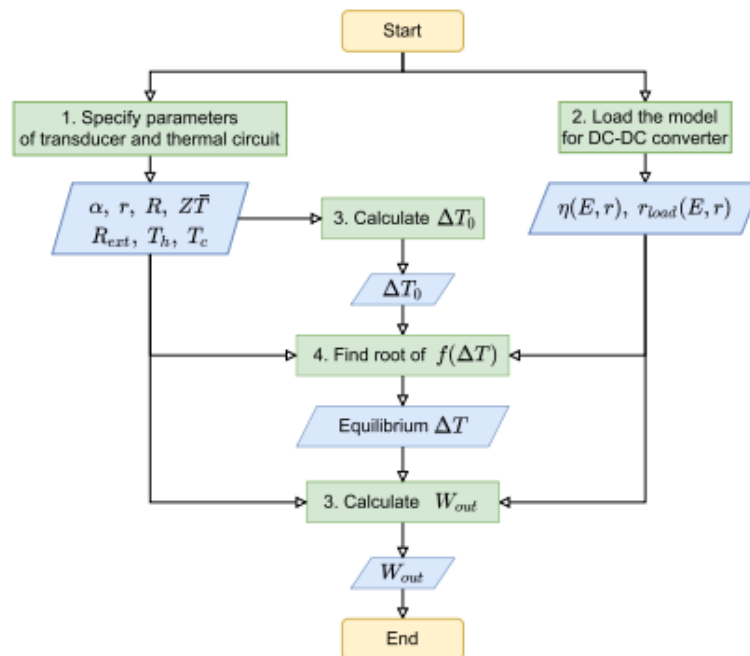


Figura 21 - Fluxograma do algoritmo de modelização do sistema proposto de gerador termoelétrico mencionado acima [33].

## 6.6. Simulação de um Modelo TEG com base no Simulink

Os autores do trabalho [34] desenvolveram um modelo para o TEG baseado no Simulink, tendo em conta as equações dos fenómenos termoelétricos como o aquecimento de Joule, a condução térmica, o aquecimento/arrefecimento Peltier e o efeito Seebeck e as resistências elétrica e térmica.

A Figura 22 mostra o diagrama de blocos criado no Simulink. O modelo é simulado variando a resistência de carga de 0 a 100  $\Omega$ . Das simulações, observa-se o comportamento da tensão de saída, da corrente, da potência e da eficiência.

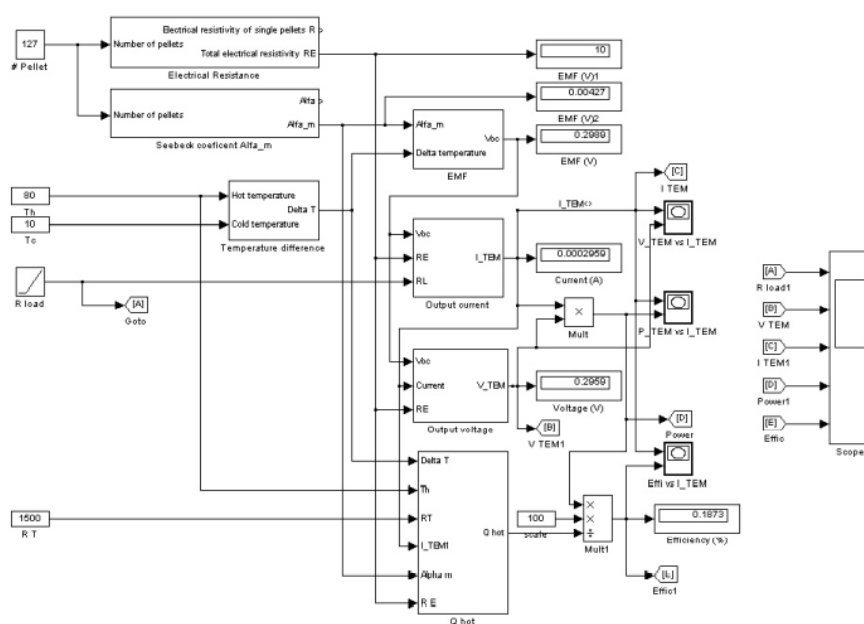


Figura 22 - Diagrama de blocos Simulink do modelo TEG [34].

## 7. Caracterização do gerador através da utilização de programas de simulação

Para obtenção das características do TEG são utilizados vários programas de simulação. Os mais comuns são o ANSYS [8], [9], [14] e [15], o CONSOL [8], [9], [10], [11], o SPICE [8], [10], o Matlab [8], o Microsoft Excel [9], e os métodos Taguchi e ANOVA [10].

O Matlab é um dos ambientes de programação mais amplamente disponíveis e versáteis [8]. As equações básicas, perdas de temperatura devido a elementos passivos

térmicos e elétricos, as propriedades dependentes da temperatura e as temperaturas reais em elementos termoelétricos, podem ser simuladas no MATLAB [8].

A análise numérica através do método de elementos finitos (FEM) pode ser aplicada utilizando o ANSYS e o COMSOL para, por exemplo, estudar a viabilidade de integração de um módulo TE num gerador [8]. A geometria da perna, a malha, a criação de um modelo 3D de um módulo e o cálculo da distribuição de temperaturas podem ser modelados no ANSYS design Modeler [9][14] [25].

O COMSOL Multiphysics é um software que permite a criação de modelos definindo parâmetros, construindo uma geometria, aplicando as equações físicas, criando a malha de elementos, e resolvendo o modelo, que depois permite a visualização e pós-processamento dos resultados [11]. Este permite definir vários tamanhos de malha de elementos (normal, fina, grossa, mais grossa) [10].

A modelização analítica pode ser feita resolvendo as equações que descrevem os princípios de funcionamento do sistema utilizando o Microsoft Excel [9].

Os modelos elétricos podem ser simulados no SPICE, para dar uma descrição simples do comportamento dinâmico e estático do sistema termoelétrico, concordando com os modelos experimentais, embora esses modelos usem propriedades independentes da temperatura [8], [10].

Para obter as características do CTEG, foi utilizado o método de simulação do sistema baseado nas equações de conservação. Este modelo foi descrito no modelo dinâmico. A definição da equação consiste no seguinte: o fluxo de calor de entrada de cada módulo, lado quente, transfere calor para o lado frio por condução e, conseqüentemente, a potência do circuito total do módulo [13]. Ou seja, o fluxo de calor da entrada dos módulos é o somatório do fluxo de calor por condução pela potência total do circuito (equação 23).

$$Q_{in} = Q_c + P_t \quad (22)$$

Onde:

- $Q_{in}$  é o fluxo de calor da entrada dos módulos;
- $Q_c$  é fluxo de calor por condução;
- $P_t$  é potência total do circuito [13].

Os métodos de Taguchi e ANOVA são utilizados para otimizar os parâmetros dos modelos e não para simulação dos modelos.

O método Taguchi tem sido amplamente utilizado para otimizar variáveis operacionais devido à sua característica única de requerer um número mínimo de experiências [10]. O método Taguchi usa um conjunto de matrizes ortogonais predefinidas para a definição das experiências ou otimização de processos. A escolha de matrizes ortogonais depende do número de fatores a serem estudados e da profundidade das informações a serem estudadas, ou seja, o número de níveis para cada fator de controlo. Taguchi introduziu o conceito de relação sinal-ruído (S/N), onde a saída desejável é considerada como sinal e a saída indesejável é denominada de ruído. Esta razão é uma medida de variabilidade no processo [10].

A análise de variância (ANOVA) pode ser usada para analisar os parâmetros do processo que afetam o desempenho do sistema. A tabela típica da ANOVA compreende: graus de liberdade, soma dos quadrados, variância, valores  $F$  e contribuição percentual de cada um dos fatores de controlo [10].

