



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

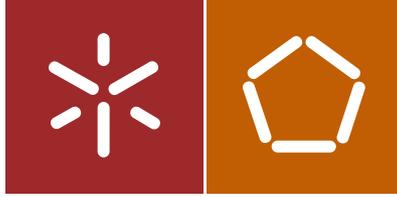
João Urbano Barbosa Afonso Gerador Termoelétrico para Escape de Automóvel com Controlo de Temperatura

João Urbano Barbosa Afonso

Gerador Termoelétrico para Escape de
Automóvel com Controlo de Temperatura

UMinho | 2014

Novembro de 2014



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Urbano Barbosa Afonso

Gerador Termoelétrico para Escape de
Automóvel com Controlo de Temperatura

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de
Mestre em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Luís Miguel Valente Gonçalves

e coorientação do
Professor Doutor Francisco C. Pimenta de Brito

DECLARAÇÃO

Nome: João Urbano Barbosa Afonso

Correio electrónico: joaourbanoafonso@gmail.com

Tlm.: 00351 966 856 718

Número do Bilhete de Identidade: 13229993 3 zz 7

Título da dissertação:

Gerador termoelectrico para escape de automóvel com controlo de temperatura

Ano de conclusão: 2014

Orientadores:

Professor Doutor Luís Miguel Valente Gonçalves

Professor Doutor Francisco C. Pimenta de Brito

Designação do Mestrado:

Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre em Engenharia Electrónica Industrial e de Computadores

Área de Especialização: Microtecnologias e Automação, Controlo e Robótica

Escola: Escola de Engenharia

Departamento: Departamento de Electrónica Industrial

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Guimarães, ___/___/_____

Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

O longo percurso académico ao qual me submeti culmina com a realização desta dissertação, tal só possível com o enorme apoio de várias pessoas, às quais quero deixar aqui o meu sincero e eterno agradecimento.

É esta a derradeira etapa do meu percurso académico e é aquela que mais exigiu de mim, tal não seria possível sem o enorme apoio dos meus orientadores, aos quais deixo aqui o meu sincero agradecimento, Doutor Luís Miguel Valente Gonçalves e Doutor Francisco C. Pimenta de Brito, por todo o conhecimento e conselhos transmitidos, por todo o apoio demonstrado em toda a fase desta dissertação e pela amizade e respeito que tiveram por mim, que contribuiu para um crescimento, aprendizagem e enriquecimento técnico e pessoal.

Ao Doutor Jorge Martins, pelo enorme conhecimento transmitido e ajuda prestada ao longo de toda a minha dissertação.

Ao Doutor Eurico Seabra, por todo o apoio que me deu e conhecimento que me transmitiu numa fase fulcral da minha dissertação.

Ao Engenheiro e amigo Armando Alves, por todo o apoio prestado nas mais diversas partes da minha dissertação.

Aos meus colegas Sérgio Marques, João Oliveira e David Queli pelo mais diverso auxílio prestado, assim como a todos os meus amigos sem exceção, obrigado.

Aos técnicos das oficinas do Departamento de Eletrónica Industrial, Ângela Macedo, Carlos Torres e Joel Almeida, por todo o auxílio e paciência demonstrada nas partes mais práticas da dissertação assim como pela dedicação ao longo do curso.

À Sara Leal, que sempre demonstrou um enorme apoio e sempre compreendeu os diferentes estados de espírito provocados pela realização da dissertação e pela motivação e coragem que sempre me transmitiu, o meu muito e sincero obrigado.

À minha irmã, Ana Afonso, por todo o companheirismo e amizade em todos os momentos do meu curso e da minha vida.

Por último, um enorme agradecimento àqueles que me permitiram chegar até aqui e aos quais dedico na íntegra esta dissertação, aos meus pais, Ana Afonso e Urbano Afonso!

RESUMO

No mundo atual existe uma grande preocupação por parte de organizações mundiais, grandes empresas e população, com o meio ambiente. Muitos defendem que, a emissão de gases como o CO₂, CO, NO_x e hidrocarbonetos não queimados, causada pelos veículos movidos por um motor de combustão, provocam problemas como alterações climáticas e poluição da atmosfera, aos quais estão aliados os conhecidos problemas como o efeito de estufa, havendo a necessidade de aumentar a eficiência dos automóveis [1]. Associado à emissão de gases, está a energia térmica que estes disponibilizam, por isso, os materiais termoelétricos são uma mais-valia para recuperar parte da energia térmica normalmente desperdiçada nos motores de combustão através destes gases. Esta energia térmica pode mesmo exceder a energia útil mecânica. Se se tiver em conta a potência de um automóvel de 100kW, com um rendimento de 25%, mais de 15kW de energia térmica estão disponíveis nos gases de escape, sendo o resto perdas no circuito de arrefecimento e outras perdas térmicas.

A presente dissertação aborda métodos que têm como objetivo o aumento da eficiência energética do veículo, convertendo a energia térmica em energia elétrica recuperando a energia térmica desperdiçada nos gases de escape, utilizando geradores termoelétricos baseados no efeito de “*Seebeck*”, que através de uma diferença de temperatura, criada entre as duas faces do gerador, é gerada uma diferença de potencial [2]. Os geradores termoelétricos disponíveis no mercado não apresentam resistência a temperaturas na ordem dos 800°C (temperatura atingida pelos gases de escape), com isto é necessário recorrer à utilização de “*Heat-Pipes*” de condutância variável, dispositivo bastante eficiente para transferência de calor, redução de temperatura e controlo de temperatura do gerador termoelétrico [3][4]. Os geradores termoelétricos disponíveis aguentam temperaturas na ordem dos 300°C. Pretende-se com esta dissertação, na continuidade de outros trabalhos anteriores, testar em diferentes condições o gerador existente na Universidade do Minho depois de ter adaptado e melhorado toda a instalação experimental para geração de energia elétrica, utilizando a energia térmica desperdiçada na exaustão dos motores de combustão, utilizando “*heat-pipes*” de condutância variável no controlo de temperatura de funcionamento dos módulos termoelétricos disponíveis comercialmente.

Palavras-chave: *Gerador termoelétrico, heat-pipe, Seebeck.*

ABSTRACT

Nowadays, there is great concern among world organizations, corporations and people, about the environment. Many defend that the emission of CO₂ and other gases caused by combustion engine vehicles, cause problems such as climate change and atmospheric pollution, allied to the greenhouse effect problems. There is a real requirement to increase the efficiency of the motor vehicles, which are responsible for a large emission of CO₂ into the atmosphere, [1]. Taking into account a 100kW power and 25% efficiency, over 15kW of thermal energy is available in the exhaust gases, while the remainder are losses in the cooling circuit.

The methods discussed in this dissertation aims to increase energy efficiency of the vehicle by converting thermal energy into electric energy, recovering wasted heat energy in the exhaust gases, using thermoelectric generators, based on the "*Seebeck*" effect, which through a temperature difference created between the two faces of the generator, a voltage is generated [2].

The temperature supported by thermoelectric generators available in the market do not exhibit resistance to temperatures of 800 ° C (temperature reached by exhaust gases), it is necessary to resort to the use of variable conductance "*Heat Pipe*", very efficient device for transferring and effectively achieve a temperature reduction and temperature control of the thermoelectric generator [3][4].

Thermoelectric generators available in the market can withstand temperatures of 300 ° C. Following other pappers, the aim of this dissertation is test different conditions at UM's generator after having adapted and improved the whole experimental setup, using the heat energy wasted in combustion engine exhaust using "heat pipes" variable conductance in controlling the operating temperature of thermoelectric modules are available commercially.

