M 2019

U.PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

MICRO GERAÇÃO DE ENERGIA COM RECURSO A CALOR RESIDUAL – IMPLEMENTAÇÃO NUMÉRICA

JOÃO MOREIRA FERRAZ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

Micro Geração de Energia com Recurso a Calor Residual – Implementação Numérica

João Moreira Ferraz

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Sónia Isabel Silva Pinto

Orientador na empresa: Eng. Pedro Peixoto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Junho de 2019

"The degree of civilization of any epoch, people, or group of peoples is measured by ability to utilize energy for human advancement or needs."

George G. MacCurdy

Resumo

O presente projeto, desenvolvido na equipa de *Smart Systems* do CeNTI, tem como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta que permita dimensionar e prever o funcionamento de um sistema de micro geração de energia elétrica com recurso a calor residual que possa ser usada por utilizadores sem conhecimentos avançados de transferência de calor.

Em primeiro lugar foi efectuado um estudo dos efeitos termoelétricos e do estado de arte da produção termoelétrica, de modo a identificar soluções e modelos já existentes e o que seria necessário desenvolver.

De seguida foram comparados diferentes métodos de cálculo das propriedades de um módulo de Peltier e foi elaborado um modelo físico, que permite realizar a previsão da potência gerada e a seleção do sistema ideal de micro geração, a ser implementado na ferramenta em desenvolvimento.

A ferramenta numérica foi desenvolvidada em *Visual Basic for Aplications* (VBA), superando os objetivos iniciais de funcionalidade do utilizador através de um ambiente gráfico de fácil compreensão, sistemas de validação dos dados introduzidos e uma base de dados integrada com vários módulos presentes no mercado. As funcionalidades foram extendidas ao contemplar diferentes tipos de fontes de calor e diferentes cenários de utilização e a minimizar o tempo de computação. Um manual de instruções para a ferramenta foi escrito em simultâneo.

Por último, os resultados obtidos através da ferramenta numérica foram validados. Primeiro comparou-se os resultados com a folha de especificações de um módulo, onde o modelo de Palacios foi demonstrado como sendo o melhor, com desvios inferiores a 1%. Numa segunda parte foram feitos testes em laboratório, onde o modelo de Luo apresentou resultados mais próximos dos lidos. No entanto o modelo de Palacios devolve valores mais consistentes, com um erro explicável pelas condições de teste, com um erro de aproximadamente 10%

Palavras-Chave: micro geração, gerador termoelétrico, seleção de componentes, módulo de Seebeck, módulo de Peltier, calor residual

Energy Micro Generation Using Waste Heat – Numerical Implementation

Abstract

The present project, integrated in the *Smart Systems* team, has the objective of developing a tool that allows to size and predict the operation of a system of electric energy micro generation from residual heat that can be used by users without advanced heat transfer knowledge.

Firstly, a study of the thermoelectric effects and the state of the art of thermoelectric production was done, in order to identify existing solutions and models and what would need to be developed.

Then, different methods of calculating the properties of a Peltier module were compared and a physical model, that allows the prediction of generated power and selecting the ideal micro-generation system, was elaborated to be implemented in the tool in development.

The numerical tool was developed em *Visual Basic for Aplications* (VBA), surpassing the initial objectives of user functionality through an easy-to-understand graphical environment, data validation systems introduced and an integrated database with several modules present in the market. The features were extended by contemplating different types of heat sources and different usage scenarios and minimizing computing time. The manual of instructions was also written simoultaneously.

Finally, the results obtained through the tool were validated. Firstly, results were compared with the spec sheet, with the Palacios model showing closer results, with error smaller than 1%. Later were made experimental tests. In this instance the model by Luo had less error. The values obtained with the Palacios model, though, were more consistent, with the error being explainable by the test conditions, the error being about 10%.

Keywords: micro generation, thermoelectric generator, components selection, Seebeck module, Peltier module, waste heat

Agradecimentos

A conclusão desta dissertação representa também a conclusão de um ciclo, de uma etapa importante da vida. Como tal, gostaria de aproveitar este espaço para agradecer àqueles que me ajudaram e apoiaram durante este projeto.

Aos meus orientadores, Professora Sónia Isabel Silva Pinto e Eng. Pedro Peixoto, por terem estado sempre disponíveis para todas as minhas questões e pelo otimismo que sempre me transmitiram.

À FEUP e ao DEMec. Pelos dias e noites passados nesta casa, pelas alegrias e desesperos, pelo que aprendi, tanto aquilo que cabe numa folha de exame como o que não pode ser escrito. Por me ajudarem a tornar-me quem eu sou.

À equipa de Smart Systems do CeNTI, por me terem acolhido como um deles durante estes meses, pelo interesse que sempre tiveram nas horas de trabalho e pelo companheirismo fora delas.

Ao restante CeNTI, pessoas e instituição, pelas condições que me forneceram neste estágio e apoio nas diferentes atividades.

À minha familia, aos meus pais, avós e irmão, fonte maior de apoio e motivação, que estiveram sempre ao meu lado neste percurso, por terem sempre o ânimo que por vezes me faltou.

Aos meus amigos de infância, pela compreensão pelas vezes em que desaparecia no meio de trabalhos e exames, por terem festejado comigo todos os sucessos que me trouxeram até aqui e pela força que me deram sempre para ultrapassar “só mais um obstáculo”, repetidamente.

Uma palavra também aos meus amigos da faculdade, com quem partilhei notas, aulas e noitadas. Começaram colegas, acabaram amigos para a vida.

Índice

1 Introdução 1
1.1 Apresentação do CeNTI - Centro de Nanotecnologia e Materiais Técnicos, Funcionais e Inteligentes 2
1.2 O Projeto no CeNTI 3
1.3 Objetivos do projeto 4
1.4 Método seguido no projeto 4
1.5 Estrutura da dissertação 5
2 Estado da Arte 7
2.1. Geradores termoelétricos 7
2.2. Aplicações de GTE 8
2.3. Constituição de um módulo termoelétrico 8
2.4. Materiais termoelétricos 9
2.5. Efeitos termoelétricos 13
2.6. Variação das propriedades termoelétricas com a temperatura 16
2.7. Modelação de um GTE 18
2.8. Utilização de um módulo de Peltier como GTE 19
2.9. Obtenção dos parâmetros termoelétricos de um módulo de Peltier 20
2.10. Aumento da eficácia do sistema de geração termoelétrica 22
2.11. Modelos de otimização e seleção de GTE 24
3 Desenvolvimento da ferramenta de otimização e seleção de módulos termoelétricos 25
3.1. Utilização da ferramenta 25
3.2. Cálculo das propriedades termoelétricas de um módulo de Seebeck 27
3.3. Cálculos auxiliares 29
3.4. Associação de módulos termoelétricos 30
3.5. Processo de cálculo das características do módulo ótimo 30
3.5.1. Propriedades termoelétricas do módulo ótimo a ser usado com uma fonte quente de temperatura constante 31
3.5.2. Otimização para uma fonte quente de temperatura constante e área disponível conhecida 33
3.5.3. Otimização para uma fonte quente de temperatura constante e potência objetiva conhecida 35
3.5.4. Propriedades termoelétricas do módulo ótimo a ser usado com uma fonte quente com fluxo de calor constante 37
3.5.5. Otimização para uma fonte quente de fluxo constante 37
3.6. Verificação da produção de um módulo real 41
4 A ferramenta de seleção e previsão de módulos termoelétricos 43
4.1. A primeira versão 43
4.2. Desenvolvimento até ao protótipo final 44
4.3. A versão atual 45
5 Resultados e discussão 55
6 Conclusões e perspetivas de trabalho futuro 63

6.1. Conclusões 63
6.2. Perspetivas de trabalho futuro 65

Referências 67

ANEXO A: Manual de instruções 71

ANEXO B: Folha de especificações do módulo Marlow NL1013T 91

ANEXO C: Folha de especificações do módulo CUI CP40136 97

ANEXO D: Abstract submetido para congresso 103

Nomenclatura

Símbolo	Designação	Unidade
$A_{disponível}$	Área disponível para a aplicação de módulos termoelétricos	cm^2
$A_{módulo}$	Área de um módulo termoelétrico	cm^2
I	Corrente elétrica	A
I_{max}	Corrente elétrica máxima	A
k	Condutividade térmica do material	W/m•K
K_m	Condutância térmica do módulo	W/K
K_{TE}	Condutância térmica equivalente do módulo em funcionamento	W/K
m	Razão de resistências térmicas	-
n	Razão de resistências elétricas	-
P	Potência elétrica	W
p	Número de módulos em paralelo	-
$\dot{Q}_c$	Fluxo de calor no lado frio do módulo	W
$\dot{Q}_{fonte}$	Fluxo de calor produzido pela fonte	W
$\dot{Q}_h$	Fluxo de calor no lado quente do módulo	W
$\dot{Q}_{max}$	Fluxo de calor máximo gerado pelo módulo de Peltier	W
$\dot{Q}_P$	Fluxo de calor devido ao efeito de Peltier	W
R	Resistência elétrica	Ω
R_f	Resistência térmica do lado frio do módulo	K/W
R_i	Resistência elétrica interna ao módulo	Ω
$R_{i,ass}$	Resistência elétrica interna à associação de módulos	Ω
R_{j-c}	Resistência térmica entre a fonte e o invólucro	K/W
R_L	Resistência elétrica da carga	Ω

R_q	Resistência térmica do lado quente do módulo	K/W
$R_{t,c}$	Resistência térmica de contacto	K/W
$R_{t,e}$	Resistências térmicas exteriores ao módulo	K/W
$R_{t,equivalente}$	Resistência térmica equivalente do módulo em funcionamento	K/W
$R_{t,f}$	Resistência térmica total do lado frio do módulo	K/W
$R_{t,m}$	Resistência térmica do módulo	K/W
$R_{t,m,ass}$	Resistência térmica da associação de módulos	K/W
$R_{t,paralelo}$	Resistência térmica paralela ao módulo	K/W
$R_{t,q}$	Resistência térmica total do lado quente do módulo	K/W
S	Coeficiente de Seebeck do módulo	V/K
S_{ass}	Coeficiente de Seebeck da associação de módulos	V/K
s	Número de módulos em série	-
T	Temperatura	K
$\bar{T}$	Temperatura média de funcionamento	K
T_C	Temperatura do lado frio do módulo	K
$T_{C,a}$	Temperatura arbitrada do lado frio do módulo	K
$T_{C,c}$	Temperatura calculada do lado frio do módulo	K
T_{case}	Temperatura do invólucro da fonte de calor	K
T_{fab}	Temperatura do lado quente do módulo nos dados do fabricante	K
T_h	Temperatura do lado quente do módulo	K
$T_{H,a}$	Temperatura arbitrada do lado quente do módulo	K
$T_{H,c}$	Temperatura calculada do lado quente do módulo	K
T_s	Temperatura da fonte quente	K
T_∞	Temperatura ambiente	K

U	Diferença de potencial elétrico	V
U_{max}	Diferença máxima de potencial elétrico	V
x	Número de módulos	-
Z	Valor de mérito	1/K
z	Número de termopares no módulo	-
α	Coeficiente de Seebeck do material	V/K
ΔT	Diferença de temperatura entre as faces do módulo	K
ΔT_{max}	Diferença de temperatura máxima entre as faces do módulo	K
η	Rendimento da conversão energética	-
η_{ZT}	Rendimento termoelétrico	-
μ	Coeficiente de Thomson	V/K
ρ	Resistividade elétrica	Ω•m

Índice de Figuras

Figura 1 - Logótipo do CeNTI. 2

Figura 2 - O CeNTI em números. 3

Figura 3 – Esquema de funcionamento de um GTE. Calor flui da fonte quente (heat source) para a junção quente de dois materiais (hot junction) e da junção fria de dois materiais (cold junction) para um dissipador (heat sink). Este fluxo de calor gera uma corrente elétrica (I) que pode ser convertida em potência elétrica (WE) (Karpe, 2010) 7

Figura 4 - Esquema de um GTE. Este é constituído por elementos termoelétricos positivos (tipo P, laranja) e negativos (tipo N, amarelo), ligados eletricamente em série e termicamente em paralelo, condutores elétricos (azul, a ligarem os diferentes elementos) e placas termicamente condutores e eletricamente isolantes (a verde e azul claro, a servirem de base aos condutores elétricos) (Dousti et al., 2015). 9

Figura 5 – Diferença de temperaturas entre as junções de dois materiais diferentes que cria uma diferença de potencial elétrico entre pontas abertas de um dos materiais (Karpe, 2010). 13

Figura 6 – Circuito com dois materiais condutores diferentes ligado a uma fonte elétrica. Numa das junções entre materiais é absorvido calor e na outra é libertado calor (Karpe, 2010). 14

Figura 7 – Corrente elétrica que atravessa um material condutor com resistência não nula é libertada energia sob a forma de calor (Kanimba e Tian, 2016). 15

Figura 8 – Material sujeito a uma diferença de temperatura ao longo do seu comprimento. O seu potencial elétrico altera-se com a temperatura. Na figura está representado um material com coeficiente de Thomson negativo (Electricalvoice, 2018). 16

Figura 9 - Diagrama do funcionamento da ferramenta no processo de escolha do módulo ótimo. 26

Figura 10- Diagrama do processo de seleção do módulo ótimo para o caso de uma fonte de calor de temperatura constante e área conhecida 34

Figura 11 - Diagrama do processo de seleção do módulo ótimo para o caso de uma fonte de calor de temperatura constante 36

Figura 12 - Diagrama do processo de seleção do módulo ótimo para o caso de uma fonte de calor de fluxo constante 38

Figura 13 - Diagrama do processo de cálculo do método iterativo simples 40

Figura 14 - Ambiente de trabalho da versão inicial da ferramenta. 43

Figura 15 - Estrutura básica das janelas da ferramenta. 45

Figura 16 - Excerto de captura de ecrã que contém os botões para iniciar a ferramenta. ... 46

Figura 17 - Janela de introdução das condições de funcionamento do sistema para a seleção do módulo ótimo. 47

Figura 18 - Janela de resultados da seleção de módulo ótimo. 47

Figura 19 - Janela de seleção da fonte quente e módulo de estudo para o teste de módulo conhecido. 48

Figura 20 - Janela para introdução das condições para o teste de um módulo conhecido no caso de uma fonte quente de temperatura constante. 49

Figura 21 - Janela de resultados do teste a um módulo conhecido. 50

Figura 22 - Janela para ativar, inativar e eliminar módulos. 51

Figura 23 - Janela para a adição de um módulo de Seebeck. 51

Figura 24 - Janela para a adição de um módulo de Peltier. 52

Figura 25 - Janela de opções avançadas. 53

Figura 26 - Imagem recolhida com a câmara térmica. A faixa em tons mais claros é a banda de aquecimento e os dois quadrados escuros são os módulos termoelétricos. 58

Figura 27 - Circuito em teste com os módulos termoelétricos ligados em paralelo. 59

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Características de materiais TE disponíveis (Twaha et al., 2016). 11

Tabela 2 – Lista de materiais termoelétricos poliméricos e cerâmicos (He et al., 2015). ... 12

Tabela 3 - Propriedades termoelétricas do módulo NL1013T calculadas pelos diferentes métodos. 55

Tabela 4 - Comparação entre a tensão e potência elétrica geradas de acordo com as propriedades calculadas pelos 3 métodos para TH=85˚C e TC=27˚C. 56

Tabela 5 - Comparação entre a tensão e potência elétrica geradas de acordo com propriedades calculadas pelos 3 métodos para TH=55˚C e TC=27˚C. 56

Tabela 6 - Comparação entre a tensão e potência elétrica geradas de acordo com propriedades calculadas pelos 3 métodos para TH=35˚C e TC=27˚C. 57

Tabela 7 - Propriedades termoelétricas do módulo CP40136 calculadas pelos diferentes métodos. 57

Tabela 8 - Comparação dos valores de tensão previstos e medidos para um módulo termoelétrico. 59

Tabela 9 - Comparação dos valores de tensão previstos e medidos para dois módulos termoelétricos associados em série. 60

Tabela 10 - Comparação dos valores de tensão previstos e medidos para dois módulos termoelétricos associados em paralelo. 60

Tabela 11 - Corrente calculada nas diferentes configurações. 61

1 Introdução

Os consumos mundiais de energia têm vindo a aumentar anualmente. De acordo com o estudo estatístico da energia mundial elaborado pela BP (2018), o consumo mundial de energia primária cresceu 2,2% em 2017, um incremento superior à média de 1,7% nos 10 anos anteriores. Tal facto resultou num aumento de 1,6% de emissões de dióxido de carbono. No entanto, em França, 30% da energia final é desperdiçada como calor (Twaha *et al.*, 2016). Na Alemanha, 80% da energia primária é desperdiçada como calor residual (Nesarajah e Frey, 2016). Mesmo no nosso dia-a-dia, numa viagem de carro, 40% da energia é desperdiçada na forma de calor pelo escape (Twaha *et al.*, 2016). Estes dados sustentam a procura por métodos mais ecológicos de produção de energia útil, sendo um deles o aproveitamento de energia térmica residual.

A estratégia principal passa por utilizar métodos de recuperação de calor, como o pré-aquecimento de fluido de trabalho usando o calor dos gases de escape, ou através de ciclos de Rankine orgânicos, que usam o calor residual como fonte quente. Muito do calor residual libertado está, no entanto, a temperaturas muito baixas para ser recuperado pelos sistemas convencionais (Karpe, 2010). Uma solução possível passa pela utilização de geradores termoelétricos (GTE). Esta tecnologia tem a vantagem de ser económica, poder funcionar durante longos períodos sem manutenção e conseguir aproveitar diferenças de temperaturas mais pequenas (Dousti *et al.*, 2015).

As mesmas características que tornam os GTE interessantes para o uso no aproveitamento de energia térmica residual tornam-nos também indicados para fornecer energia elétrica a sistemas eletrónicos autónomos. Neste caso, um utilizador não terá, à partida, conhecimentos avançados de transferência de calor nem interesse em utilizar métodos matemáticos complexos e morosos no processo de escolha de um gerador termoelétrico para a sua utilização, sendo importante criar uma ferramenta numérica que simplifique e agilize este processo.

1.1 Apresentação do CeNTI - Centro de Nanotecnologia e Materiais Técnicos, Funcionais e Inteligentes

O CeNTI - Centro de Nanotecnologia e Materiais Técnicos, Funcionais e Inteligentes - é um instituto de investigação e desenvolvimento tecnológico (I&DT) privado sem fins lucrativos. Foi fundado em 2006, numa parceria entre a Universidade do Minho, a Universidade do Porto, a Universidade de Aveiro, o CITEVE - Centro Tecnológico das Indústrias Têxtil e do Vestuário de Portugal, o CTIC - Centro Tecnológico das Indústrias do Couro, e o CEIIA - Centro para a Excelência e Inovação na Indústria Automóvel.



Figura 1 - Logótipo do CeNTI.

O CeNTI desenvolve atividades de Investigação, Desenvolvimento Tecnológico, Inovação e Engenharia nos domínios dos materiais e sistemas inteligentes e funcionais. Dispõe de meios físicos avançados de desenvolvimento, teste, prototipagem e apoio a *scale-up* nas áreas da nanotecnologia, da funcionalização e da "smartização" de materiais, nomeadamente no que concerne às tecnologias da eletrónica impressa. Distingue-se dos seus pares europeus por dominar a funcionalização e a “smartização” de substratos de capital importância para as indústrias relevantes em Portugal como têxteis, polímeros, couro, papel, vidro, cerâmica, pedra natural, betão, cortiça, madeira, etc.

No CeNTI encontram-se igualmente recursos humanos com formação avançada nas mais variadas áreas de conhecimento, das engenharias (química, polímeros, biológica, mecânica, materiais, eletrónica, eletrotecnia, informática, etc.) e das ciências (química, matemática, física, etc.). A sua equipa de investigação dedica-se ao estudo e desenvolvimento de novos produtos nas áreas da nanotecnologia e materiais inteligentes,

com enfoque na transferência de tecnologia e criação de produtos de valor acrescentado para o mercado.

De modo a demonstrar o seu crescimento, podem ser comparados os valores da Figura 2, relativos ao ano de 2019, com aqueles verificados em 2017, em que o CeNTI registava 90 projetos com a indústria, 12 projetos financiados a nível europeu, 40 pedidos de patente e 5 patentes concedidas.



Figura 2 - O CeNTI em números (CeNTI, 2019).

O CeNTI é membro de vários clusters e plataformas tecnológicas nacionais e internacionais, nomeadamente, OE-A – Organic and Printed Electronics Association, E2B - Energy Efficient Buildings European Initiative, ETP-TC European Technology Platform for the Future of Textiles and Clothing, Value4Nano, Centro Habitat Portugal, Cluster da Mobilidade Portugal, Cluster da Saúde Portugal e vários comités de normalização.

1.2 O Projeto no CeNTI

O projeto desta dissertação está inserido na equipa *Smart Systems* do CeNTI. Esta grupo, que opera na área de eletrónica e informática, investiga, projeta e desenvolve soluções de sensorização, aquisição, processamento, atuação, comunicação,

armazenamento, aplicações *Cloud based* e aplicações móveis, situações em que a autonomia dos sistemas é uma mais-valia ou até mesmo uma necessidade. Essa autonomia prende-se não só com o funcionamento do sistema, mas também com o seu fornecimento de energia.

Embora haja outras opções, como a produção fotovoltaica ou geradores mecânicos, estas opções nem sempre estão disponíveis. Nos casos em que haja uma fonte quente e uma fonte fria disponíveis, a micro geração termoelétrica é uma possível opção, embora ainda pouco consolidada. Este trabalho visa dar apoio nesse sentido, criando uma ferramenta que apoie a avaliação da adequabilidade da micro geração termoelétrica para um determinado caso de estudo e a melhor forma de implementar essa solução.

1.3 Objetivos do projeto

Este projeto tem como objetivo desenvolver uma ferramenta que ajude a prever a micro geração elétrica com recurso a calor residual que seja intuitiva e possível de usar por quem não tenha conhecimentos avançados em transferência de calor. Para atingir tal resultado será necessário:

- Estudar ou desenvolver um modelo físico que relacione as condições do sistema com a potência elétrica gerada;
- Implementar uma ferramenta numérica, em *Visual Basic for Applications*, que permita escolher o melhor módulo para a situação em estudo;
- Efetuar um estudo de mercado dos módulos existentes e o tipo de informação disponibilizada pelos fabricantes;
- Tornar a ferramenta numérica utilizável até por quem não tenha conhecimentos avançados de transferência de calor;
- Verificar experimentalmente os resultados obtidos através do software.

1.4 Método seguido no projeto

O projeto teve início com um estudo das tecnologias e ferramentas existentes relacionadas com a conversão termoelétrica em estado sólido. As informações recolhidas

serviram de indicador da direção que o desenvolvimento da ferramenta deveria tomar. Este foi feito a par com ensaios em laboratório para validar resultados. Estando o modelo numérico desenvolvido, foram decididas melhorias a implementar na ferramenta, de modo a facilitar a utilização, diminuir o tempo de computação e aumentar as funcionalidades, numa abordagem de melhoria contínua até ao final do estágio na empresa.

1.5 Estrutura da dissertação

O Capítulo 2 foca a revisão do estado da arte da geração termoelétrica de energia em estado sólido e dos modos de otimização deste cenário.

O Capítulo 3 verifica a teoria a seguir nesta dissertação e descreve os processos de cálculo usados na ferramenta numérica desenvolvida.

O Capítulo 4 demonstra a ferramenta, desde a primeira versão funcional até à versão existente no final do estágio. A versão mais recente da ferramenta é abordada em maior detalhe, sendo descrito o seu funcionamento com recurso a excertos do manual de instruções que a acompanha.

O Capítulo 5 demonstra e analisa os resultados obtidos analítica e experimentalmente.

O Capítulo 6 refere as principais conclusões do trabalho desenvolvido e analisa possíveis trabalhos futuros.

O Anexo A demonstra o manual de instruções desenvolvido para acompanhar a ferramenta.

O Anexo B apresenta a folha de especificações do módulo Marlow NL1013T, usado na verificação analítica.

O Anexo C apresenta a folha de especificações do módulo CUI CP40136, usado na verificação Experimental.

O Anexo D apresenta o *extended abstract* submetido e aprovado no congresso *Mechanics and Materials in Design*, de 4 a 6 de Setembro na Universidade de Bolonha, Itália.

2 Estado da Arte

De modo a desenvolver a ferramenta para selecionar o módulo ótimo é necessário compreender o funcionamento da tecnologia e estudar as soluções já existentes. Nesta secção é revisto o estado da arte no que diz respeito aos efeitos termoelétricos, ao funcionamento de geradores termoelétricos, à otimização do seu funcionamento e às ferramentas já existentes para a sua seleção e otimização.

2.1. Geradores termoelétricos

Este modo de produção de eletricidade baseia-se num gerador em estado sólido, sem partes móveis, o que traz as vantagens de não produzir ruído, nem vibrações, e de não necessitar de manutenção (Nuwayhid *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2017; Kanimba e Tian, 2016). É um processo particularmente útil para recuperar calor desperdiçado de baixo grau, onde métodos como um ciclo de Rankine orgânico não se revelariam eficazes (Nesarajah e Frey; 2016; Liu *et al.*, 2014) ou em situações em que um sistema de geração de energia mais fiável e isento de manutenção seja desejável (Nesarajah e Frey, 2016). O funcionamento de um GTE é demonstrado na Figura 3. Calor flui da fonte quente (heat source) para a junção quente de dois materiais (hot junction) e da junção fria de dois materiais (cold junction) para um dissipador (heat sink). Este fluxo de calor gera uma corrente elétrica (I) que pode ser convertida em potência elétrica ($\dot{W}_E$).

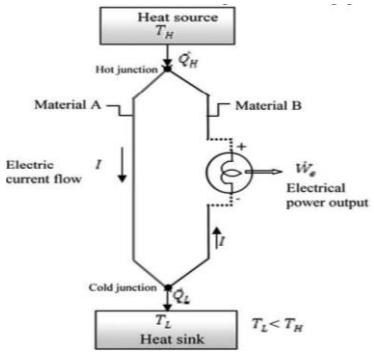


Figura 3 – Esquema de funcionamento de um GTE. (Karpe, 2010)

Apesar da baixa eficiência desta tecnologia (Chen *et al.*, 2017; Twaha *et al.*, 2016), a geração de energia elétrica por tecnologia termoelétrica consegue ser mais económica que a geração fotovoltaica e eólica (Chen *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2014).

2.2. Aplicações de GTE

Apesar da baixa eficiência, há GTEs a serem usados em múltiplas aplicações. A indústria onde o uso desta tecnologia é mais relevante é a aeroespacial, recolhendo a energia térmica resultante do decaimento de isótopos radioativos (geradores termoelétricos radioisotópicos – GTR) (O'Brien *et al.*, 2008; He *et al.*, 2015) para fornecer energia elétrica a sondas espaciais. Numa escala diferente, tanto em dimensões físicas como nas temperaturas utilizadas, a Seiko e Citizen já têm relógios alimentados pela diferença de temperatura entre o corpo humano e o ar circundante (Twaha *et al.*, 2016). Ainda, estão a ser desenvolvidas aplicações que permitem recuperar baixas potências, como, por exemplo, o calor humano para produzir entre 5μW e 1W para alimentar sensores, aparelhos médicos ou relógios (Nesarajah e Frey, 2016; He *et al.*, 2015) e potências altas, como sistemas que permitem recuperar até 1kW dos gases de escape de automóveis e reduzir os consumos de combustível até 10% (Karpe, 2010), passando por soluções intermédias que permitem fornecer 100W de energia elétrica a regiões que não são servidas pela rede elétrica, recuperando o calor de fogões domésticos (Nuwayhid et al., 2005).

Apesar da maioria das aplicações estudadas se destinarem à recuperação de energia, também há em estudo instalações de geração de energia elétrica com base em geradores termoelétricos, usando como fonte de calor a energia solar concentrada ou o calor geotérmico (Twaha *et al.*, 2016; He *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2014).

A utilização de geradores termoelétricos é especialmente indicada para aplicações de baixa temperatura e baixas diferenças de temperatura, não só porque os métodos tradicionais não são adequados para essas baixas temperaturas (Karpe, 2010; Liu *et al.*, 2014), como também porque perde eficiência para temperaturas mais elevadas (He *et al.*, 2015).

2.3. Constituição de um módulo termoelétrico

Um módulo termoelétrico (MTE), designação que abrange tanto os GTE como os módulos de Peltier, módulos desenhados para funcionar como bombas de calor, é

constituído por dois tipos de elementos, designados por P e N de modo a ilustrar o défice e excesso de eletrões, respetivamente (Kanimba e Tian, 2016).

Por norma, e de forma a minimizar os custos, estes elementos são frequentemente feitos da mesma liga, sendo apenas dopados de forma a criar as polaridades (Kanimba e Tian, 2016). Estes elementos são organizados em pares, os chamados termopares. Num MTE vários destes pares são ligados em paralelo do ponto de vista térmico e em série do ponto de vista elétrico (Ahiska, 2006; Nesarajah e Frey, 2016; Kanimba e Tian, 2016), como se pode constatar na Figura 4. Um módulo termoelétrico é constituído por elementos termoelétricos positivos (tipo P, laranja) e negativos (tipo N, amarelo), ligados eletricamente em série e termicamente em paralelo, condutores elétricos (azul, a ligarem os diferentes elementos) e placas termicamente condutores e eletricamente isolantes (a verde e azul claro, a servirem de base aos condutores elétricos)

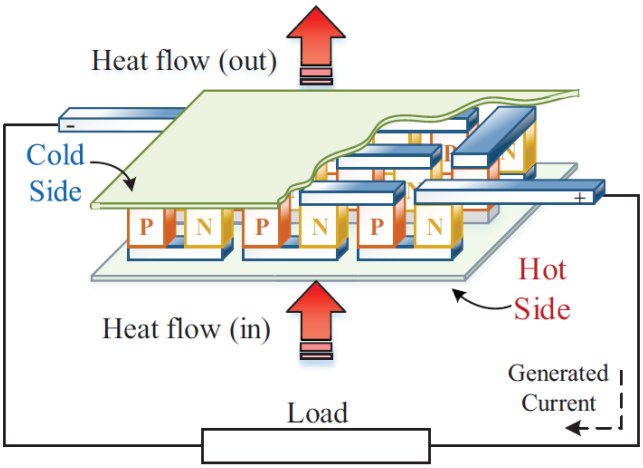


Figura 4 - Esquema de um GTE. (Dousti et al., 2015).

2.4. Materiais termoelétricos

Os materiais utilizados nos geradores termoelétricos são escolhidos, em parte, com base na temperatura de utilização e no seu valor de mérito adimensional (ZT). Este último parâmetro é definido multiplicando o valor de mérito de um material termoelétrico (Z) pela temperatura para a qual esse valor de mérito foi calculado (T). Quanto maior o seu valor, mais adequado é o material para ser utilizado no fabrico de um gerador

termoelétrico (Cheng *et al.*, 2014) e para um material, ZT, é definido por (Twaha *et al.*, 2016; Nesarajah e Frey, 2016; Kanimba e Tian, 2016):

$$ZT = \frac{\alpha^2 T}{\kappa \rho} \tag{2.1}$$

onde α é o coeficiente de Seebeck do material, T é a temperatura absoluta, κ é a condutividade térmica e ρ é a resistividade elétrica.

O rendimento termoelétrico (η_{ZT}) pode ser dado por (Sherman *et al.*, 1960):

$$\eta_{ZT} = \frac{\sqrt{1+ZT}-1}{\sqrt{1+ZT}+T_C/T_H} \tag{2.2}$$

sendo T_C é a temperatura do lado frio e T_H é a temperatura do lado quente.

Ainda, o rendimento total (η) é dado através da conjugação do rendimento termoelétrico com o rendimento de Carnot (Teffah *et al.*, 2018; Nesarajah e Frey, 2016; He *et al.*, 2015):

$$\eta = \frac{\Delta T}{T_h}\frac{\sqrt{1+ZT}-1}{\sqrt{1+ZT}+T_c/T_h} \tag{2.3}$$

pelo que ΔT é a diferença de temperaturas entre o lado quente e o lado frio.

Na atualidade, e de acordo com a disponibilidade comercial, os materiais mais usados no fabrico de geradores termoelétricos são os indicados na Tabela 1.