A ANOVA pode determinar se as médias de três ou mais grupos são diferentes. A ANOVA usa testes  $F$  para testar estatisticamente a igualdade entre médias. Os valores  $F$  são obtidos quando se executa uma experiência na tabela ANOVA, calculados para saber se os parâmetros são significativos ou não. Quanto maior for o  $F$ , mais significativo será o parâmetro e assim podemos saber se o modelo pode ser ou não validado.

O valor  $F$  é dado pela equação 24

$$F = \frac{MS_{\text{parametro}}}{MS_E} \quad (23)$$

Onde:

- $MS_{\text{parametro}}$  é o quadrado médio do parâmetro;
- $MS_E$  é o erro quadrático médio.

## 8. Proposta e análise energética de um sistema de geração de energia termoelétrica a partir da temperatura do corpo

### 8.1. Simulação do Modelo no Matlab/Simulink

O modelo do TEG aqui proposto foi desenvolvido no Matlab. Este software permite fazer simulações, criar gráficos e pacotes completos de dados computacionais [35]. O Simulink é uma ferramenta de simulação integrada no Matlab, que permite modelar, simular e analisar sistemas dinâmicos, como sistemas de controlo, processamento de sinal, comunicação, logísticos, entre outros [36].

O Simulink usa uma interface gráfica, na qual os modelos são criados em forma de diagrama de blocos. Pode ser interligada com o Matlab através do desenvolvimento de linhas de comando.

Este modelo foi desenvolvido e adaptado a partir do trabalho [37]. A Figura 23 representa um diagrama de blocos com 4 entradas, dois operadores matemáticos, uma resistência, uma fonte de tensão controlada e duas portas de conexão.

Os blocos de entradas são as temperaturas  $T_h$  e  $T_c$ , temperaturas quente e fria, respetivamente, os coeficientes de Seebeck e o número de módulos do TEG. Neste modelo, a diferença das temperaturas,  $\Delta T$ , é multiplicada pelo coeficiente de Seebeck pelo número de módulos, o que resulta na tensão de saída que, por sua vez, alimenta uma resistência. Este diagrama permite criar o subsistema encontrado na Figura 24.

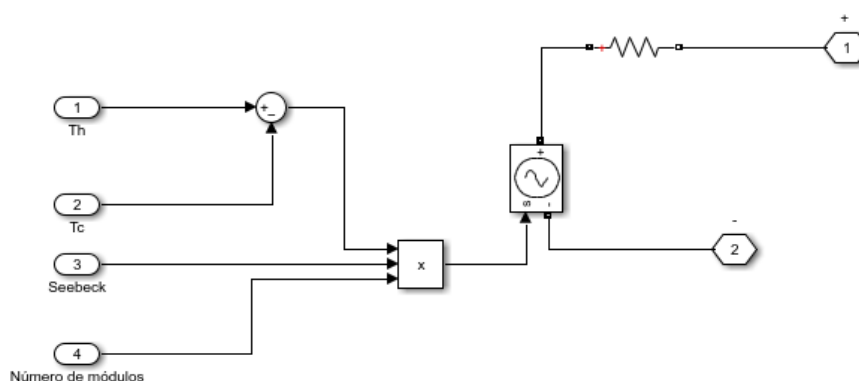


Figura 23 - Diagrama de blocos do modelo [37].

A Figura 24 representa diagrama completo criado no simulink. Os geradores termoelétricos foram formados a partir da Figura 23. Foram adicionados os blocos de entradas com respetivos valores (que podem ser alterados). O bloco clock em conjunto com o bloco fcn permitem ter uma noção clara dos gráficos. O bloco clock gera o tempo de simulação atual em cada etapa da simulação. À saída foram adicionados corrente, tensão e a potência. O resultado da corrente multiplicado pela tensão é a potência gerada. Os blocos de scope e os displays permitem a visualização dos gráficos e dos resultados respetivamente.

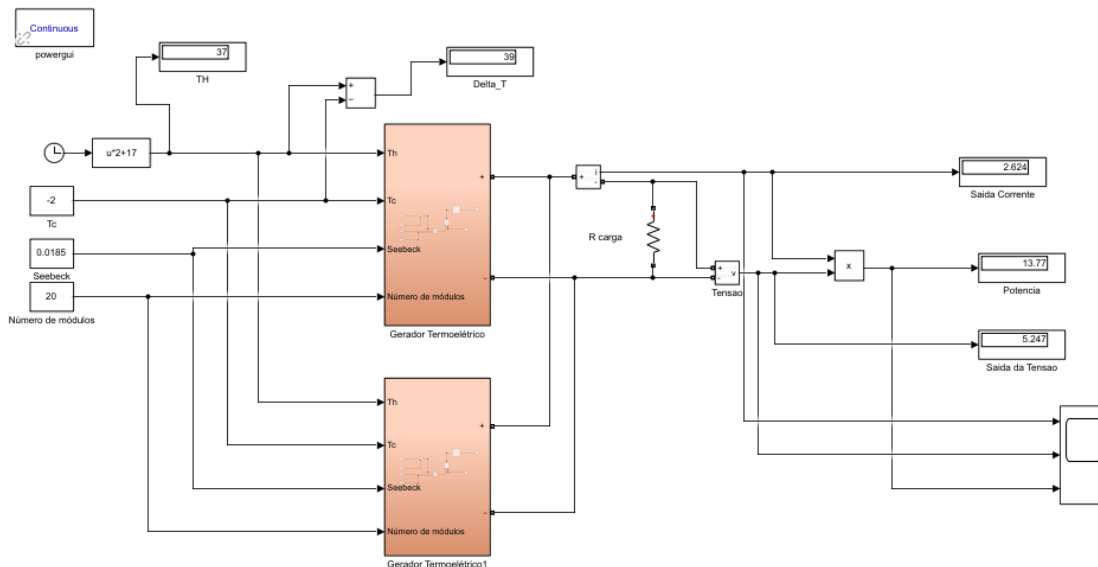


Figura 24 - Diagrama completo do Modelo, adaptado [37].

Sabe-se que diversos parâmetros influenciam o desempenho dos geradores termoelétricos. Nas seguintes secções veremos alguns como a temperatura, resistência interna, coeficiente de Seebeck e a resistência de carga.

### 8.1.1. Avaliação da influência das temperaturas

Nesta secção será analisada a influência das temperaturas no desempenho do sistema, mantendo constante o coeficiente de Seebeck a 0.0185, resistência interna  $R_{in}$  a 7 ohms e resistência de carga  $R_L$  a 2 ohms. Na tabela 1, a  $T_h$  variou de 0 a 37°C por causa do bloco fcn e o clock, sendo depois mantida a 37°C o que corresponde a temperatura máxima do corpo humano num individuo saudável, variando-se a temperatura ambiente  $T_c$  de -2 até 42°C com intervalo de 3°C, o que corresponde aos valores de temperatura que têm sido registadas na Covilhã.

A maior diferença de temperatura regista-se com  $T_c = -2$  e a menor diferença de temperatura regista-se quando  $T_c = 42$  °C.

Quando  $T_c$  varia entre -2°C a 22°C, os valores da corrente, tensão e potência diminuem. No entanto estas são máximas quando  $T_c = -2$ °C.

A partir de  $T_c = 25^\circ\text{C}$  até  $34^\circ\text{C}$ , os valores da tensão são maiores que da potência. Quando  $T_c = 31$  e  $34^\circ\text{C}$ , a corrente e a tensão são maiores que a potência.