Keywords: *Thermoelectric Generator, heat-pipe, Seebeck.*

ÍNDICE

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract.....	vii
Índice	ix
Índice de Figuras	xi
Índice de tabelas	xiii
Glossário de Símbolos e Abreviaturas	1
1 Introdução	3
1.1 Motivação e Enquadramento	3
1.2 Objetivos.....	5
1.3 Organização da dissertação	5
2 Estado da Arte.....	11
2.1 Introdução.....	11
2.2 Módulos termoelétricos	11
2.3 Geradores Termoelétricos Aplicados a Automóveis	12
2.4 Outras aplicações para aproveitamento de calor	15
3 Termoelectricidade	19
3.1 Introdução.....	19
3.2 Efeito de <i>Seebeck</i>	19
3.3 Efeito de <i>Peltier</i>	28
3.4 Análise do Modelo Termoelétrico.....	30
3.5 Análise do Modelo Termoelétrico para Módulos em Série.....	37
4 Termodinâmica e Transferência de Calor.....	43
4.1 Introdução.....	43
4.2 Transferência de Calor.....	44

4.3	Heat Pipes	47
5	Trabalho Experimental e Resultados Experimentais	53
5.1	Introdução.....	53
5.2	Caracterização da Instalação Experimental.....	53
5.3	Aquisição e Tratamento de Dados.....	59
5.4	Ensaio e Resultados	66
5.4.1	Instalação Experimental do Motor.....	67
5.4.2	Ensaio experimental utilizando a água como fluido de trabalho	69
5.4.3	Resultados Globais utilizando água como fluido de trabalho	86
5.4.4	Ensaio experimental utilizando <i>Dowtherm A</i> como fluido de trabalho	90
6	Conclusões e Trabalho Futuro	97
6.1	Conclusões.....	97
6.2	Trabalho Futuro	101
	Referências	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1-1 Distribuição elétrica de um veículo com motor de combustão interna[2]...	4
Figura 2.3-1 Permutador de calor [11].	13
Figura 2.3-2 Modelo <i>BMW 530i</i> com o gerador termoelétrico.	13
Figura 2.3-3 Modelo <i>Ford Fusion</i> .	14
Figura 2.3-4 Sistema de geradores termoelétricos implementados no <i>Ford Fusion</i> [13].	14
Figura 2.3-5 Implementação do gerador termoelétrico no modelo <i>Chevrolet</i> [15].	15
Figura 2.3-6 Modelo <i>Chevrolet</i> com o sistema gerador termoelétrico implementado[15].	15
Figura 3.2-1 Efeito de <i>Seebeck</i> utilizado como sensor de temperatura e gerador termoelétrico[16].	19
Figura 3.2-2 Movimento dos eletrões quando uma face do semicondutor é aquecida e a outra face arrefecida, criando uma diferença de potencial entre estas extremidades, denominado Efeito <i>Seebeck</i> [16].	20
Figura 3.2-3 Comportamento das cargas de dois semicondutores com coeficientes de <i>Seebeck</i> , a , diferentes, quando submetidos a uma diferença de temperatura[16].	20
Figura 3.2-4 Funcionamento do Sensor de Temperatura – Termopar[16].	22
Figura 3.2-5 Junção de um módulo termoelétrico.	25
Figura 3.2-6 Módulo termoelétrico com várias junções NP[16].	25
Figura 3.2-7 Módulo termoelétrico especificado.	26
Figura 3.3-1 Diferentes modos de funcionamento por efeito de <i>Peltier</i> [16].	29
Figura 3.3-2 Dispositivo <i>Peltier</i> .	29
Figura 3.4-1 Exemplo de uma junção do módulo termoelétrico.	31
Figura 3.4-2 Junção com a representação da dimensão das junções.	32
Figura 3.4-3 Circuito elétrico equivalente do módulo termoelétrico, sem qualquer carga a fechar o circuito.	33
Figura 3.4-4 Circuito elétrico equivalente de um módulo termoelétrico, com uma carga ligada aos terminais do módulo termoelétrico.	34
Figura 3.5-1 Circuito elétrico equivalente de dois módulos termoelétricos ligados em série, sem qualquer carga a fechar o circuito.	37

Figura 3.5-2 Circuito elétrico equivalente de dois módulos termoeletricos, com uma carga ligada aos terminais dos módulos termoeletricos.	38
Figura 4.2-1 Condução de calor de um corpo com uma certa espessura[24].....	45
Figura 4.3-1 <i>Heat Pipe</i> básico[29].	48
Figura 4.3-2 <i>Heat Pipe</i> de condutância variável[29].....	49
Figura 5.2-1 Modelo em <i>SolidWorks</i> do gerador termoeletrico antigo.	54
Figura 5.2-2 Modelo em <i>SolidWorks</i> do gerador termoeletrico atual.	54
Figura 5.2-3 Gerador termoeletrico.	55
Figura 5.2-4 Modelo em <i>SolidWorks</i> do evaporador e respectivas dimensões.	55
Figura 5.2-5 Modelo da conduta de gases em <i>SolidWorks</i> , modelo antigo.....	56
Figura 5.2-6 Modelo da conduta de gases em <i>SolidWorks</i> , modelo novo.....	56
Figura 5.2-7 Modelo geral com respectivas dimensões, desenhado em <i>SolidWorks</i>	57
Figura 5.2-8 Bloco condensador com as condutas de arrefecimento e os módulos termoeletricos[10].....	58
Figura 5.2-9 Condutas de arrefecimento colocadas num bloco com módulos termoeletricos.	58
Figura 5.3-1 Placa da <i>National Instruments</i> , <i>NI 9214</i> para aquisição do sinal dos termopares e medição da temperatura.	59
Figura 5.3-2 Termopares tipo K da <i>RS</i> que foram usados para a medição de temperaturas.....	60
Figura 5.3-3 Placa de aquisição da <i>National Instruments</i> , <i>NI 9201</i> , para medição das tensões.	60
Figura 5.3-4 Gaveta de ligação ao computador da série <i>CompactDAQ</i>	60
Figura 5.3-5 Programa de aquisição de dados em funcionamento.	61
Figura 5.3-6 Exemplo da folha de cálculo exportada do programa em <i>LabView</i>	62
Figura 5.4-1 Resistências de carga usadas para simular uma carga nos módulos.....	67
Figura 5.4-2 motor <i>Diesel PSA 1.6 HDi</i> de 75 cavalos (55 kW).....	68
Figura 5.4-3 Linha de escape que direciona os gases de escape do motor para gerador termoeletrico.....	68
Figura 5.4-4 a)Travão elétrico de um camião acoplado ao motor utilizado; b)Transformador elétrico variável para controlo do travão elétrico de camião.	69
Figura 5.4-5 Painel de controlo do motor usado para o ensaio.	69

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.2-1 Coeficientes de <i>Seebeck</i> de alguns materiais para uma temperatura de 0°C[16][20].	22
Tabela 3.2-2 Tipos de termopares[10][21][22][23].	24
Tabela 3.2-3 Propriedades de materiais termoelétricos à temperatura ambiente.	28
Tabela 4.3-1 Possíveis líquidos de trabalho e respetivo ponto de ebulição para a pressão ambiente, um bar.	50
Tabela 5.3-1 Nomenclatura e significado das medições efetuadas.	62
Tabela 5.4-1 Pressões do líquido de trabalho, água, e respetivos pontos de ebulição. ..	66
Tabela 5.4-2 Regimes de binários testados às 2000 rpm e respetiva potência mecânica.	70
Tabela 5.4-3 Pressões a que o gerador foi sujeito nos ensaios e respetivo ponto de ebulição da água.	70

GLOSSÁRIO DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

<i>Símbolos</i>	<i>Definição</i>	<i>Unidade</i>
A	<i>Área de secção</i>	m^2
d	<i>Espessura</i>	M
E	<i>Espessura</i>	J
h	<i>Coefficiente de convecção</i>	$Wm^{-2}K^{-1}$
I	<i>Corrente Eléctrica</i>	A
k	<i>Condutância térmica</i>	WK^{-1}
C_p	<i>Capacidade calorífica específica</i>	$J/(kg.K)$
L	<i>Comprimento</i>	m
n	<i>Números de junções termoelectricas</i>	
Q	<i>Calor</i>	W
R	<i>Resistência Eléctrica</i>	Ω
R_i	<i>Resistência Interna</i>	Ω
$R_{contacto}$	<i>Resistência eléctrica de contacto</i>	Ω
R_{carga}	<i>Resistência eléctrica da carga</i>	Ω
$R_{junção}$	<i>Resistência eléctrica da junção NP</i>	Ω
R_n	<i>Resistência eléctrica do elemento tipo N da junção</i>	Ω
R_p	<i>Resistência eléctrica do elemento tipo P da junção</i>	Ω
T	<i>Temperatura</i>	$^{\circ}C$
V	<i>Tensão</i>	<i>Volt</i>
ΔV	<i>Diferença de potencial</i>	<i>Volt</i>
ΔT	<i>Diferença de temperatura</i>	$^{\circ}C$
HP	<i>Heat Pipe</i>	
Hps	<i>Heat pipes</i>	
π	<i>Coefficiente de Peltier</i>	V
α	<i>Coefficiente de Seebeck</i>	$V/^{\circ}C$
α_n	<i>Coefficiente de Seebeck do elemento tipo N</i>	$V/^{\circ}C$
α_p	<i>Coefficiente de Seebeck do elemento tipo P</i>	$V/^{\circ}C$
ρ	<i>Resistividade eléctrica</i>	$\Omega.m$