Como a tabela indica, as propriedades termoelétricas variam com a temperatura, estando a variação das propriedades do Bi_2Te_3 descritas em Liao *et al.*(2018).

Na literatura existem, no entanto, outros materiais ou métodos de fabrico usando os mesmos materiais com valores de ZT mais elevados. Contudo, estes ainda não estão disponíveis no mercado. Tal facto deve-se a processos de fabrico muito dispendiosos, quer pelas técnicas usadas que exigem, quer pela instabilidade e alteração das propriedades termoelétricas dos materiais com o tempo e exposição às condições de uso (Cheng *et al.*, 2014).

Tabela 1 - Características de materiais TE disponíveis (Twaha et al., 2016).

Temperatura (ºC)	Tipo	Material termoelétrico	ZT máximo
<150	p	Bi2Te3	0.8
	n	Bi2Te3	0.8
150-500	p	Zn4Sb3	-
	p, n	PbTe	0.7-0.8
	p	TeAgGeSb (TAGS)	1.2
500-700	p	CeFe4Sb12	1.1
	n	CoSb3	0.8
700-900	p, n	SiGe	0.6-1.0
	p	LaTe	0.4

Apesar da maioria dos materiais termoelétricos utilizados serem semicondutores, estes não são flexíveis, nem resistentes a muito altas temperaturas, condições de importância maior que a eficiência em certas situações. De modo a resolver este problema, estão a ser estudados materiais termoelétricos poliméricos para serem usados quando a flexibilidade é de maior interesse e cerâmicos para serem usados quando as altas temperaturas são o fator limitante (He *et al.*, 2015).

Os valores de ZT para os materiais termoelétricos semicondutores, poliméricos e cerâmicos podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 – Lista de materiais termoelétricos poliméricos e cerâmicos (He et al., 2015).

Autor	Ano de Publicação	Material	ZT	Temperatura [K]
Masatoshi Otake et al.	2004	$Si_{0,8}Ge_{0,2}$	0.66	1073
Ken Kurosaki et al.	2001	$BaUO_3$	1.8	900
K. Kato et al.	1996	$SiC/B4C + PSS$	1.75	873
Jun-ichi Tani et al.	2005	Mg_2Si	0.86	862
Won-Seung Cho et al.	1999	$Fe_{0,9}Mn_{0,1}Si_2$	1.31	773
T. Caillat et al.	1997	Zn_4Sb_3	1.4	670
Shinsuke Yamanaka et al.	2003	Tl_9BiTe_6	0.86	590
Hasaka et al.	1997	$Cu_xSn_1S_4$	0.6	570
L.T. Zhang et al.	2003	Zn_4Zn_4	1.2	460
Lei Wang et al.	2011	Grafite	0.54	393
J. Navrhtil	1996	$Sb_{2-x}Bi_xTe$	0.93	300
P.W. Zhu et al.	2002	$PbTe$	0.87	293
Pei et al.	2012	$Pb_{1-x}Mn_xTe$	1.6	700
Pei et al.	2013	$BiCuSeO$	0.9	923
Rhyee et al.	2009	$In_4Se_{3-\sigma}$	1.48	705

Zhao et al.	2014	Cristal único de $SnSe$	2.6+-0.3	923
Kim et al.	2013	3,4-Etilenodioxitiofeno	0.42	Temperatura ambiente

2.5. Efeitos termoelétricos

A primeira descoberta de um efeito termoelétrico ocorreu em 1821 por Seebeck (Ahiska, 2006; He *et al.*, 2015), razão pela qual ficou conhecido como efeito de Seebeck. Foi mostrado que em dois metais diferentes unidos em dois pontos distintos, com uma das suas uniões aquecida e a outra arrefecida, era gerada uma corrente entre eles, como demonstrado na Figura 5. Inicialmente, os materiais usados eram metais e a eletricidade gerada não tinha relevo para a produção de energia elétrica. No entanto, a descoberta de semicondutores no século XX trouxe um aumento do interesse na matéria (Karpe, 2010; He *et al.*, 2015).

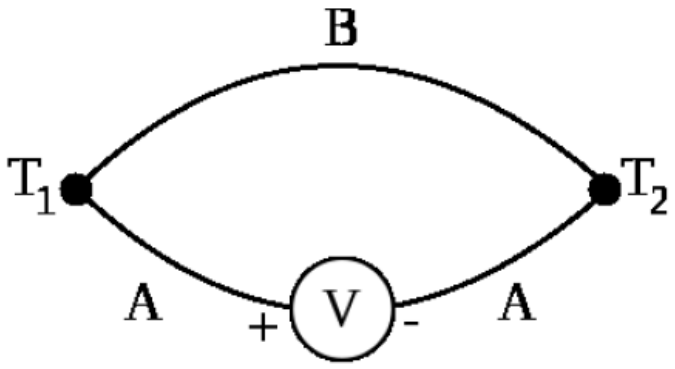


Figura 5 – Diferença de temperaturas entre as junções de dois materiais diferentes que cria uma diferença de potencial elétrico entre pontas abertas de um dos materiais (Karpe, 2010).

O efeito de Seebeck é utilizado vulgarmente nos termopares, para medição de temperatura. É, ainda, o efeito de maior importância no funcionamento de um gerador termoelétrico, razão pela qual os geradores termoelétricos também são chamados de módulos de Seebeck.

Desta forma, o coeficiente de Seebeck do material, α, é dado por (Nesarajah e Frey, 2016):

$$\alpha = \frac{U}{\Delta T} \tag{2.4}$$

onde U é a diferença de potencial e ΔT é a diferença de temperaturas entre o lado quente e o lado frio.

De modo diferente ao efeito de Seebeck, o efeito de Peltier, descoberto em 1834 (Nesarajah e Frey, 2016; He *et al.*, 2015), ocorre quando uma corrente flui através de uma junção de dois condutores termoelétricos diferentes, provocando uma diferença de temperaturas entre as duas junções, observável na Figura 6.

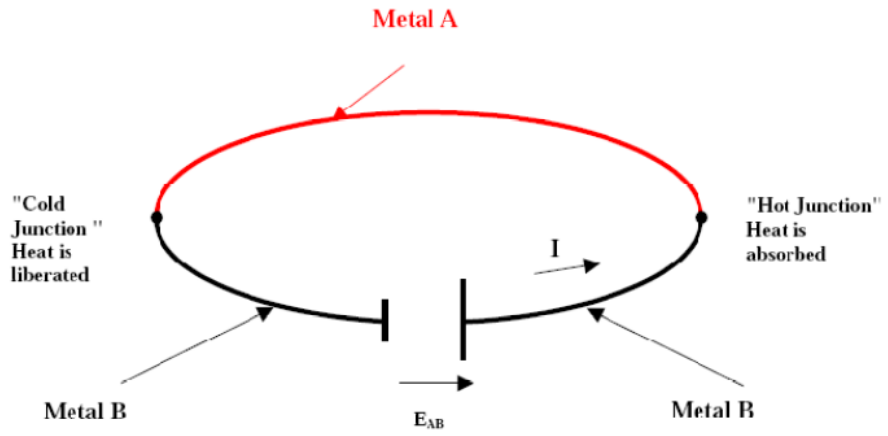


Figura 6 – Circuito com dois materiais condutores diferentes ligado a uma fonte elétrica. Numa das junções entre materiais é absorvido calor e na outra é libertado calor (Karpe, 2010).

O efeito de Peltier é o princípio de funcionamento dos módulos de Peltier, usados, acima de tudo, para arrefecimento de componentes eletrónicos, embora a corrente que percorre os elementos de um gerador termoelétrico também origine nestes um gradiente térmico. Assim, o calor transferido pelo efeito de Peltier é dado por (Nesarajah e Frey, 2016):

$$\dot{Q}_P = \alpha I T \tag{2.5}$$

$\dot{Q}_P$ é o calor transferido pelo efeito de Peltier, I a corrente elétrica e T a temperatura absoluta.

Também relevante é o chamado efeito de Joule, devido à sua descoberta por James Joule em 1840 (Encyclopaedia Britannica, 1998), que descreve o calor dissipado por um material com resistência elétrica não nula quando percorrido por uma corrente elétrica (Kanimba e Tian, 2016). Este efeito é demonstrado na Figura 7.

No contexto de um gerador termoelétrico, este efeito reduz o calor disponível para a geração termoelétrica nos elementos do gerador. A potência dissipada por efeito de Joule é dada por:

$$P = RI^2 \tag{2.6}$$

sendo P a potência elétrica, R a resistência elétrica e I a corrente elétrica.

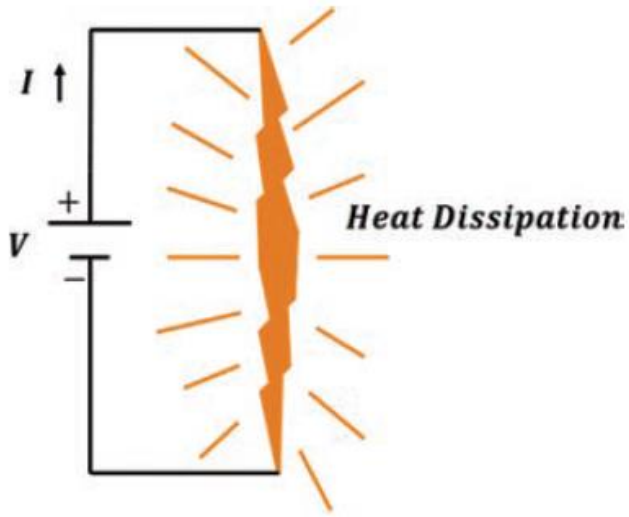


Figura 7 – Corrente elétrica que atravessa um material condutor com resistência não nula é libertada energia sob a forma de calor (Kanimba e Tian, 2016).

Aquecendo um material condutor de eletricidade, os eletrões nessa zona têm uma maior energia cinética que aqueles na zona mais fria. Assim, os eletrões movem-se para a zona de menos energia, a zona fria. Esta distribuição desigual de eletrões ao longo do condutor origina um campo elétrico no material, sendo o polo positivo na zona mais quente. Este efeito foi designado por efeito Thomson, em honra de William Thomson (mais conhecido por Lorde Kelvin) (Kanimba e Tian, 2016), que o descobriu em 1854 (Encyclopaedia Britannica, 1998), e é demonstrado no esquema da Figura 8. Na figura está representado um material com coeficiente de Thomson negativo.

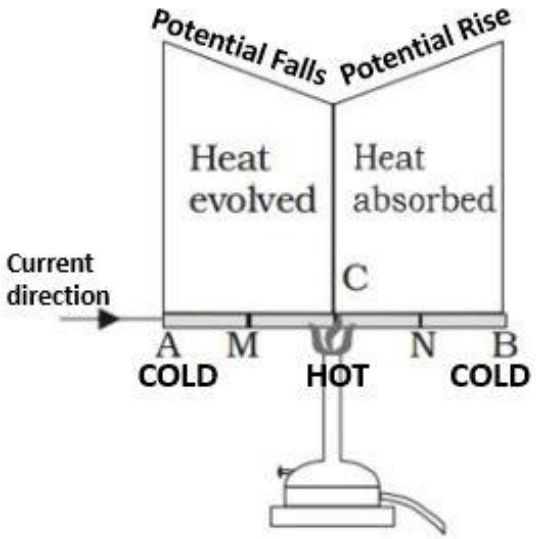


Figura 8 – Material sujeito a uma diferença de temperatura ao longo do seu comprimento. O seu potencial elétrico altera-se com a temperatura. (Electricalvoice, 2018).

O efeito de Thomson, μ, é descrito por:

$$\mu = T\frac{d\alpha}{dT} \tag{2.7}$$

Uma vez que o coeficiente de Seebeck é geralmente assumido constante ao longo do módulo, o efeito de Thomson é frequentemente desprezado (Lésage *et al.*, 2013; Nesarajah e Frey, 2016).

2.6. Variação das propriedades termoelétricas com a temperatura

De modo a encontrar o módulo termoelétrico ótimo para uma dada utilização é necessário converter as suas propriedades à temperatura de utilização para aquelas à temperatura da folha de especificações do fabricante. Para isso podem ser usadas as equações descritas no trabalho de Liao *et al.*(2018), adaptadas para o cálculo do valor médio das propriedades entre os elementos do tipo *n* e tipo *p* representadas nas equações 2.8 a 2.10.

$$\alpha(T) = 6{,}13 \times 10^{-6} \times T^3 - 0{,}0114 \times T^2 + 5{,}11 \times T - 541 \quad (2.8)$$

$$\rho(T) = -1{,}49 \times 10^{-5} \times T^2 + 0{,}0172 \times T - 2{,}78 \quad (2.9)$$

$$k(T) = 3{,}96 \times 10^{-5} \times T^2 - 0{,}0268 \times T + 5{,}84 \quad (2.10)$$

sendo α o coeficiente de Seebeck do telureto de bismuto, T a temperatura, ρ a resistividade elétrica do telureto de bismuto e κ a condutividade térmica do telureto de bismuto.

Conhecendo a área de secção de cada elemento termoelétrico, a sua altura e o número destes num módulo, será possível obter o coeficiente de Seebeck, a resistência térmica e a resistência elétrica de um módulo termoelétrico. Uma vez que esses parâmetros geométricos não estão normalmente disponíveis, os resultados das equações 2.8 a 2.10 serão utilizados para relacionar o coeficiente de Seebeck, a resistência térmica ($R_{t,m}$) e a resistência elétrica (R_i) de um módulo termoelétrico a diferentes temperaturas através das relações expressas nas equações 2.12 a 2.14.

$$\frac{S(T_1)}{\alpha(T_1)} = \frac{S(T_2)}{\alpha(T_2)} \quad (2.12)$$

$$\frac{R_i(T_1)}{\rho(T_1)} = \frac{R_i(T_2)}{\rho(T_2)} \quad (2.13)$$

$$R_{t,m}(T_1) \times k(T_1) = R_{t,m}(T_2) \times k(T_2) \quad (2.14)$$

onde T é a temperatura. A condutância térmica (K_m), a resistência interna (R_i) e o coeficiente de Seebeck do módulo (S) relacionam-se respetivamente com a condutividade térmica (κ), resistividade elétrica (ρ) e coeficiente de Seebeck do material (α) pelas equações:

$$K_m = \frac{\kappa \times A \times z}{l} \quad (2.15)$$

$$R_i = \frac{\rho \times l \times z}{A} \quad (2.16)$$

$$S = \alpha \times z \quad (2.17)$$

em que A representa a área de cada elemento termoelétrico, l representa o comprimento de cada elemento termoelétrico e z representa o número de termopares no módulo.

2.7. Modelação de um GTE

De modo a prever o funcionamento do GTE é necessário fazer a modelação do seu comportamento. De acordo com Chen *et al.* (2002), o calor absorvido no lado quente do gerador ($\dot{Q}_H$) é dado por:

$$\dot{Q}_H = ST_H I - 0{,}5I^2R_i + K_m\Delta T \tag{2.18}$$

sendo I a corrente elétrica, K_m a condutância térmica do módulo termoelétrico, R_i a resistência elétrica interna do módulo termoelétrico, S o coeficiente de Seebeck do módulo, T_H a temperatura na face quente e ΔT a diferença de temperaturas entre o lado quente e o lado frio.

Por outro lado, o calor libertado no lado frio ($\dot{Q}_C$) é dado por:

$$\dot{Q}_C = ST_C I + 0{,}5I^2R_i + K_m\Delta T \tag{2.19}$$

onde T_C é a temperatura na face fria.

Assim, a potência elétrica gerada (P) será a diferença entre o calor absorvido no lado quente ($\dot{Q}_H$) e o calor libertado no lado frio ($\dot{Q}_C$):

$$P = \dot{Q}_H - \dot{Q}_C = SI\Delta T - I^2R_i \tag{2.20}$$

Este método obriga a conhecer a corrente elétrica ou os fluxos de calor para determinar a potência elétrica gerada. Já o método deduzido por Nuwayhid *et al.* (2005) resulta na equação:

$$P = \left(\frac{S\Delta T}{R_i + R_L}\right)^2 \times R_L \tag{2.21}$$

sendo R_i a resistência elétrica do GTE e R_L a resistência elétrica da carga.

Deste modo, torna-se possível prever a potência produzida pelo sistema, uma vez que os parâmetros $S, \Delta T$ e R_i são característicos do GTE e do sistema onde vai ser aplicado e a resistência da carga (R_L) corresponde à resistência elétrica do elemento que vai receber a potência produzida (resistência, conversor DC-DC ou outro), que é do conhecimento do utilizador.

Sendo a lei de potência elétrica dada por:

$$P = UI \tag{2.22}$$

onde I é a corrente, P é a potência elétrica e U é a tensão. Combinando com a lei de Ohm, podendo ser reescrita por:

$$P = RI^2 \tag{2.23}$$

onde R é a resistência elétrica. Igualando as eq. 2.21 e eq. 2.23, a corrente elétrica (I) pode ser definida por:

$$I^2 R_L = \left(\frac{S\Delta T}{R_i + R_L}\right)^2 R_L \tag{2.24}$$

$$I = \frac{S\Delta T}{R_i + R_L} \tag{2.25}$$

Ainda, relacionando as eq. 2.21, eq. 2.22 e eq. 2.25, a diferença de potencial nos terminais da carga (ou do gerador) (U) é dada por:

$$\left(\frac{S\Delta T}{R_i + R_L}\right)^2 R_L = U\frac{S\Delta T}{R_i + R_L} \tag{2.26}$$

$$U = \frac{S\Delta T}{R_i + R_L} R_L \tag{2.27}$$

2.8. Utilização de um módulo de Peltier como GTE

Enquanto que na sua utilização comum os módulos de Peltier se baseiam no efeito de Peltier e os GTE se baseiam no efeito de Seebeck, em ambos os módulos termoelétricos, o valor de mérito adimensional (ZT) é um parâmetro determinante, levando à seleção de materiais idênticos nos dois tipos de módulos para as mesmas condições de temperatura. No entanto, os dois tipos de módulos termoelétricos apresentam diferenças no que diz respeito à sua construção (Nesarajah e Frey, 2016). Os GTE são, por norma, desenhados para suportar temperaturas mais elevadas que os módulos de Peltier, como se pode constatar nas soldagens, desenhadas de modo a suportar melhor essas temperaturas, e nas

placas cerâmicas que têm soluções de forma a dissipar as tensões de origem térmica. Os módulos termoelétricos também se distinguem pelos fios elétricos, não só pelas questões térmicas - os fios dos GTE têm um revestimento isolador de um material mais resistente à temperatura - mas também pelas questões elétricas - os fios dos módulos de Peltier têm uma área de secção maior de modo a transportar correntes maiores. Por último, as dimensões dos elementos termoelétricos nos dois módulos também são diferentes, sendo mais altos e esguios nos módulos de Peltier e mais baixos e largos nos GTE (Palacios *et al.*, 2009). No entanto, tal como demonstrado por Nesarajah e Frey (2016), para diferenças de temperatura baixas, um módulo de Peltier a funcionar como gerador pode produzir potências mais elevadas que um GTE. O custo mais baixo de um módulo de Peltier é mais uma boa razão para a utilização destes módulos termoelétricos para a produção de energia elétrica em detrimento de um módulo especializado, caso o módulo de Peltier suporte as temperaturas da aplicação em causa.

2.9. Obtenção dos parâmetros termoelétricos de um módulo de Peltier

Na utilização de um módulo de Peltier como GTE é igualmente interessante conseguir prever o desempenho do módulo termoelétrico como gerador termoelétrico, não só para comparar a sua prestação com aquela de um GTE dedicado, como também para verificar se o módulo consegue gerar as especificações elétricas pretendidas. No entanto, as folhas de especificação, tanto do módulo de Peltier como do gerador termoelétrico, raramente contêm as informações necessárias para a aplicação do modelo descrito na secção anterior, pois nas aplicações convencionais, arrefecimento ou aquecimento no caso de um módulo de Peltier ou geração de energia elétrica com diferença de temperaturas conhecida no caso de um GTE, não é necessária essa informação. Lineykin e Ben-Yaakov (2005) desenvolveram uma metodologia analítica capaz de estimar os parâmetros de um módulo de Peltier através dos valores máximos de tensão (U_{max}), corrente (I_{max}) e diferença de temperatura entre os extremos do módulo (ΔT_{max}) para uma dada temperatura da face quente. Estes valores estão comummente presentes nas folhas de especificação.

Através deste método, o coeficiente de Seebeck (S), resistência elétrica (R_i) e condutância térmica (K_m) são obtidos através da Eq. 2.28, Eq. 2.29 e Eq. 2.30:

$$S = \frac{U_{max}}{T_{fab}} \tag{2.28}$$

$$R_i = \frac{U_{max}}{I_{max}} \frac{\left(T_{fab} - \Delta T_{max}\right)}{T_{fab}} \tag{2.29}$$

$$K_m = \frac{I_{max} U_{max}}{\Delta T_{max}} \frac{\left(T_{fab} - \Delta T_{max}\right)}{2T_{fab}} \tag{2.30}$$

sendo que U_{max} é a tensão máxima suportada pelo módulo, T_{fab} a temperatura na face quente nos dados do fabricante, R_i a resistência elétrica interna do módulo, ΔT_{max} a diferença de temperaturas máxima entre o lado quente e o lado frio suportada pelo módulo, I_{max} é a corrente elétrica máxima suportada pelo módulo e K_m a condutância térmica do módulo.

Posteriormente, Luo (2009) comparou este método com um outro desenvolvido por si. Este método, à semelhança do anterior, recorre aos valores máximos de corrente (I_{max}) e diferença de temperatura entre os extremos do módulo (ΔT_{max}). No entanto, não faz uso da tensão máxima (U_{max}) mas sim do calor máximo absorvido na face fria do módulo de Peltier (Q_{max}). Usando o método de Luo, os parâmetros termoelétricos são determinados com recurso às Eq. 2.31, Eq. 2.32 e Eq. 2.33:

$$S = \frac{2 \times \dot{Q}_{max}}{I_{max}} \frac{1}{T_{fab} - \Delta T_{max}} \tag{2.31}$$

$$R_i = \frac{2\dot{Q}_{max}}{I_{max}^2} \frac{T_{fab} - \Delta T_{max}}{T_{fab} + \Delta T_{max}} \tag{2.32}$$

$$K_m = \frac{T_{fab} - \Delta T_{max}}{T_{fab} + \Delta T_{max}} \frac{\dot{Q}_{max}}{\Delta T_{max}} \tag{2.33}$$

$$Z = \frac{2 \times \Delta T_{max}}{\left(T_{fab} - \Delta T_{max}\right)^2} \tag{2.34}$$

Embora fosse esperado resultados iguais pelos dois métodos, Luo constatou que havia uma diferença de 5% entre os resultados obtidos. No entanto, não concluiu qual se aproximava mais dos valores reais.

Num outro trabalho, Palacios et al. (2009) desenvolveu um terceiro modelo para obter as mesmas propriedades, coeficiente de Seebeck (S), resistência elétrica (R_i) e condutância térmica (K_m). Este modelo distingue-se por não se limitar a usar valores máximos. Podem-se usar valores de calor transferido na face fria (Q_c), corrente (I), tensão (U) e diferença de temperaturas entre as duas faces do módulo de Peltier (ΔT) em vários pontos de funcionamento existentes nas curvas fornecidas pelo fabricante do módulo. Tal facto traria, à partida, resultados mais fiáveis. No entanto, uma vez que os valores são lidos no gráfico das curvas de funcionamento, estes estão sujeitos a erros de leitura. Este método resulta nas Eq. 2.35, Eq 2.36 e Eq. 2.37:

$$S = \frac{\dot{Q}_c + 0{,}5I^2R_i}{T_{fab}I} \tag{2.35}$$

$$R_i = \frac{U}{I} \tag{2.36}$$

$$K_m = \frac{S(T_{fab} - \Delta T)I - 0{,}5I^2R_i}{\Delta T} \tag{2.37}$$

onde $\dot{Q}_c$ é fluxo de calor absorvido na face fria.

Os valores usados nas Eq. 2.35 e Eq. 2.36 devem ser lidos na zona das curvas de funcionamento onde a diferença de temperaturas entre as duas faces do módulo de Peltier (ΔT) é igual a 0. Contudo, os valores para a Eq. 2.37 devem ser lidos na zona das curvas onde o calor transferido na face fria ($\dot{Q}_c$) é igual a 0.

Tanto quanto se sabe, nenhum trabalho comparou o método de Palacios et al. (2009) com nenhum dos anteriores.

2.10. Aumento da eficácia do sistema de geração termoelétrica

Em grande parte da literatura a condição de potência máxima é encontrada derivando a equação (2.11) em ordem a R_L e igualando a 0, o que implica $R_L = R_i$, ou seja, a resistência elétrica da carga deve ser igual à resistência elétrica interna do módulo. Esta condição é válida quando a diferença de temperaturas entre as faces do GTE, ΔT, é constante. Uma vez que a corrente elétrica que percorre um módulo tem influência no

fluxo de calor que o atravessa (ver equações 2.18 e 2.19) e a resistência da carga afeta a corrente no circuito elétrico, quando o módulo está separado das temperaturas conhecidas por uma resistência térmica não nula, a carga (R_L) afeta a diferença de temperaturas entre as faces do módulo (Dalola *et al.*, 2009). Como demonstrado por Yazawa e Shakouri (2012), quando se tem em consideração a relação da carga com os fluxos de calor, a potência máxima será atingida quando a razão de resistências elétricas (n) for:

$$n = \frac{R_L}{R_i} = \sqrt{1 + Z\bar{T}} \tag{2.38}$$

No seguimento do trabalho de Yazawa e Shakouri, McCarty (2013) demonstrou que há também um valor ótimo para a razão de resistências térmicas (*m*):

$$m = \frac{R_{T,M}}{R_{T,E}} = \sqrt{1 + Z\bar{T}} \tag{2.39}$$

onde $R_{T,M}$ é a resistência térmica do GTE e $R_{T,E}$ é a soma das resistências térmicas externas ao GTE.

O trabalho de Sempels e Lesage (2018) veio trazer mais profundidade a esta análise, concluindo que as equações 2.38 e 2.39 representavam as razões de resistências para a condição de fontes de calor de temperatura constante. No entanto, para fontes de temperatura de fluxo de calor constante, a razão de resistência elétricas é dada por:

$$n = \frac{R_L}{R_i} = 1 + Z\bar{T} \tag{2.40}$$

E a razão de resistências térmicas, m, deve tender para infinito. Já para a condição de fonte de calor de fluxo constante em que parte do fluxo não atravessa o módulo termoelétrico, a razão de resistências elétricas, n, é dada novamente pela expressão 2.38. Já a razão de resistências térmicas, m, nestas condições é dada por:

$$m = \frac{R_{T,M}}{R_{T,E}} = \frac{(K_{SH} + K)}{K_{SH}}\sqrt{1 + Z\bar{T}} \tag{2.41}$$

sendo K_{SH} a condutância térmica do caminho para o fluxo de calor paralelo ao módulo termoelétrico.

De modo a aumentar a eficácia do sistema de geração termoelétrica, é conveniente aumentar a diferença de temperatura entre os terminais dos elementos termoelétricos. Uma vez que a fonte quente é, por norma, calor rejeitado, não pode ser aumentada. A fonte fria também está habitualmente à temperatura ambiente, não sendo possível

diminuí-la. A eficácia do sistema pode, então, ser aumentada, diminuindo as resistências térmicas entre a fonte quente e o GTE ($R_{t,q}$) e entre o GTE e a fonte fria ($R_{t,f}$). Em ambos os casos, a solução mais usada são os dissipadores de calor, por não necessitarem de manutenção nem consumirem energia e complementarem bem as características dos GTEs (Twaha *et al.*, 2016). No entanto, há também sistemas mais complexos, nomeadamente os sistemas testados em automóveis, em que o lado frio do GTE é integrado no sistema de refrigeração existente (Karpe, 2010).

2.11. Modelos de otimização e seleção de GTE

O principal foco dos atuais modelos matemáticos é a otimização dos parâmetros geométricos de um GTE, nomeadamente a área de secção, a altura e o número de elementos termoelétricos destes. Fan et al. (2016) desenvolveram um modelo matemático para a otimização destas características para a situação de temperatura de superfície constante ou fluxo de calor constante. Yazawa e Shakouri (2012), Gomez et al. (2013), McCarty (2013) e Sempels e Lesage (2018) criaram modelos que também otimizam a resistência entre as fontes quente e fria e o GTE. No entanto, a área de secção, a altura e o número de elementos termoelétricos têm pouco relevo para o utilizador comum, uma vez que os fabricantes raramente os divulgam e, mesmo que os divulgassem, era improvável encontrar um módulo com a configuração ótima para o caso pretendido. Existem, ainda, os métodos divulgados pelos fabricantes, como o guia que McCarty escreveu para a Marlow Industries (McCarty, 2019), ou a calculadora de propriedades da Hi-Z (Hi-Z, 2019). No entanto, o guia da Marlow recorre, mais uma vez, a propriedades que raramente estão disponíveis para o utilizador, como o número de termopares, enquanto que a calculadora da Hi-Z exige que o utilizador conheça a diferença de temperaturas entre as faces do GTE.

3 Desenvolvimento da ferramenta de otimização e seleção de módulos termoelétricos

A ferramenta proposta para a caracterização funcional e seleção de módulos termoelétricos é implementada com recurso a um livro no software *Microsoft Excel*, *Visual Basic for Applications*. Para o seu funcionamento o utilizador deverá introduzir os dados relativamente ao seu caso de estudo e irá obter os parâmetros que deverá utilizar para selecionar o módulo termoelétrico que melhor se adapta a esse cenário. Para além da caracterização e seleção individual dos módulos, a ferramenta implementa outras funcionalidades como a associação de módulos, o calculo do módulo ótimo e o cálculo das propriedades termoelétricas dos módulos.

3.1. Utilização da ferramenta

Para a utilização da ferramenta são solicitados ao utilizador parâmetros relacionados com as caracteristicas elétricas da saída do gerador de energia, bem como as características térmicas do aparato onde se pretende efetuar a instalação, nomeadamente as temperaturas das fontes quente e fria e a resistência elétrica. Com o intuito de aumentar a abrangência da ferramenta, esta está preparada, também, para utilizadores sem experiência, nem conhecimentos na área da transferência de calor, podendo utilizá-la sem dificuldades, uma vez que contém explicações básicas de conceitos fundamentais e limites para valores razoáveis nas entradas. O funcionamento da ferramenta é apresentado no diagrama da Figura 9. O processo começa com a introdução de dados por parte do utilizador e a ferramenta efetua os cálculos auxiliares. Segue-se o cálculo das características do módulo ótimo e das propriedades da associação de módulos. Este é um processo iterativo e interligado. Assim que o módulo ótimo é encontrado a ferramenta verifica a produção de energia elétrica por módulos reais nas mesmas condições, selecionando os que apresentam melhores performances. Por fim, a ferramenta devolve as características que permitem identificar o módulo ótimo, nomeadamente a tensão máxima, U, corrente máxima, I, fluxo de calor máximo, Q, e diferença de temperaturas máxima, ΔT, permitidos pelo módulo, bem como as melhores escolhas de entre os módulos já conhecidos.

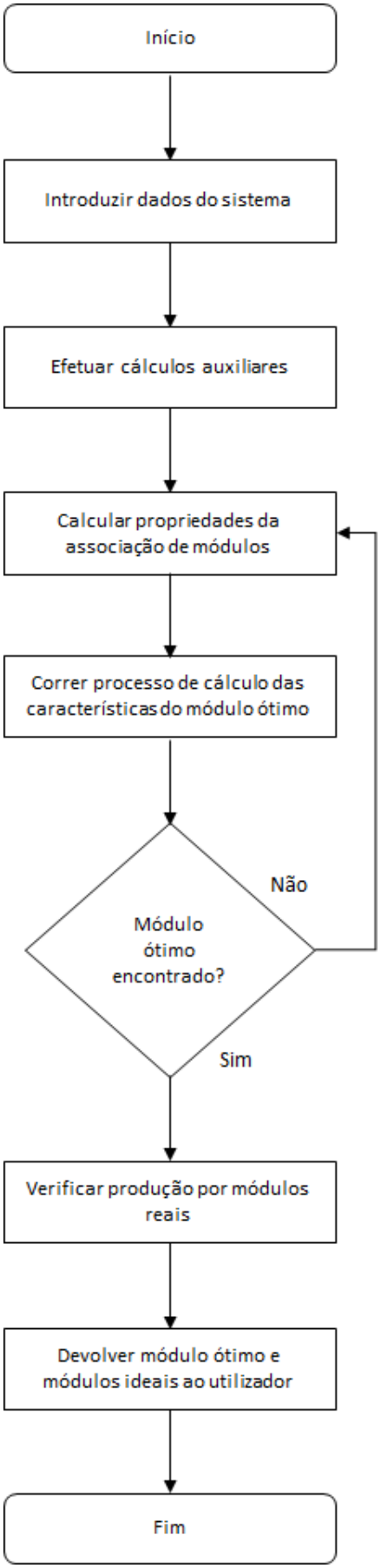


Figura 9 - Diagrama do funcionamento da ferramenta no processo de escolha do módulo ótimo.