Quando  $T_c = T_h$ , as variáveis de saídas medidas são nulas. Para  $T_c > T_h$ , resultam valores de corrente e tensão negativas, mas a potência é positiva e aumenta.

Tabela 1 – Resultados da influência das temperaturas no desempenho do sistema.

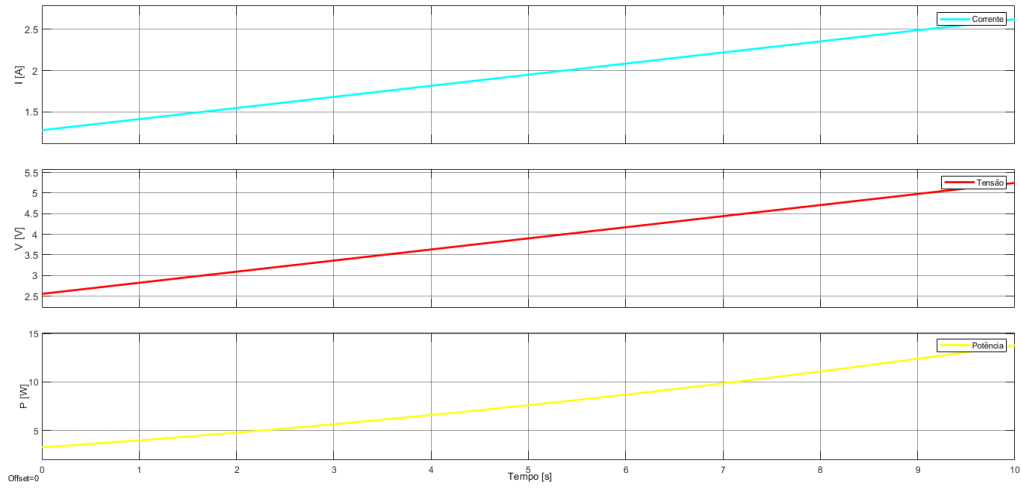
Temperaturas (°C)		Resistência de carga (Ω) $R_L$	Resistência interna (Ω) $R_{in}$	Coefficiente de Seebeck $\alpha$	Corrente (A) $I$	Tensão (V) $V$	Potência (W) $P$
$T_h$	$T_c$						
37	-2	2	7	0.0185	2.624	5.247	13.77
	1				2.422	4.844	11.73
	4				2.22	4.44	9.857
	7				2.0184	4.036	8.146
	10				1.816	3.633	6.598
	13				1.615	3.229	5.214
	16				1.413	2.825	3.992
	19				1.211	2.422	2.933
	22				1.009	2.018	2.037
	25				0.8073	1.615	1.202
	28				0.6055	1.211	0.7332
	31				0.4036	0.8073	0.3258
	34				0.2018	0.4036	0.08146
	37				0	0	0
	40				-0.2018	-0.4036	0.08146
42	-0.3364	-0.6727	0.2263				

A Figura 25 mostra a evolução temporal das grandezas descritas na Tabela 1, nomeadamente a corrente, a tensão e a potência para algumas temperaturas. A Figura 25a diz respeito à situação de  $T_c = -2^\circ\text{C}$ , onde se verifica um aumento da corrente, da tensão e da potência. A Figura 25b diz respeito à situação de ter  $T_c = 22^\circ\text{C}$ , onde a corrente aumenta, a tensão aumenta e a potência também aumenta, mas com uma pequena curvatura.

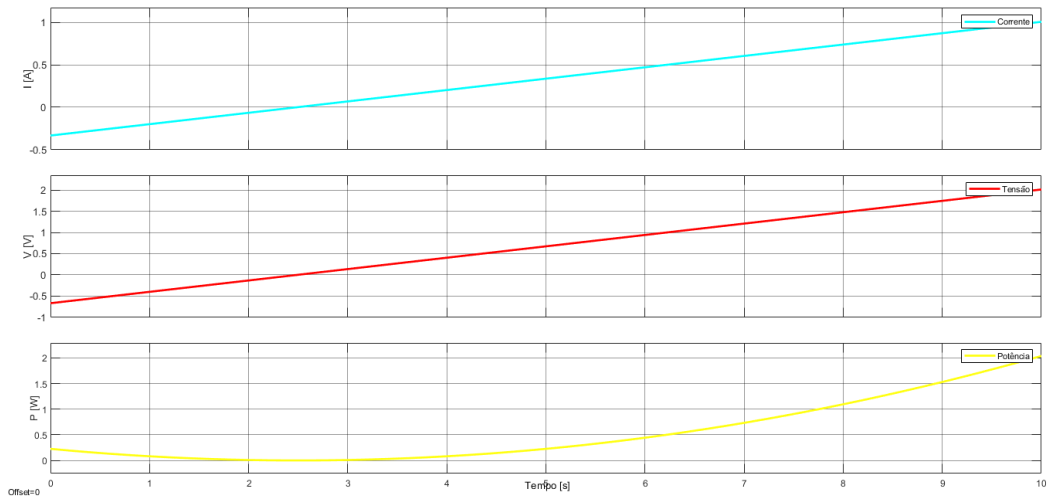
A Figura 25c, correspondente à temperatura  $T_c = 37^\circ\text{C}$ , mostra que a corrente e a tensão variam entre -1.5A e 0A e entre -3V e 0V, respetivamente, a potência diminui até 0 W.

Na Figura 25d, quando  $T_c = 25^\circ\text{C}$ , verifica-se uma diminuição da corrente e da tensão (valores negativos), diminuindo também a potência até cerca dos 5 segundos, aumentando de seguida.

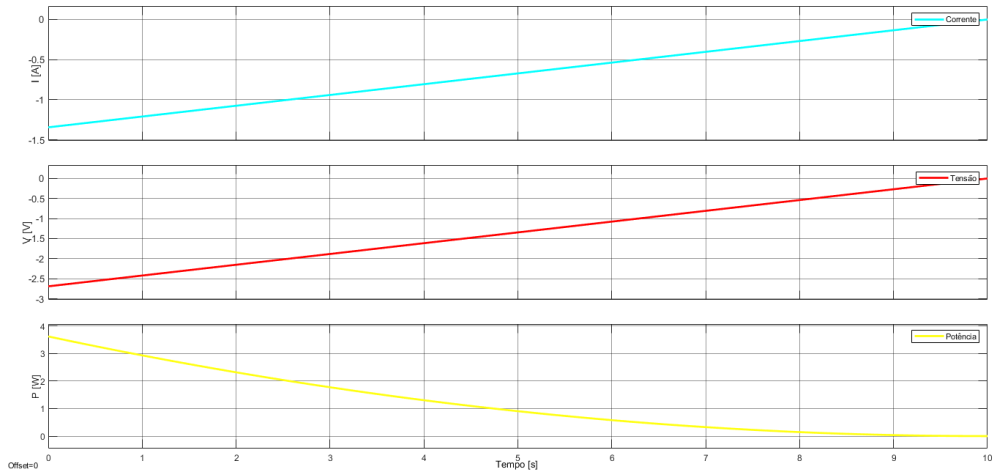
Na Figura 25e, quando  $T_c = 34^\circ\text{C}$ , verifica-se uma diminuição dos valores de corrente e de tensão (valores negativos), com diminuição da potência, até à anulação da corrente, sendo nula a potência.