1 INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO E ENQUADRAMENTO

A indústria automóvel possui um elevado nível de exigência na construção e desenvolvimento dos seus veículos. Através da observação dos mesmos repara-se que estes, apresentam hoje em dia um número de funcionalidades e recursos bastante elevados e complexos, podendo dar-se como exemplo, painéis ou ecrãs informativos, sistemas de navegação GPS, sistemas de estacionamento, sistemas de ar condicionado, sistemas de áudio, sistemas de vídeo, sistemas de controlo de velocidade, assim como sistema de auxílio à travagem, motricidade ou estabilidade do veículo, sistemas de “*Start and Stop*” uma imensa quantidade de sensores, controladores e atuadores. Assim sendo, todos estes exemplos apresentados são responsáveis por um elevado consumo de energia elétrica no veículo, sendo considerados recursos ou funcionalidades exigentes a nível energético. Como se sabe, a maior parte dos veículos apresentam motores de combustão interna, logo, estas funcionalidades e recursos, quando instalados num veículo com motor de combustão interna, representa um aumento da carga mecânica do motor, pois a utilização destes refletem-se num aumento do consumo de energia elétrica que necessita ser produzida retirando energia mecânica ao motor. Com isto, verifica-se nos veículos, um aumento de consumo de combustível e aumento das emissões de gases poluentes, de modo a que o motor seja capaz de alimentar todo o sistema elétrico e eletrónico do veículo. Este aumento das emissões de gases poluentes por parte dos veículos com motor de combustão agrava ainda mais a preocupação existente sobre a poluição ambiental. Desta forma, organizações governamentais viram-se obrigadas a criar legislações que impõe limites para as emissões de gases poluentes por parte dos veículos com motores de combustão[5][6].

A Figura 1.1-1 resume a distribuição de energia elétrica num veículo movido através de um motor de combustão interna. Verifica-se que grande parte da energia produzida através do combustível é desperdiçada sob a forma de calor.

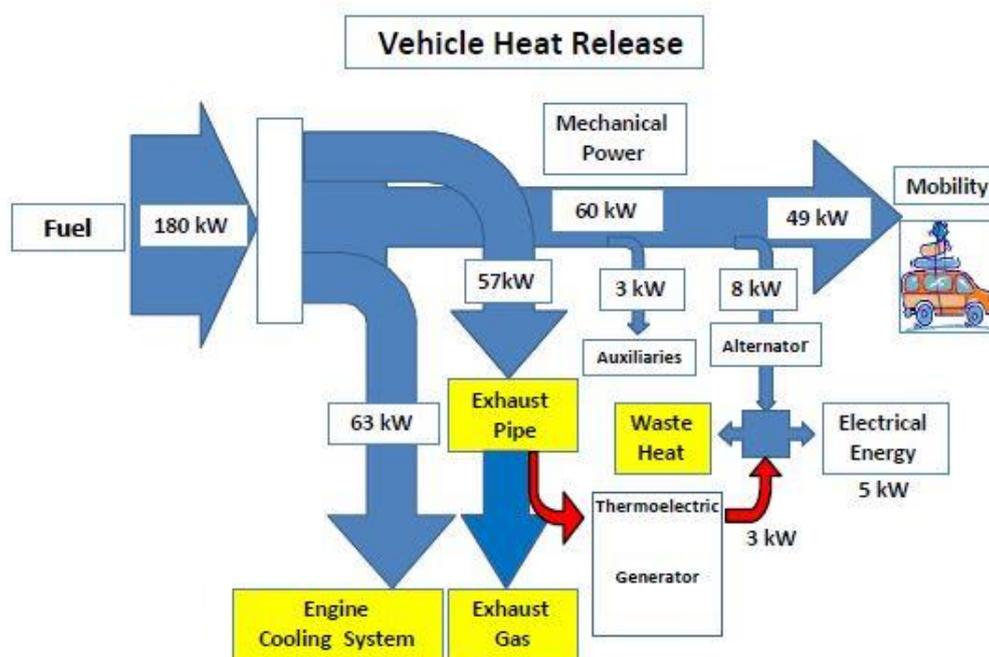


Figura 1.1-1 Distribuição elétrica de um veículo com motor de combustão interna[2].

Para combater este problema torna-se essencial encontrar soluções economicamente fiáveis, por parte dos construtores automóveis, de modo a encontrar soluções que produzam resultados, no sentido de combater o problema anteriormente descrito. Assim, estes construtores vêm-se obrigados a desenvolver veículos menos poluentes, mais ecológicos, passando por diversas soluções, como por exemplo veículos que não funcionam a combustíveis fósseis, nomeadamente carros que têm como motor de propulsão um motor elétrico. O seu principal problema é o custo de aquisição, pois possui ainda um preço elevado comparado com um veículo de motor de combustão. Pode-se também, referenciar veículos que utilizam um motor elétrico associado ao motor de combustão, denominados os veículos híbridos, que utilizam sistemas gerador de energia para carregar as baterias que alimentam estes motores elétricos, diminuindo assim os gases poluentes. Tendo em consideração o elevado custo destes sistemas descritos, vê-se na energia desperdiçada sob a forma de calor pelo tubo de escape uma solução economicamente fiável.

1.2 OBJETIVOS

Esta dissertação tem como objetivo o aumento da eficiência energética do veículo, através da recuperação da energia térmica em energia elétrica, recuperando a energia térmica desperdiçada nos gases de escape. Isto será feito utilizando geradores/conversores termoelétricos baseados no efeito de “*Seebeck*”, que através de uma diferença de temperatura criada entre as duas faces do gerador, é gerada uma diferença de potencial [2]. Contudo existe um problema, pois a temperatura suportada pelos geradores termoelétricos disponíveis no mercado vai até cerca de 250-300°C, enquanto as temperaturas dos gases de escape poderão exceder os 800°C. Com isto torna-se necessário reduzir a temperatura de operação do gerador, preferencialmente evitando rejeição de calor e recorrendo a uma conversão. Isto pode ser feito recorrendo à utilização de *Heat Pipes* de condutância variável, dispositivo bastante eficiente para transferência de calor e, se necessário, para redução de temperatura [3]. A utilização deste dispositivo permite controlar a temperatura de funcionamento do gerador termoelétrico através de regulação da pressão interna de funcionamento do *Heat Pipe* [4].

Com esta dissertação pretende-se, projetar, simular, construir e caracterizar um protótipo para geração de energia elétrica, utilizando a energia térmica desperdiçada na exaustão dos motores de combustão e utilizando *Heat Pipes* de condutância variável no controlo de temperatura de funcionamento dos módulos termoelétricos disponíveis comercialmente.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em 6 capítulos. Os dois capítulos iniciais têm o objetivo de enquadrar e introduzir esta dissertação. Deste modo, o capítulo um explica a importância do desenvolvimento desta dissertação no âmbito científico assim como no âmbito cultural, ambiental e económico. O capítulo citado destaca também as motivações que levam ao desenvolvimento desta dissertação. No capítulo um destaca-se também a abordagem aos objetivos teóricos e práticos desta dissertação.