3.2. Cálculo das propriedades termoelétricas de um módulo de Seebeck

Como descrito na secção 2.9, existem métodos para calcular as propriedades termoelétricas de um módulo de Peltier. Num módulo de Seebeck existe o mesmo problema: os fabricantes raramente divulgam diretamente as propriedades termoelétricas dos módulos. Uma vez que estas são essenciais para o funcionamento da ferramenta, foi necessário desenvolver um método de as calcular.

A resistência interna do módulo é habitualmente fornecida pelo fabricante, sendo apenas necessário converter para a temperatura relevante para o caso, utilizando para isso a equação 2.13.

Um dado fornecido em todas as folhas de especificações é a tensão em circuito aberto. Partindo da equação 2.4 e substituindo o coeficiente de Seebeck do material (α) pelo coeficiente de Seebeck do módulo (S), o coeficiente de Seebeck do módulo é dado por:

$$S = \frac{V_{oc}}{\Delta T} \tag{3.1}$$

onde V_{oc} é a tensão em circuito aberto e ΔT é a diferença de temperatura entre as duas faces do módulo. A conversão para a temperatura relevante faz-se com recurso à equação 2.12.

A resistência térmica do módulo é o parâmetro que apresenta mais dificuldades. Alguns fabricantes disponibilizam o valor dessa propriedade, sendo apenas necessário converter para a temperatura relevante através da equação 2.14. Outros, no entanto, referem o fluxo de calor através do módulo. Caso este valor seja dado para uma situação de circuito aberto, a resistência térmica do módulo ($R_{t,m}$) é calculada por:

$$R_{t,m} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} \tag{3.2}$$

onde $\dot{Q}$ é o fluxo de calor que atravessa o módulo.

Quando o fluxo de calor é dado para uma situação de circuito fechado o fluxo de calor através do módulo é afetado pelo calor de Peltier. Tal fenómeno leva a uma resistência térmica equivalente ($R_{t,equivalente}$) é dado por:

$$R_{t,equivalente} = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} \tag{3.3}$$

De acordo com o trabalho de Sempels e Lesage (2018), a condutância térmica equivalente (K_{TE}) é dada por:

$$K_{TE} = K_m + \frac{S^2 \overline{T}}{(R_i + R_L)} \tag{3.4}$$

onde K_0 é a condutância térmica do módulo, S é o coeficiente de Seebeck do módulo, $\overline{T}$ é a temperatura média do módulo, R_i é a resistência elétrica interna do módulo e R_L é a resistência da carga. Sabendo que:

$$K = \frac{1}{R_T} \tag{3.5}$$

onde K é uma condutância térmica e R_T é uma resistência térmica.

Combinando as equações 3.3, 3.4 e 3.5, a resistência térmica de um módulo é dada por:

$$R_{t,m} = \frac{1}{\frac{\Delta T}{\dot{Q}} - \frac{S^2 \overline{T}}{R_i + R_L}} \tag{3.6}$$

Tendo em conta que os fabricantes fornecem os dados para a condição de equilíbrio de resistências ($R_i = R_L$), a equação 3.6 pode ser simplificada para:

$$R_{t,m} = \frac{1}{\frac{\Delta T}{\dot{Q}} - \frac{S^2 \overline{T}}{2R_i}} \tag{3.7}$$

É assim possível caracterizar os parâmetros termoelétricos de um módulo de Seebeck através das informações presentes na folha de especificações do fabricante, permitindo que estes módulos sejam considerados na ferramenta e adicionados à base de dados por um utilizador sem conhecimentos específicos sobre os efeitos termoelétricos.

3.3. Cálculos auxiliares

De modo a obter as características do módulo ótimo, é necessário conhecer o sistema em estudo. Isto implica caracterizar os sistemas envolvidos neste, nomeadamente as resistências térmicas e as resistências elétricas.

No que diz respeito às resistências térmicas, foram previstas duas situações: aquelas em que o utilizador conhece a resistência térmica, seja de um material, para o caso de condução através de um sólido, seja de um dissipador de calor, caso se troque calor com um fluido. Caso o calor seja trocado com o ar, e caso o utilizador não conheça o valor da resistência térmica por se encontrar numa fase inicial de projeto, são utilizados os valores estimados pelo trabalho de Lee. As resistências de contacto são estimadas num valor de 0,03K/W (Champier et al., 2011; Ritzer e Lau, 1994; Wang et al., 2018), podendo também o utilizador alterar, caso tenha um valor mais correto no seu projeto. Estas resistências serão conhecidas como resistência térmica do lado quente, R_q, e resistência térmica do lado frio, R_f. Assim, a resistência térmica total externa ao módulo, $R_{t,e}$, será dada por:

$$R_{t,e} = R_{t,q} + R_{t,f} \tag{3.8}$$

sendo $R_{t,q}$ a resistência total do lado quente, dada pela equação 3.9, e $R_{t,f}$ a resistência térmica total do lado frio, dada pela equação 3.10.

$$R_{t,q} = R_q + R_{t,c} \tag{3.9}$$

$$R_{t,f} = R_f + R_{t,c} \tag{3.10}$$

onde R_q representa a resistência térmica do material ou componente do lado quente, R_f a resistência térmica do material ou componente do lado frio e $R_{t,c}$ a resistência térmica de contacto.

Caso o contacto do lado quente seja efetuado com uma superfície cuja temperatura seja constante e conhecida, o valor de $R_{t,q}$ será simplesmente igual à resistência térmica de contacto, $R_{t,c}$. O caso simétrico, em que o contacto do lado frio se faz com uma superfície de temperatura constante e conhecida, não foi abordado por se tratar, comummente, de uma situação em que a transferência de calor associada a este fenómeno seria uma desvantagem.

3.4. Associação de módulos termoelétricos

Os módulos termoelétricos não têm necessariamente de ser usados isoladamente, podendo ser associados entre eles. De forma a facilitar os cálculos, as propriedades de cada módulo termoelétrico podem ser substituídas pelas características da associação. Sendo assim, o coeficiente de Seebeck (S_{ass}), a resistência elétrica ($R_{i,ass}$) e a resistência térmica ($R_{t,ass}$) de uma associação de módulos são dados por:

$$S_{ass} = S \times s \tag{3.11}$$

$$R_{i,ass} = \frac{R_i \times s}{p} \tag{3.12}$$

$$R_{t,ass} = \frac{R_{t,m}}{s \times p} \tag{3.13}$$

onde p é o número de módulos associados em paralelo, R_i a resistência elétrica interna de um módulo individual, $R_{t,m}$ a resistência térmica de um módulo individual, S o coeficiente de Seebeck de um módulo individual e s o número de módulos associados em série.

3.5. Processo de cálculo das características do módulo ótimo

O processo de cálculo do módulo ótimo é dependente das condições de utilização do mesmo. O desenho e escolha desse módulo não depende apenas das condições de resistência térmica e elétrica do sistema em que ele irá ser integrado, mas também do modo de funcionamento da fonte. Uma vez que a temperatura de uma fonte de calor a temperatura constante não varia com a presença do sistema de geração de energia elétrica em estudo, a escolha do módulo ótimo (e associação de módulos) poderá ter como objetivo único a produção da potência elétrica desejada ou, caso haja uma área disponível conhecida, obter a maior potência possível usando essa área. Por outro lado, quando a fonte de calor tem um fluxo de calor constante, a presença destes módulos pode alterar a temperatura de funcionamento da mesma, em particular no caso da eletrónica, em que a fonte de calor pode ser um processador, um LED, entre outros. Estas fontes de calor têm

temperaturas máximas de funcionamento que não devem ser ultrapassadas. Neste caso, a seleção dos módulos deverá ter a temperatura máxima da fonte em consideração. Sendo assim, foram desenvolvidos métodos de cálculo diferentes para as duas situações. Estes métodos foram implementados utilizando a linguagem *Visual Basic for Applications* (VBA) sobre o software *Microsoft Excel*.

3.5.1. Propriedades termoelétricas do módulo ótimo a ser usado com uma fonte quente de temperatura constante

Como indicado na secção 2.7, quando a fonte de calor tem uma temperatura constante, existe um valor ideal para a razão de resistências elétricas (n) e para a razão de resistências térmicas (m), dados pelas equações 2.38 e 2.39, respetivamente. Uma vez que os módulos serão frequentemente usados em associação com outros, de modo a representar melhor as condições da associação de módulos estas equações devem ser revistas e as propriedades de um módulo devem ser substituídas pelas propriedades da associação de módulos. Resolvendo as equações 2.38 e 2.39 em relação às propriedades da associação de módulos obtém-se:

$$R_{i,ass} = \frac{R_L}{\sqrt{1 + Z\bar{T}}} \tag{3.14}$$

$$R_{t,ass} = R_{t,e} \times \sqrt{1 + Z\bar{T}} \tag{3.15}$$

onde $R_{i,ass}$ é a resistência elétrica da associação de módulos, R_L a resistência elétrica da carga, $R_{t,ass}$ a resistência térmica da associação de módulos, $R_{t,e}$ a resistência térmica exterior aos módulos, $\bar{T}$ a temperatura média dos módulos e Z o valor de mérito.

Recorrendo de seguida às equações 3.11 e 3.12, estão então definidas a resistência elétrica interna e resistência térmica do módulo ótimo. No entanto, para o caracterizar por completo, é ainda necessário definir o valor do seu coeficiente de Seebeck. Sabendo que:

$$Z = \frac{S^2 R_{t,m}}{R_i} \tag{3.16}$$

sendo R_i a resistência elétrica de um módulo, $R_{t,m}$ a resistência térmica de um módulo, S o coeficiente de Seebeck de um módulo e Z o valor de mérito.

Por comparação dos módulos existentes no mercado foi possível verificar que o valor máximo de Z é de cerca de 0,0026K^{-1}. Sendo assim, o valor do coeficiente de Seebeck (S) é dado por:

$$S = \sqrt{\frac{Z \times R_i}{R_{t,m}}} \tag{3.17}$$

Em que a resistência elétrica interna (R_i) e a resistência térmica ($R_{t,m}$) foram calculadas anteriormente e o valor de mérito, Z, é o referido no parágrafo anterior. De modo a poder acompanhar a evolução dos materiais e das técnicas, esse valor pode ser atualizado pelo utilizador. Estes valores para o coeficiente de Seebeck (S), resistência elétrica interna (R_i) e resistência térmica ($R_{t,m}$) são válidos para a temperatura de funcionamento do modo termoelétrico. De modo a apresentar os valores das propriedades termoelétricas e das características de funcionamento a outra temperatura, como é habitual nas folhas de especificações dos fabricantes, são utilizadas as expressões 2.13 e 2.14. Sendo assim, as propriedades de funcionamento do módulo ótimo são dadas por:

$$R_i(T_{fab}) = \frac{R_L}{\sqrt{1 + Z\bar{T}}} \frac{s}{p} \frac{\rho(\bar{T})}{\rho(T_{fab})} \tag{3.18}$$

$$R_{t,m}(T_{fab}) = R_{t,e} \times s \times p \times \sqrt{1 + Z\bar{T}}\, \frac{\kappa(T_{fab})}{\kappa(\bar{T})} \tag{3.19}$$

$$S = \sqrt{\frac{Z \times R_i(T_{fab})}{R_{t,m}(T_{fab})}} \tag{3.20}$$

onde p é o número de paralelo na associação de módulos, s o número de módulos em série na associação de módulos, T_{fab} a temperatura dos dados da folha de especificações do fabricante, κ a condutividade térmica do telureto de bismuto e ρ a resistividade elétrica do telureto de bismuto.

Os valores destas propriedades termoelétricas são atualizados a cada iteração, de modo a corresponder a cada nova configuração do sistema.

3.5.2. Otimização para uma fonte quente de temperatura constante e área disponível conhecida

Na situação em que uma fonte de calor tem a sua temperatura constante e a área disponível é conhecida, o objetivo é produzir a maior potência elétrica possível utilizando essa área. Logicamente, um maior número de módulos levará a uma potência maior, mas a forma como estes estão associados também é relevante para a produção final.

O processo de cálculo utilizado neste caso pode ser visto na Figura 10, onde se podem ver as entradas de dados, os cálculos das condições de trabalho dos módulos, o ciclo para a determinação da melhor associação e o processo de decisão final.

Neste diagrama, P é a potência elétrica gerada, $P_{anterior}$ a potência elétrica gerada de acordo com a iteração anterior, s o número de paralelos em que os módulos estão organizados, $T_{C,a}$ a temperatura arbitrada do lado frio, $T_{C,c}$ a temperatura calculada do lado frio, $T_{H,a}$ a temperatura arbitrada do lado quente, $T_{H,c}$ a temperatura calculada do lado quente e x o número de módulos utilizados.

O processo começa por determinar quantos módulos poderão ser colocados na área disponível. Uma vez que é a medida mais comum no mercado, esta ferramenta faz o cálculo para módulos com 16 cm^2 de área. Assim, o número de módulos (x) será dado por:

$$x = A_{disponível}/A_{módulo} \tag{3.21}$$

onde $A_{disponível}$ é a área disponível para a aplicação de módulos termoelétricos e $A_{módulo}$ é a área de um módulo termoelétrico. O resultado desta expressão será arredondado por defeito ao maior inteiro, uma vez que os módulos não podem ser divididos em partes menores. De seguida, arbitra-se uma temperatura para as faces quente e fria do módulo termoelétrico, $T_{H,a}$ e $T_{C,a}$, respetivamente. Sendo a diferença de temperaturas, ΔT, dada por $\Delta T = T_{H,a} - T_{C,a}$, torna-se então possível calcular a potência produzida, P, como descrito na equação 2.21. Conhecendo a potência, será então possível calcular a corrente através da equação 2.27, função da potência, P, e da resistência da carga, R_L.

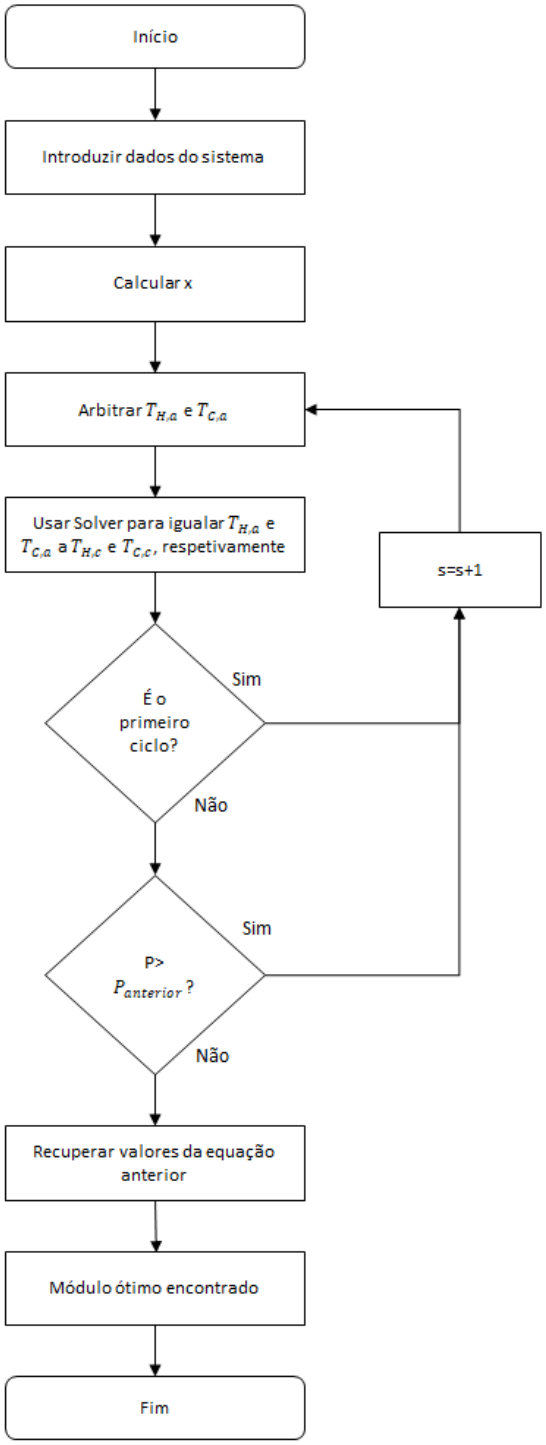


Figura 10- Diagrama do processo de seleção do módulo ótimo para o caso de uma fonte de calor de temperatura constante e área conhecida

Com estes dados é determinado o fluxo de calor que entra no módulo termoelétrico, $\dot{Q}_H$, e o fluxo que sai do mesmo, $\dot{Q}_C$, através das equações 2.18 e 2.19, dependentes do

coeficiente de Seebeck, S, da resistência interna, R_i, da resistência térmica, $R_{t,m}$ e da temperaturas das faces quente e fria.

Sabendo os fluxos de calor, as temperaturas das fontes quente, T_S, e fria, T_∞, e as resistências térmicas, pode-se agora calcular um novo valor para as temperaturas das faces quente e fria do módulo, $T_{H,c}$ e $T_{C,c}$, respetivamente:

$$T_{H,c} = T_S - \dot{Q}_H \times R_{t,q} \tag{3.22}$$

$$T_{C,c} = T_\infty + \dot{Q}_C \times R_{t,f} \tag{3.23}$$

sendo os valores $T_{H,a}$ e $T_{C,a}$ arbitrados, à partida serão diferentes de $T_{H,c}$ e $T_{C,c}$, respetivamente. Usando o suplemento *Solver* integrada no software *Microsoft Excel*, pelo método de cálculo de gradiente reduzido generalizado não linear ("*GRG Non-linear*" no programa), os valores de $T_{H,a}$ e $T_{C,a}$ são alterados até que não haja diferença entre estes e os valores obtidos pelas equações 3.22 e 3.23. A partir deste momento estão encontrados o módulo ótimo e as condições de funcionamento deste caso de estudo. Uma vez que o modo como os módulos estão associados afeta a produção elétrica do sistema, são testadas diferentes associações, começando com todos os módulos em série e testando com mais séries em paralelo em cada iteração, sendo que a ferramenta devolve os dados para o caso mais favorável.

3.5.3. Otimização para uma fonte quente de temperatura constante e potência objetiva conhecida

Para o caso de uma fonte de calor de temperatura constante, o objetivo será encontrar o módulo ideal para integrar uma associação de módulos que permita gerar a potência elétrica pretendida.

O processo de cálculo que permite identificar o módulo ótimo para esta situação é apresentado no diagrama da Figura 11, onde se podem ver as entradas de dados, o ciclo de cálculo e o processo de decisão de final do processo.

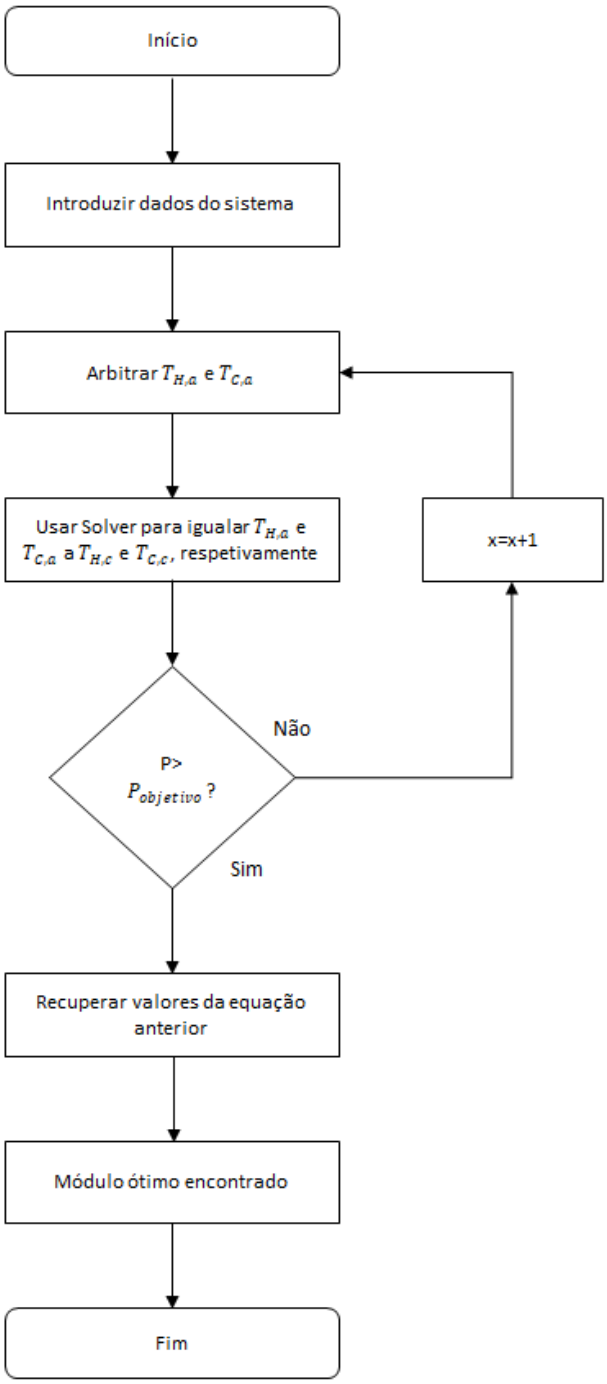


Figura 11 - Diagrama do processo de seleção do módulo ótimo para o caso de uma fonte de calor de temperatura constante

Este processo é em tudo semelhante ao descrito na secção 3.4.2. começando por arbitrar as temperaturas, resolvendo as equações relativas aos fluxos de calor e iterando até as temperaturas arbitradas e calculadas coincidirem. No entanto, o número de módulos a utilizar neste caso não é conhecido e pode acontecer que não seja possível produzir a potência pretendida apenas com um módulo. Nesse caso, o número de módulos deverá

ser aumentado, alterando as propriedades da associação e levando a uma nova escolha de módulo ótimo. Embora não esteja descrito no diagrama anterior, por uma questão de simplicidade, para cada valor de x é efetuado um ciclo para encontrar o melhor valor de s, à semelhança do que é demonstrado no diagrama da Figura 10.

3.5.4. Propriedades termoelétricas do módulo ótimo a ser usado com uma fonte quente com fluxo de calor constante

Como referido na secção 2.10, existem valores ideais para a razão de resistências térmicas (m) e elétricas (n) numa situação em que um gerador termoelétrico está associado a uma fonte quente com fluxo de calor constante. No entanto, no caso em que todo o calor é transferido através dos módulos, a razão de resistências térmicas tende para infinito, o que não é exequível na realidade. Como tal, de forma a obter parâmetros realistas para as propriedades termoelétricas do módulo ótimo a ser usado com uma fonte quente com fluxo de calor constante, optou-se por usar o suplemento *Solver* do *Microsoft Excel* para calcular essas propriedades. O *Solver* foi usado para maximizar a potência produzida alterando os valores de corrente máxima, I_{max}, e tensão máxima, U_{max}, suportados pelo módulo, respeitando os valores limite encontrados no mercado e o valor de mérito Z, definido como indicado na secção 3.5.1. Isto implica que tenha sido usado o método de Lineykin e Ben-Yaakov para o cálculo das propriedades termoelétricas, uma vez que o método de Palacios et al. obriga à determinação de mais um parâmetro, neste caso o fluxo de calor máximo, Q_{max}, o que ultrapassa as capacidades do suplemento *Solver*.

3.5.5. Otimização para uma fonte quente de fluxo constante

No caso de uma fonte de calor de fluxo constante, o principal objetivo é não ultrapassar a temperatura máxima de funcionamento da fonte de calor, o que iria diminuir a sua funcionalidade, a sua fiabilidade ou até resultar em danos permanentes. De forma a manter a produção máxima de energia elétrica, a condição de temperatura máxima será mantida através da regulação do número de módulos termoelétricos associados, sendo

estes módulos os que apresentam características ótimas para a maior produção de energia nas condições de temperatura do caso em estudo. O método de cálculo a implementar neste caso é apresentado no diagrama da Figura 12, onde é de salientar o ciclo para o cálculo do número de módulos a utilizar.

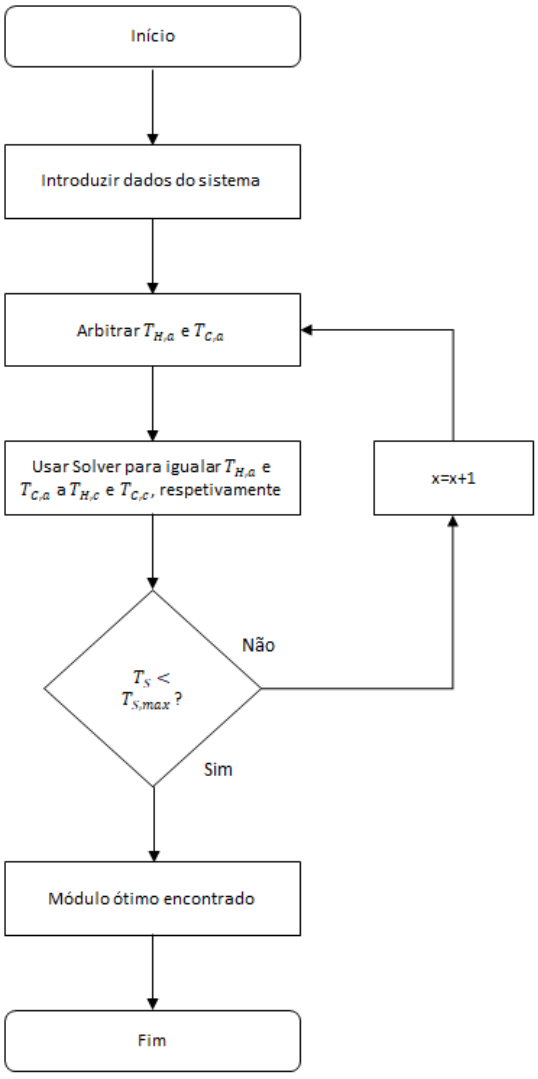


Figura 12 - Diagrama do processo de seleção do módulo ótimo para o caso de uma fonte de calor de fluxo constante

À semelhança do que acontece no caso em que a fonte de calor tem temperatura constante, o processo começa com o arbítrio das temperaturas $T_{H,a}$ e $T_{C,a}$. Tal como no caso anterior, estas vão permitir o cálculo da potência elétrica produzida, P, e dos fluxos de calor à entrada do módulo, $\dot{Q}_H$, e à saída do mesmo, $\dot{Q}_C$. No entanto, a temperatura da fonte não é conhecida neste caso. A face quente do módulo estará adjacente ao invólucro

da fonte de calor (vulgarmente designado por *case*, do inglês para "caixa" ou "revestimento").

A temperatura do invólucro poderá ser calculada em dois cenários. No primeiro, a fonte de calor está isolada e só troca calor com o exterior através dos módulos. Neste caso a temperatura do invólucro da fonte, T_{case}, será dada por.

$$T_{case} = T_{H,a} + \frac{\dot{Q}_{fonte}}{x} \times R_{t,q} \tag{3.24}$$

onde $\dot{Q}_{fonte}$ é o fluxo de calor produzido pela fonte.

Por outro lado, também é possível que nem todo o fluxo de calor atravesse os módulos, escapando por caminhos paralelos. A resistência desse caminho paralelo, $R_{t,paralelo}$, poderá ser definida do mesmo modo que as resistências térmicas dos lados quente e frio, R_q e R_f, respetivamente. Nesta situação, a temperatura do invólucro é definida por:

$$T_{case} = \left(\frac{R_{t,q} \times R_{t,paralelo}}{x \times R_{t,paralelo} + R_{t,q}}\right)\left(\dot{Q}_{fonte} + \frac{x \times T_{H,a}}{R_{t,q}} + \frac{T_{\infty}}{R_{t,paralelo}}\right) \tag{3.25}$$

Esta temperatura T_{case} irá substituir a temperatura da fonte quente, T_S, na equação 3.22, utilizada para calcular a temperatura na face quente do módulo, $T_{H,c}$. Já a temperatura na face fria do módulo, $T_{C,c}$, será calculada através da equação 3.23, sem necessidade de alterações.

O passo seguinte é calcular a temperatura da fonte quente, T_S. Conhecendo o valor da temperatura do invólucro, T_{case}, sendo o fluxo de calor, $\dot{Q}_{fonte}$, condição do estado de funcionamento da fonte e portanto conhecido, e sabendo o valor da resistência térmica entre a fonte e a superfície do invólucro, fornecida pelo fabricante e vulgarmente designada de $R_{j\text{-}c}$, a temperatura da fonte pode ser obtida por:

$$T_S = T_{case} + \dot{Q}_{fonte} \times R_{j-c} \tag{3.26}$$

Se a temperatura da fonte quente, T_S, for superior à temperatura máxima admissível da fonte quente, $T_{S\,max}$, é adicionado mais um módulo e o processo de cálculo é repetido.

À semelhança do que foi referido na secção 3.5.3, também neste processo de cálculo há um ciclo para determinar o valor ideal de s, omitido para simplificação do diagrama da Figura 12.

Este processo de cálculo pode ocasionalmente, revelar-se demasiado complexo para o suplemento *Solver* do *Microsoft Excel*. Assim, quando é devolvido um erro, é utilizado outro método de cálculo para igualar $T_{H,a}$ e $T_{C,a}$ a $T_{H,c}$ e $T_{C,c}$, respetivamente. Pela sua simplicidade, como demonstrado no diagrama da Figura 13, foi utilizado o método iterativo simples.

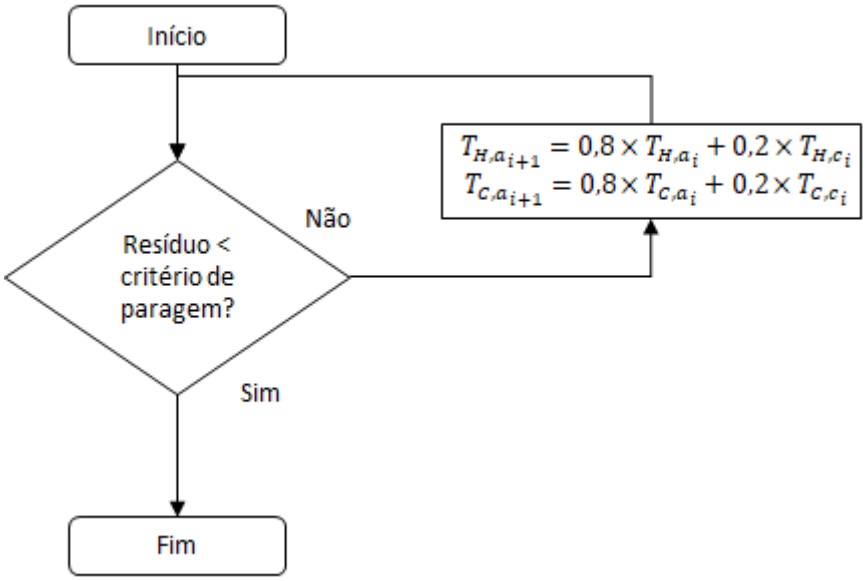


Figura 13 - Diagrama do processo de cálculo do método iterativo simples

Este segmento entra no diagrama da Figura 12 por substituição do bloco "Usar Solver para igualar $T_{H,a}$ e $T_{C,a}$ a $T_{H,c}$ e $T_{C,c}$, respetivamente". Este método é dado por:

$$\begin{Bmatrix} T_{H,a_{i+1}} = T_{H,c_i} \\ T_{C,a_{i+1}} = T_{C,c_i} \end{Bmatrix} \tag{3.27}$$

sendo $T_{H,a_{i+1}}$ a temperatura arbitrada na face quente do módulo na iteração i+1, $T_{C,a_{i+1}}$ a temperatura arbitrada na face fria do módulo na iteração i+1, T_{H,c_i} a temperatura calculada na face quente do módulo na iteração i e T_{C,c_i} a temperatura calculada na face fria do módulo na iteração i.