(a)



(b)



(c)

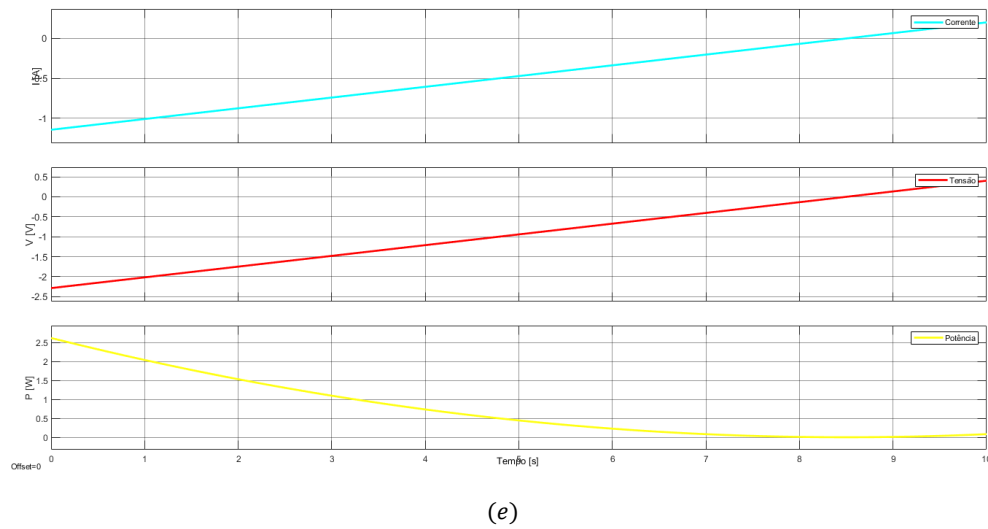
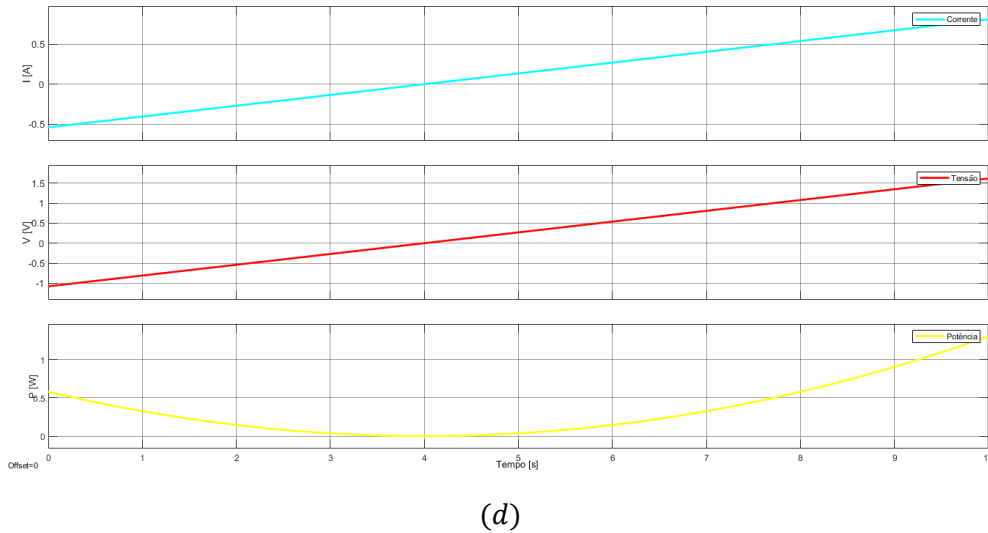


Figura 25 - Influência da temperatura no desempenho do modelo.

### 8.1.2. Avaliação da influência do coeficiente de Seebeck

Uma vez que o coeficiente de Seebeck e a resistência interna dependem do tipo e da construção do TEG, os valores apresentados no trabalho foram retirados de referências bibliográficas e são os seguintes:

$$\alpha = 0.0185 \text{ e } R_{in} = 0.7\Omega \text{ [37]}$$

$$\alpha = 0.027 \text{ e } R_{in} = 0.47\Omega \text{ [35]}$$

$$\alpha = 0.0517 \text{ e } R_{in} = 3\Omega \text{ [38]}$$

O aumento da potência gerada a partir dos TEGs é realizado pela conexão série e paralela dos TEGs. A modelização de TEGs conectados em série e paralelo é

representada na Figura 24. O número de módulos conectados na modelização TEG foi de 20 em série.

Na Tabela 2 pode observar-se que as temperaturas foram mantidas constantes em 37°C e 42°C, representando a temperatura do corpo humano e a temperatura ambiente respetivamente e a resistência de carga foi fixada em 2 ohm. Observa-se que quanto maior for o coeficiente de Seebeck, maiores serão a corrente e a tensão (valores negativos) e maior será a potência.

Tabela 2 - Resultados da influência do coeficiente de Seebeck, para  $T_c$  maior do que o  $T_h$ .

Temperaturas (°C)		Resistência de carga (Ω) $R_L$	Resistência interna (Ω) $R_{in}$	Coeficiente de Seebeck $\alpha$	Corrente (A) $I$	Tensão (V) $V$	Potência (W) $P$
$T_h$	$T_c$						
37	42	2	7	0.0185	-0.336	-0.6727	0.2263
			0.47	0.027	-1.208	-2.416	2.919
			3	0.0517	-1.477	-2.954	4.364

A Figura 26 foi criada a partir da tabela 2 e do anexo 1, mostra a variação da corrente, da tensão e da potência para os três valores do coeficiente de Seebeck. Verifica-se um aumento dessas três grandezas com o aumento do valor do coeficiente.

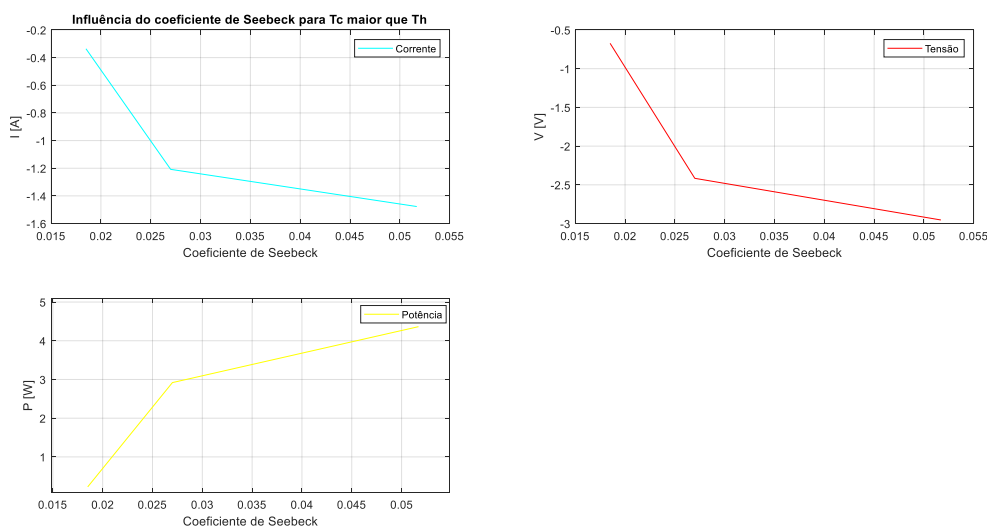


Figura 26 - Influência do coeficiente de Seebeck, para  $T_c$  maior do que  $T_h$ .

Agora, e considerando a temperatura ambiente menor que a temperatura do corpo humano, mostram-se os resultados obtidos na Tabela 3.

Assim, vai ser avaliada a influência do coeficiente de Seebeck, mantendo constante a temperatura do corpo humano e a resistência de carga. Escolheu-se ainda

para valor da temperatura ambiente  $-2^{\circ}\text{C}$ , mantendo a resistência de carga em  $2\ \Omega$ . Na Tabela 3 mostram-se os resultados obtidos da simulação. Observa-se que quanto maior for o coeficiente de Seebeck, maiores serão os valores da corrente, da tensão e também da potência.