Como capítulo de contexto introdutório, o capítulo dois, definido como “Estado da Arte”, contém uma pesquisa e explicação de geradores termoelétricos já existentes e implementados em veículos equipados com motor de combustão interna. O capítulo dois possui também uma breve pesquisa sobre outras aplicações existentes com vista ao

aproveitamento do calor gerado pelos gases de exaustão de um motor de combustão interna.

O capítulo três e quatro têm o objetivo de explicar todos os conceitos teóricos inerentes ao desenvolvimento desta dissertação, quer a nível teórico quer a nível prático. Assim, o capítulo três possui o título de “Termoelectricidade” e o capítulo quatro é intitulado de “Termodinâmica e Transferência de calor”.

Deste modo, o capítulo três explica o funcionamento dos módulos termoeletricos, assim como, todos os efeitos e fenómenos que servem de suporte para o estudo do funcionamento dos mesmos. São também descritos neste capítulo, os materiais possíveis para a construção destes módulos termoeletricos. Na parte final do referido capítulo é também mostrado o circuito elétrico equivalente para um módulo termoeletrico, assim como, para dois módulos termoeletricos ligados em série. Para ambos os circuitos elétricos equivalentes, são deduzidas as fórmulas matemáticas que os suportam.

O capítulo quatro intitulado de “Termodinâmica e Transferência de calor”, apresenta conceitos teóricos referentes à transferência de calor e efeitos associados. Apresenta também a abordagem aos “*Heat Pipes*” mecanismo desenvolvido com vista à transferência de calor.

O capítulo cinco, aborda o trabalho experimental realizado e os resultados obtidos. Neste capítulo, é efetuada uma caracterização do gerador termoeletrico referente à instalação experimental do mesmo. É também apresentado o programa de aquisição de dados desenvolvido assim como as características das placas de aquisição utilizadas na dissertação. É explicado como foi efetuado o tratamento de todos os dados recolhidos pelo programa de aquisição de dados. Este capítulo culmina, com os ensaios experimentais que foram realizados assim como a explicação das condições dos mesmos. São mostrados e explicados os resultados obtidos nos ensaios realizados.

Por fim, é apresentado o capítulo com o título de “Conclusões e Trabalho Futuro”. Neste capítulo são apresentadas as conclusões da dissertação, bem como os desafios encontrados, que por vezes dificultaram o desenvolvimento do trabalho, com sugestões para melhoria futura. São explicados, de um modo geral, os resultados obtidos nos ensaios.

Relativamente ao trabalho futuro, são apresentadas algumas sugestões de como poderá que ser efetuado o desenvolvimento deste trabalho. A evolução do protótipo atual é sugerida, bem como, a criação de um novo protótipo.

2 ESTADO DA ARTE

2 ESTADO DA ARTE

2.1 INTRODUÇÃO

Recentemente a energia térmica proveniente dos gases de escape dos motores a gasolina e a gasóleo começou a ser investigada e estudada, de modo a esta ser aproveitada para a produção de energia elétrica. As máquinas térmicas, que transformam o calor em energia mecânica, possuem uma baixa eficiência energética, nomeadamente devido a questões ligadas à termodinâmica. Efetivamente, a energia térmica é um tipo de energia de menor “qualidade”, que a energia elétrica ou mecânica, pois o seu grau de “desorganização”(entropia), é muito superior. Enquanto que a energia elétrica e mecânica podem ser integralmente convertidas em energia térmica, o reverso não pode acontecer devido a questões ligadas à irreversibilidade termodinâmica. Estes conceitos são abordados mais adiante.

Os motores de combustão citados anteriormente possuem $\frac{2}{3}$ de desperdício do calor do combustível através dos gases de escape e do sistema de arrefecimento do motor [7]. Deste modo, tornou-se necessário encontrar uma solução para o reaproveitamento da energia desperdiçada, tanto por razões ambientais como por razões económicas, tendo em conta que o recurso natural para a produção de combustível é uma matéria-prima finita. Neste contexto tem-se especial atenção a problemas relacionados com a eficiência energética, emissões de gases e, não menos importante, a poupança dos recursos naturais existentes. Portanto, é extremamente necessário minimizar qualquer perda energética nos veículos equipados com motores de combustão.

Uma das formas de evitar esta perda é utilizar esta energia residual para produzir energia elétrica, com recurso a geradores termoelétricos e módulos termoelétricos [7][8]

2.2 MÓDULOS TERMOELÉTRICOS

No início do século XIX teve início a odisséia de conseguir gerar energia elétrica diretamente através da energia térmica. Uma das formas de conseguir isto é o efeito de *Seebeck*. Este feito foi conseguido pelo físico alemão *Thomas Johann Seebeck*, em 1820, que observou que seria possível conseguir uma diferença de potencial através de dois tipos de metais diferentes, quando sujeitos a uma diferença de temperatura entre as suas

junções [9] . Foi então aqui que se deu o grande passo para desenvolver e investigar os módulos termoelétricos.

No Reino Unido, em 1925, surgiu o primeiro módulo termoelétrico para fornecer energia a rádios. Este módulo foi denominado como de *Thermattaix* e tinha a particularidade de, para aquecer a face quente, usar um maçarico, e para arrefecer a face fria utilizar a temperatura ambiente. Em 1920 iniciou-se na altura, na ainda URSS, no *Physical Technical Insitute* a investigação de materiais termoelétricos com base em semicondutores, terminando esta investigação no ano de 1930. Seis anos após o término da investigação, decorria o ano de 1936, foi provado no *Physical Technical Institute* que existia a possibilidade de criar um semicondutor do tipo P e tipo N, surgindo então o primeiro modulo termoelétrico em 1954, baseado no conceito de semicondutores de tipo N e tipo P. Os módulos termoelétricos disponíveis atualmente no mercado possuem a capacidade de funcionar até temperaturas na ordem dos 300°C, conseguindo ser implementados em equipamentos e aplicações que necessitem de uma potência entre os miliwatts até aos quilowatts [10].

Atualmente fabricantes como, *Ferrotec*, *Kryotherm*, *Thermonamic*, *Thermoelectricsupllier*, *Waronix*, *Tetech*, *Sctbnord* e a *HI-Z Technology* são exemplos de fabricantes que possuem geradores termoelétricos com diferentes características entre si. Destacam-se os fabricantes que possuem os módulos que apresentam menor resistência à temperatura, como é o caso dos *Sctbnord* que suportam 180° C, assim como os fabricantes que possuem os módulos que aguentam maior temperatura como é o caso dos da *Thermonamic* que aguentam temperaturas na ordem dos 320° C [10].

2.3 GERADORES TERMOELÉTRICOS APLICADOS A AUTOMÓVEIS

Aproveitar a energia térmica proveniente dos gases de escape e que é desperdiçada, é uma técnica relativamente recente. Assim, segundo alguns dados, conclui-se que o primeiro gerador termoelétrico funcional para aproveitamento de energia térmica desperdiçada e que produzia energia elétrica surgiu no ano de 1963, sem se conhecer muitos mais pormenores sobre o mesmo.

Na segunda metade do Séclo XX foram desenvolvidos protótipos de geradores termoelétricos por marcas conceituada como a *Porsche*, a implementar o sistema no seu modelo 944, *Nissan Motors*, e a Universidade de *Clarkson* em colaboração com a *General*

Motors(GM). A produção de energia elétrica nos geradores desenvolvidos por estas marcas situa-se entre os valores de 30 Watts e 1000 Watts quer nos motores a gasolina quer nos motores a gasóleo [7].

Em 1987 no *U.S. Department of Energy's*, foi o ano em que se iniciou o desenvolvimento e implementação de projetos de maior envergadura, com o desenvolvimento e construção de um gerador termoelétrico com 1kW de potência para motores a gasóleo. Foi construído um gerador termoelétrico com uma potência de 200 watts, sendo este apresentado no decorrer do ano de 1991, este gerador visava aproveitar o calor gerado nos gases de escape (energia térmica) de um camião e converter esta temperatura em energia elétrica, de modo a esta ser aproveitada pelos componentes elétricos do camião. Com o intuito de diminuir o consumo de combustível do veículo e emissão de gases poluentes para a atmosfera [7] [10].