No entanto, devido a problemas de convergência, é necessário utilizar um fator de relaxação. Assim, a nova matriz é dada por:

$$\begin{Bmatrix} T_{H,a_{i+1}} = 0{,}8 \times T_{H,a_i} + 0{,}2 \times T_{H,c_i} \\ T_{C,a_{i+1}} = 0{,}8 \times T_{C,a_i} + 0{,}2 \times T_{C,c_i} \end{Bmatrix} \tag{3.28}$$

acrescentando os termos T_{H,a_i} como a temperatura arbitrada na face quente do módulo na iteração i e T_{C,a_i} como a temperatura arbitrada na face fria do módulo na iteração i.

As iterações terminam quando o resíduo for inferior a um valor que pode ser alterado pelo utilizador, mas que está predefinido para um valor de 1×10^{-5}. Este critério de paragem garante um erro reduzido no valor final de potência produzida e de temperatura da fonte quente sem que o tempo computacional ocupado seja muito extenso. O resíduo é determinado por:

$$Resíduo = \left|T_{H,c_i} - T_{H,a_i}\right| + \left|T_{C,c_i} - T_{C,a_i}\right| \tag{3.29}$$

Estando estabelecidas as temperaturas do lado quente e frio, o cálculo prossegue com a avaliação da temperatura da fonte, retomando o processo descrito anteriormente.

3.6. Verificação da produção de um módulo real

Caso o utilizador já conheça as propriedades de um módulo e queira saber a produção elétrica desse módulo numa dada situação, também o poderá fazer. Neste caso, os métodos de cálculo serão os mesmos que os utilizados na previsão da produção de um módulo ótimo, como indicado nas secções anteriores. A diferença prende-se com as propriedades do módulo – coeficiente de Seebeck, resistência interna e resistência térmica -, que em vez de serem calculadas com recurso às equações referidas na secção 3.4.1 já serão conhecidas e estarão presentes numa base de dados integrada no programa, sendo que o utilizador seleciona o módulo que quer testar a partir dessa base de dados. De origem, o programa conta com 40 módulos, escolhidos por serem módulos dedicados à produção de energia elétrica, por terem sido úteis no desenvolvimento desta ferramenta ou por terem propriedades termoelétricas mais difíceis de calcular. Esta base de dados pode ser expandida pelo utilizador, uma vez que a ferramenta dispõe da possibilidade de adicionar novos módulos. As propriedades termoelétricas serão calculadas pela ferramenta, tendo o utilizador apenas que introduzir dados frequentemente referidos nas folhas de especificações dos fabricantes.

Na funcionalidade de seleção do módulo ótimo, a ferramenta devolve também os módulos presentes na base de dados que oferecem características mais vantajosas. No

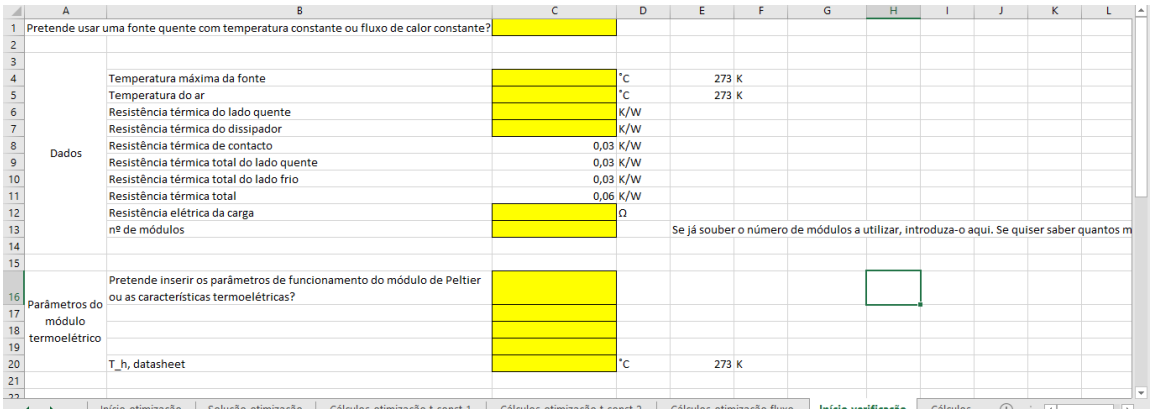
caso de uma fonte de calor de temperatura constante e área disponível conhecida, a ferramenta indica quais os módulos que permitem o menor preço, o menor preço por Watt, o menor número de módulos e a maior potência. No caso de a fonte de calor ser de temperatura constante e a potência objetivo ser conhecida, a ferramenta devolve os módulos que permitem atingir o menor preço, o menor número de módulos e a menor área. Por último, no caso de uma fonte de calor com fluxo de calor constante, são indicados os módulos adequados para alcançar um menor preço, menor preço por Watt, menor número de módulos, menor área ou maior potência. Nesta fase apenas são testados os módulos cuja temperatura máxima de funcionamento seja igual ou superior à temperatura máxima da fonte quente e que não estejam marcados como "Inativo" pelo utilizador.

4 A ferramenta de seleção e previsão de módulos termoelétricos

A ferramenta teve várias versões, desde a primeira versão funcional até à versão ativa no final do projeto. Nesta secção é abordada essa evolução e o funcionamento da versão mais atual. Mais informações sobre a ferramenta podem ser encontradas no manual de instruções, desenvolvido no decorrer deste projeto, presente no Anexo A desta dissertação.

4.1. A primeira versão

A primeira versão da ferramenta foi apenas desenhada para calcular o módulo ótimo, para um dado caso de estudo, ou para prever o funcionamento de um módulo conhecido, cujos parâmetros termoelétricos deveriam ser introduzidos em cada utilização. A função de pesquisa de potência máxima para uma área conhecida ainda não estava disponível. Elaborou-se um livro no *Microsoft Excel* em que o utilizador poderia preencher as células adequadas, destacadas por meio de formatação condicional, e em que o processo de cálculo era efetuado em células de cálculo à vista do utilizador. Na Figura 14 pode-se observar o ambiente de trabalho do utilizador nessa versão.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Pretende usar uma fonte quente com temperatura constante ou fluxo de calor constante?											
2												
3												
4	Dados	Temperatura máxima da fonte		°C	273	K						
5		Temperatura do ar		°C	273	K						
6		Resistência térmica do lado quente		K/W								
7		Resistência térmica do dissipador		K/W								
8		Resistência térmica de contacto	0,03	K/W								
9		Resistência térmica total do lado quente	0,03	K/W								
10		Resistência térmica total do lado frio	0,03	K/W								
11		Resistência térmica total	0,06	K/W								
12		Resistência elétrica da carga		Ω								
13		nº de módulos			Se já souber o número de módulos a utilizar, introduza-o aqui. Se quiser saber quantos m							
14												
15												
16	Parâmetros do módulo termoelétrico	Pretende inserir os parâmetros de funcionamento do módulo de Peltier ou as características termoelétricas?										
17												
18												
19												
20		T_h, datasheet		°C	273	K						
21												

Figura 14 - Ambiente de trabalho da versão inicial da ferramenta.

Nesta versão o tempo de cálculo ainda não merecia atenção. No entanto, já cumpria os requisitos mínimos para a ferramenta.

4.2. Desenvolvimento até ao protótipo final

Após os testes iniciais e reuniões com os orientadores, foi decidida a criação de um ambiente gráfico para facilitar a experiência do utilizador. Por iniciativa própria, foi também introduzida a funcionalidade de cálculo da potência máxima recuperável a partir de uma área conhecida. A ferramenta final inclui, também, um conjunto de verificações para as introduções do utilizador, de modo a impedir que sejam introduzidos dados inválidos, direcionando para a caixa de texto onde o valor problemático for detetado.

Dadas as funcionalidades da ferramenta, foi pensado fazer a migração do software Microsoft Excel para um programa desenvolvido de raiz. No entanto, uma vez que no desenvolvimento da ferramenta numérica se teve em consideração o menor tempo computacional possível e a linguagem VBA não permite, de origem, *multithreading* (a utilização de múltiplos *threads* do CPU), optou-se pela manutenção da ferramenta associada ao Microsoft Excel, implementando métodos como a integração ao máximo do suplemento *Solver* (que funciona em *multithreading*) ou testes mais ágeis aos módulos para reduzir o tempo computacional. Estas medidas resultaram em reduções significativas do tempo de computação, verificadas por intermédio de temporizadores integrados no código. Estas reduções chegaram a 80%, com um caso a passar de 12,43 minutos de computação para 2,27 minutos. Há métodos que permitem *multithreading* em VBA, ou seria possível, ainda, a programação noutra linguagem. Tendo em conta o período de desenvolvimento desta dissertação, esta opção não se mostrou viável. A versão final inclui, ainda, uma base de dados com módulos termoelétricos, que não só facilita a utilização quando se quer testar um módulo conhecido (basta selecionar o módulo a partir da base de dados), como permite também destacar os melhores módulos conhecidos quando se faz a pesquisa pelo módulo ótimo.

Por último, foi ainda melhorada a acessibilidade à ferramenta. A primeira versão era apenas compatível com *Microsoft Excel* 2016 ou superior, ao passo que o protótipo mais recente existe em duas versões, uma mais rápida e leve compatível com *Microsoft Excel* 2010 e superiores, outra que pode ser utilizada a partir da versão 97 do *Microsoft Excel*, estando assim acessível a mais utilizadores. Passou, também, a dispensar que o utilizador tenha de adicionar e ativar o suplemento *Solver*, estando, nesta forma, diretamente atuado pela ferramenta, sendo agora uma verdadeira aplicação "*plug-and-play"*.

4.3. A versão atual

No final do estágio, a versão mais recente da ferramenta apresenta um ambiente gráfico próprio, embora ainda se baseie no *software Microsoft Excel*. Este ambiente permite ao utilizador navegar facilmente pelas várias janelas da ferramenta. Nesta subsecção é feita referência a janelas e processos existentes na ferramenta.

A navegação na ferramenta é feita através de botões que se localizam na mesma posição em todas as janelas, para manter uma coesão entre elas. Essa estrutura pode ser observada na Figura 15.

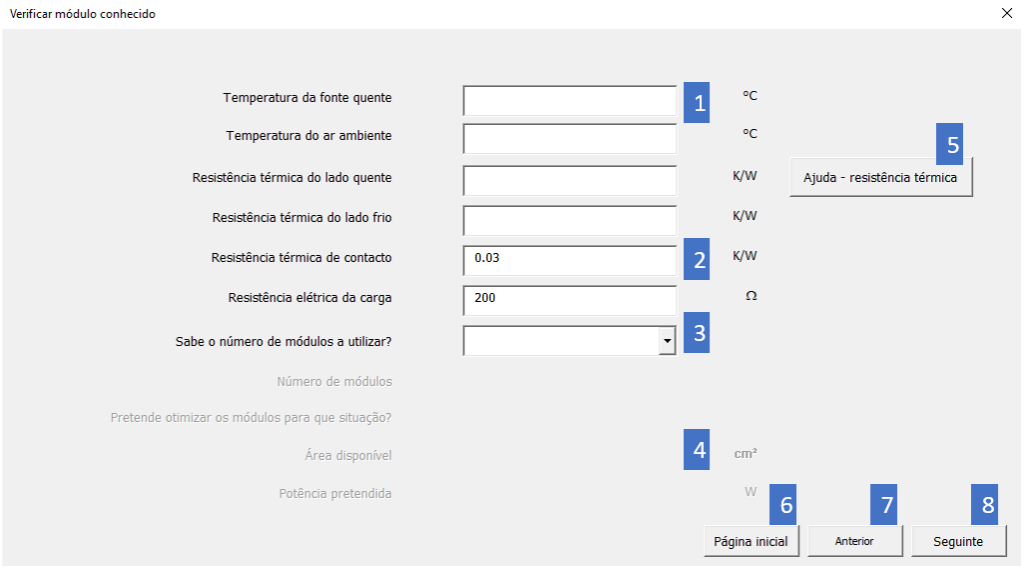


Figura 15 - Estrutura básica das janelas da ferramenta.

Numa janela pode-se encontrar:

1. Caixa de texto ativa – necessita de uma introdução por parte do utilizador. Dados inválidos serão eliminados e o utilizador será notificado a alterá-los.
2. Caixa de texto ativa com valor predefinido, tal como ponto 1, mas com um valor predefinido para casos comuns.
3. Caixa de combinação – necessita de uma introdução por parte do utilizador. Permite apenas escolhas a partir da lista.
4. Caixa de texto inativa (oculta) – poderá ser ativada consoante as ações do utilizador. Caso seja ativada, comporta-se como o ponto 1.

5. Botão de ajuda de conceito – nas diferentes janelas, sempre que haja um conceito que o utilizador possa não conhecer, existe um botão de ajuda que fornece uma explicação breve do conceito em causa.
6. Botão "Página inicial" – retorna à página inicial.
7. Botão "Anterior" – retorna à página anterior.
8. Botão "Seguinte" – caso todas as introduções feitas pelo utilizador sejam válidas, avança para a página seguinte. Caso contrário notifica o erro.

De modo suportar diferentes idiomas, o início do programa desenvolvido é uma folha de trabalho com dois botões, como se pode constatar na Figura 16: um para a versão em português do *Microsoft Excel* e outro para a versão em inglês, uma vez que há comandos internos que se alteram consoante a linguagem em que o *software* está disponibilizado. O idioma da ferramenta desenvolvida, no entanto, mantém-se o português, independentemente do botão utilizado.

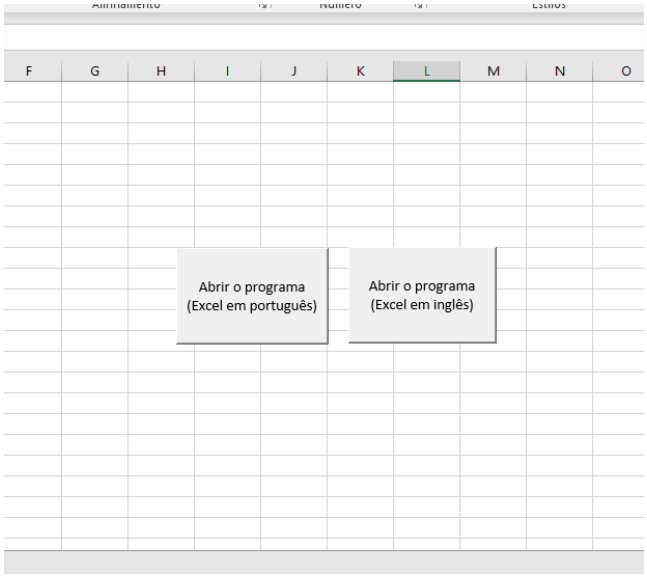


Figura 16 - Excerto de captura de ecrã que contém os botões para iniciar a ferramenta.

Aberta a ferramenta, e clicando no botão indicado, inicia-se o processo de seleção de um módulo ótimo. A ferramenta requer que o utilizador defina a fonte quente, se é uma fonte de fluxo constante ou de fluxo de calor constante, e as condições em que os módulos vão funcionar, como as temperaturas exteriores, resistências elétricas e térmicas exteriores ao módulo, com textos de ajuda disponíveis para auxiliar o utilizador caso seja necessário (ver Figura 17).

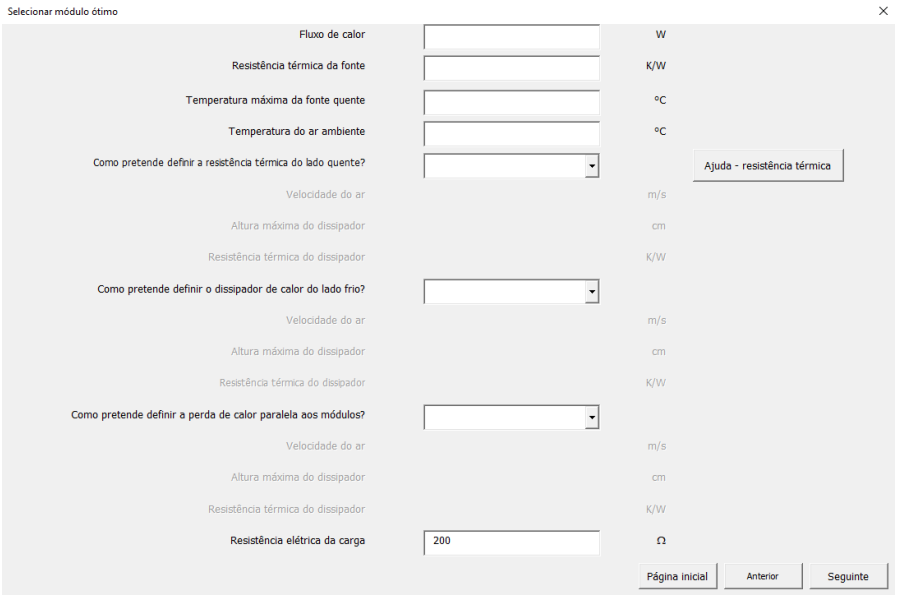


Figura 17 - Janela de introdução das condições de funcionamento do sistema para a seleção do módulo ótimo.

A janela da Figura 17 é a que o utilizador visualizará caso selecione uma fonte quente com fluxo de calor constante. Para o caso de uma fonte quente de temperatura constante a janela é semelhante e pode ser observada na Figura 5 do Anexo A.

O processo de seleção do módulo ótimo devolve, para além das características de um módulo ótimo teórico, uma lista de quais os melhores módulos para a aplicação em estudo, consoante diferentes critérios de avaliação, como descrito na secção 3.6. Esses resultados são apresentados na janela visível na Figura 18.

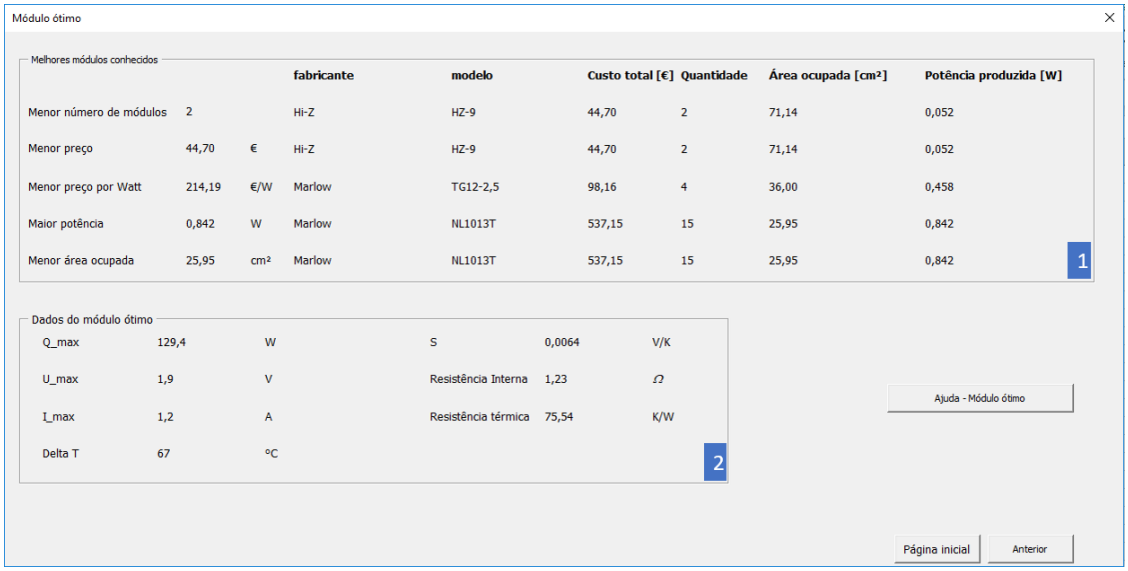
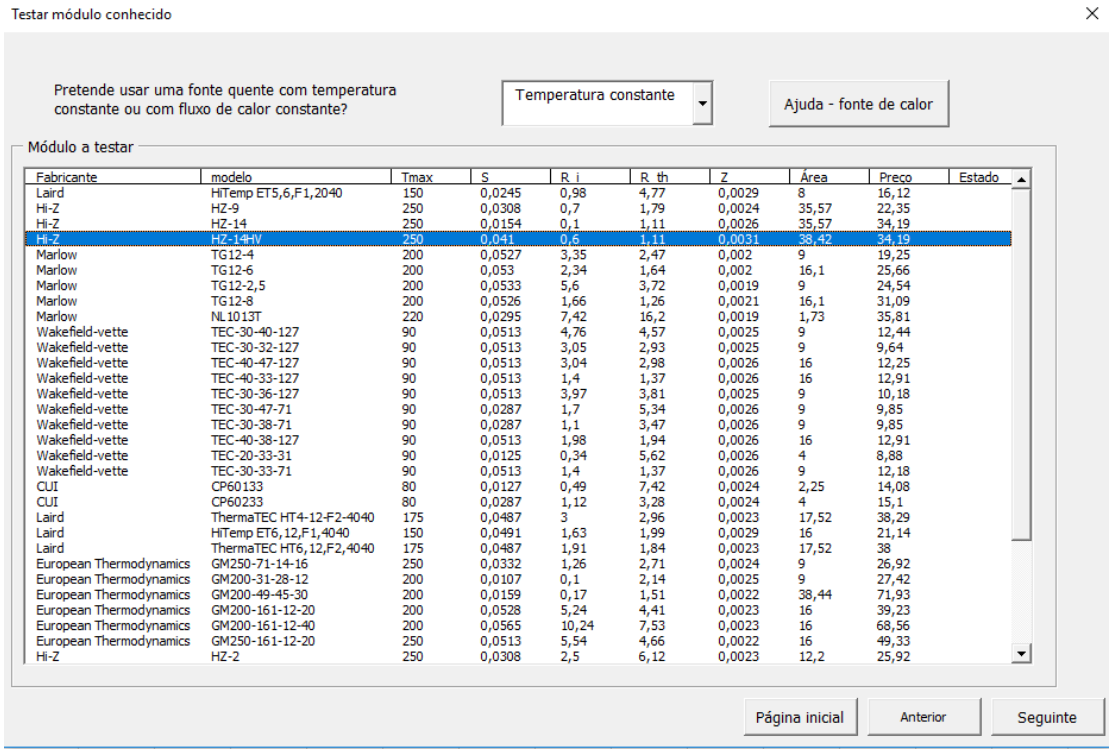


Figura 18 - Janela de resultados da seleção de módulo ótimo.

Nesta janela de resultados destacam-se duas áreas:

1. *Melhores módulos conhecidos* – Nesta área são indicados os módulos que apresentam as melhores prestações para diferentes situações, bem como os dados mais relevantes sobre esse sistema de produção. As prestações avaliadas variam consoante o caso em estudo, como indicado na secção 3.6.
2. *Dados do módulo ótimo* – Nesta área são indicados os dados do módulo ótimo para a produção de energia elétrica neste caso. Este módulo, no entanto, pode não existir por se tratar de uma aplicação muito específica. Isto é especialmente verdade para casos em que são necessários poucos módulos.

No caso em que se pretende testar um módulo conhecido, o procedimento é semelhante, implicando a definição da fonte quente e a caracterização do sistema. A maior diferença é a seleção do módulo, que é feita a partir da base de dados integrada no sistema. A seleção do módulo e a definição da fonte quente são feitas a partir da janela visível na Figura 19.



Fabricante	modelo	Tmax	S	R_i	R_th	Z	Área	Preco	Estado
Laird	HiTemp ET5,6,F1,2040	150	0,0245	0,98	4,77	0,0029	8	16,12	
Hi-Z	HZ-9	250	0,0308	0,7	1,79	0,0024	35,57	22,35	
Hi-Z	HZ-14	250	0,0154	0,1	1,11	0,0026	35,57	34,19	
Hi-Z	HZ-14HV	250	0,041	0,6	1,11	0,0031	38,42	34,19	
Marlow	TG12-4	200	0,0527	3,35	2,47	0,002	9	19,25	
Marlow	TG12-6	200	0,053	2,34	1,64	0,002	16,1	25,66	
Marlow	TG12-2,5	200	0,0533	5,6	3,72	0,0019	9	24,54	
Marlow	TG12-8	200	0,0526	1,66	1,26	0,0021	16,1	31,09	
Marlow	NL1013T	220	0,0295	7,42	16,2	0,0019	1,73	35,81	
Wakefield-vette	TEC-30-40-127	90	0,0513	4,76	4,57	0,0025	9	12,44	
Wakefield-vette	TEC-30-32-127	90	0,0513	3,05	2,93	0,0025	9	9,64	
Wakefield-vette	TEC-40-47-127	90	0,0513	3,04	2,98	0,0026	16	12,25	
Wakefield-vette	TEC-40-33-127	90	0,0513	1,4	1,37	0,0026	16	12,91	
Wakefield-vette	TEC-30-36-127	90	0,0513	3,97	3,81	0,0025	9	10,18	
Wakefield-vette	TEC-30-47-71	90	0,0287	1,7	5,34	0,0026	9	9,85	
Wakefield-vette	TEC-30-38-71	90	0,0287	1,1	3,47	0,0026	9	9,85	
Wakefield-vette	TEC-40-38-127	90	0,0513	1,98	1,94	0,0026	16	12,91	
Wakefield-vette	TEC-20-33-31	90	0,0125	0,34	5,62	0,0026	4	8,88	
Wakefield-vette	TEC-30-33-71	90	0,0513	1,4	1,37	0,0026	9	12,18	
CUI	CP60133	80	0,0127	0,49	7,42	0,0024	2,25	14,08	
CUI	CP60233	80	0,0287	1,12	3,28	0,0024	4	15,1	
Laird	ThermaTEC HT4-12-F2-4040	175	0,0487	3	2,96	0,0023	17,52	38,29	
Laird	HiTemp ET6,12,F1,4040	150	0,0491	1,63	1,99	0,0029	16	21,14	
Laird	ThermaTEC HT6,12,F2,4040	175	0,0487	1,91	1,84	0,0023	17,52	38	
European Thermodynamics	GM250-71-14-16	250	0,0332	1,26	2,71	0,0024	9	26,92	
European Thermodynamics	GM200-31-28-12	200	0,0107	0,1	2,14	0,0025	9	27,42	
European Thermodynamics	GM200-49-45-30	200	0,0159	0,17	1,51	0,0022	38,44	71,93	
European Thermodynamics	GM200-161-12-20	200	0,0528	5,24	4,41	0,0023	16	39,23	
European Thermodynamics	GM200-161-12-40	200	0,0565	10,24	7,53	0,0023	16	68,56	
European Thermodynamics	GM250-161-12-20	250	0,0513	5,54	4,66	0,0022	16	49,33	
Hi-Z	HZ-2	250	0,0308	2,5	6,12	0,0023	12,2	25,92	

Figura 19 - Janela de seleção da fonte quente e módulo de estudo para o teste de módulo conhecido.

A escolha do tipo de fonte faz-se através da caixa de combinação e a escolha do módulo faz-se clicando num módulo da lista, ficando o módulo selecionado como se vê na figura.

Segue-se a caracterização do sistema. Quando comparado com a seleção de um módulo ótimo, a maior diferença é a definição das resistências térmicas, que nesta fase devem ser obrigatoriamente introduzidas pelo utilizador, não havendo a possibilidade de utilizar valores aproximados. A janela para caracterização do sistema pode ser vista na Figura 20. Esta janela é para um caso de fonte quente de temperatura constante. Para o caso de fluxo constante a janela é semelhante e pode ser observada na Figura 8 do Anexo A.



Figura 20 - Janela para introdução das condições para o teste de um módulo conhecido no caso de uma fonte quente de temperatura constante.

Nesta janela o valor da resistência de contacto vem pré-definido para 0,03 K/W, o que seria espectável no contacto de um módulo de tamanho padrão (16cm^2) com uma pasta térmica como material de interface e com uma pressão de contacto aplicada. Do mesmo modo, a resistência da carga está pré-definida para 200 Ω, um valor razoável para um conversor DC-DC. Ambos os valores podem ser alterados simplesmente escrevendo na caixa de texto respetiva. O resultado deste teste é devolvido numa janela como é visível na Figura 21.

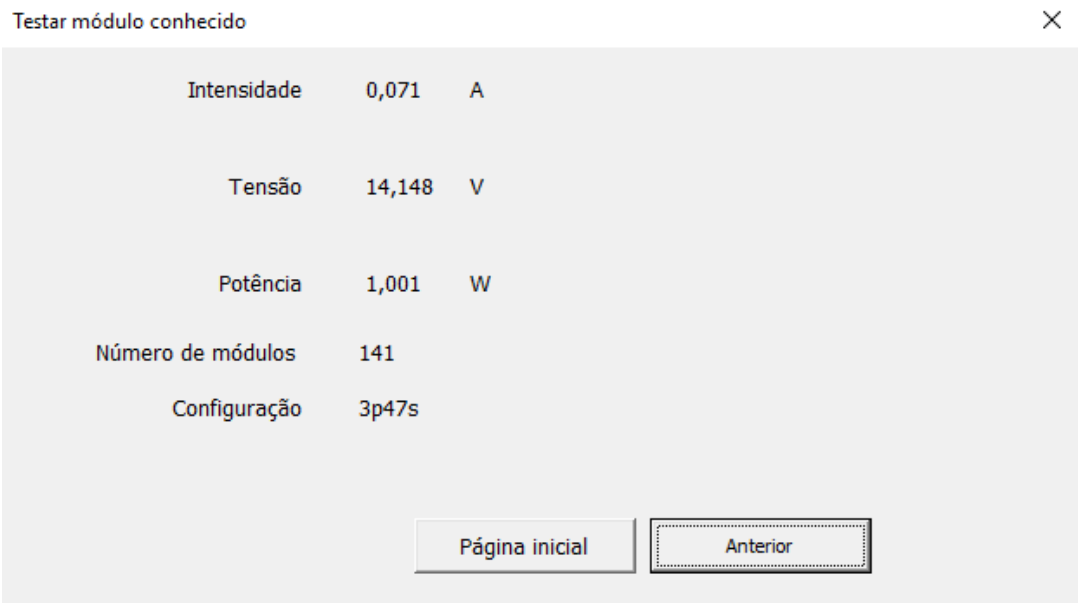


Figura 21 - Janela de resultados do teste a um módulo conhecido.

Nesta janela pode-se visualizar a corrente, a tensão e a potência elétrica previsivelmente geradas, bem como o número de módulos a utilizar. Por omissão, os módulos deverão ser ligados eletricamente em série. No entanto, caso a configuração mais vantajosa seja outra, esta vem também indicada na janela, como se pode observar na Figura 21, na indicação "Configuração". Esta segue uma lógica do tipo βpγs, onde β representa o número de módulos em paralelo (p) e γ o número de módulos em série (s). No caso da Figura 21, isto corresponderia a um sistema com 3 conjuntos de módulos ligados em paralelo, cada conjunto constituído por 47 módulos ligados em série. Esta lógica vem explicada em maior detalhe no manual de instruções (Anexo A da presente dissertação), na secção "Testar módulo conhecido".

Na ferramenta é ainda possível fazer a gestão dos módulos registados na base de dados. Tal consiste em ativar módulos conhecidos (condição de origem), permitindo que eles sejam considerados na pesquisa pelo módulo ótimo, ou inativar módulos, retirando-os dessa pesquisa. É também possível eliminar módulos, sendo esta uma ação definitiva e, por isso, exige confirmação por parte do utilizador. Estas ações são feitas a partir da janela visível na Figura 22. Na janela estão visíveis módulos ativos e inativos (módulos inativos sinalizados na última coluna) e módulos selecionados (a azul). Os módulos selecionados seriam afetados pela ação a tomar de seguida. "Ativar módulos" ativa todos os módulos selecionados, "Ativar todos" ativa todos os módulos inativos, "Inativar módulos" inativa todos os módulos selecionados e "Eliminar módulos" elimina os módulos selecionados.