Tabela 3 – Resultados da influência do coeficiente de Seebeck, para  $T_c$  menor do que  $T_h$ .

Temperaturas ( $^{\circ}\text{C}$ )		Resistência de carga ( $\Omega$ ) $R_L$	Resistência interna ( $\Omega$ ) $R_{in}$	Coefficiente de Seebeck $\alpha$	Corrente (A) $I$	Tensão (V) $V$	Potência (W) $P$
$T_h$	$T_c$						
37	-2	2	7	0.0185	2.624	5.247	13.77
			0.47	0.027	9.423	18.85	177.6
			3	0.0517	11.52	23.04	265.5

A Figura 27 foi criada a partir da tabela 3 e do anexo 2, mostra a variação da corrente, da tensão e da potência para os três valores do coeficiente de Seebeck. Verifica-se um aumento dessas três grandezas com o aumento do valor do coeficiente.

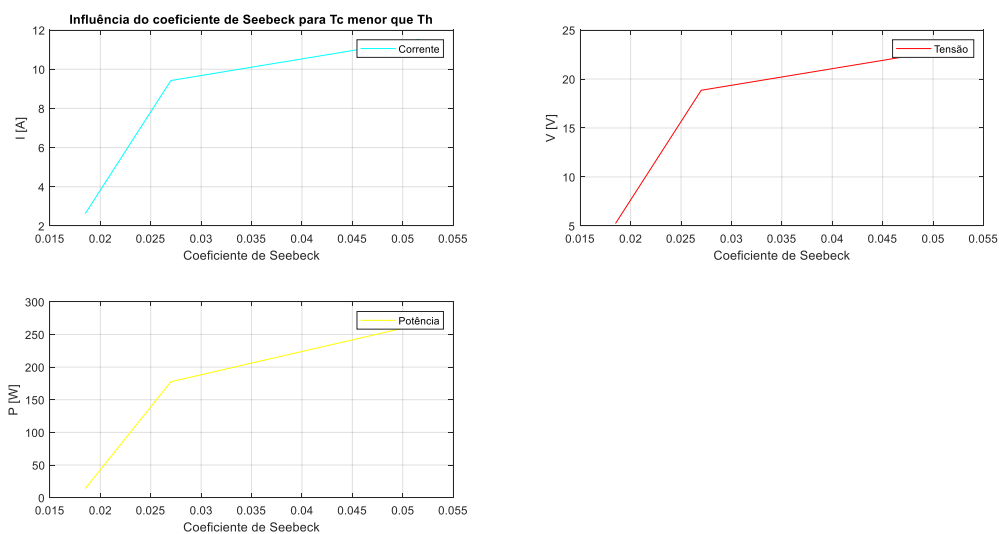


Figura 27-Influência do coeficiente de Seebeck, para  $T_c$  menor do que  $T_h$ .

### 8.1.3. Avaliação da influência da resistência de carga

Nesta subsecção pretende-se analisar a influência da variação da resistência de carga no desempenho do dispositivo. Para isso, mantiveram-se constantes as temperaturas em  $37^{\circ}\text{C}$  e  $12^{\circ}\text{C}$ , a temperatura do corpo humano e a temperatura ambiente respetivamente, mantendo constante também o coeficiente de Seebeck (0.0185) e a

resistência interna em 7 ohm. A Tabela 4 mostra os resultados obtidos para a variação da resistência de carga [37]. Observa-se que aumentando a resistência de carga, a corrente vai diminuindo, a tensão vai aumentando e potência vai diminuindo.

Tabela 4 – Resultados da Influência da resistência de carga no desempenho do sistema.

Temperaturas (°C)		Resistênci a de carga (Ω) $R_L$	Resistênci a interna (Ω) $R_{in}$	Coefficient e de Seebeck $\alpha$	Corrente (A) $I$	Tensão (V) $V$	Potencia (W) $P$
$T_h$	$T_c$						
37	12	2	7	0.0185	1.682	3.364	5.657
		7			0.881	6.167	5.433
		27			0.3033	8.189	2.483
		47			0.1832	8.609	1.577
		67			0.1312	8.791	1.153
		87			0.1022	8.892	0.9089
		107			0.08371	8.957	0.7498
		127			0.07088	9.002	0.60381
		147			0.06146	9.035	0.5553
		167			0.05425	9.06	0.4915
		187			0.04856	9.08	0.4409

A Figura 28 mostra graficamente os pontos descritos na tabela 4 e foi criada a partir do anexo 3. A corrente e a potência diminuem à medida que a resistência de carga aumenta, ao passo que a tensão aumenta com aumento da resistência de carga.

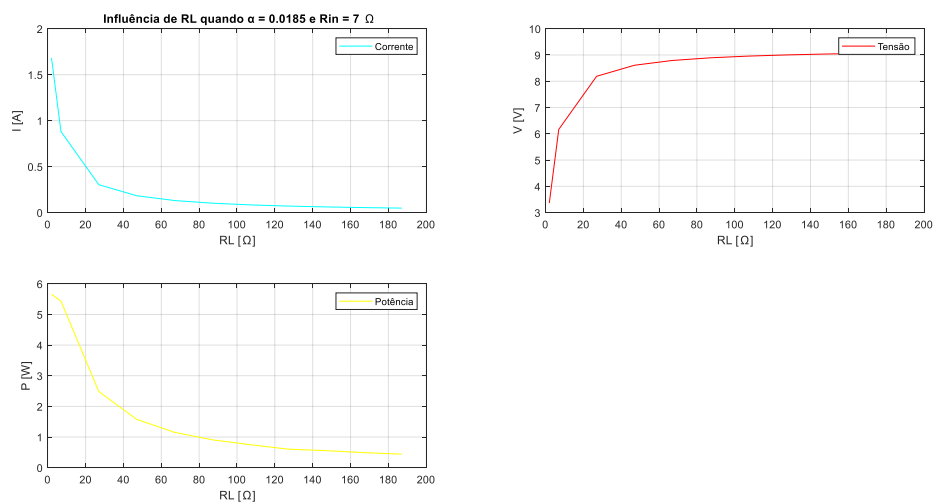


Figura 28-Influência da resistência de carga no desempenho do sistema, quando  $\alpha = 0.0185$  e  $R_{in} = 7\Omega$ .

Na Tabela 5 observa-se a influência do valor da resistência de carga, agora variando também o coeficiente de Seebeck e da relacionada resistência interna. Para isso, fixaram-se uma vez mais a temperatura do corpo humano e a temperatura ambiente

em 37°C e 12°C, respetivamente, considerando-se agora um coeficiente de Seebeck de 0.027 e resistência interna de 0.47, e um outro coeficiente de Seebeck de 0.0517 e uma resistência interna de 3.

Observa-se que aumentando a resistência de carga, a corrente vai diminuindo, a tensão vai aumentando e potência vai diminuindo.

Tabela 5 - Resultados da influência da resistência de carga no sistema, considerando dois coeficientes de Seebeck e duas resistências internas.