A *Nissan Research Center* projetou, em 1998, um gerador termoelétrico, constituído por 72 módulos termoelétricos cuja construção era de silício germânio. Este gerador foi testado num motor a gasolina com 3000cc de cilindrada onde se conseguiu gerar cerca de 35.5 watts de energia elétrica [1].

Inserido no programa *Freedom Car Office* do *U.S. Department of Energy's*, começou-se o desenvolvimento de um gerador termoelétrico de produção de energia elétrica de elevada eficiência, em novembro de 2004, pela *BSST*, equipa constituída por técnicos da *BMW, Visteon e Marlow Industries* [10]. Este sistema visava a redução do consumo de combustível através da redução de trabalho pelo alternador do veículo, pois grande parte da energia produzida por este, com a utilização do sistema desenvolvido, seria reduzida. O veículo usado para implementação e testes deste sistema foi um *BMW* modelo 530i a gasolina com 3000cc de cilindrada, no qual os resultados obtidos conseguiram provar uma economia de cerca 10% de consumos de combustível e uma capacidade máxima de gerar energia na ordem de 1 quilowatt de energia elétrica [10][11].



Figura 2.3-2 Modelo *BMW* 530i com o gerador termoelétrico.

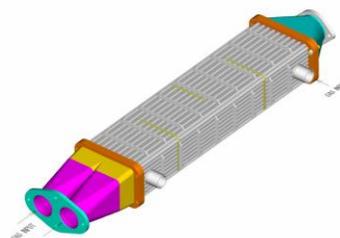


Figura 2.3-1 Permutador de calor [11].

Em 2008, a *Volkswagen* apresentou, em Berlim, no *Thermoelektrik-Eine Chance Für Die Atomobillindustrie*, um veículo protótipo equipado com um gerador termoelétrico capaz de gerar 600 watts de energia elétrica através da energia térmica desperdiçada nos gases de escapes. Com isto a marca conseguia cobrir cerca de 30% da energia elétrica que o veículo necessitava, refletindo-se numa diminuição de cerca de 5% nos consumos [12].

Módulos termoelétricos de Bi_2TE_3 foram utilizados pela Ford para desenvolver também um sistema de geradores termoelétricos, que produziam uma potência de 500 watts, sendo este gerador implementado num *Ford Fusion* [13].



Figura 2.3-3 Modelo *Ford Fusion*.

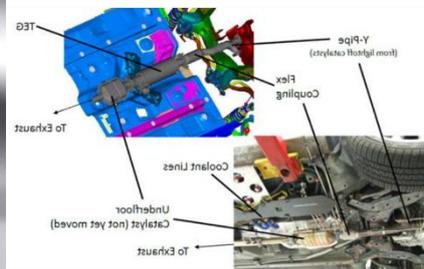


Figura 2.3-4 Sistema de geradores termoelétricos implementados no *Ford Fusion*[13].

Em 2010, a *General Motors* implementou no modelo *Suburban* da *Chevrolet* um gerador termoelétrico desenvolvido pela empresa, este gerador conseguia uma redução dos consumos na ordem dos 5% sem nunca serem divulgadas as potências geradas e a que temperaturas estas eram geradas. Uma inovação da *General Motors* seria o modo como era implementado no escape do veículo o gerador, uma vez que o tubo de escape apresentava uma bifurcação a meio que levava os gases de escape para a zona do gerador. Nesta bifurcação, existia uma válvula *bypass* para limitar a passagem dos gases de escape e consequentemente do calor, para evitar danos no gerador por excesso de temperatura [14],[15].



Figura 2.3-6 Modelo *Chevrolet* com o sistema gerador termoelétrico implementado[15].



Figura 2.3-5 Implementação do gerador termoelétrico no modelo *Chevrolet*[15].

2.4 OUTRAS APLICAÇÕES PARA APROVEITAMENTO DE CALOR

Existem ainda em desenvolvimento outros projetos para aproveitamento de calor num veículo, de modo a reduzir as emissões de gases poluentes para a atmosfera assim como a diminuição dos consumos do veículo [13].

Estes projetos apresentam uma grande desvantagem comparativamente com a utilização de geradores termoelétricos desenvolvidos com módulos termoelétricos, que consiste na sua complexidade em termos de construção, sendo um sistema mais sujeito a erros e falhas. Também a sua eficiência em veículos de potências mais baixas não é a desejada. Exemplos destas aplicações são os seguintes [13]:

- *Electric Turbo-Compounding*: aplicação da Caterpillar, que, segundo fontes, consegue uma redução e economia de combustível da ordem dos 3 a 10%;
- *Mechanical Turbo-Compounding*: aplicação que consegue uma redução na ordem dos 5 a 10% na redução e na economia de combustível;
- *Turbo generator integrated gas energy recovery system*: aplicação que anuncia uma redução de combustível na ordem dos 6%;
- *Stirling cycle in co-generation*: anuncia uma redução de cerca de 40% mas é especificada uma baixa produção de energia elétrica;

- *Rankine cycle turbo-steamer*: anuncia uma melhoria de economia de combustível na ordem dos 17%;
- *Organic rankine cycle*: anuncia uma economia de combustível na ordem dos 60%;
- *Therm-acoustics*: Tem uma produção de energia elétrica bastante baixa.

3 TERMOELETRICIDADE

3 TERMOELETRICIDADE

3.1 INTRODUÇÃO

Termoelectricidade pode-se explicar, muito resumidamente, como sendo a produção de energia eléctrica através de uma diferença de temperatura, assim como a produção de uma diferença de temperatura através de energia eléctrica. A termoelectricidade reflete-se em três efeitos, efeito de *Seebeck*, efeito de *Peltier*, efeito de *Thompson*, neste subcapítulo apenas se abordam os dois primeiros efeitos, respetivamente [16][17].

3.2 EFEITO DE *SEEBECK*

Natural da Estónia, o então médico Thomas Seebeck estudou física, descobrindo no ano de 1821 o efeito ao qual foi dado o nome de efeito de *Seebeck* [16][17].

O efeito de *Seebeck* considera que a partir de uma diferença de temperatura presente entre dois tipos de materiais diferentes, surge uma tensão eléctrica, a qual origina uma corrente eléctrica quando se fecha o circuito. A este efeito é associado um coeficiente de quantificação, sendo este o coeficiente de *Seebeck* – α , [17][16][18].

$$\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta T}$$

Eq. 3.2-1

Este efeito é utilizado utilizado essencialmente em aplicações de sensores de temperatura e geradores termoelétricos:

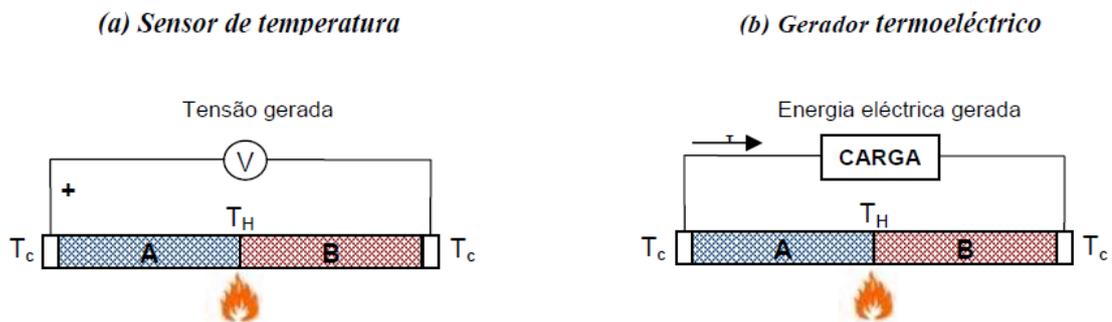


Figura 3.2-1 Efeito de *Seebeck* utilizado como sensor de temperatura e gerador termoelétrico[16].

Para ajudar a compreender este fenómeno, sabe-se que quando um semicondutor, ou um metal, com o coeficiente de *Seebeck* negativo, é aquecido e arrefecido em partes

opostas, os eletrões da região que é aquecida ficam excitados e movem-se para a região que é arrefecida, pois é nesta região que encontram um nível de energia mais reduzido. Neste sentido, a zona da região aquecida fica com excesso de iões e a zona que é arrefecida com excesso de eletrões. Quando o campo elétrico provocado por estas cargas não permite mais movimentações das mesmas diz-se que se atingiu o equilíbrio [19][18].