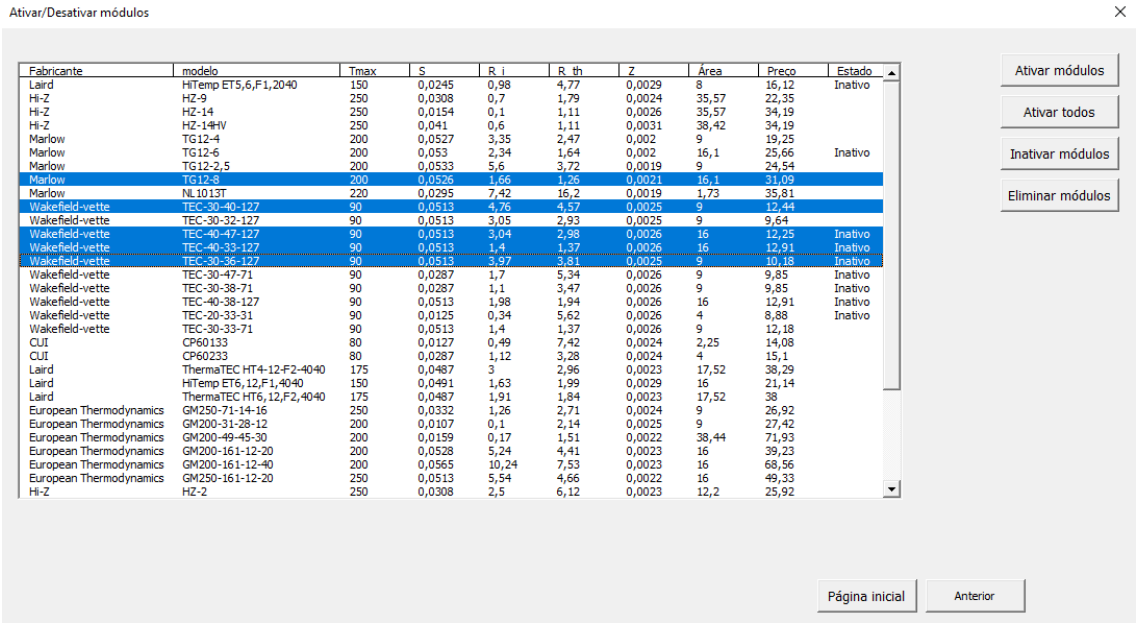


Figura 22 - Janela para ativar, inativar e eliminar módulos.

É também possível adicionar módulos. O processo, no entanto, vai depender do tipo de módulo em causa, uma vez que serão necessárias introduções diferentes para um módulo de Seebeck e para um módulo de Peltier. Para o primeiro caso, um módulo é adicionado preenchendo as caixas de texto da Figura 23.

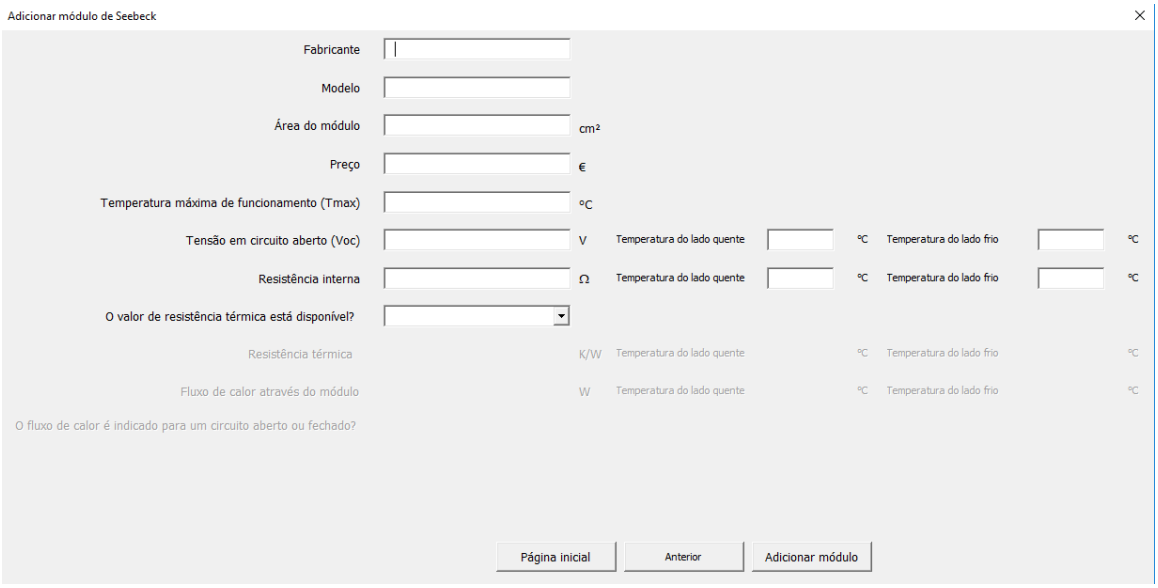


Figura 23 - Janela para a adição de um módulo de Seebeck.

O elevado número de caixas de texto e as combinações de caixas de texto ativas e inativas prendem-se não só com a variabilidade da informação disponível nas folhas de especificações dos fabricantes dos módulos de Seebeck, como também com o facto de não haver um método simples desenvolvido para este propósito, sendo as propriedades termoelétricas de um módulo de Seebeck obtidas de acordo com equações desenvolvidas nesta dissertação.

Para um módulo de Peltier, o utilizador deverá preencher as caixas de texto da janela da Figura 24.

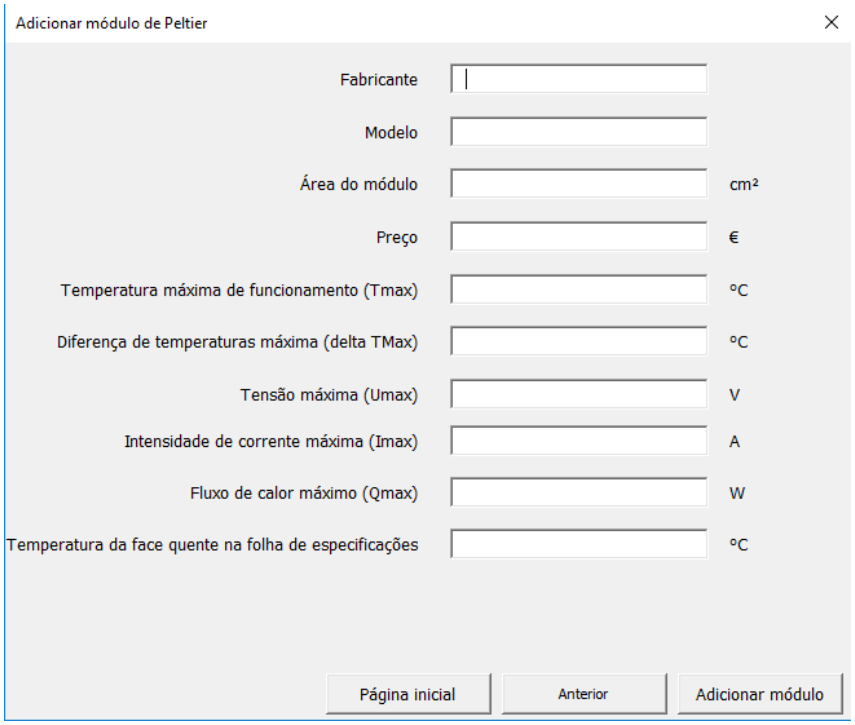


Figura 24 - Janela para a adição de um módulo de Peltier.

O utilizador tem também à disposição uma janela para opções avançadas, que não são espectáveis de ser alteradas com frequência. Estas opções são a temperatura da folha de especificações do fabricante na pesquisa pelo módulo ótimo, útil caso haja um fabricante que forneça folhas de especificações com temperaturas do lado quente diferentes do padrão, ou alterar o valor de Z, valor de mérito de um material termoelétrico, na escolha do módulo ótimo. Esta alteração pode ser feita de 3 métodos distintos, como pode ser observado na Figura 25.

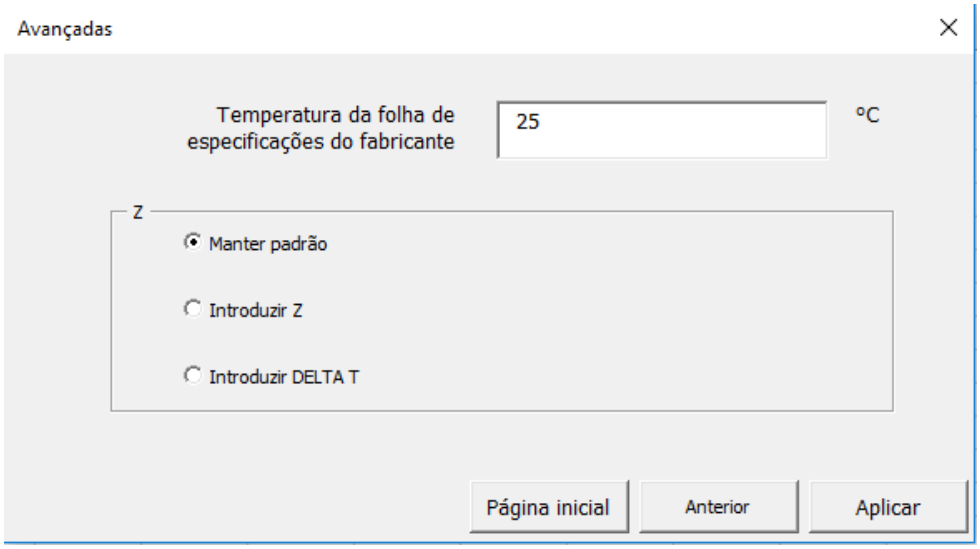


Figura 25 - Janela de opções avançadas.

A definição padrão utiliza a média dos valores de Z dos módulos registados na base de dados. Também é possível introduzir manualmente o valor de Z ou introduzir o valor da diferença de temperaturas máxima entre as faces do módulo termoelétrico, um indicador do valor de mérito desse módulo.

5 Resultados e discussão

Como foi descrito na secção 2.8, existem três métodos que permitem a obtenção dos parâmetros termoelétricos de um módulo de Peltier. No entanto, tanto quanto é atualmente conhecido, não houve nenhuma comparação entre eles para estabelecer qual dos métodos devolve resultados mais próximos da realidade. Uma vez que a obtenção desses métodos é parte essencial do funcionamento da ferramenta desenvolvida, é necessário auferir qual ou quais os métodos a utilizar.

O primeiro passo desta análise, entre métodos, foi a comparação dos seus resultados com os dados das folhas de especificações dos fabricantes. Para isso, foi utilizada a folha de especificações do módulo NL1013T, da Marlow Industries, que pode ser consultada no Anexo B deste documento. Este módulo foi desenhado para a utilização como módulo de Peltier e como módulo de Seebeck, sendo que na folha de especificações podem ser encontrados os pontos de funcionamento para os dois casos, permitindo assim a comparação dos resultados obtidos.

Utilizando as tabelas de dados para a temperatura do lado quente a 50˚C, os parâmetros termoelétricos do módulo calcularam-se as seguintes propriedades termoelétricas:

Tabela 3 - Propriedades termoelétricas do módulo NL1013T calculadas pelos diferentes métodos.

	Lineykin	Luo	Palacios
$S\ [V/K]$	0,0297	0,0276	0,0310
$R_i[\Omega]$	7,55	7,00	9,20
$R_{th}[K/W]$	18,28	19,72	21,14

Com recurso a estes dados, determinou-se, de seguida, a potência elétrica gerada nas condições de equilíbrio de resistências e a tensão em circuito aberto. Para este cálculo utiliza-se para temperatura de lado frio 27˚C e para as temperaturas de lado quente 85˚C, 55˚C e 35˚C, condições para as quais o fabricante disponibiliza dados. A potência foi calculada usando a expressão 2.21 e os valores de S e R_i foram adaptados às diferentes temperaturas médias através das equações 2.12 e 2.13, respetivamente. Os valores

calculados, bem como o erro em relação aos valores fornecidos pelo fabricante, podem ser vistos na Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6.

Tabela 4 - Comparação entre a tensão e potência elétrica geradas de acordo com as propriedades calculadas pelos 3 métodos para T_H=85˚C e T_C=27˚C.

	$U_{circuito\ aberto}$ [V]	Erro $U_{circuito\ aberto}$ [%]	Potência [W]	Erro potência [%]
Lineykin	1,734	-3,13	0,096	10,34
Luo	1,608	-10,17	0,089	2,30
Palacios	1,806	0,89	0,085	-2,30
Fabricante	*1,79*		*0,087*	

Tabela 5 - Comparação entre a tensão e potência elétrica geradas de acordo com propriedades calculadas pelos 3 métodos para T_H=55˚C e T_C=27˚C.

	$U_{circuito\ aberto}$ [V]	Erro $U_{circuito\ aberto}$ [%]	Potência [W]	Erro potência [%]
Lineykin	0,822	-3,29	0,024	14,29
Luo	0,762	-10,35	0,022	4,76
Palacios	0,857	0,82	0,021	0,00
Fabricante	*0,85*		*0,021*	

Tabela 6 - Comparação entre a tensão e potência elétrica geradas de acordo com propriedades calculadas pelos 3 métodos para T_H=35˚C e T_C=27˚C.

	$U_{circuito\ aberto}$ [V]	Erro $U_{circuito\ aberto}$ [%]	Potência [W]	Erro potência [%]
Lineykin	0,231	-3,75	0,002	0,00
Luo	0,214	-10,83	0,002	0,00
Palacios	0,241	0,42	0,002	0,00
Fabricante	*0,24*		*0,002*	

Com o objetivo de validar os resultados calculados, o passo seguinte consistiu na realização de testes em laboratório. O princípio seguido foi o mesmo: comparar os dados previstos através dos diferentes métodos com aqueles efetivamente medidos, utilizando dois módulos para verificar se o funcionamento das associações de módulos termoelétricos correspondia ao previsto. Para tal foram utilizados dois módulos termoelétricos CP40136, fabricados pela CUI. As propriedades obtidas pelos diferentes métodos podem ser consultadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Propriedades termoelétricas do módulo CP40136 calculadas pelos diferentes métodos.

	Lineykin	Luo	Palacios
$S\ [V/K]$	0,0127	0,0111	0,0131
$R_i[\Omega]$	0,74	0,65	0,95
$R_{th}[K/W]$	11,13	12,74	14,21

Para os ensaios, foi usada uma banda de aquecimento como fonte de calor, sendo controlada para temperatura constante através da fonte de potência. O contacto entre a fonte de calor e os módulos fez-se com recurso a uma almofada térmica Arctic Thermal Pad, com uma condutividade térmica de 6W/mK e espessura de 0,5mm, o que resultava numa resistência de contacto térmica de 3,5K/W - após aplicar a resistência de contacto

referida no trabalho de Hansson et al. (2016) e corrigindo a condutividade da almofada térmica por comparação com os valores referidos no trabalho de Lee et al.(1997). As temperaturas foram medidas com recurso a uma câmara térmica FLIR, de modo a eliminar os erros por resistência térmica de contacto. As resistências elétricas e tensões elétricas foram medidas com recurso a um multímetro. Na Figura 26 pode-se observar uma imagem da câmara térmica, retirada durante a fase de aquecimento.



Figura 26 - Imagem recolhida com a câmara térmica. A faixa em tons mais claros é a banda de aquecimento e os dois quadrados escuros são os módulos termoelétricos.

Em ambos os casos, circuito aberto e circuito fechado, o resultado medido foi a tensão entre os terminais dos módulos, uma vez que permitiu que o circuito pudesse ser mantido em funcionamento durante as medições sem alterações à sua resistência (apesar de muito baixa, um amperímetro apresenta uma resistência elétrica não nula) e diminuiu o número de ligações que foi necessário alterar entre testes. A Figura 27 apresenta a montagem usada nos testes experimentais, com o circuito montado na configuração de dois módulos em paralelo.

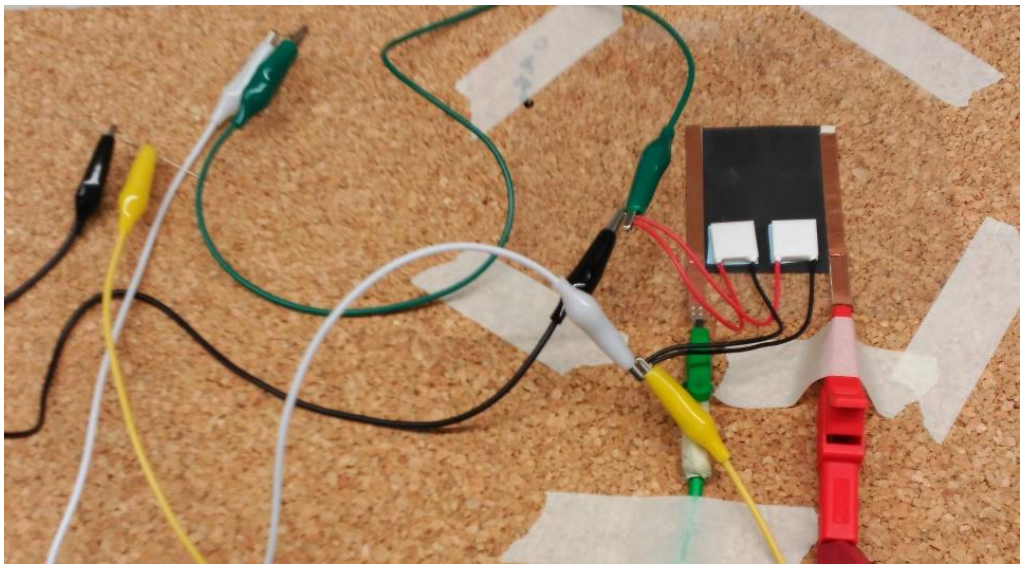


Figura 27 - Circuito em teste com os módulos termoelétricos ligados em paralelo.

No teste com um módulo apenas, a temperatura média do lado quente foi de 51,9˚C no teste em circuito aberto e 51,6 ˚C no teste em circuito fechado e a temperatura média do lado frio foi de 47,7˚C no teste em circuito aberto e 47,9 ˚C no teste em circuito fechado. Para fechar o circuito foi usada uma resistência de 1,10Ω. Os resultados, bem como a comparação com o valor medido, podem ser observados na Tabela 8.

Tabela 8 - Comparação dos valores de tensão previstos e medidos para um módulo termoelétrico.

	$U_{circuito\ aberto}$ [V]	Erro $U_{circuito\ aberto}$ [%]	$U_{circuito\ fechado}$ [V]	Erro $U_{circuito\ fechado}$ [%]
Lineykin	0,0426	0,95	0,0193	15,57
Luo	0,0383	-9,24	0,0187	11,98
Palacios	0,0463	9,72	0,0177	5,99
Medição	*0,0422*		*0,0167*	

No teste com dois módulos ligados em série, a temperatura média do lado quente foi de 52,1˚C no teste em circuito aberto e 51,4˚C no teste em circuito fechado e a temperatura média do lado frio foi de 47,5˚C no teste em circuito aberto e 47,4˚C no teste em circuito

fechado. Para fechar o circuito foi usada uma resistência de 2,15Ω. Os resultados, bem como a comparação com o valor medido, podem ser visualizados na Tabela 9.

Tabela 9 - Comparação dos valores de tensão previstos e medidos para dois módulos termoelétricos associados em série.

	$U_{circuito\ aberto}$ [V]	Erro $U_{circuito\ aberto}$ [%]	$U_{circuito\ fechado}$ [V]	Erro $U_{circuito\ fechado}$ [%]
Lineykin	0,0953	5,77	0,0414	18,97
Luo	0,0840	-6,77	0,0400	14,94
Palacios	0,1014	12,54	0,0399	14,66
Medição	*0,0901*		*0,0348*	

No teste com dois módulos ligados em paralelo, a temperatura média do lado quente foi de 52,3˚C no teste em circuito aberto e 51,3˚C no teste em circuito fechado e a temperatura média do lado frio foi de 47,7˚C no teste em circuito aberto e 47,9˚C no teste em circuito fechado. Para fechar o circuito foi usada uma resistência de 0,60Ω. Os resultados, bem como a comparação com o valor medido, podem ser vistos na Tabela 10.

Tabela 10 - Comparação dos valores de tensão previstos e medidos para dois módulos termoelétricos associados em paralelo.

	$U_{circuito\ aberto}$ [V]	Erro $U_{circuito\ aberto}$ [%]	$U_{circuito\ fechado}$ [V]	Erro $U_{circuito\ fechado}$ [%]
Lineykin	0,0466	2,87	0,0184	12,20
Luo	0,042	-7,28	0,0177	7,93
Palacios	0,0507	11,92	0,0179	9,15
Medição	*0,0453*		*0,0164*	

No âmbito desta atividade experimental optou-se por deixar a superfície superior dos módulos descoberta de modo a ter uma boa leitura da temperatura. Numa instalação em funcionamento, ou num teste futuro, o módulo poderá ser montado em condições de funcionamento, ou seja, acoplado a um dissipador de calor, que poderá servir de base a um sistema que permita a montagem dos módulos sob pressão.

Na situação de circuito aberto, o método que devolve resultados mais próximos daqueles medidos em laboratório é o método de Lineykin e Ben-Yaakov, com erro médio de 3,20%. Em circuito fechado, o que apresenta melhores resultados é o de Palacios, com um erro médio de 9,9%. No entanto, tanto o método de Lineykin e Ben-Yaakov como o de Luo apresentam erros significativamente diferentes nas duas situações, ao passo que o método de Palacios apresenta um erro semelhante em circuito fechado e em circuito aberto. Por este motivo, e por analogia com os resultados obtidos por comparação com as especificações do fabricante, o método de Palacios é assumido como sendo o que é mais adequado para calcular as propriedades termoelétricas de um módulo de Peltier. As diferenças entre os valores medidos e calculados podem dever-se a um mau contacto térmico, uma vez que os módulos se soltaram da fonte de calor mais que uma vez, podendo este contacto não se efetuar nas melhores condições. Este problema não foi resolvido em ensaios subsequentes pois no laboratório não foi encontrada forma de medir corretamente a temperatura no lado frio do módulo, ou estimar a resistência térmica entre a fonte fria e o módulo, e colocar o módulo sob pressão.

Através da lei de Ohm, a corrente (I) pode ser calculada por:

$$I = \frac{U}{R} \tag{5.1}$$

onde a R é a resistência elétrica e U é a tensão medida nos terminais da resistência.

Aplicando a equação 5.1 aos valores de resistência e tensão medidos nas diferentes configurações do circuito, a corrente em cada caso é apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 - Corrente calculada nas diferentes configurações.

	Módulo isolado	Módulos em série	Módulos em paralelo
Corrente [A]	0,0152	0,0162	0,0273

As características das associações de módulos ficaram comprovadas, com a associação de módulos em série a gerar o dobro da tensão e a mesma corrente que um módulo isolado e a associação de módulos em paralelo a gerar a mesma tensão e o dobro da corrente quando comparada com um módulo isolado.

6 Conclusões e perspetivas de trabalho futuro

6.1. Conclusões

O objetivo principal do trabalho, criar uma ferramenta que permita dimensionar um sistema de micro geração de energia elétrica com recurso a calor residual, foi atingido.

O trabalho começou com uma revisão do estado da arte no que diz respeito aos efeitos termoelétricos, funcionamento de módulos termoelétricos, ferramentas existentes e informação presente nas folhas de especificações dos módulos disponíveis no mercado. Esta pesquisa revelou que nem nas folhas de especificações dos módulos de Peltier nem dos módulos de Seebeck estão explícitas as propriedades termoelétricas dos módulos, sendo necessário encontrar ou desenvolver métodos para as calcular, um passo que não estava inicialmente previsto no desenvolvimento da ferramenta.

A ferramenta de seleção e teste dos sistemas de micro geração de energia foi desenvolvida recorrendo ao *software Microsoft Excel* e a funções programadas com recurso à linguagem do *Visual Basic for Applications* (VBA). Ao objetivo inicial adicionaram-se casos de estudo para fontes quentes com fluxo de calor constante e dimensionamento para uma área disponível conhecida, bem como uma base de dados com módulos termoelétricos, que permite analisar os melhores módulos reais para uma situação de seleção de módulo ótimo. Também o ambiente gráfico foi trabalhado, a usabilidade do programa foi aumentada com ciclos de verificação dos dados inseridos, mensagens de erro e ajuda e o tempo de computação foi minimizado. Estes aspetos não constavam do plano inicial e foram sucessivamente implementados na ferramenta num espírito de melhoria contínua. A ferramenta final contempla uma base de dados de módulos conhecidos, de forma a facilitar a introdução dos dados do módulo na previsão do seu funcionamento. E a sugestão de módulos reais na pesquisa por um módulo ótimo contempla, também, métodos de adição de novos módulos à base de dados adequados às informações presentes nas folhas de especificações fornecidas pelos fabricantes, tanto para módulos desenhados para funcionar como bombas de calor como para módulos desenhados para funcionar como geradores termoelétricos. Nas funcionalidades de cálculo, inclui a capacidade seleção do módulo ótimo, que calcula as propriedades do módulo ótimo a usar no caso de estudo e devolve os módulos conhecidos mais adequados,

e a previsão do funcionamento de um módulo conhecido num caso de estudo. Os cálculos podem ser feitos para a condição de uma fonte quente com fluxo de calor constante, em que se procura que a temperatura máxima da fonte não seja ultrapassada, e para a condição de uma fonte quente com temperatura constante, em que se pode dimensionar o sistema para produzir uma determinada potência, extrair a máxima potência de uma determinada área. Em todos os casos é devolvida a configuração elétrica da associação de módulos mais vantajosa.

Foram avaliados os três métodos mais relevantes da literatura para calcular as propriedades termoelétricas de um módulo de Peltier: o de Luo, o de Lineykin e Ben-Yaakov e o de Palacios et al., uma vez que tal comparação nunca tinha sido feita. O de Palacios et al. demonstrou ser o mais fiável, com erros inferiores ou mais facilmente explicáveis que aqueles obtidos através dos outros métodos. O trabalho desenvolvido desta fase deu origem a uma publicação, que foi aceite, e será apresentada no congresso *M2D 2019 – 8th International Conference Mechanics and Materials in Design*, a decorrer entre 4 e 6 de setembro de 2019 na Universidade de Bolonha, Itália, disponível no Anexo D deste documento.

Uma vez que não foram encontrados métodos de calcular as propriedades termoelétricas de um módulo de Seebeck com base nas informações habitualmente fornecidas nas folhas de especificações destes módulos, foi analisada a informação frequentemente fornecida e foi encontrado um método para calcular essas propriedades, que foi posteriormente incluido na ferramenta.

Com a ferramenta já desenvolvida, os valores devolvidos por ela foram comparados com valores obtidos em laboratório, comparando novamente os três métodos de obtenção de propriedades termoelétricas. Neste teste, o método de Luo apresentou um erro menor. No entanto, a tensão medida em circuito aberto e em circuito fechado apresentou desvios em direções diferentes. O método de Palacios apresentou desvios maiores, mas consistentes em direção e módulo, levando a crer que foram devidos a circunstâncias não contabilizadas no método experimental e que este é o método mais fiável.

A visão inicial para a ferramenta era uma folha de cálculo no *software Microsoft Excel*. Este software é uma boa base para sistemas de cálculo uma vez que está amplamente distribuído e permite uma elevada personalização através da programação em VBA. No entanto, o único método numérico que permite manter um tempo computacional aceitavelmente curto é o método GRG não linear, implementado a partir do suplemento

Solver. Este foi o principal motivo pelo qual a ferramenta não migrou para um programa desenvolvido de raíz no *Visual Studio*. Mesmo assim, o suplemento *Solver* tem limitações no que diz respeito ao número de variáveis que consegue calcular ou aos valores iniciais dessas variáveis, contornadas através de rotinas incorporadas no código. Implica também que a ferramenta não possa ser usada em computadores que usem outros programas de folhas de cálculo.

6.2. Perspetivas de trabalho futuro

A nível de um trabalho futuro, revela interesse repetir os testes em laboratório, controlando melhor as condições, em especial no que diz respeito ao contacto térmico, para melhor avaliar a exatidão dos valores devolvidos pela ferramenta e os métodos de obtenção das propriedades termoelétricas. Aconselha-se a montagem e funcionamento dos módulos termoelétricos sob pressão. Recomendam-se também testes aos métodos de cálculo das propriedades termoelétricas de um módulo de Seebeck.

A tecnologia de seguimento do ponto de potência máxima (Maximum Power Point Tracking – MPPT), desenvolvida em grande parte devido à produção fotovoltaica, está também a avançar para gamas mais baixas de potência, entrando no âmbito da micro geração. Estes conversores apresentam uma resistência variável, escolhendo automaticamente a que permite a produção de maior potência elétrica. Uma versão futura da ferramenta poderá ser capaz de integrar este componente no seu processo de cálculo.

Referências

Ahiska R, Dişlitaş S. Microcontroller Based Thermoelectric Generator Application. Journal of Science, 2006, 19, p. 135-141.

BP, "BP Statistical Review of World Energy 67th edition", 2018

CeNTI, "Factos e Números", 2019. Disponível online em: https://www.centi.pt/sobre/factos-e-numeros-centi-nanotecnologia, consultado pela última vez a 25 de junho de 2019.

Champier D, Bédécarrats J P, Kousksou T, Rivaletto M, Strub F, Pignolet P. Study of a TE (thermoelectric) generator incorporated in a multifunction wood stove. Energy, 2011, 36, p. 1518-1526.

Chen J, Li K, Liu C, Li M, Lv Y, Jia L, Jiang S. Enhanced Efficiency of Thermoelectric Generator by Optimizing Mechanical and Electrical Structures. Energies, 2017, 10, p. 1329.

Chen L, Gong J, Sun F, Wu C. Effect of heat transfer on the performance of thermoelectric generators. International Journal of Thermal Sciences, 2002, 41, p. 95-99.

Dousti M, Petraglia A, Pedram A. Accurate electrothermal modeling of thermoelectric generators. Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), Grenoble, 2015, p. 1603-1606.

Electricalvoice. Thomson Effect | Positive & Negative Types, 2018. Disponível online em https://electricalvoice.com/thomson-effect-positive-negative-type/, consultado pela última vez a 21 de fevereiro de 2019.

Encyclopædia Britannica, inc. Joule's Law, 1998. Disponível online em https://www.britannica.com/science/Joules-law, consultado pela última vez em 20 de março de 2019.

Encyclopædia Britannica, inc. Thomson Effect, 1998. Disponível online em https://www.britannica.com/science/Thomson-effect, consultado pela última vez em 20 de março de 2019.

Fan L, Zhang G, Wang R, Jiao K. A comprehensive and time-efficient model for determination of thermoelectric generator length and cross-section area. Energy Conversion and Management, 2016, 122, p. 85–94.

Freunek M, Reindl L M, Walker W D. Modified model for thermoelectric generators, 2008.

Gomez M, Reid R, Ohara B, Lee H. Influence of electrical current variance and thermal resistances on optimum working conditions and geometry for thermoelectric energy harvesting. Journal of Applied Physics, 2013, 113, 174908.

Hansson J, Zandén C, Ye L, Liu J. Review of Current Progress of Thermal Interface Materials for Electronics Thermal Management Applications. 2016 IEEE 16th International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO), 2016, p. 371-374.

He W, Zhang G, Zhang X, Li J, Li G, Zhao X. Recent development and application of thermoelectric generator and cooler. Applied Energy, 2015, 143, p. 1-25.

Hi-Z. Performance calculator. Disponível online em https://hi-z.com/wp-content/uploads/2019/03/ModulePerformanceCalculator.exe, consultado pela última vez a 31 de maio de 2019

Kanimba E, Tian Z. Modeling of a Thermoelectric Generator Device. Thermoelectrics for Power Generation - A Look at Trends in the Technology, 2016, 18, p. 461.

Karabetoglu S, Sisman A, Ozturk Z F, Sahin T. Characterization of a thermoelectric generator at low temperatures. Energy Conversion and Management, 2012, 62, p. 47-50.

Karpe, S. Thermoelectric Power Generation using Waste Heat of Automobile. International Journal of Current Engineering and Technology, 2010, Edição especial 4.

Lee S, Early M, Pellilo M. Thermal Interface Material Performance in Microelectronics Packaging Applications. Microelectronics Journal, 1997, volume 28, nº 1, p. xiii-xx.

Lee S. How to Select a Heat Sink. Aavid Thermal Engineering. Disponível online em https://pdfs.semanticscholar.org/0278/5be83fa7cd77a4ed986597d676e5aa981164.pdf. Consultado pela última vez a 16 de abril de 2019

Lesage F, Pelletier R, Fournier L, Sempels E. Optimal electrical load for peak power of a thermoelectric module with a solar electric application. Energy Conversion and Management, 2013, 74, p. 51-59.