Temperaturas (°C)		Resistência de carga (Ω)	Resistência interna (Ω)	Coefficiente de Seebeck	Corrente (A)	Tensão (V)	Potência (W)
$T_h$	$T_c$	$R_L$	$R_{in}$	$\alpha$	$I$	$V$	$P$
37	12	0.47	0.47	0.027	19.15	9	172.3
		7			1.866	13.06	24.37
		27			0.4957	13.38	6.634
		47			0.2858	13.43	3.839
		67			0.2008	13.45	2.701
		87			0.1548	13.46	2.084
		107			0.1259	13.47	1.696
		127			0.1061	13.48	1.43
		147			0.09169	13.48	1.236
		167			0.08072	13.48	1.088
		187			0.0721	13.48	0.9722
37	12	3	3	0.0517	5.744	17.23	99
		7			3.041	21.29	64.74
		27			0.907	24.49	22.21
		47			0.533	25.05	13.35
		67			0.3774	25.28	9.541
		87			0.2921	25.41	7.423
		107			0.2382	25.49	6.074
		127			0.2012	25.55	5.139
		147			0.1741	25.59	4.454
		167			0.1534	25.62	3.93
		187			0.1371	25.64	3.517

A Figura 29 mostra graficamente os pontos descritos na tabela 5, quando  $\alpha=0.027$  e  $R_{in}=0.47\Omega$  e foi criada a partir do anexo 4. A corrente e a potência diminuem à medida que a resistência de carga aumenta, ao passo que a tensão aumenta com aumento da resistência de carga. A potência atinge valor máximo, quando  $R_L = R_{in}$

A Figura 30 foi criada a partir do anexo 5, e mostra que quando  $\alpha=0.0517$  e  $R_{in}=3\Omega$ , a corrente e a potência diminuem a medida que a resistência de carga aumenta, ao passo que a tensão aumenta com aumento da resistência de carga.

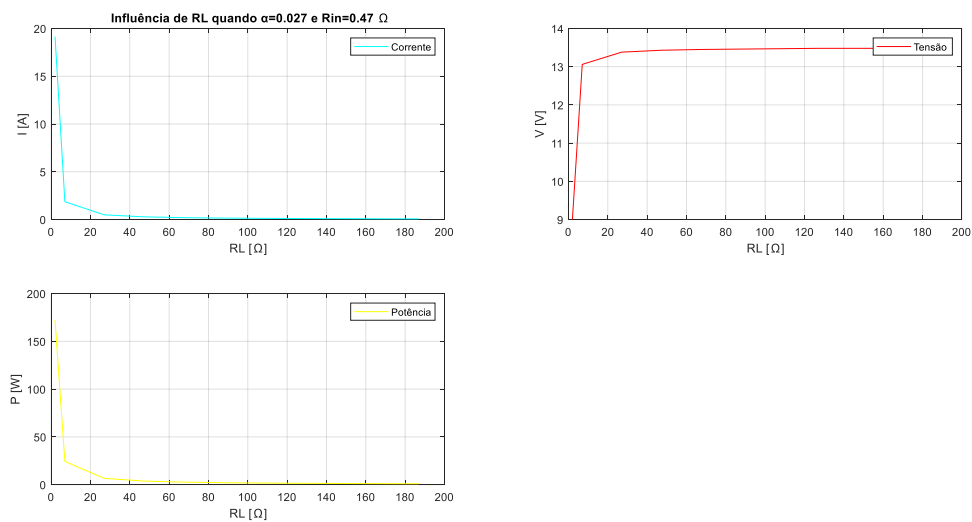


Figura 29 - Influência da Resistência de carga no desempenho do sistema, para  $\alpha=0.027$  e  $R_{in}=0.47\Omega$ .

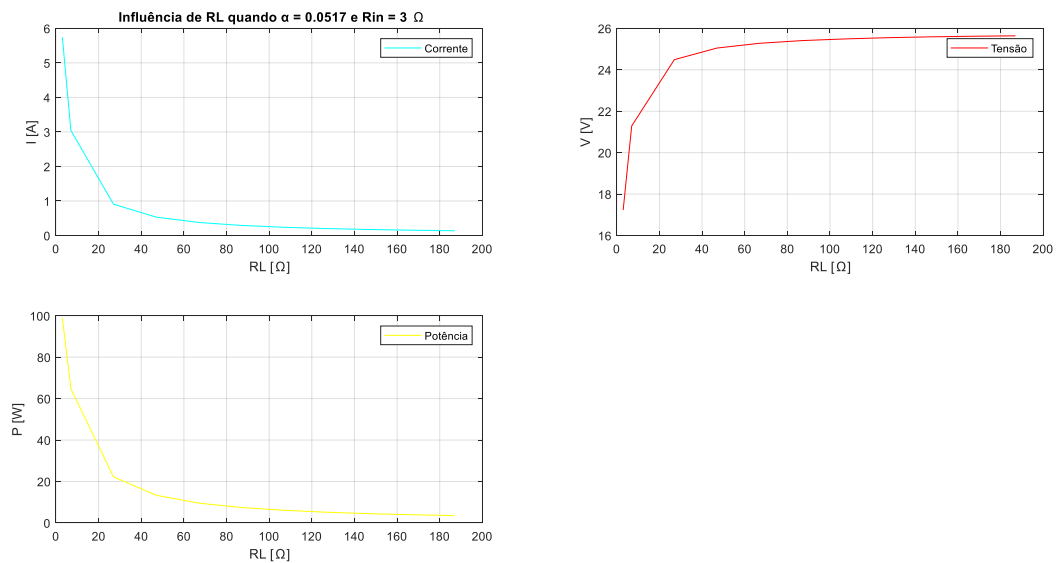


Figura 30 - Influência da Resistência de carga no desempenho do sistema, para  $\alpha = 0.0517$  e  $R_{in} = 3\Omega$ .

## 9. Conclusão

No final deste trabalho, a primeira conclusão a referir é que para fazer modelo de geradores termoelétricos a partir do aproveitamento do calor humano é importante ter em consideração os efeitos termoelétricos para converter a diferença de temperatura em energia elétrica.

Neste trabalho analisaram-se diversos parâmetros que afetam o desempenho do gerador, nomeadamente a temperatura, o coeficiente de Seebeck, a resistência interna e a resistência de carga.

Quanto maior for a diferença de temperatura, maior será a energia gerada.

Quando a temperatura ambiente é maior que a temperatura corporal, observa-se que quanto maior for o coeficiente de Seebeck, maiores serão a corrente e a tensão (valores negativos) e maior será a potência.

Quando a temperatura ambiente é menor que a temperatura corporal, observa-se que quanto maior for o coeficiente de Seebeck, maiores serão os valores da corrente, da tensão e também da potência.

Relativamente à resistência de carga, quando esta aumenta a corrente vai diminuindo, a tensão vai aumentando e potência também diminui.

Dos resultados obtidos, verificou-se que a maior potência e a maior corrente obtidas ocorreram para  $T_c = -2^\circ\text{C}$ ,  $R_L = 2\Omega$ ,  $R_{in} = 3\Omega$  e  $\alpha = 0.0517$ , com os valores de 265.5 W e 11.52 A, respetivamente. A maior tensão, de 25.64 V, obteve-se para  $T_c = 12^\circ\text{C}$ ,  $R_L = 200\Omega$ ,  $R_{in} = 3\Omega$  e  $\alpha = 0.0517$ .