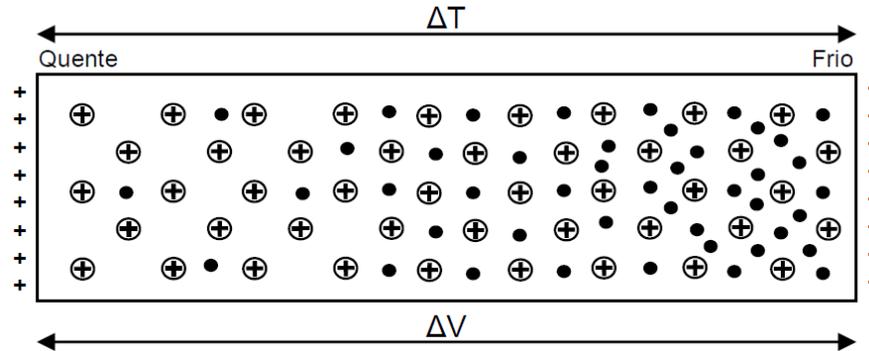


Figura 3.2-2 Movimento dos eletrões quando uma face do semicondutor é aquecida e a outra face arrefecida, criando uma diferença de potencial entre estas extremidades, denominado Efeito *Seebeck* [16].

Apenas quando o coeficiente de *Seebeck* é negativo é que se pode aplicar o que foi descrito anteriormente, pois fatores externos podem alterar ou modificar o movimento dos iões e eletrões, o que se traduz numa alteração do coeficiente de *Seebeck*, podendo este passar a ser positivo [16][18].

Observa-se na Figura 3.2-3 que no semicondutor em que o coeficiente de *Seebeck* é negativo os eletrões deslocam-se da face quente para a face fria, pois esta apresenta um nível de energia mais baixo.

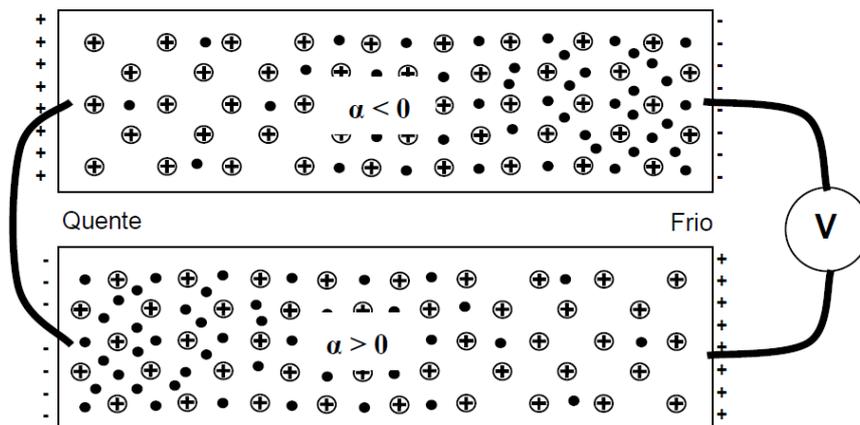


Figura 3.2-3 Comportamento das cargas de dois semicondutores com coeficientes de *Seebeck*, α , diferentes, quando submetidos a uma diferença de temperatura [16].

Por outro lado, no condutor onde o coeficiente de *Seebeck* é positivo, os eletrões deslocam-se da face fria para a face quente, ou seja, no sentido oposto do condutor onde

o coeficiente de Seebeck é negativo. Como se pode observar, é possível obter uma diferença de potencial na extremidade fria dos dois condutores, sendo esta exatamente proporcional à diferença de temperatura criada entre a face quente e a face fria dos semicondutores. A diferença de potencial, ΔV , na junção fria dos dois semicondutores pode ser dada através da fórmula seguinte [19]:

$$\Delta V = (T_{quente} - T_{fria}) * (\alpha_{\alpha>0} - \alpha_{\alpha<0})$$

Eq. 3.2-2

Neste sentido, é possível dizer-se que através deste efeito é possível construir e desenvolver equipamentos e dispositivos com as mais diversas utilizações e finalidades. Sensores de temperatura (i.e. Termopar) e módulos termoelétricos, são os exemplos mais frequentes onde o conceito de efeito de *Seebeck* está presente.

É possível destacar dois modos de operação de um módulo termoelétrico, sendo um deles quando é medida a diferença de potencial do módulo, funcionamento de um termopar com o objetivo de medir diferenças de temperatura, e outro, quando colocamos uma carga a fechar o circuito à saída do módulo, fazendo com que este seja percorrido por uma corrente elétrica, pode-se dizer então que este se encontra em modo de gerador de energia elétrica [16] [18][20].

De modo a quantificar uma determinada temperatura, são utilizados sensores de temperatura, que apenas adquirem um sinal com o qual é permitido quantificar a valor da temperatura que se encontra nas junções deste mesmo sensor [16].

Os sensores de temperatura utilizados para este efeito utilizam nas suas junções materiais como, ferro, cobre, níquel, alumínio, entre outros [16].

A Figura 3.2-4 ilustra o princípio de funcionamento do sensor de temperatura, termopar.

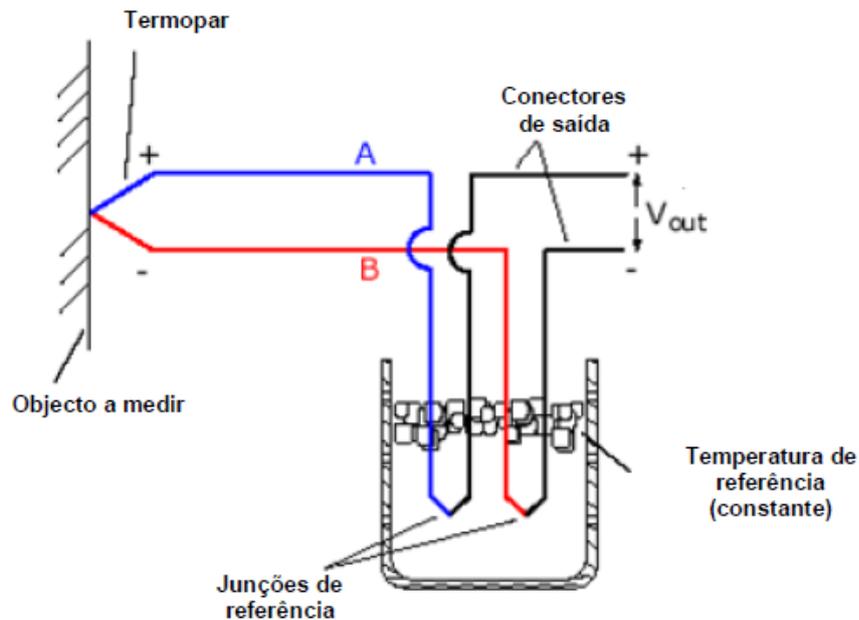


Figura 3.2-4 Funcionamento do Sensor de Temperatura – Termopar[16].

Este sensor tem como objetivo medir uma temperatura de uma superfície em contacto com a junção. Para tal, esse tipo de sensor, funciona, através da medição da diferença de temperatura entre dois pontos, sendo necessário ter conhecimento da temperatura de uma das junções para poder determinar o valor de temperatura da outra junção. A figura acima mostra uma das junções mergulhada num banho de gelo, com o objetivo de servir de referência em relação a junção onde se encontra o objeto a medir. O princípio de funcionamento ilustrado permite medir diferenças de temperatura, a temperatura de referência é o banho de gelo que se encontra sempre à mesma temperatura se a pressão ambiente se mantiver constante [16]. É necessário usar acondicionamento de sinal de modo a adquirir a diferença de potencial gerada pela temperatura a ser medida. Com o inconveniente de usar um banho de gelo para o valor de referência, em grande parte das aplicações onde se utiliza termopares, este é substituído por um sensor de temperatura absoluto (por exemplo, do tipo termo-resistivo) que mede a temperatura da junção de referência e efetua a compensação da saída do valor do termopar [16].