Liao M, He Z, Jiang C, Fan X, Li Y, Qi, F. A three-dimensional model for thermoelectric generator and the influence of Peltier effect on the performance and heat transfer. Applied Thermal Engineering, 2018, 133, p. 493-500.

Lineykin S, Ben-Yaakov S. Modeling and Analysis of Thermoelectric Modules. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, vol. 43, no. 2, pp. 505-512.

Liu C, Chen P, Li K. A 1 kW thermoelectric generator for low-temperature geothermal resources. Transactions - Geothermal Resources Council, 2014, 38, p. 749-754.

Luo, Z. A simple method to estimate the physical characteristics of a thermoelectric cooler from vendor datasheets. Electronics Cooling, 2008, 14, p. 22-27.

McCarty, R. Energy-Harvesting-for-Wireless-Sensors. Marlow Industries. Disponível online em https://www.marlow.com/hubfs/Marlow-Energy-Harvesting-for-Wireless-Sensors.pdf, consultado pela última vez a 17 de abril de 2019.

McCarty R. Thermoelectric Power Generator Design for Maximum Power: It's All About ZT. Journal of Electronic Materials, 2013, volume 42, No. 7. P. 1504-1508

Nesarajah M, Frey G. Thermoelectric power generation: Peltier element versus thermoelectric generator. IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Florence, 2016, p. 4252-4257.

Nuwayhid R, Shihadeh A, Ghaddar N. Development and testing of a domestic woodstove thermoelectric generator with natural convection cooling, Energy Conversion and Management, Volume 46, Issues 9–10, 2005, p. 1631-1643

O'Brien R C, Ambrosi, R M, Bannister N P, Howe S D, Atkinson H V. Safe radioisotope thermoelectric generators and heat sources for space applications. Journal of Nuclear Materials, 2008, 389, p. 506-521.

Palacios R, Arenas A, Pecharromán R R, Pagola F L. Analytical procedure to obtain internal parameters from performance curves of commercial thermoelectric modules. Applied Thermal Engineering, 2009, Volume 29, Issues 17–18, p. 3501-3505.

Ritzer T, Lau P. Economic optimization of heat sink design, AIP Conference Proceedings, 1994, 316, p. 177-180

Sempels E, Lesage F. Optimization of Thermoelectric Generators in the Presence of Heat Losses and Fluid Flows, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2018, volume 8, nº 9, p.1573-1580.

Sherman B. Calculation of Efficiency of Thermoelectric Devices. Journal of Applied Physics, 1960, 31, p. 1

Strasser M, Aigner R, Lauterbach C, Sturm T F, Franosch M, Wachutka G. Micromachined CMOS thermoelectric generators as on-chip power supply. Sensors and Actuators A: Physical, Volume 114, Issues 2–3, 2004, p. 362-370.

Teffah K, Zhang Y, Mou X. Modeling and Experimentation of New Thermoelectric Cooler–Thermoelectric Generator Module. Energies, 2018, 11, p. 576.

Twaha S, Zhu J, Yan Y, Li B. A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modelling and performance improvement. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 65, p. 698-726.

Wang S, Xie T, Xie H. Experimental study of the effects of the thermal contact resistance on the performance of thermoelectric generator. Applied Thermal Engineering, 2018, 130, p. 847–853.

Yazawa K, Shakouri A. Optimization of power and efficiency of thermoelectric devices with asymmetric thermal contacts. Journal of Applied Physics, 2012, 111, 024509.

Yildiz F, Coogler K. Low power energy harvesting with a thermoelectric generator through an air conditioning condenser. ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings, 2014, 34.

Zheng X F, Liu C X, Yan Y Y, Wang Q. A review of thermoelectrics research – Recent developments and potentials for sustainable and renewable energy applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 32, p. 486-503.

ANEXO A: Manual de instruções

Este anexo contém o manual de instruções desenhado para acompanhar a ferramenta desenvolvida nesta dissertação. Contém instruções para a sua utilização, bem como as limitações do programa e conselhos para a correta montagem dos módulos.

Manual de Instruções

Ferramenta de Caracterização e Seleção de Módulos Termoelétricos

Conteúdo

Introdução 1

Sobre a ferramenta 1

Compatibilidade 1

Organização da ferramenta 1

Esquema das janelas 2

As funcionalidades do programa 3

Menu inicial 3

Selecionar módulo ótimo 4

Testar módulo conhecido 7

Gerir módulos 10

Avançadas 13

Como obter a maior potência possível 14

Limitações do programa 14

Introdução

Sobre a ferramenta

Esta ferramenta destina-se a facilitar a escolha dos módulos termoelétricos a integrar num sistema de micro geração de energia. É uma ferramenta de cálculo baseada no software MS Excel. O utilizador irá introduzir os dados relativamente ao seu caso de estudo e irá obter os parâmetros que deverá utilizar para selecionar o módulo de Peltier que melhor se adapta a esse cenário, mais concretamente a tensão máxima, U, intensidade de corrente máxima, I, fluxo de calor máximo, Q, e diferença de temperaturas máxima, ΔT, permitidos pelo módulo. Irá ainda conhecer as melhores escolhas de entre os módulos já conhecidos. Esta ferramenta está preparada, também, para utilizadores sem experiência nem conhecimentos na área da transferência de calor, podendo utilizá-la sem dificuldades, uma vez que contém explicações básicas de conceitos fundamentais e limites para valores razoáveis nas entradas.

Compatibilidade

Este programa foi desenvolvido no MS Excel 2016. É apresentado em duas versões, uma compatível com MS Excel 97 e superiores, outra compatível com MS Excel 2010 e superiores. Para melhores resultados use a versão mais avançada que o seu sistema permitir.

Organização da ferramenta

Esta ferramenta está dividida em três caminhos principais: Seleção do módulo ótimo, teste de um módulo conhecido e gestão dos módulos conhecidos.

A gestão dos módulos conhecidos destina-se a interagir com a base de dados integrada nesta ferramenta. É possível adicionar novos módulos, inativar e reativar módulos para as pesquisas de módulos ótimos e eliminar definitivamente módulos ultrapassados.

Na seleção do módulo ótimo é possível introduzir as condições de operação previstas e encontrar não só os parâmetros de um módulo teórico ideal para essas condições, como também saber quais são os mais indicados de entre os módulos registados na base de dados da ferramenta.

No teste de um módulo conhecido é possível testar o funcionamento de um módulo conhecido para um conjunto de condições ambiente. Este caminho difere do anterior não só por apenas testar o módulo selecionado como também por devolver informações mais precisas, nomeadamente a tensão, intensidade de corrente, potência elétrica e configuração ideal dos módulos.

Esquema das janelas

As janelas desta ferramenta têm o mesmo aspeto básico em todas elas, alterando os elementos disponíveis e o seu significado. É possível alterar entre os diferentes elementos de interface gráfica usando o rato, a tecla Tab ou as setas de navegação (apenas válido para caixas de texto e caixas de combinação).

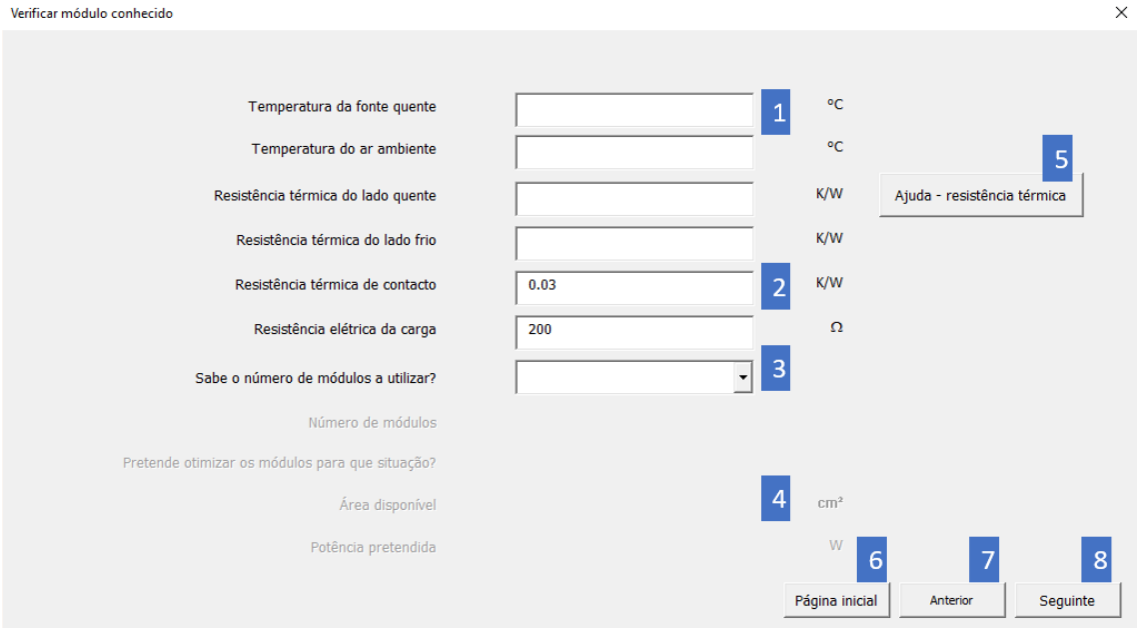


Figura 1 - Elementos básicos das janelas do programa.

Numa janela podem encontrar-se:

1. Caixa de texto ativa – necessita de uma introdução por parte do utilizador. Dados inválidos serão eliminados e o utilizador será notificado a alterá-los.
2. Caixa de texto ativa com valor predefinido – tal como 1. mas com um valor predefinido para casos comuns.
3. Caixa de combinação – necessita de uma introdução por parte do utilizador. Permite apenas escolhas a partir da lista.
4. Caixa de texto inativa (oculta) – poderá ser ativada consoante as ações do utilizador. Caso seja ativada, comporta-se como 1.
5. Botão de ajuda de conceito – nas diferentes janelas, sempre que haja um conceito que o utilizador possa não conhecer, existe um botão de ajuda que fornece uma explicação breve do conceito em causa.
6. Botão “Página inicial” – retorna à página inicial.
7. Botão “Anterior” – retorna à página anterior.
8. Botão “Seguinte” – caso todas as introduções feitas pelo utilizador sejam válidas, avança para a página seguinte. Caso contrário notifica o erro.

As funcionalidades do programa

Menu inicial

Quando abre o ficheiro MS Excel (extensão .xlsm) vai encontrar a janela da Figura 2.

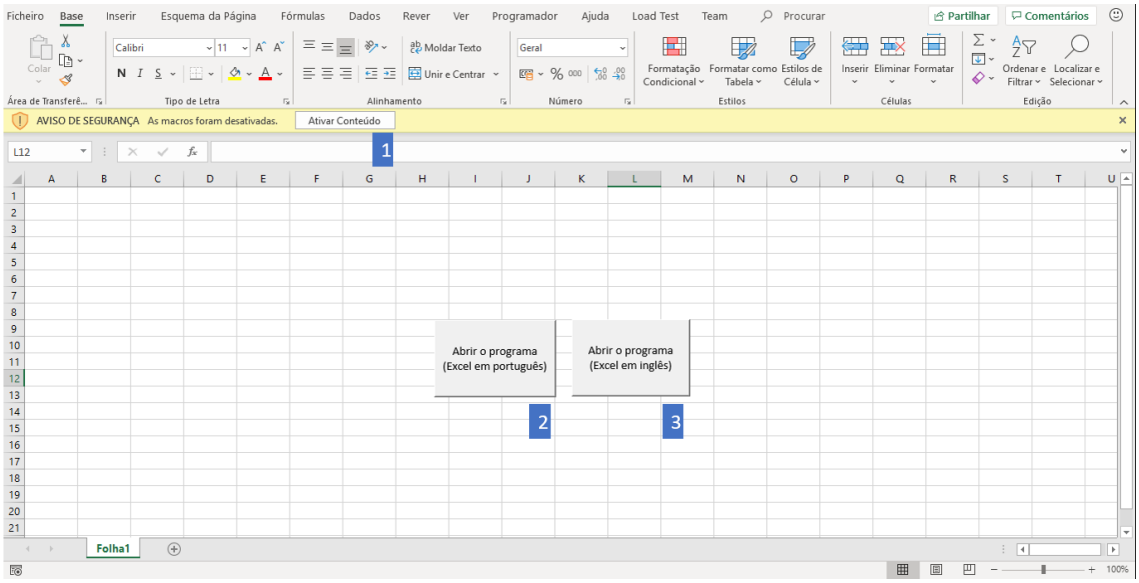


Figura 2 - Ambiente do MS Excel encontrado ao abrir o ficheiro.

Nesta janela são de destacar:

1. Ativar Conteúdo – com um ficheiro novo, de uma fonte externa ao computador que está a ser utilizado, o MS Excel bloqueia a execução de Macros. De forma a correr este programa, deverá clicar em "Ativar Conteúdo".
2. Abrir o programa (Excel em português) – caso a sua versão do Excel esteja em português, deverá clicar neste botão para abrir o programa.
3. Abrir o programa (Excel em inglês) - caso a sua versão do Excel esteja em inglês, deverá clicar neste botão para abrir o programa.

Nesta janela a edição de células e separadores está bloqueada para evitar a alteração involuntária do programa, que poderia implicar falhas no funcionamento da ferramenta. O aviso de segurança não irá aparecer em todas as utilizações, e dependendo das definições, pode nem aparecer na primeira utilização. Nesse caso, deverá ignorar esse passo.

A diferença entre os botões 2 e 3 diz apenas respeito à língua em que está instalado o *MS Excel* no seu computador. O programa estará sempre em português.

Clicando nos botões 2 ou 3, a primeira janela é a "Página inicial". É a partir desta janela que se acede a toda a ferramenta. As opções disponíveis nesta janela podem ser consultadas na Figura 3.

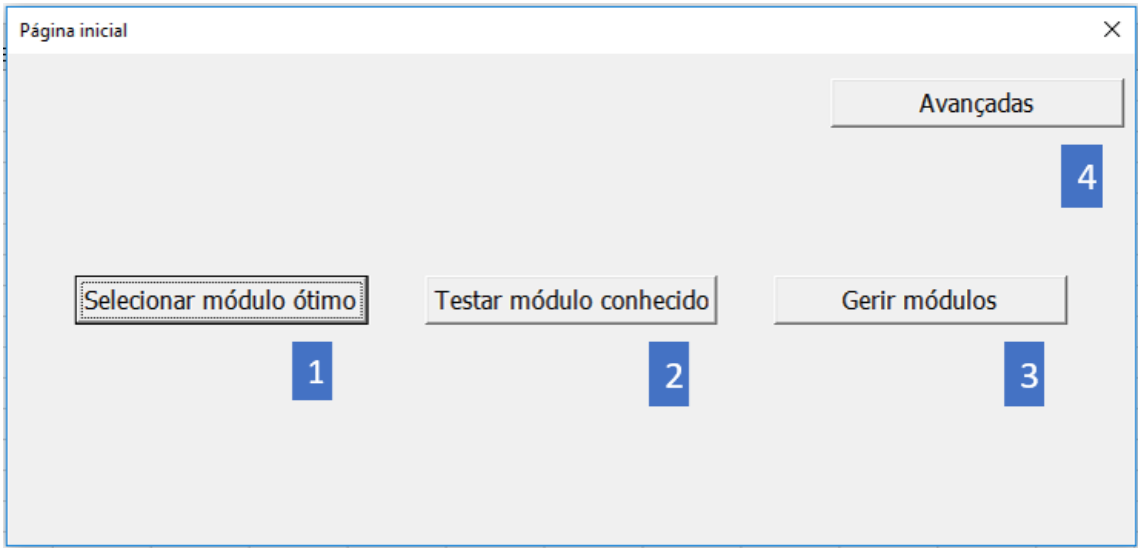


Figura 3 - Página inicial.

Na Página inicial estão presentes 4 botões:

1. Selecionar módulo ótimo – inicia o processo de seleção de um módulo ótimo com base nas condições de funcionamento.
2. Testar módulo conhecido – inicia o processo de teste de um módulo presente na lista de módulos integrada na ferramenta.
3. Gerir módulos – permite adicionar, inativar, reativar ou remover módulos da lista de módulos integrada na ferramenta.
4. Avançadas – permite gerir parâmetros avançados de cálculo, como a temperatura da folha de especificações de um módulo ótimo ou o valor de Z a ser usado nos cálculos do mesmo.

Todas as restantes janelas possuem um botão que permite voltar imediatamente para a Página inicial, de modo a agilizar os movimentos dentro da ferramenta.

Selecionar módulo ótimo

A seleção do módulo ótimo começa com a definição da fonte quente. Há duas possibilidades previstas nesta ferramenta: uma fonte quente de temperatura constante e uma fonte quente de fluxo de calor constante. A escolha será feita a partir da caixa de combinação da Figura 4.



Figura 4 - Página de seleção do tipo de fonte para a seleção de módulo ótimo.

De modo a ajudar quem possa ter dúvidas, está disponível um botão “Ajuda” para ajudar a perceber qual é o tipo de fonte quente. Uma fonte de temperatura constante é um sistema, geralmente de grandes dimensões, em que a presença dos módulos não vai afetar a sua temperatura. Por exemplo, uma caldeira de aquecimento, um forno com controlo de temperatura. Uma fonte de fluxo constante é um corpo cuja temperatura vai ser afetada pela presença dos módulos, mas o fluxo de calor será o mesmo. Por exemplo, LEDs ou CPUs.

Consoante a opção escolhida, o utilizador será direcionado para a janela respetiva. Como pode ser visto na Figura 5, o utilizador deverá introduzir as condições em que os módulos irão operar.

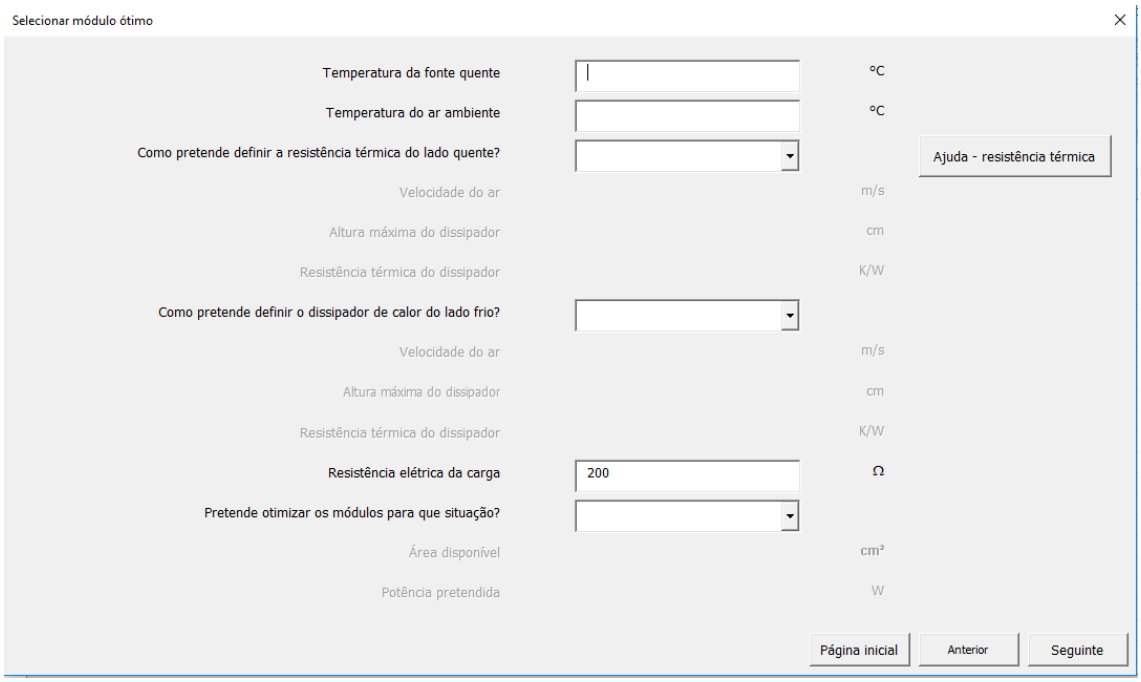


Figura 5 - Janela de introdução das condições de funcionamento do sistema para a seleção do módulo ótimo.

Esta janela é para o caso de uma fonte quente com temperatura constante. No entanto, no caso de uma fonte quente com fluxo de calor constante, a estrutura e modo de funcionamento são os mesmos.

Uma vez que o processo de escolha poderá estar ainda numa fase inicial, as resistências térmicas poderão ser estimadas pelo volume dos dissipadores de calor e pela velocidade do ar. À semelhança do que ocorre na condução elétrica, também na transferência de calor existem resistências que dificultam este fenómeno. Neste cenário, caso a fonte quente ou fria seja um líquido ou gás, o modo mais eficaz de transferir o calor é usando um dissipador de calor. Podem ser usados valores conhecidos para a resistência térmica do dissipador ou em alternativa introduzidos os limites do seu funcionamento para obter um valor estimado. Caso a transferência de calor se faça através do contacto entre dois sólidos poderá ser introduzido o valor da resistência térmica do material por onde ocorre a transferência de calor (normalmente chamado de R j-c em componentes eletrónicos) ou, caso o contacto seja feito diretamente com a fonte, apenas deverá ser considerada a resistência de contacto. A resistência elétrica vem pré-definida para o valor padrão de um conversor de tensão, podendo ser alterada pelo utilizador simplesmente escrevendo na caixa de texto correspondente.

Como indicado anteriormente, todas as caixas de texto ativas e visíveis deverão ser preenchidas com valores adequados. No caso de ser introduzido um valor fora do âmbito desta

ferramenta, será mostrado um aviso de erro e o cursor será colocado na caixa de texto onde esse erro ocorreu. É de relembrar que o separador das unidades é a vírgula.

Introduzidos os dados, o programa vai calcular o módulo ótimo e verificar quais os módulos conhecidos que apresentam as melhores prestações. Esta operação poderá demorar alguns minutos. Esses resultados são demonstrados na janela da Figura 6.

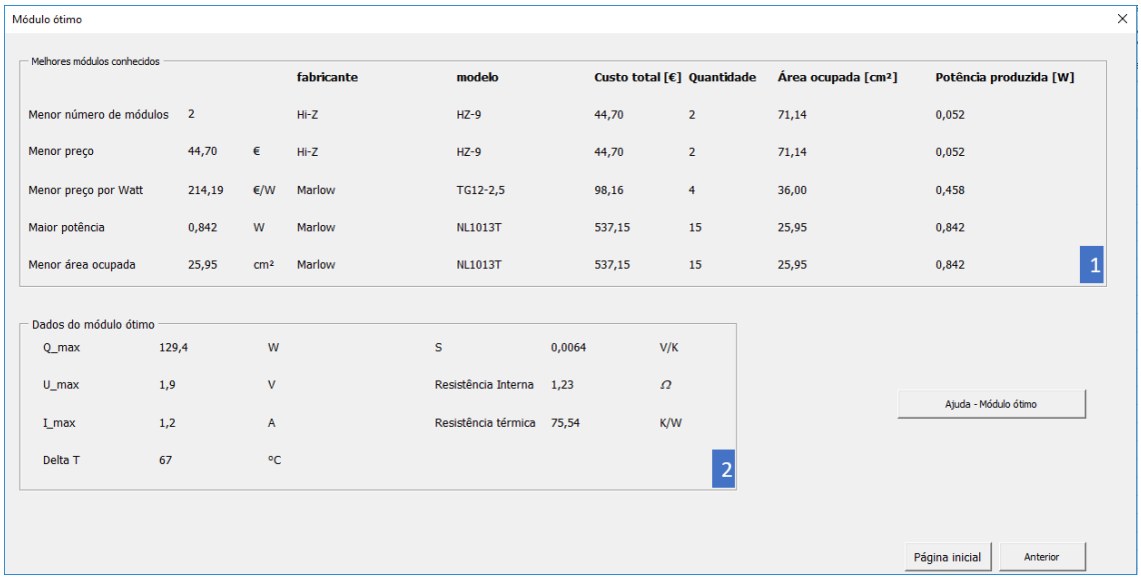


Figura 6 - Janela de resultados da seleção de módulo ótimo.

Nesta janela de resultados são de destacar duas áreas:

1. Melhores módulos conhecidos – nesta área são indicados os módulos que apresentam as melhores prestações para diferentes situações, bem como os dados mais relevantes sobre esse sistema de produção. As prestações avaliadas variam consoante o caso em estudo.
2. Dados do módulo ótimo – nesta área são indicados os dados do módulo ótimo para a produção de energia elétrica neste caso. Este módulo, no entanto, pode não existir por se tratar de uma aplicação muito específica. Isto é especialmente verdade para casos em que são necessários poucos módulos.

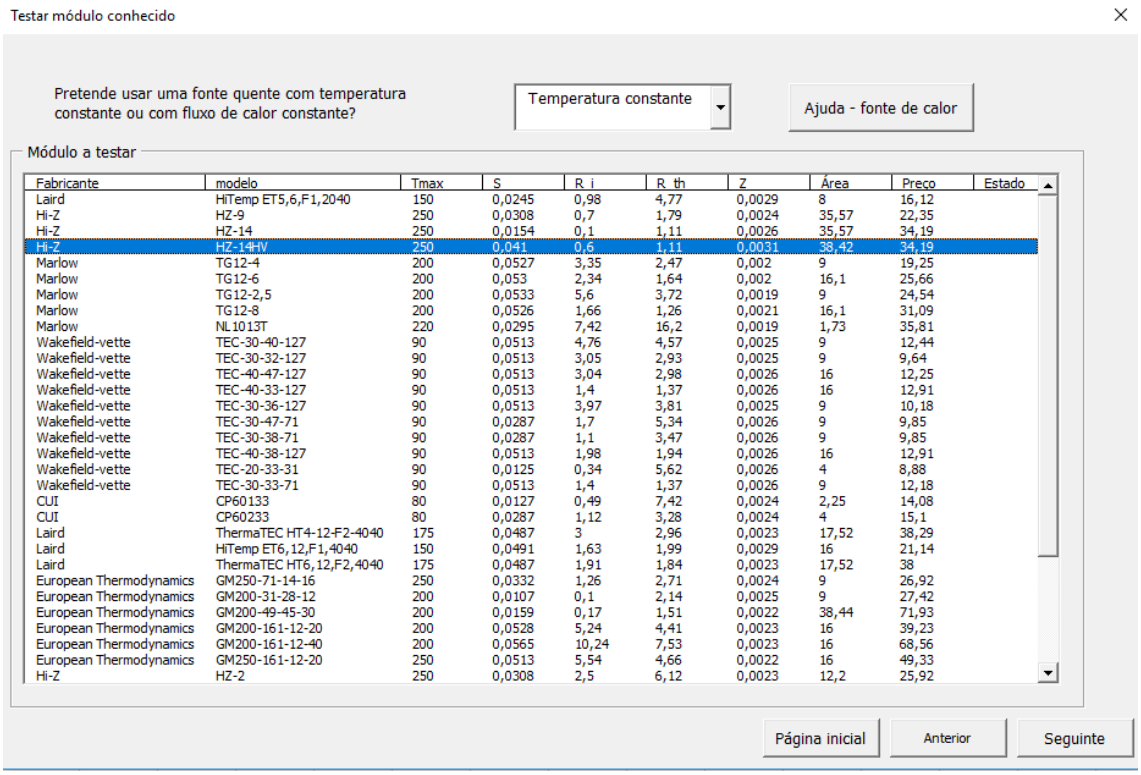
Deve começar a pesquisar pela intensidade de corrente, I_max, filtrando de seguida pelo calor transferido, Q_max, ou pela tensão máxima, U_max. Associando X módulos elétricamente em série e termicamente em paralelo, o calor transferido, Q_max, e a tensão máxima, U_max, dos módulos utilizados são multiplicados por X. Esta propriedade é útil caso não se encontrem módulos que reúnam as características adequadas. Esta associação, no entanto, poderá não ter o comportamento exato do módulo ótimo previsto, devendo esse módulo escolhido ser adicionado à base de dados deste programa e o processo de otimização corrido novamente para confirmar que essa é uma das escolhas. Se houver dois módulos cujas características anteriores sejam idênticas, o que tiver maior diferença de temperatura máxima será o mais eficaz.

Para o caso de fonte quente de temperatura constante, poderá escolher os módulos para a condição de potência objetivo conhecida, em que sabe a potência que quer obter e o programa devolve os módulos mais adequados, ou para a condição de potência máxima, em que sabe a área máxima disponível e o programa devolve os módulos mais adequados para gerar potência elétrica. Para o caso de uma fonte quente de fluxo de calor constante, o sistema faz os cálculos de modo a que a temperatura máxima da fonte nunca seja ultrapassada.

Nesta janela, o botão “Seguinte” não está disponível, uma vez que não foram definidos passos a tomar de seguida. O utilizador deverá, então, procurar o módulo que pretende utilizar, um dissipador que possa ser usado com esse módulo (caso aplicável) e estudar a sua prestação previsível em “Testar módulo conhecido”.

Testar módulo conhecido

Caso haja um módulo cuja capacidade de produção de energia elétrica queira conhecer a sua capacidade de gerar energia elétrica deverá usar esta funcionalidade. Para além do módulo, que deverá constar da base de dados do programa, deverá conhecer ainda as resistências térmicas associadas ao sistema (dadas na folha de especificações do dissipador de calor escolhido ou dependentes das propriedades do material por onde é transferido o calor). O primeiro passo consiste na escolha do módulo a testar e da definição do tipo de fonte de calor, como pode ser visto na Figura 7.



Fabricante	modelo	Tmax	S	R_i	R_th	Z	Área	Preço	Estado
Laird	HiTemp ET5,6,F1,2040	150	0,0245	0,98	4,77	0,0029	8	16,12	
Hi-Z	HZ-9	250	0,0308	0,7	1,79	0,0024	35,57	22,35	
Hi-Z	HZ-14	250	0,0154	0,1	1,11	0,0026	35,57	34,19	
Hi-Z	HZ-14HV	250	0,041	0,6	1,11	0,0031	38,42	34,19	
Marlow	TG12-4	200	0,0527	3,35	2,47	0,002	9	19,25	
Marlow	TG12-6	200	0,053	2,34	1,64	0,002	16,1	25,66	
Marlow	TG12-2,5	200	0,0533	5,6	3,72	0,0019	9	24,54	
Marlow	TG12-8	200	0,0526	1,66	1,26	0,0021	16,1	31,09	
Marlow	NL1013T	220	0,0295	7,42	16,2	0,0019	1,73	35,81	
Wakefield-vette	TEC-30-40-127	90	0,0513	4,76	4,57	0,0025	9	12,44	
Wakefield-vette	TEC-30-32-127	90	0,0513	3,05	2,93	0,0025	9	9,64	
Wakefield-vette	TEC-40-47-127	90	0,0513	3,04	2,98	0,0026	16	12,25	
Wakefield-vette	TEC-40-33-127	90	0,0513	1,4	1,37	0,0026	16	12,91	
Wakefield-vette	TEC-30-36-127	90	0,0513	3,97	3,81	0,0025	9	10,18	
Wakefield-vette	TEC-30-47-71	90	0,0287	1,7	5,34	0,0026	9	9,85	
Wakefield-vette	TEC-30-38-71	90	0,0287	1,1	3,47	0,0026	9	9,85	
Wakefield-vette	TEC-40-38-127	90	0,0513	1,98	1,94	0,0026	16	12,91	
Wakefield-vette	TEC-20-33-31	90	0,0125	0,34	5,62	0,0026	4	8,88	
Wakefield-vette	TEC-30-33-71	90	0,0513	1,4	1,37	0,0026	9	12,18	
CUI	CP60133	80	0,0127	0,49	7,42	0,0024	2,25	14,08	
CUI	CP60233	80	0,0287	1,12	3,28	0,0024	4	15,1	
Laird	ThermaTEC HT4-12-F2-4040	175	0,0487	3	2,96	0,0023	17,52	38,29	
Laird	HiTemp ET6,12,F1,4040	150	0,0491	1,63	1,99	0,0029	16	21,14	
Laird	ThermaTEC HT6,12,F2,4040	175	0,0487	1,91	1,84	0,0023	17,52	38	
European Thermodynamics	GM250-71-14-16	250	0,0332	1,26	2,71	0,0024	9	26,92	
European Thermodynamics	GM200-31-28-12	200	0,0107	0,1	2,14	0,0025	9	27,42	
European Thermodynamics	GM200-49-45-30	200	0,0159	0,17	1,51	0,0022	38,44	71,93	
European Thermodynamics	GM200-161-12-20	200	0,0528	5,24	4,41	0,0023	16	39,23	
European Thermodynamics	GM200-161-12-40	200	0,0565	10,24	7,53	0,0023	16	68,56	
European Thermodynamics	GM250-161-12-20	250	0,0513	5,54	4,66	0,0022	16	49,33	
Hi-Z	HZ-2	250	0,0308	2,5	6,12	0,0023	12,2	25,92	

Figura 7 - Janela de seleção da fonte quente e módulo de estudo para o teste de módulo conhecido.