## 10. Bibliografia

- [1] Nesrine Jaziri, Ayda Boughamoura, Jens Müller, Brahim Mezghani, Fares Tounsi, Mohammed Ismail, “A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications”, *Energy Reports*, Volume 6, Supplement 7, 2020, Pages 264-287, ISSN 2352-4847, doi.org/10.1016/j.egy.2019.12.011.
- [2] T.S. Krishna Kumar, S. Anil Kumar, K. Kodanda Ram, Kiran Raj Goli, V. Siva Prasad, “Analysis of thermo electric generators in automobile applications”, *Materials Today: Proceedings*, Volume 45, Part 7, 2021, Pages 5835-5839, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.081>.
- [3] Mori, T., & Priya, S, "Materials for energy harvesting: At the forefront of a new wave", 2018, *MRS Bulletin*, 43(3), 176-180. doi:10.1557/mrs.2018.32.
- [4] Diana Enescu, “Thermoelectric Energy Harvesting: Basic Principles and Applications”, January 21, 2019, DOI: 10.5772/intechopen.83495.
- [5] Zhengbao Yang, Shengxi Zhou, Jean Zu, Daniel Inman, “High-Performance Piezoelectric Energy Harvesters and Their Applications”, *Joule*, Volume 2, Issue 4, 2018, Pages 642-697, ISSN 2542-4351, doi.org/10.1016/j.joule.2018.03.011.
- [6] Ioannis Petsagkourakis, Klas Tybrandt, Xavier Crispin, Isao Ohkubo, Norifusa Satoh & Takao Mori, “Thermoelectric materials and applications for energy harvesting power generation”, 2018, *Science and Technology of Advanced Materials*, 19:1, 836-862, doi: 10.1080/14686996.2018.1530938.
- [7] O.H. Ando Junior, A.L.O. Maran, N.C. Henao,” A review of the development and applications of thermoelectric microgenerators for energy harvesting”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 91, 2018, Pages 376-393, ISSN 1364-0321, doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.052.
- [8] Alberto Ferrario, Stefano Boldrini, Alvise Miozzo, Monica Fabrizio,” Temperature dependent iterative model of thermoelectric generator including thermal losses in passive elements”, *Applied Thermal Engineering*, Volume 150, 2019, Pages 620-627, ISSN 1359-4311, doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.031.
- [9] R. S. Kondaguli and P. V. Malaji, “Mathematical modeling and numerical simulation of thermoelectric generator”, *AIP Conference Proceedings* 2274, 030037 (2020); <https://doi.org/10.1063/5.0022427>
- [10] Mani Ranjan, Tanmoy Maiti, “Device modeling and performance optimization of thermoelectric generators under isothermal and isoflux heat source condition”, *Journal of Power Sources*, Volume 480, 2020, 228867, ISSN 0378-7753, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228867>

- [11] Qusay Doraghi, Navid Khordehghah, Alina Żabnieńska-Góra, ALujean Ahmad, Les Norman, Darem Ahmad and Hussan Jouhara, “Investigation and Computational Modelling of Variable TEG Leg Geometries”. *ChemEngineering* 2021, 5, 45. <https://doi.org/10.3390/chemengineering5030045>
- [12] Sergei Vostrikov, Andrey Somov, Pavel Gotovtsev, “Low temperature gradient thermoelectric generator: Modelling and experimental verification”, *Applied Energy*, Volume 255, 2019, 113786, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113786>.
- [13] Rong Shen, Xiaolong Gou, Haoyu Xu, Kuanrong Qiu, “Dynamic performance analysis of a cascaded thermoelectric generator, *Applied Energy*”, Volume 203, 2017, Pages 808-815, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.108>.
- [14] P. Wang, K.F. Wang, B.L. Wang, Y.J. Cui, “Modeling of thermoelectric generators with effects of side surface heat convection and temperature dependence of material properties” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 133, 2019, Pages 1145-1153, ISSN 0017-9310, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.01.006>.
- [15] P. Wang, B.L. Wang, J.E. Li, “Temperature and performance modeling of thermoelectric generators, *International Journal of Heat and Mass Transfer*”, Volume 143, 2019, 118509, ISSN 0017-9310, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118509>.
- [16] Marianne Lossec, Bernard Multon, Hamid Ben Ahmed, “Sizing optimization of a thermoelectric generator set with heatsink for harvesting human body heat”, *Energy Conversion and Management*, Volume 68, 2013, Pages 260-265, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.01.021>.
- [17] H. Wong and Z. Dahari, “Human body parts heat energy harvesting using thermoelectric module,” 2015 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON), Johor Bahru, 2015, pp. 211-214, Doi: 10.1109/CENCON.2015.7409541.
- [18] A. Collado and A. Georgiadis, "Conformal Hybrid Solar and Electromagnetic (EM) Energy Harvesting Rectenna," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 60, no. 8, pp. 2225-2234, Aug. 2013, doi: 10.1109/TCSI.2013.2239154.
- [19] Hanjun Ryu, Hong-Joon Yoon, and Sang-Woo Kim, “Hybrid Energy Harvesters: Toward Sustainable Energy Harvesting”, *Advanced Materials*, 26 February 2019, <https://doi.org/10.1002/adma.201802898>
- [20] Adnan Harb, Energy harvesting, “State-of-the-art, *Renewable Energy*”, Volume 36, Issue 10, 2011, Pages 2641-2654, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.014>.
- [21] Himanshu Sharma, Ahteshamul Haque, and Zainul Abidin Jaffery, “Modeling and Optimisation of a Solar Energy Harvesting System for Wireless Sensor Network Nodes”, *J. Sens. Actuator Netw.* 2018, 7, 40; doi:10.3390/jsan7030040.
- [22] Jaehoon Choi, Inki Jung, Chong-Yun Kang, “A brief review of sound energy harvesting”, *Nano Energy*, Volume 56, 2019, Pages 169-183, ISSN 2211-2855, <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.11.036>.

- [23] Alperen Toprak and Onur Tigli, “Piezoelectric energy harvesting: State-of-the and challenges”, 2014, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4896166>.
- [24] Seyed Mohsen Pourkiaei, Mohammad Hossein Ahmadi, Milad Sadeghzadeh, Soroush Moosavi, Fathollah Pourfayaz, Lingen Chen, Mohammad Arab Pour Yazdi, Ravinder Kumar,” Thermoelectric cooler and thermoelectric generator devices: A review of present and potential applications, modeling and materials”, Energy, Volume 186, 2019, 115849, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.179>.
- [25] Dhoopagunta, Shripad, "Analytical Modeling and Numerical Simulation of a Thermoelectric Generator Including Contact Resistances" (2016). Master's Theses. 766. [https://scholarworks.wmich.edu/masters\\_theses/766](https://scholarworks.wmich.edu/masters_theses/766)
- [26] Eurydice Kanimba and Zhiting Tian, “Modeling of a Thermoelectric Generator Device”, December 21st, 2016, DOI: 10.5772/65741
- [27] Mao, J., Chen, G. & Ren, Z, “Thermoelectric cooling materials”, Nat. Mater. 20, 454–461 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41563-020-00852-w>
- [28] Canan Dagdeviren, Zhou Li, and Zhong Lin Wang, “Energy Harvesting from the Animal/Human Body for Self-Powered Electronics”, Annu. Rev. Biomed, June 2017, vol 19:85–108, <https://doi.org/10.1146/annurev-bioeng-071516-044517>.
- [29] Mohit Thakkar, “Peltier (thermoelectric) cooling module”, Mechanical Engineering Department, School of Technology, Pandit Deendayal Petroleum University, 2015.
- [30] Melissa Hyland, Haywood Hunter, Jie Liu, Elena Veety, Daryoosh Vashae, “Wearable thermoelectric generators for human body heat harvesting”, Applied Energy, Volume 182, 2016, Pages 518-524, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.150>.
- [31] Francisco Suarez, Amin Nozariasbmarz, Daryoosh Vashae and Mehmet C. Ozturk, “Designing thermoelectric generators for self-powered wearable electronics”, Energy Environ. Sci, 2016, DOI: 10.1039/c6ee00456c.
- [32] Min-Ki Kim, Myoung-Soo Kim, Seok Lee , Chulki Kim and Yong-Jun Kim, “Wearable thermoelectric generator for harvesting human body heat energy”, Smart Materials and Structures, 9 September 2014, doi:10.1088/0964-1726/23/10/105002.
- [33] Sergei Vostrikov, Andrey Somov, Pavel Gotovtsev, Michele Magno, “Comprehensive modelling framework for a low temperature gradient thermoelectric generator”, Energy Conversion and Management, Volume 247, 2021, 114721, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114721>.
- [34] Nabil Karami and Nazih Moubayed, “New Modeling Approach and Validation of a Thermoelectric Generator”, June 2014, DOI: 10.1109/ISIE.2014.6864678
- [35] Filip Kuchta , Kamil Lubikowski and Jędrzej Mączak, “TEG Model in MATLAB Simulink”, Proceedings of the institute of vehicles 4(113)/2017.
- [36] João Paulo Coelho e Tatiana Pinho, “Introdução ao Simulink - Aplicações na engenharia” Instituto Politécnico de Bragança – Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro – Escola de Ciências e Tecnologia.