A Tabela 3.2-1 indica o valor do coeficiente de *Seebeck* para diferentes materiais usados nas junções.

Tabela 3.2-1 Coeficientes de *Seebeck* de alguns materiais para uma temperatura de 0°C[16][20].

Material	Coeficiente de <i>Seebeck</i> ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)
Alumínio	3.5
Antimónio	47

Bismuto	-72
Cádio	7.5
Carbono	3.0
Chumbo	4.0
Constantan	-35
Cobre	6.5
Ferro	19
Germânio	300
Mercúrio	0.60
Níquel	-15
Níquel-Crómio	25
Ouro	6.5
Platina	0
Potássio	-9.0
Prata	6.5
Ródio	6.0
Selénio	900
Silício	440
Sódio	-2.0
Tântalo	4.5
Telúrio	500
Tungsténio	7.5

Existem, neste contexto, sete tipos de termopares diferentes, os quais são constituídos por diferentes tipos de materiais possuindo diferentes características entre si, como pode ser observado na tabela seguinte.

Tabela 3.2-2 Tipos de termopares[10][21][22][23]

Tipo de termopar	Elemento Termoeletrico Positivo	Elemento Termoeletrico Negativo	Limites de Temperatura	Força Eletromotriz produzida	Erro
J	99.5 % Ferro	55% Cobre 45% Niquel	-210°C a 760°C	-8.096mV a 42.919mV	0.75%
K	90% Niquel 10% Cromio	95% Niquel 2% Manganésio 2% Alumínio 1% Silício	-270°C a 1200°C	-6.458mV a 48.838mV	0.75%
N	84.6% Niquel 14.2% Cromio 104% Silício	95.45% Niquel 4.40% Silício 0.15% Manganésio	-300°C a 1300°C	-4.345mV a 47.513mV	0.75%
R	87% Platina 13% Ródio	100% Platina	-50°C a 1768°C	-0.226mV a 21.101mV	0.25%
S	90% Platina 10% Ródio	100% Platina	-50°C a 1768°C	-0.236mV a 18.693mV	0.25%
T	100% Cobre	55% Cobre 45% Niquel	-270°C a 400°C	-6.258mV a 20.872mV	0.75%
B	70.4% Platina 29.6% Ródio	93.9% Platina 9.1% Ródio	0° a 1820°C	0mV a 13.820mV	0.50%
E	90% Niquel 10% Cromio	55% Cobre 45% Niquel	-270°C a 1000°C	-9.835mV a 76.373mV	0.50%

Os módulos termoeletricos baseiam-se no efeito de *Seebeck*. Estes módulos têm o objetivo de converter energia térmica em energia elétrica, através de uma diferença de temperatura gerada em cada uma das suas extremidades. Estes módulos termoeletricos são constituídos por junções que se constroem com elementos do tipo P, do tipo N, podendo existir nos módulos termoeletricos N junções como as descritas anteriormente.

A Figura 3.2-5 representa uma junção NP das muitas presentes num módulo termoelétrico.

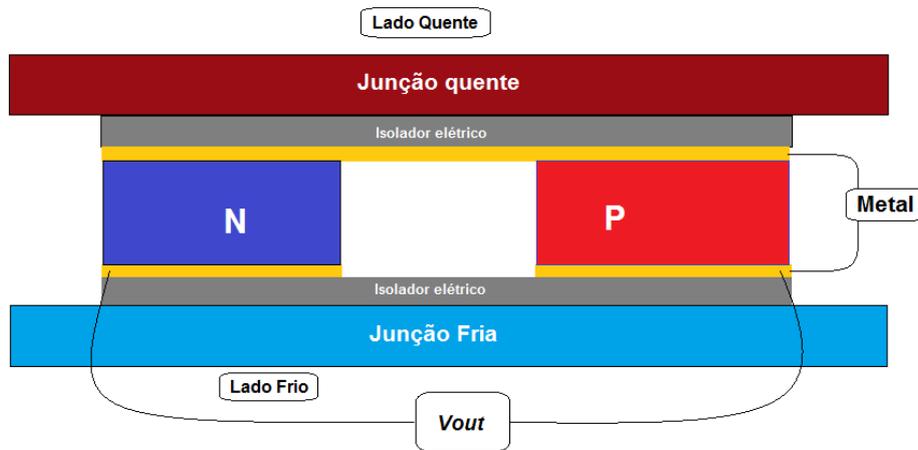


Figura 3.2-5 Junção de um módulo termoelétrico.

Uma fonte de calor externa aquece a junção quente, enquanto que a temperatura ambiente, a ausência de calor ou dissipação de calor, absorve calor na junção fria, de modo a se dissipar o calor gerado, assim como, o calor transmitido por condução através do módulo. Assim produz-se um movimento de eletrões nos elementos N e P, conforme foi explicado anteriormente. N e P são elementos termoelétricos de tipos distintos, refletindo-se no valor do coeficiente de *Seebeck*, sendo este no elemento de tipo N, negativo, e, no elemento de tipo P, positivo. Consegue-se assim uma diferença de potencial entre dois pontos da junção fria, como foi explicado anteriormente. Fechando o circuito com uma resistência de carga no lugar de Vout, sendo este percorrido por uma corrente elétrica.

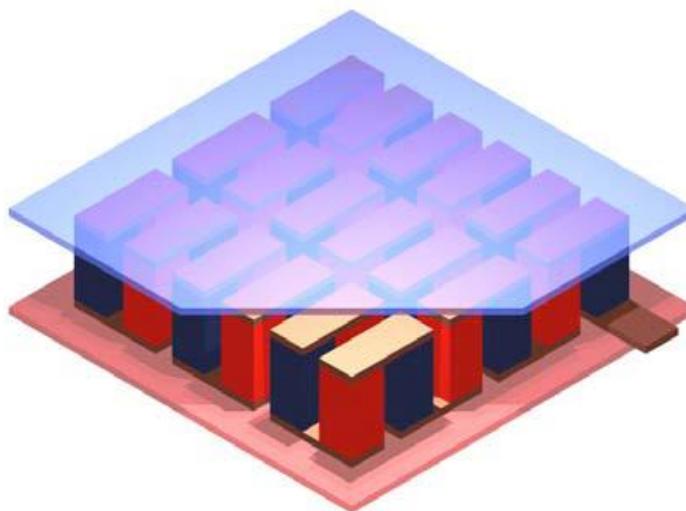


Figura 3.2-6 Módulo termoelétrico com várias junções NP[16].

Um módulo termoelétrico ou gerador termoelétrico é constituído por várias junções como as demonstradas na Figura 3.2-6, estas são ligadas em paralelo entre si do ponto de vista térmico, sendo do ponto de vista eléctrico ligadas em serie entre si.

A Figura 3.2-7 representa em detalhe como construído um módulo termoelétrico.

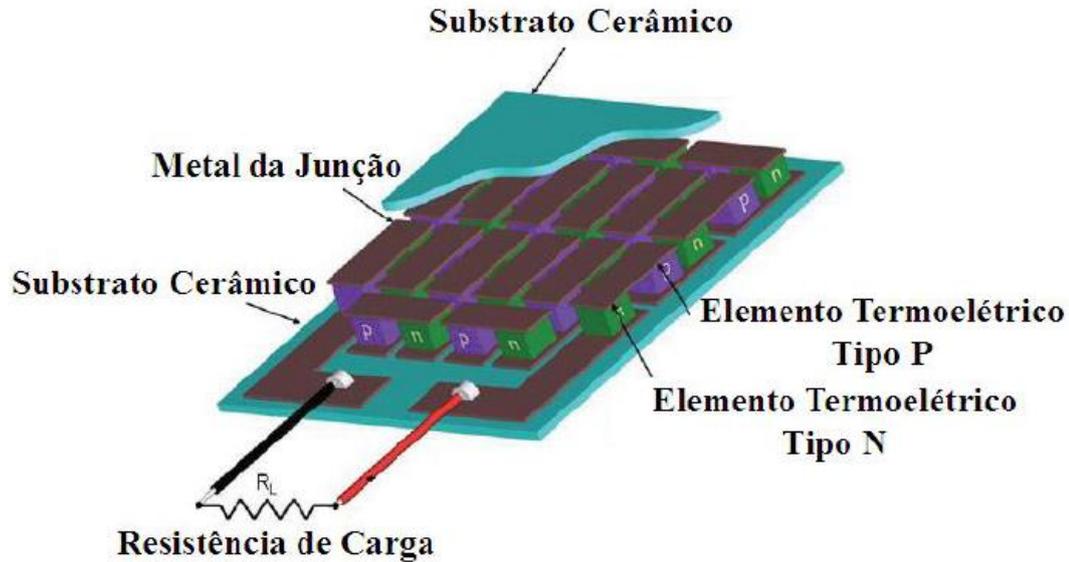


Figura 3.2-7 Módulo termoelétrico especificado.