A escolha do tipo de fonte faz-se através da caixa de combinação e a escolha do módulo faz-se clicando num módulo da lista, ficando o módulo selecionado como se vê na figura.

Estando as duas seleções feitas, o botão “Seguinte” leva para a janela de caracterização das condições do sistema, à semelhança do caso da seleção do módulo ótimo. Esta janela pode ser vista na Figura 8. Neste caso, a janela demonstrada é para a situação de uma fonte quente com fluxo de calor constante. À semelhança da secção anterior, no entanto, a janela é idêntica na situação de fonte quente com temperatura constante.

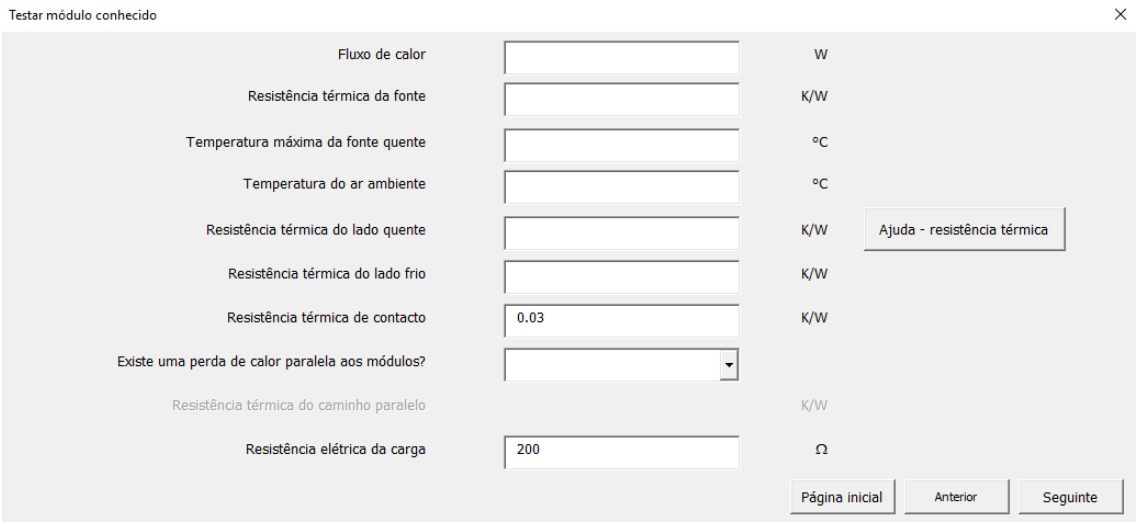


Figura 8 - Janela para introdução das condições para o teste de um módulo conhecido no caso de uma fonte quente de fluxo de calor constante.

Nesta janela a resistência de contacto bem também pré-definida, com um valor comum para uma utilização com uma pasta térmica como material de interface e pressão de contacto elevada, as condições de montagem ideais. No entanto, à semelhança da resistência elétrica da carga, pode ser alterada simplesmente alterando o texto da caixa de texto correspondente.

Os resultados do teste surgem numa janela semelhante à da Figura 9.

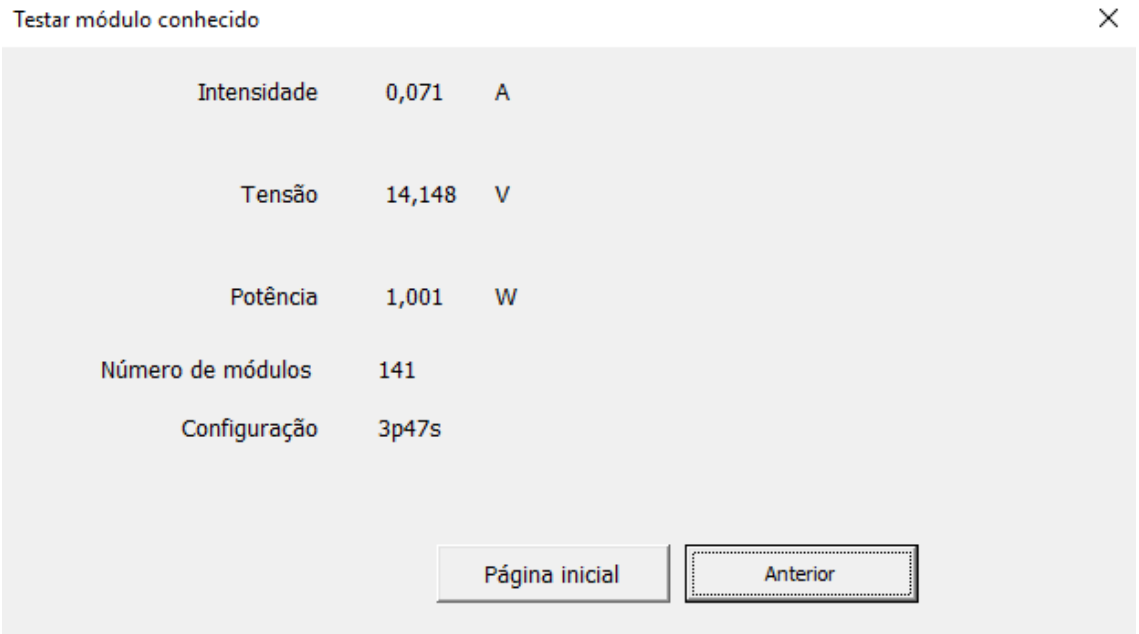


Figura 9 - Janela de resultados do teste a um módulo conhecido.

Nesta janela podem ver-se os dados esperados para um sistema com o módulo em teste. São devolvidos a intensidade da corrente, a tensão e a potência elétrica gerada, bem como o número de módulos a utilizar. Por defeito, os módulos devem ser ligados eletricamente em série. No entanto, caso a configuração mais vantajosa seja outra, esta vem também indicada na janela, como se pode ver na Figura 9, na indicação "Configuração". Esta segue uma lógica do tipo αpβs, onde α representa o número de módulos em paralelo (p) e β o número de módulos em série (s).

No caso da Figura 9, isto corresponderia a um sistema com 3 conjuntos de módulos ligados em paralelo, cada conjunto constituído por 47 módulos ligados em série. A título de exemplo podem ser observadas as seguintes configurações para um conjunto de 4 módulos (representados como fontes de tensão DC):

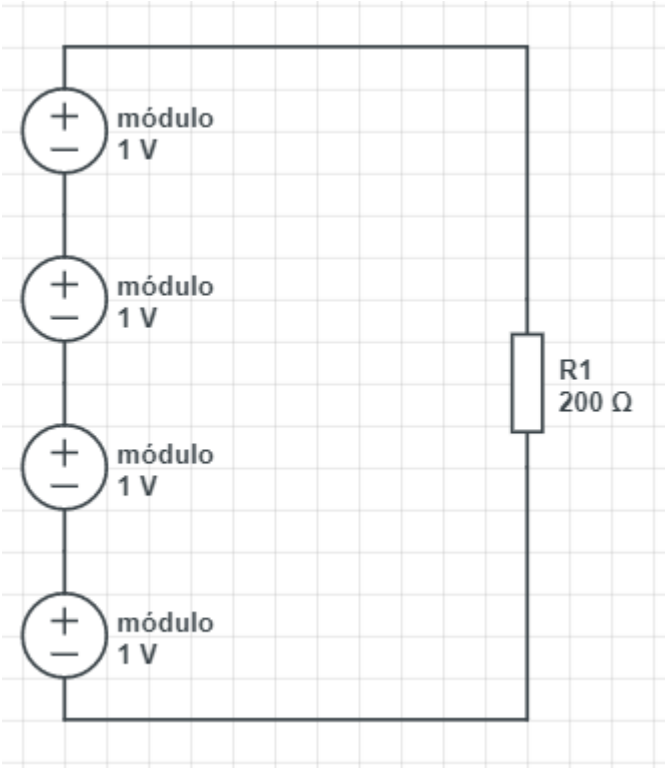


Figura 10 - 4 módulos numa configuração 1p4s.

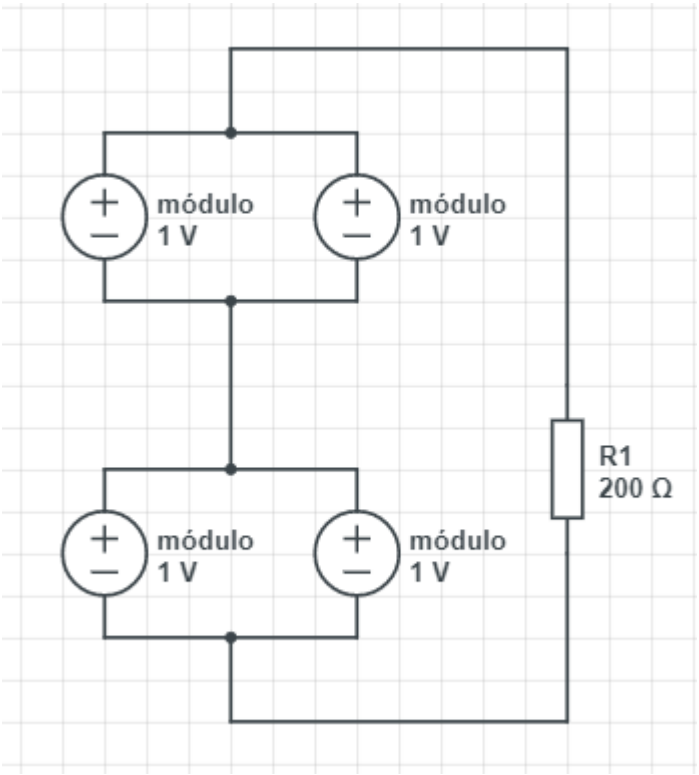


Figura 11 - 4 módulos numa configuração 2p2s.

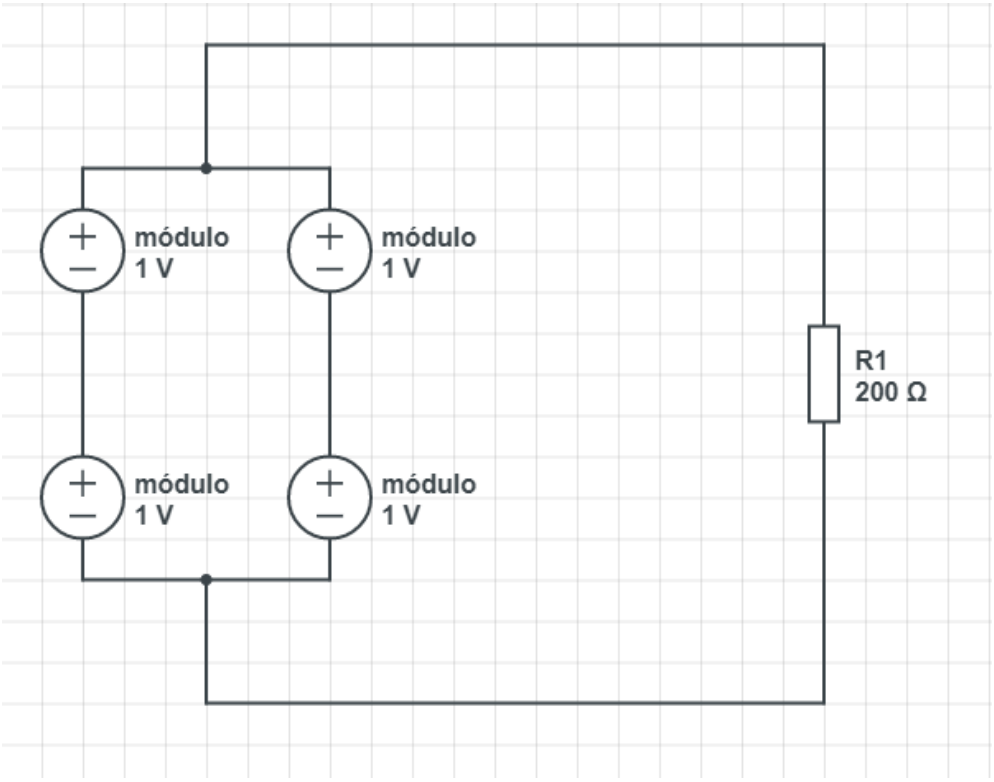


Figura 12 - 4 módulos numa configuração 2p2s.

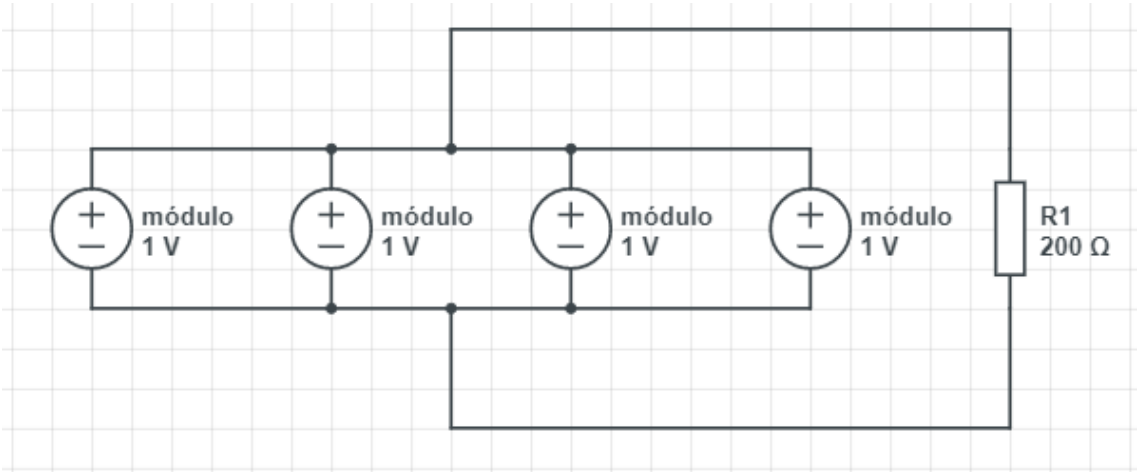


Figura 13 - 4 módulos numa configuração 4p1s.

Gerir módulos

De modo a fazer a gestão dos módulos disponíveis na base de dados foi criado um caminho que permite essa operação. Existem três funcionalidades: ativar, inativar e remover os módulos já presentes na base de dados ou adicionar módulos novos ou adicionar módulos novos. A janela que permite escolher entre estas duas funcionalidades está visível na Figura 14.

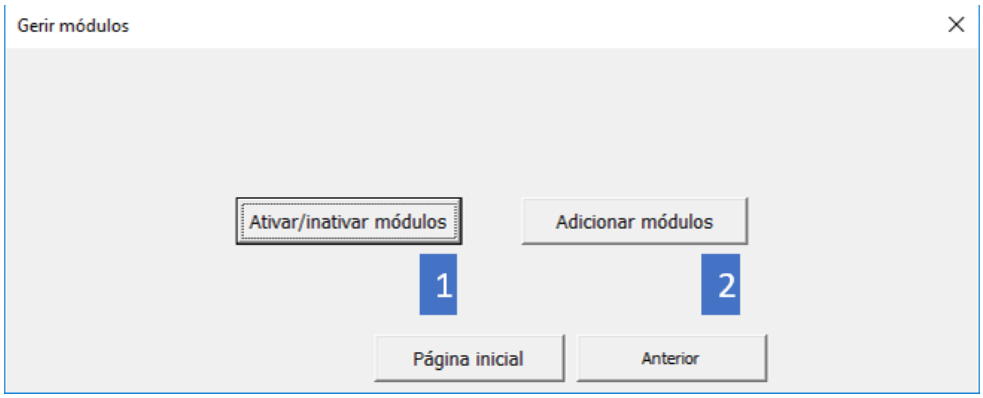


Figura 14 - Janela inicial na gestão de módulos.

Usando os botões respetivos é então possível:

1. Ativar/inativar módulos – ativar, inativar ou remover módulos da base de dados.
2. Adicionar módulos – permite adicionar módulos à base de dados.

A funcionalidade de ativar ou inativar módulos torna-os elegíveis ou não, respetivamente, para serem indicados como módulos de melhores prestações na funcionalidade de seleção do módulo ótimo. Esta ação é reversível a qualquer momento, voltando à janela que permite ativar ou inativar módulos, visível na Figura 15.

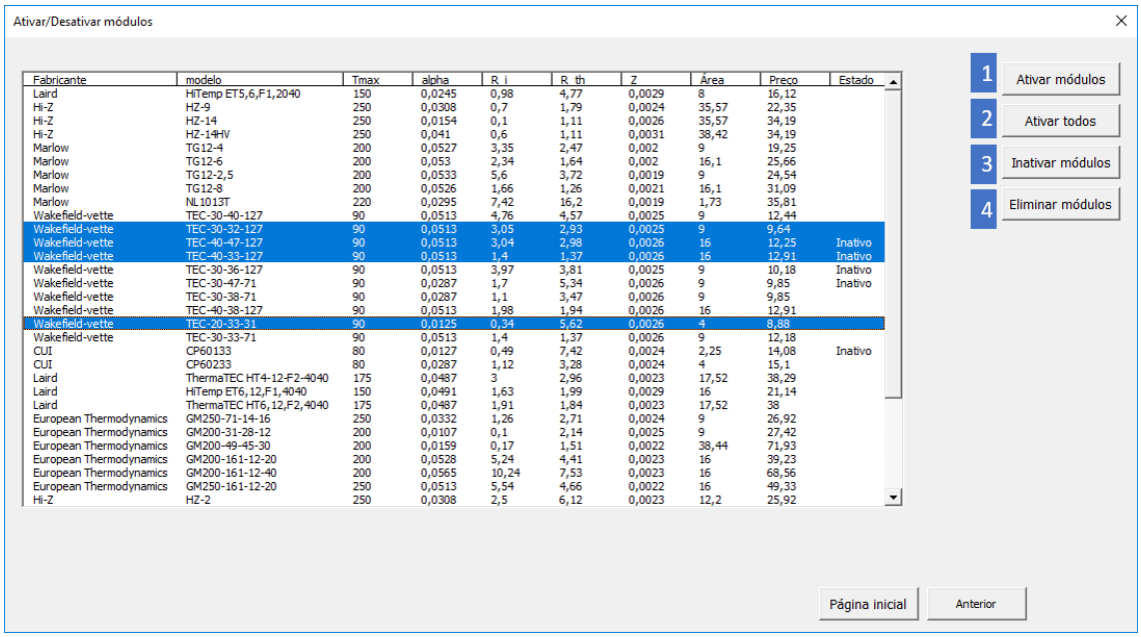


Figura 15 - Janela para ativar, inativar e eliminar módulos.

Nesta janela é possível:

1. Ativar módulos – ativa os módulos selecionados (a azul na Figura 15). Caso haja módulos selecionados que já estejam ativos, permanecerão assim..
2. Ativar todos – ativa todos os módulos inativos.
3. Inativar módulos – Inativa todos os módulos selecionados (a azul na Figura 15). Caso haja módulos selecionados que já estejam inativos, permanecerão assim.
4. Eliminar módulos – elimina definitivamente os módulos selecionados (a azul na Figura 15). Esta ação não é reversível.

Ativar ou inativar os módulos permite que eles sejam elegíveis, ou não, para serem selecionados como tendo as melhores prestações pela funcionalidade de seleção do módulo ótimo. Eliminar os módulos remove-os permanentemente da base de dados, ficando de fora das escolhas de módulo ótimo bem como da lista usada para selecionar o módulo a testar.

Quando é escolhida a funcionalidade de adicionar módulos, a primeira escolha a fazer é selecionar o tipo de módulo a adicionar, uma vez que isso influencia as informações que é preciso recolher. Tal é feito através da janela da Figura 16.

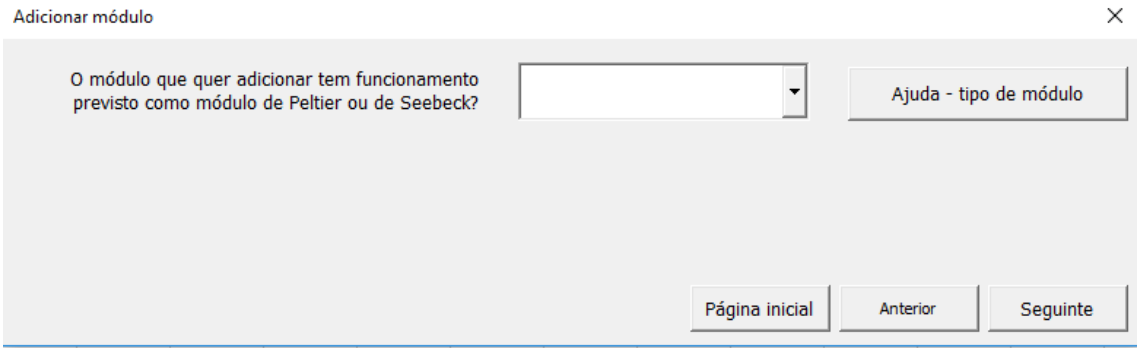


Figura 16 - Janela de seleção do tipo de módulo a adicionar.

O tipo de módulo é escolhido a partir da caixa de combinação ao centro da janela. Um módulo de Seebeck é um módulo termoelétrico desenhado especificamente para a produção de energia elétrica a partir de diferenças de temperatura. Um módulo de Peltier é um módulo termoelétrico desenhado para provocar diferenças de temperatura ou fluxos de calor quando percorrido por corrente elétrica, ou seja, para aquecer, arrefecer ou manter uma diferença de temperatura.

Tendo escolhido o tipo de módulo é necessário introduzir informações relativas ao módulo. Foram escolhidos parâmetros comummente presentes nas folhas de especificações dos fabricantes, devidamente identificados e com as unidades de medida adequadas, como se pode ver na Figura 17.

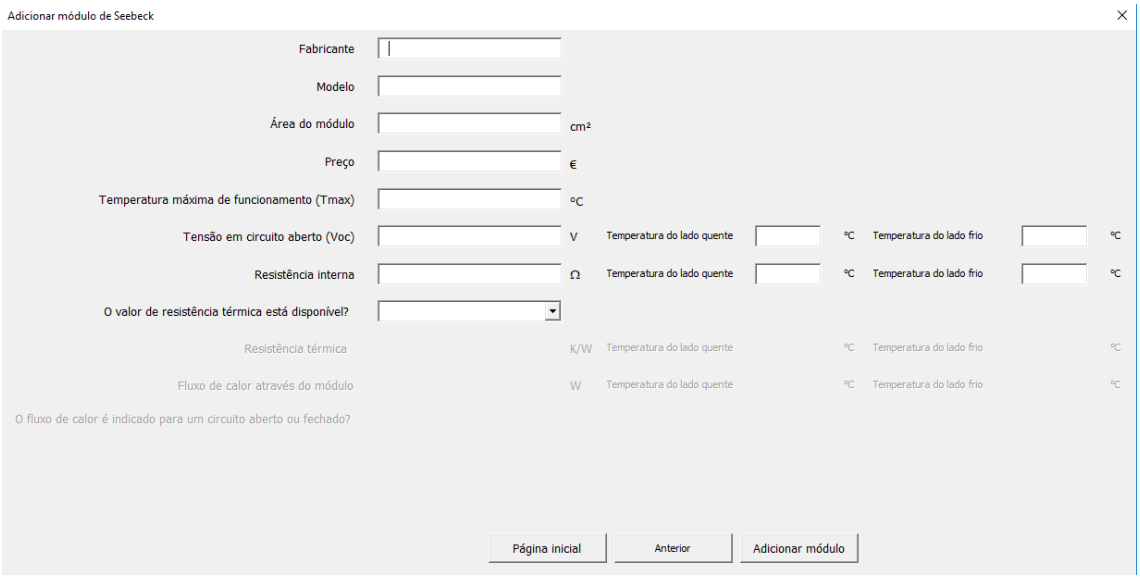


Figura 17 - Janela para a adição de um módulo de Seebeck.

Na Figura 17 pode ver-se a janela para a adição de um módulo de Seebeck, onde os parâmetros requeridos obrigam a que sejam introduzidas as temperaturas das faces quente e fria dos módulos. Para um módulo de Peltier, a janela é simplificada.

Quando clica em "Adicionar módulo" é apresentada uma mensagem a confirmar que o módulo foi adicionado à base de dados. Na eventualidade de haver erros na introdução de dados, será informado por uma mensagem e o cursor será colocado na caixa de texto onde o erro foi detetado.

Avançadas

Em "Avançadas" poderá alterar parâmetros de cálculo que, à partida, não precisam de ser alterados com frequência. Entre eles incluem-se a temperatura da folha de especificações do fabricante na pesquisa pelo módulo ótimo, útil caso haja um fabricante que forneça folhas de especificações com temperaturas do lado quente diferentes do padrão, ou alterar o valor de Z, valor de mérito de um material termoelétrico, na escolha do módulo ótimo. Esta alteração pode ser feita de 3 métodos distintos, como pode ser visto na Figura 18.

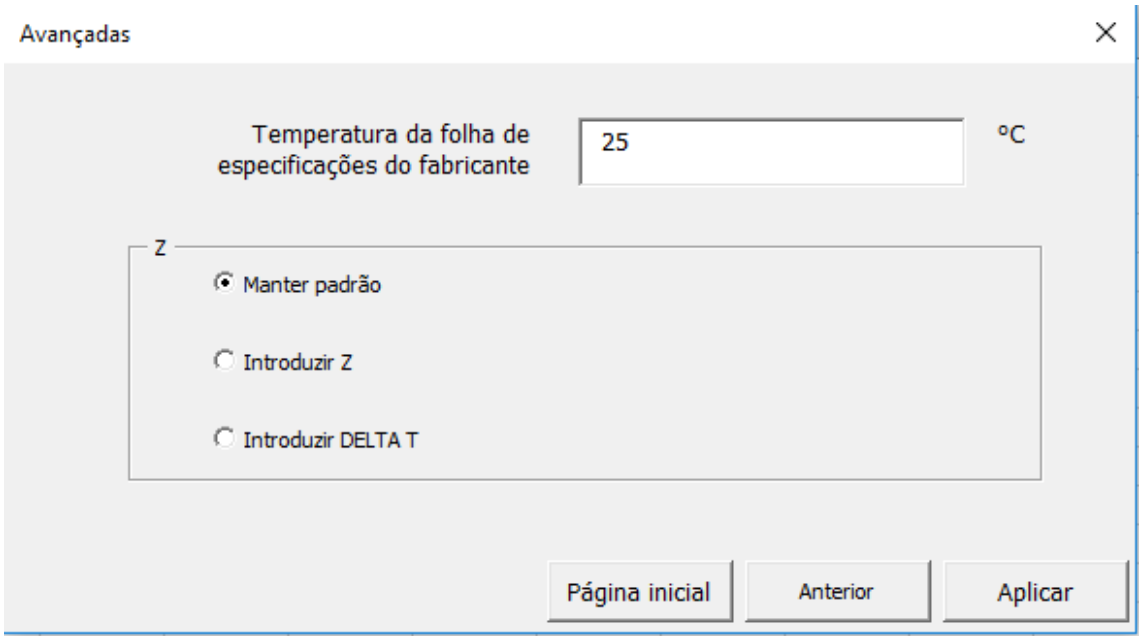


Figura 18 - Janela de opções avançadas.

O padrão utiliza a média dos valores de Z dos módulos registados na base de dados. Também é possível introduzir manualmente o valor de Z ou introduzir o valor da diferença de temperaturas máxima entre as faces do módulo de Peltier, um indicador do valor de mérito desse módulo.

Como obter a maior potência possível

Para um mesmo módulo termoelétrico, a potência gerada depende da diferença de temperatura entre as suas faces. Como tal, de modo a obter a maior potência, essa diferença deve ser maximizada. Assumindo que as temperaturas das fontes quente e fria não podem ser alteradas (habitual num sistema de aproveitamento de calor residual), a diferença de temperaturas pode ser maximizada aumentando o contacto térmico entre sólidos ou aumentando as dimensões do dissipador de calor. No caso do dissipador, a sua posição também influencia, devendo estar alinhado com o fluxo de gás/líquido (caso exista).

Limitações do programa

A ferramenta permite apenas sugerir o módulo ótimo e verificar o funcionamento dos módulos conhecidos. O módulo ótimo, embora seja tecnologicamente possível, poderá não existir por se tratar de uma aplicação muito específica.

A ferramenta não consegue avaliar as condições do sistema, como as resistências elétricas e térmicas exteriores aos módulos ou as temperaturas das fontes quente e fria.

A ferramenta foi desenhada para módulos que utilizam como material termoelétrico o telureto de bismuto (Bi_2Te_3). Como tal, a temperatura máxima da fonte quente não deverá passar os 250˚C, e não devem ser adicionados módulos que utilizem outros materiais termoelétricos.

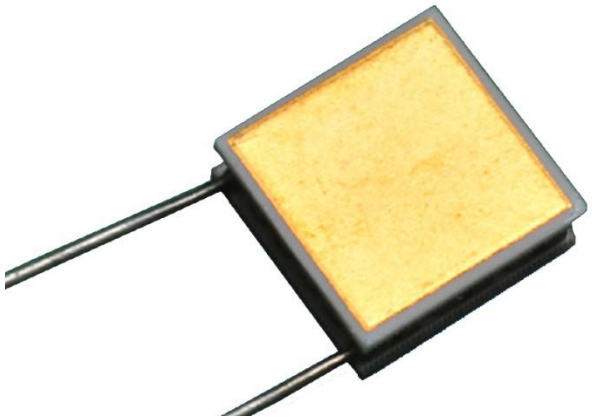
Estratégias comerciais dos fabricantes, vendedores ou alterações das taxas de câmbio podem alterar o preço dos módulos registados na base de dados. Os preços dos diferentes módulos termoelétricos estão corretos à altura da publicação para remessas de 20 unidades. Servem apenas de comparação, não dispensando consulta dos preços praticados no momento.

ANEXO B: Folha de especificações do módulo Marlow NL1013T

Este anexo contém a folha de especificações do módulo termoelétrico NL1013T, usado para verificar analiticamente a validade dos diferentes métodos de cálculo das propriedades termoelétricas de um módulo de Peltier.

Technical Data Sheet for NL1013T

Single-Stage Thermoelectric Module



NOMINAL PERFORMANCE IN VACUUM

Hot Side Temperature (°C)	27	50
Δ Tmax (°C):	61	69
Qmax (watts):	4.8	5.4
Imax (amps):	1.0	1.0
Vmax (vdc):	8.5	9.6
AC Resistance (ohms):	7.42	--
Device ZT	0.77	--

PRODUCT FEATURES

- RoHS EU Compliant
- Maximum process temperature is 220°C.
- Ceramic Material: Aluminum Oxide
- Metallized Exterior Surfaces are Au flash, suitable for soldering.
- RTV Sealing options available.

ORDERING OPTIONS

Model Number	Description
NL1013T-01AC	TEM, Top and Base Metallized Exterior
NL1013T-02AC	TEM, Base Metallized Exterior
NL1013T-03AC	TEM, No Metallized Exterior
NL1013T-04AC	TEM, No Metallized Exterior, RTV, Sealed, Special Wires

OPERATION CAUTIONS

For maximum reliability, storage and operation below 130°C in a non-condensing environment is recommended. To minimize thermal stress, use linear/proportional temperature control or a similar method rather than an ON/OFF method.

INSTALLATION

Recommended mounting methods: Bonding with thermal epoxy or soldering with metallized ceramics. For additional information, please refer to our TEC Installation Guide.