- [37] Mamur, Hayati and Çoban, Yusuf, "Detailed modeling of a thermoelectric generator for maximum power point tracking, " Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences: Vol. 28: No. 1, Article 9, 2020. <https://doi.org/10.3906/elk-1907-166> Available at: <https://journals.tubitak.gov.tr/elektrik/vol28/iss1/9>.
- [38] Marcos Compadre Torrecilla , Andrea Montecucco , Jonathan Sivitera, Andrew R. Knoxa, Andrew Strain, "Novel model and maximum power tracking algorithm for thermoelectric generators operated under constant heat flux", Applied Energy Vol 256, 15 December 2019, 113930, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113930>.
- [39] Aarti Kane, Vishal Verma and Bhim Singh, "Temperature Dependent Analysis of Thermoelectric Module using Matlab/simulink", 2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), 2-5 December 2012, Kota Kinabalu Sabah, Malaysia.

## Anexos

```
close all
Alfa= [0.0185, 0.027, 0.0517];
I = [-0.336, -1.208, -1.477];
V = [-0.6727, -2.416, -2.954];
P = [0.2263, 2.919, 4.364];
subplot(2, 2, 1);
plot(Alfa, I, '-c');
title('Influência do coeficiente de Seebeck para Tc maior que Th');
legend('Corrente');
xlabel('Coeficiente de Seebeck');
ylabel('I [A]')
grid on;
subplot(2, 2, 2);
plot(Alfa, V, '-r');
legend('Tensão');
xlabel('Coeficiente de Seebeck');
ylabel('V [V]')
grid on;
subplot(2, 2, 3);
plot(Alfa, P, '-y');
legend('Potência');
xlabel('Coeficiente de Seebeck');
ylabel('P [W]')
grid on;
```

### Anexo 1- Código utilizado para criação da Figura 26

```
close all
Alfa= [0.0185, 0.027, 0.0517];
I = [2.624, 9.423, 11.52];
V = [5.247, 18.85, 23.04];
P = [13.77, 177.6, 265.5];
subplot(2, 2, 1);
plot(Alfa, I, '-c');
title('Influência do coeficiente de Seebeck para Tc menor que Th');
legend('Corrente');
xlabel('Coeficiente de Seebeck');
ylabel('I [A]')
grid on;
subplot(2, 2, 2);
plot(Alfa, V, '-r');
legend('Tensão');
xlabel('Coeficiente de Seebeck');
ylabel('V [V]')
grid on;
subplot(2, 2, 3);
plot(Alfa, P, '-y');
legend('Potência');
xlabel('Coeficiente de Seebeck');
ylabel('P [W]')
grid on;
```

### Anexo 2- Código utilizado para criação da Figura 27

## Modelização e análise de desempenho de geradores termoelétricos aplicados no aproveitamento da energia do corpo humano

```
clear all
% Influência de RL quando  $\alpha = 0.0185$  e  $R_{in} = 7\Omega$ 
I=[1.682, 0.881, 0.3033, 0.1832, 0.1312, 0.1022, 0.08371, 0.07088, 0.06146, 0.05425, 0.04856];
RL=[2, 7, 27, 47, 67, 87, 107, 127, 147, 167, 187];
V=[3.364, 6.167, 8.189, 8.609, 8.791, 8.892, 8.957, 9.002, 9.035, 9.06, 9.08];
P=[5.657, 5.433, 2.483, 1.577, 1.153, 0.9089, 0.7498, 0.60381, 0.5553, 0.4915, 0.4409];
figure;
subplot(2, 2, 1);
plot(RL, I, '-c');
title('Influência de RL quando  $\alpha = 0.0185$  e  $R_{in} = 7\Omega$ ');
legend('Corrente');
xlabel('RL [ $\Omega$ ]');
ylabel('I [A]');
grid on;
subplot(2, 2, 2);
plot(RL, V, '-r');
legend('Tensão');
xlabel('RL [ $\Omega$ ]');
ylabel('V [V]');
grid on;
subplot(2, 2, 3);
plot(RL, P, '-y');
legend('Potência');
xlabel('RL [ $\Omega$ ]');
ylabel('P [W]');
grid on;
```

### Anexo 3- Código utilizado para criação da Figura 28

```
clear all
% Influência de RL quando  $\alpha=0.027$  e  $R_{in}=0.47\Omega$ 
I=[19.15, 1.866, 0.4957, 0.2858, 0.2008, 0.1548, 0.1259, 0.1061, 0.09169, 0.08072, 0.0721];
RL=[2, 7, 27, 47, 67, 87, 107, 127, 147, 167, 187];
V=[9, 13.06, 13.38, 13.43, 13.45, 13.46, 13.47, 13.48, 13.48, 13.48, 13.48];
P=[172.3, 24.37, 6.634, 3.839, 2.701, 2.084, 1.696, 1.43, 1.236, 1.088, 0.9722];
figure;
subplot(2, 2, 1);
plot(RL, I, '-c');
title('Influência de RL quando  $\alpha=0.027$  e  $R_{in}=0.47\Omega$ ');
legend('Corrente');
xlabel('RL [ $\Omega$ ]');
ylabel('I [A]');
grid on;
subplot(2, 2, 2);
plot(RL, V, '-r');
legend('Tensão');
xlabel('RL [ $\Omega$ ]');
ylabel('V [V]');
grid on;
subplot(2, 2, 3);
plot(RL, P, '-y');
legend('Potência');
xlabel('RL [ $\Omega$ ]');
ylabel('P [W]');
grid on;
```

### Anexo 4- Código utilizado para criação da Figura 29

## Modelização e análise de desempenho de geradores termoeletrônicos aplicados no aproveitamento da energia do corpo humano

```
clear all
% Influência de RL quando  $\alpha = 0.0517$  e  $R_{in} = 3\Omega$ 
I =[5.744, 3.041, 0.907, 0.533, 0.3774, 0.2921, 0.2382, 0.2012, 0.1741, 0.1534, 0.1371 ];
RL=[3, 7, 27, 47, 67, 87, 107, 127, 147, 167, 187];
V =[17.23, 21.29, 24.49, 25.05, 25.28, 25.41, 25.49, 25.55, 25.59, 25.62, 25.64];
P =[99, 64.74, 22.21, 13.35, 9.541, 7.423, 6.074, 5.139, 4.454, 3.93, 3.517];
figure;
subplot(2, 2, 1);
plot(RL, I, '-c');
title('Influência de RL quando  $\alpha = 0.0517$  e  $R_{in} = 3\Omega$ ');
legend('Corrente');
xlabel('RL [ $\Omega$ ]');
ylabel('I [A]');
grid on;
subplot(2, 2, 2);
plot(RL, V, '-r');
legend('Tensão');
xlabel('RL [ $\Omega$ ]');
ylabel('V [V]');
grid on;
subplot(2, 2, 3);
plot(RL, P, '-y');
legend('Potência');
xlabel('RL [ $\Omega$ ]');
ylabel('P [W]');
grid on;
```

### Anexo 5- Código utilizado para criação da Figura 30