II-VI Marlow – Dallas, TX USA
214-340-4900
877-627-5691
marlow.sales@ii-vi.com

Marlow Industries Europe
GmbH - Germany
+49 (0) 6150 5439 - 403
info@marlow-europe.eu

II-VI Japan Inc.
81 43 297 2693 (tel)
center@ii-vi.co.jp
www.ii-vi.co.jp

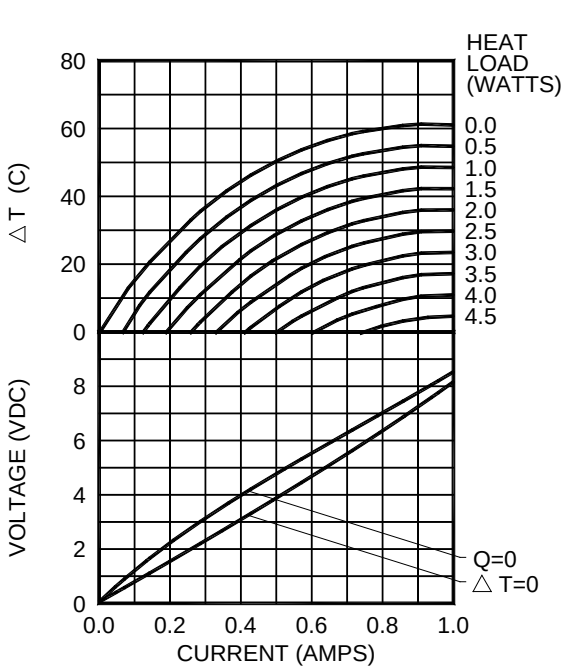
II-VI Singapore Pte., Ltd.
(65) 6481 8215 (tel)
info@ii-vi.com.sg

Marlow Industries China, II-VI
Technologies Beijing
86-10-643 98226
info@iivibj.com

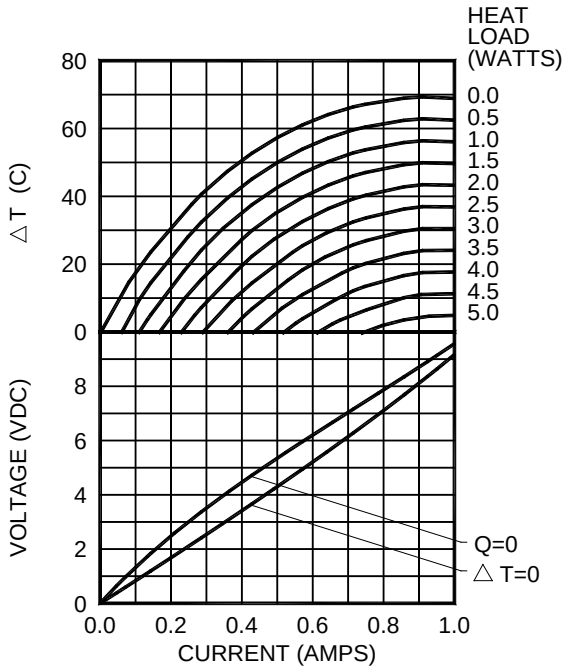
TYPICAL PERFORMANCE CURVES

ENVIRONMENT: 10^-5 TORR VACUUM

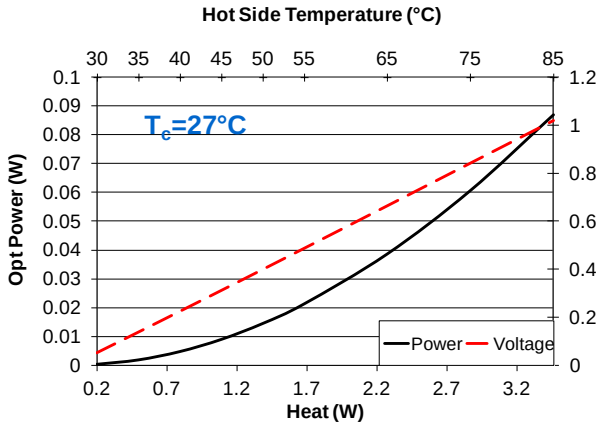
Hot Side Temperature: 27°C

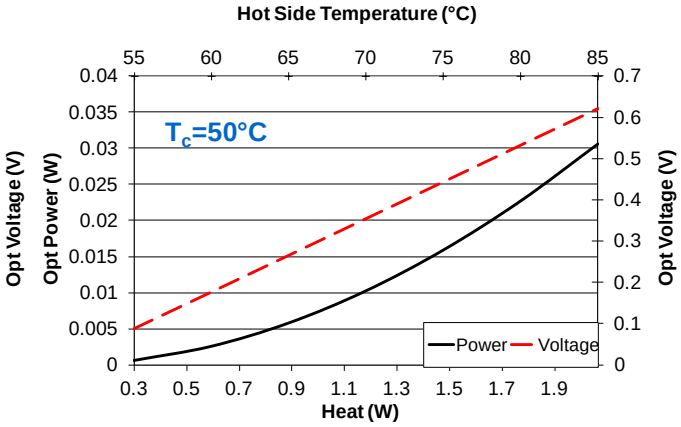


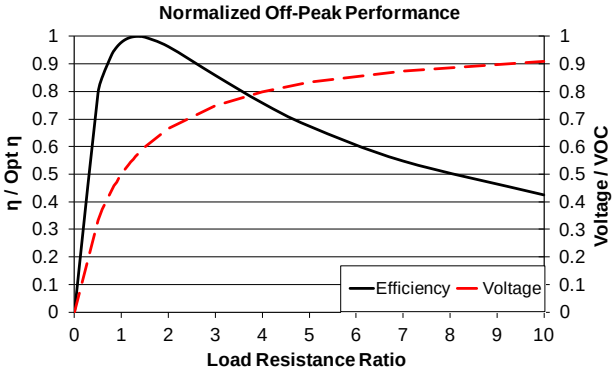
Hot Side Temperature: 50°C



POWER GENERATION PERFORMANCE CURVES

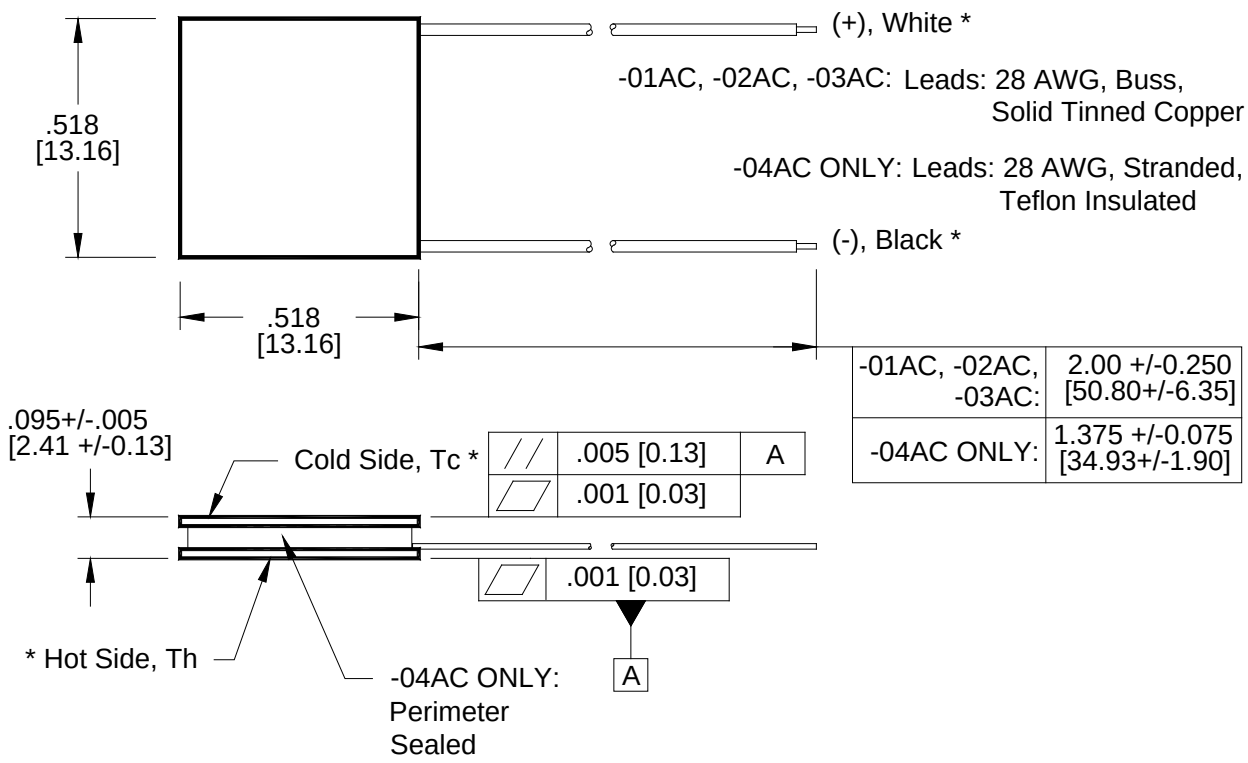






Hot Side Temperature (°C)	85	55	35
Cold Side Temperature (°C)	27	27	27
Optimum Efficiency, η (%)	2.52	1.28	0.37
Optimum Power (W)	0.087	0.021	0.002
Optimum Voltage (V)	1.021	0.487	0.138
Load Resistance for Opt η (Ω)	12.00	11.20	10.65
Open Circuit Voltage, VOC (V)	1.79	0.85	0.24
Short Circuit Current (A)	0.20	0.10	0.03
Thermal Resistance (°C/W)	16.86	16.88	16.85

MECHANICAL CHARACTERISTICS



Dimensions are in inches, and millimeters are in [ ].

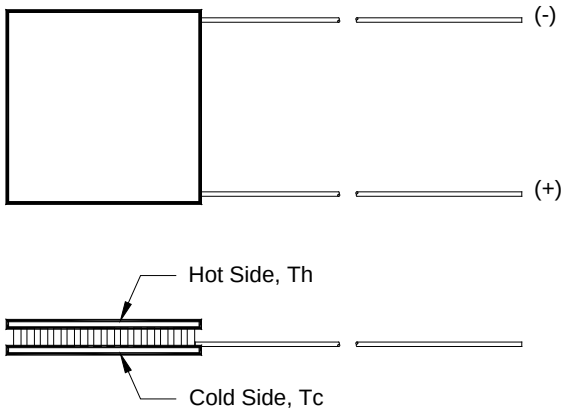
***NOTE: Cold side, hot side, positive leads, and negative leads are valid only for thermoelectric cooling. For power generation, see below.**

For customer support or general questions please contact a local office or visit our website at www.marlow.com.

Power Generation performance information is given in a nitrogen environment and cold side temperatures of 27°C and 50°C. Module temperature does not include thermal resistance of heat sinks. For performance information in vacuum, other cold side temperatures, or specific heat sinks, consult one of our applications engineers.

TYPICAL POWER GENERATION CONFIGURATION

EXAMPLE:



ANEXO C: Folha de especificações do módulo CUI CP40136

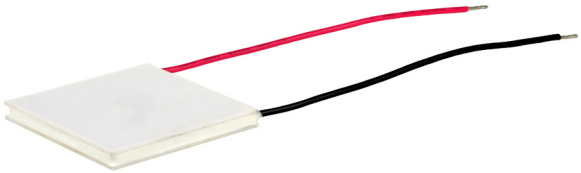
Este anexo contém a folha de especificações do módulo termoelétrico CP40136, usado para verificar experimentalmente a validade dos diferentes métodos de cálculo das propriedades termoelétricas de um módulo de Peltier.

CUI INC®

SERIES: CP40 | DESCRIPTION: PELTIER MODULE

FEATURES

- arcTEC™ structure on select models
- solid state device
- precise temperature control
- quiet operation



RoHS

MODEL	input voltage[1] max (Vdc)	input current[2] max (A)	internal resistance[3] typ (Ω±10%)	output Qmax[4] T_h=27°C (W)	output Qmax[4] T_h=50°C (W)	output ΔTmax[5] T_h=27°C (°C)	output ΔTmax[5] T_h=50°C (°C)
CP40136	3.8	4.0	0.80	8.1	9.0	66	72
CP40236	8.6	4.0	2.0	18.7	21.8	66	72
CP40336	15.4	4.0	3.5	33.4	37.3	66	72
CP40147	2.1	4.0	0.42	4.2	4.6	68	75
CP40247	3.8	4.0	0.77	7.5	8.3	68	75
CP40301547	4.2	4.0	0.87	8.4	9.2	68	75
CP40347[6]	8.6	4.0	1.76	19.6	21.6	70	77
CP40447[6]	15.4	4.0	3.15	32	35.2	70	77

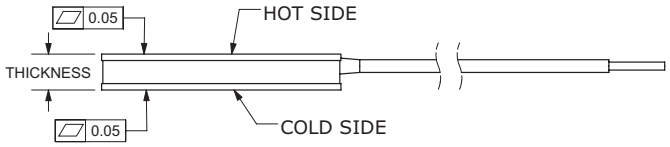
Notes:
1. Maximum voltage at ΔT max and T_h=27°C
2. Maximum current to achieve ΔT max
3. Measured by AC 4-terminal method at 25°C
4. Maximum heat absorbed at cold side occurs at I_{max}, V_{max}, and ΔT=0°C
5. Maximum temperature difference occurs at I_{max}, V_{max}, and Q=0W (ΔT max measured in a vacuum at 1.3 Pa)
6. Designed with arcTEC™ structure.

SPECIFICATIONS

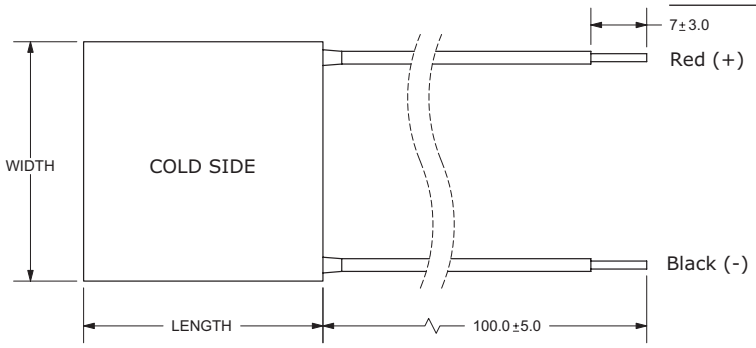
parameter	conditions/description	min	typ	max	units
solder melting temperature	connection between thermoelectric pairs CP40347, CP40447, CP40147, CP40247, CP40301547 all other models	235 138			°C °C
assembly compression				1	MPa
hot side plate				80	°C
RoHS	yes				

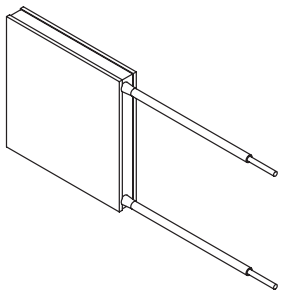
MECHANICAL DRAWING

units: mm



	MATERIAL	PLATING
ceramic plate	96% AL_2O_3	
wire leads (3.6 mm models)	22 AWG	tin
wire leads (all other models)	20 AWG	tin
sealer	silicon rubber 703 RTV (between cold and hot side plates)	
joint cover	silicon rubber 703 RTV	
marking	P/N & S/N printed on cold side surface	

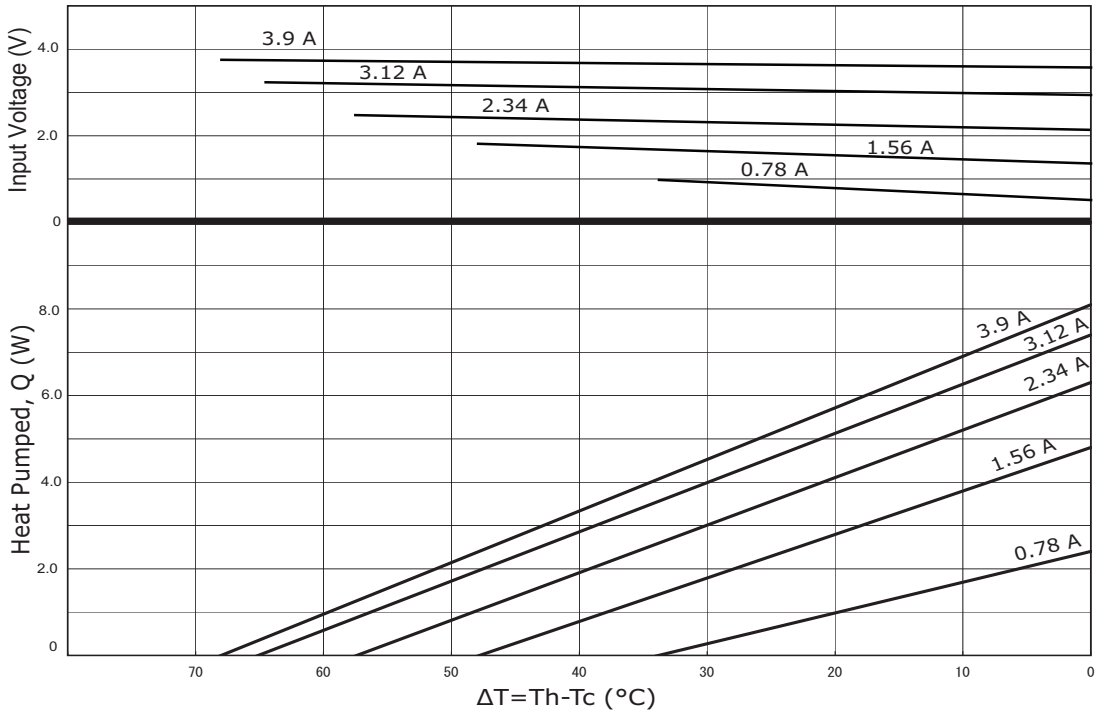




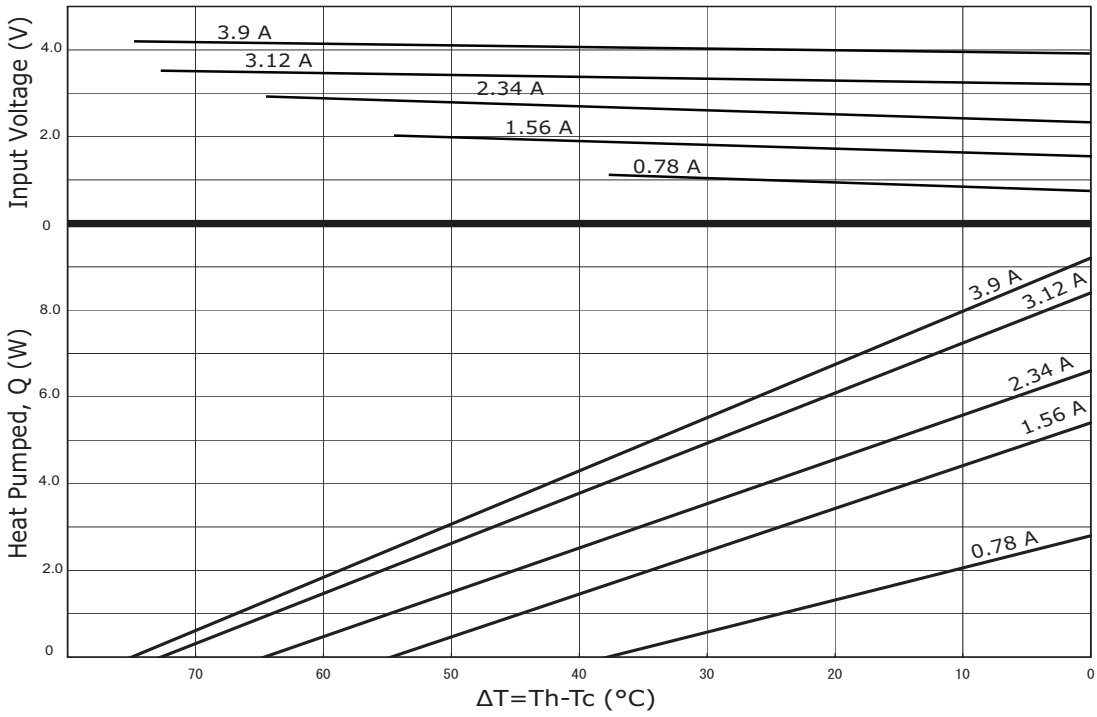
MODEL NO.	LENGTH (mm)	WIDTH (mm)	THICKNESS (mm)
CP40136	15 ±0.3	15 ±0.3	3.6 ±0.1
CP40236	20 ±0.3	20 ±0.3	3.6 ±0.1
CP40336	30 ±0.3	30 ±0.3	3.6 ±0.1
CP40147	15 ±0.3	15 ±0.3	4.62 ±0.1
CP40247	20 ±0.3	20 ±0.3	4.62 ±0.1
CP40301547	30 ±0.3	15 ±0.3	4.62 ±0.1
CP40347[1]	30 ±0.3	30 ±0.3	4.6 ±0.1
CP40447[1]	40 ±0.3	40 ±0.3	4.6 ±0.1

Notes: 1. Wire lead strip length on models CP40347 & CP40447 is 10 ±3.0 mm.

CP40136 PERFORMANCE (Th=27°C)



CP40136 PERFORMANCE (Th=50°C)



REVISION HISTORY

rev.	description	date
1.0	initial release	09/03/2009
1.01	applied new template	05/08/2012
1.02	added new models	09/08/2016
1.03	changed models CP40347 & CP40447 to arcTEC™ structure	12/01/2017
1.04	changed thickness of CP40147, CP40247, CP40301547 models	09/19/2018

The revision history provided is for informational purposes only and is believed to be accurate.

CUI INC®

Headquarters
20050 SW 112th Ave.
Tualatin, OR 97062
800.275.4899

Fax 503.612.2383
cui.com
techsupport@cui.com

CUI offers a one (1) year limited warranty. Complete warranty information is listed on our website.

CUI reserves the right to make changes to the product at any time without notice. Information provided by CUI is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by CUI for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use.

CUI products are not authorized or warranted for use as critical components in equipment that requires an extremely high level of reliability. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

ANEXO D: Abstract submetido para congresso

O seguinte "*Extended Paper*" foi aceite e será apresentado no congresso *M2D 2019 – 8th International Conference Mechanics and Materials in Design*, a decorrer entre 4 e 6 de setembro de 2019 na Universidade de Bolonha, em Itália, e é baseado no trabalho desta dissertação.

PAPER REF: (to be assigned by the editors)

METHODS TO OBTAIN THERMOELECTRIC COOLER PROPERTIES AND PERFORMANCE EVALUATION AS GENERATOR

J.M. Ferraz[1], P.T.C. Peixoto[3], S.I.S Pinto[1,2(*)]

[1]Engineering Faculty, University of Porto, Porto, Portugal
[2]Institute of Science and Innovation in Mechanical and Industrial Engineering (LAETA-INEGI), Porto, Portugal
[3]Centre for Nanotechnology and Smart Materials (CeNTI), Vila Nova de Famalicão, Portugal
[(*)]*Email:* spinto@fe.up.pt

ABSTRACT

This work compares three different methods (Lineykin, Luo, Palacios) to obtain the properties of a thermoelectric cooler through a developed numerical tool in *Visual Basic*. Then, the obtained results were compared with the manufacturer information as power generators. The Palacios model is aligned, more closely, with the manufacturer data. Later, the properties obtained were introduced in an analytical power prediction model and compared with experimental data. The same model (Palacios) shows more reliable results.

Keywords: thermoelectrity, TEC, TEG, thermoelectric generator, properties estimation, numerical tool development.

INTRODUCTION

Recovery of waste energy has become a topic of increased interest due to the increased energy needs and efficiency demand. In addition, nowadays, increased use of portable or remotely located sensors and communication systems creates the need for reliable, self-sufficient power sources. Thermoelectric generators (TEG) are a suitable candidate to solve these problems, due to its abilities to generate electrical power with very small temperature differences and its solid-state construction that implies maintenance free operations. The high price of dedicated generators is a disadvantage. However, thermoelectric coolers (TEC) are much cheaper and can also be used as TEG (Nesarajah, 2016). Given its purpose, thermoelectric properties of TEC are rarely made available to users. Therefore, methods need to be employed to enable performance prediction.

In order to evaluate the thermoelectric properties, three methods were tested, relying on the manufacturer performance curves - Palacios et al., 2009 - or maximum performance values - Lineykin and Ben-Yaakov, 2007; Luo, 2008. The information obtained, through a developed tool in *Visual Basic*, was then compared with the data provided by the manufacturer or measured in the laboratory. A commercially available TEC was used for the tests.

METHODOLOGY

In the first part of the test, the thermoelectric properties of a commercially available module, Marlow NL1013T, were calculated from its performance curves as a TEC. Given the module is designed to be used both as a TEC and a TEG, the manufacturer also provides performance curves for the module's capability as a TEG. The module's properties according to the three

different methods - Lineykin, Luo and Palacios - are used to calculate the module's performance as a TEG and the data compared.
In the second part of the test, a commercially available TEC module, CUI CP40136, is placed on a heating band, as presented in Fig. 1, to be used as a TEG. The thermoelectric properties were calculated according to the three methods - Lineykin, Luo and Palacios - through the developed tool and the results were compared. The experimental setup was chosen to enable temperature readings with a thermal camera, screenshot seen in Fig. 2, with the objective of eliminating thermal contact resistance in the temperature measurement.

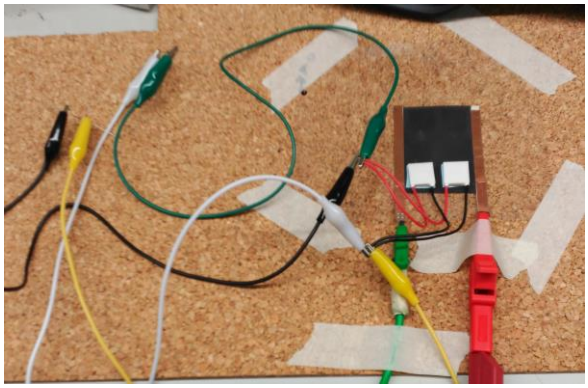


Fig. 1 - Experimental setup

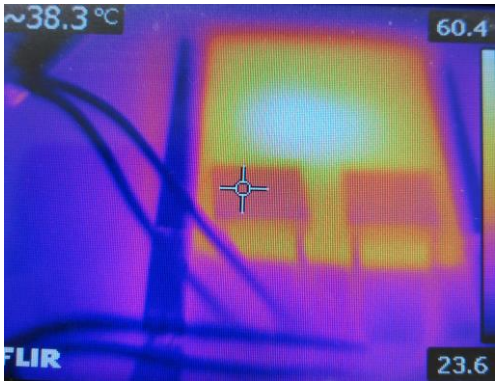


Fig. 2 - Thermal camera screenshot

RESULTS AND CONCLUSIONS

Table 1 shows the results of the properties estimation, for the NL1013T module, with the analytical method identified by the authors, using the data from the spec sheet for 50˚C hot side. The generated power was predicted by:

$$P = \left(\frac{S\Delta T}{R_i + R_L}\right)^2 \times R_L \tag{1}$$

where R_L is the electrical resistance of the load attached to the module and ΔT is the temperature difference across the module. The load resistance was equalled to the internal resistance, a common practice known as "load matching" and believed to have been used by the manufacturer. The comparison between the calculated values obtained by the developed numerical tool and manufacturer data is presented in Table 2 for the generated power and in Table 3 for the open circuit voltage. Cold side is maintained at 27˚C while hot side temperature is varied. The method that shows closer results to the manufacturer's claim is Palacios' method.

Table 1 - Calculated properties according to the different methods for the NL1013T module

Property	Lineykin	Luo	Palacios
S (V/K)	0.0297	0.0276	0.0310
R_i (Ω)	7.55	7.00	9.20
R_{th} (K/W)	18.28	19.72	21.14

Table 2 - Generated power [W] at different hot side temperatures according to the different methods and the manufacturer

	T_H=35˚C	T_H=55˚C	T_H=85˚C
Lineykin	0.002	0.024	0.096
Luo	0.002	0.022	0.089
Palacios	0.002	0.021	0.085
Manufacturer	*0.002*	*0.021*	*0.087*

Table 3 - Open circuit voltage [V] at different hot side temperatures according to the different methods and the manufacturer

	T_H=35˚C	T_H=55˚C	T_H=85˚C
Lineykin	0.231	0.822	1.734
Luo	0.214	0.762	1.608
Palacios	0.241	0.857	1.809
Manufacturer	*0.24*	*0.85*	*1.79*

The thermoelectric properties, for the CUI CP40136 module, used in the experimental tests, are shown in Table 4. For this test, the heating band was powered by a power source. The temperature of the heating band and of the cold side of the module was measured, as well as the open circuit and closed circuit voltage. The measured values were compared with those obtained by the developed numerical tool. Hot side temperature varied between 52.3˚C and 51.3˚C and cold side temperature varied between 47.9˚C and 47.4˚C. The circuit was closed using a 1.10Ω load (including wires and contact electric resistance) for a single module, 2.15Ω for two modules in series and 0.60Ω for two modules in parallel. The results are presented in Table 5, Table 6 and Table 7.

Table 4 - Calculated properties according to the different methods for the CP40136 module

Property	Lineykin	Luo	Palacios
S (V/K)	0.0127	0.0111	0.0131
R_i (Ω)	0.74	0.65	0.95
R_{th} (K/W)	11.13	12.74	14.21

Table 5 - Calculated and measured voltage in open-circuit and closed-circuit assemblies for a single module

	Open-circuit voltage [V]	Closed-circuit voltage [V]
Lineykin	0.0426	0.0193
Luo	0.0383	0.0187
Palacios	0.0463	0.0177
Experimental results	*0.0422*	*0.0167*

Table 6 - Calculated and measured voltage in open-circuit and closed-circuit assemblies for modules in series

	Open-circuit voltage [V]	**Closed-circuit voltage [V]**
Lineykin	0.0953	0.0414
Luo	0.0840	0.0400
Palacios	0.1014	0.0399
Experimental results	*0.0901*	*0.0348*

Table 7 - Calculated and measured voltage in open-circuit and closed-circuit assemblies for modules in parallel

	Open-circuit voltage [V]	**Closed-circuit voltage [V]**
Lineykin	0.0466	0.0184
Luo	0.042	0.0177
Palacios	0.0507	0.0179
Experimental results	*0.0453*	*0.0164*

In these tests, the Lineykin method shows, on average, the smallest error. However, the measured voltage, both in open-circuit and closed-circuit, presents deviations in different directions. The Palacios method shows higher differences between calculated and measured values, but consistent in direction and module. Therefore, it is believed that this is due to several circumstances, not taking into consideration, in the experimental method. The difference in values, with predictions using values according to the Palacios method showing higher voltage in every scenario, might be due to poorly calculated thermal contact resistance. It was considered a value of 3,5K/W – Nesarajah and Frey, 2016; Hansson et al.,2016 - accounting for the low contact pressure applied. It is possible that this value might have been even higher, as the modules separated more than once from the thermal pads. Comparison between the numerical results with the manufacturer data for the NL1013T module (see Table 2 and Table 3) also leads that Palacios method is the most accurate.

ACKNOWLEDGMENTS

Authors gratefully acknowledge the Engineering Faculty of University of Porto (FEUP), the Department of Mechanical Engineering (DEMec) of FEUP, the Institute of Science and Innovation in Mechanical and Industrial Engineering (LAETA-INEGI) and the Centre for Nanotechnology and Smart Materials (CeNTI).

REFERENCES

Nesarajah M, Frey G. Thermoelectric power generation: Peltier element versus thermoelectric generator. Thermoelectric power generation: Peltier element versus thermoelectric generator, 2016, p. 4252-4257.

Hansson J et al. Review of Current Progress of Thermal Interface Materials for Electronics Thermal Management Applications. 2016 IEEE 16th International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO), 2016, p. 371-374.

Lee S et al. Thermal Interface Material Performance in Microelectronics Packaging Applications. Microelectronics Journal, 1997, volume 28, nº 1, p. xiii-xx.

Lineykin S, Ben-Yaakov S. Modelling and Analysis of Thermoelectric Modules. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, vol. 43, no. 2, pp. 505-512.

Luo Z. A Simple Method to Estimate the Physical Characteristics of a Thermoelectric Cooler from Vendor Datasheets. Electronics Cooling, 2008, 14, p. 22-27

Palacios R. et al. Analytical procedure to obtain internal parameters from performance curves of commercial thermoelectric modules. Applied Thermal Engineering, 2009, 29, p. 3501-3505.