A diferença de potencial obtida aos terminais R_L é igual a soma da diferença de potencial obtida em cada junção do módulo.

$$VR_L = N_{junções} * V_{junção}$$

Eq. 3.2-3

Os geradores termoelétricos possuem uma resistência interna (R_i), a qual afeta a potência eléctrica nos terminais do gerador termoelétrico. Obtém-se a potência máxima disponível pelo gerador quando se coloca uma resistência de carga de igual valor à resistência eléctrica do gerador termoelétrico. A equação seguinte reflete o cálculo da potência máxima, relacionando a tensão em aberto, V_{aberto} , com a resistência interna do módulo, R_i [16][18]:

$$P_{max} = \frac{V_{aberto}^2}{4R_i} = \frac{(n(\alpha_p - \alpha_n)\Delta T)^2}{4n(R_n + R_p + 2R_{contacto\ metal\ junções} + 4R_c)}$$

Eq. 3.2-4

$$R_n = \rho_n \frac{l}{S}$$

Eq. 3.2-5

$$R_p = \rho_p \frac{l}{S}$$

Eq. 3.2-6

$$R_i = N(R_n + R_p + 2R_{\text{contato junções}} + 4R_c)$$

Eq. 3.2-7

$$R_c = \frac{\rho_{\text{contato}}}{S}$$

Eq. 3.2-8

A resistência interna dos geradores termoelétricos é calculada através da soma das resistências internas de cada elemento termoelétrico das junções, das resistências de contacto (R_c) e das resistências do metal das junções, sendo esta última normalmente desprezada devido ao seu valor de resistência interna ser muito mais baixo do que o valor das restantes resistências do gerador [16][18].

Os geradores termoelétricos possuem perdas, perdas essas presentes nos elementos termoelétricos, quer a nível elétrico quer a nível térmico. A nível térmico, o efeito de *Peltier* provoca arrefecimento e aquecimento, nas faces respetivas, quando a corrente gerada percorre os elementos. Há a necessidade de compensar estas perdas através da energia térmica, tendo esta de ser mantida de modo a que a diferença de temperatura entre a face quente e a face fria seja mantida. Na hipótese de esta não ser mantida, origina perdas elétricas e térmicas no módulo termoelétrico. Esta energia térmica que é necessária manter, pode ser calcula através das fórmulas a seguir demonstradas. É calculada a energia térmica necessária para a face quente do módulo termoelétrico, assim como, a energia térmica que é necessário retirar da face fria do módulo termoelétrico, Q_h e Q_c respetivamente [24][16]:

$$Q_h = (K * \Delta T) + ((\alpha_p - \alpha_n)\Delta T * I) - \left(\frac{1}{2}R * I^2\right)$$

Eq. 3.2-9

$$Q_c = (K * \Delta T) + ((\alpha_p - \alpha_n)\Delta T * I) - \left(\frac{1}{2}R * I^2\right)$$

Eq. 3.2-10

Parâmetros como o coeficiente de *Seebeck*, resistividade elétrica, e condutividade térmica, são fulcrais na escolha dos materiais termoelétricos, a utilizar na produção dos módulos termoelétricos de modo a maximizar a potência elétrica produzida. O coeficiente

de *Seebeck* é um fator determinante para que a tensão produzida pelo módulo seja elevada. A resistência interna do módulo termoelétrica é essencial que seja a mais baixa possível. De modo a que a energia térmica necessária para que o módulo termoelétrico funcione seja baixa, a condutividade térmica do material tem que ser também reduzida. A Tabela 3.2-3 mostra as diversas propriedades termoelétricas de alguns materiais utilizados para a construção de módulos termoelétricos [16][18].

Tabela 3.2-3 Propriedades de materiais termoelétricos à temperatura ambiente.

Material	Símbolo	Coefficiente de <i>Seebeck</i> (μVK^{-1})	Resistividade ($\mu\Omega\text{m}$)	Condutividade térmica ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
Níquel	Ni	-18	0.070	91
Crómio	Cr	18	0.13	94
Bismuto	Bi	-60	1.15	8.4
Antimónio	Sb	40	0.42	18.5
Telureto de bismuto (tipo n)	Bi_2Te_3	-240	10	2.02
Telureto de antimónio	Sb_2Te_3	92	3.23	1.63

3.3 EFEITO DE *PELTIER*

Tal como Thomas Seebeck, Jean Peltier deixou a sua profissão para estudar física, prosseguindo no contexto da descoberta de Seebeck. Decorria o ano de 1934, quando descobriu que quando uma junção de dois materiais diferentes é atravessada por uma corrente elétrica, esta produz energia térmica ou a absorve de modo proporcional à intensidade da corrente elétrica. Peltier, deu a este efeito o seu nome, efeito de *Peltier*, sendo o coeficiente de *Peltier* – π , o modo de quantificar este efeito.

É possível relacionar o efeito de *Seebeck* com o efeito de *Peltier* através da Eq. 3.3-1 mostrada a seguir:

$$\pi = \alpha T$$

Eq. 3.3-1

Através do efeito de *Peltier*, os geradores termoelétricos podem ser utilizados para aplicações de arrefecimento ou aquecimento. Dependendo do sentido da corrente que atravessa o gerador termoelétrico, este vai produzir ou absorver energia térmica, como mostra a Figura 3.3-1 a seguir [1][10] [16].

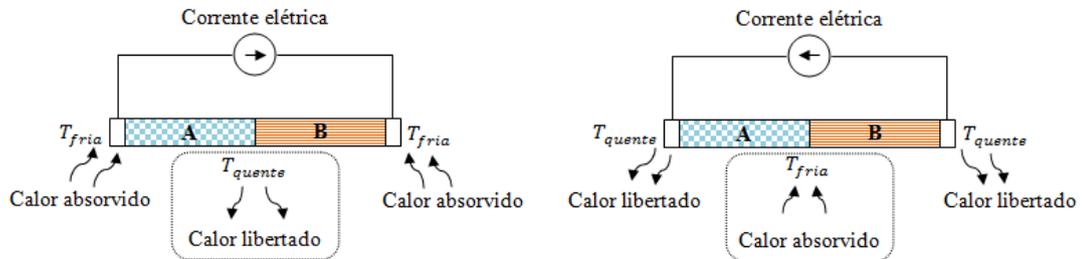


Figura 3.3-1 Diferentes modos de funcionamento por efeito de *Peltier*[16].

A corrente elétrica atravessa então os elementos do gerador termoelétrico e por efeito de *Peltier* liberta ou absorve energia térmica. Este acontecimento pode ser expresso através das equações mostradas a seguir. A energia térmica, calor, absorvido, é Q_c e a energia térmica, calor, libertado, é Q_h .

$$Q_c = (\pi_n + \pi_p)I = (\alpha_p - \alpha_n)T_c I$$

Eq. 3.3-2

$$Q_h = (\pi_n + \pi_p)I = (\alpha_p - \alpha_n)T_h I$$

Eq. 3.3-3

A Figura 3.3-2 ilustra a estrutura de um dispositivo *Peltier*, em que a corrente elétrica atravessa o dispositivo num determinado sentido, percorrendo todos os elementos termoelétricos, tal como descrito anteriormente no efeito de *Seebeck*, onde os elementos termoelétrico tipo N, têm coeficiente de *Seebeck* negativo, e os tipos P, positivo.

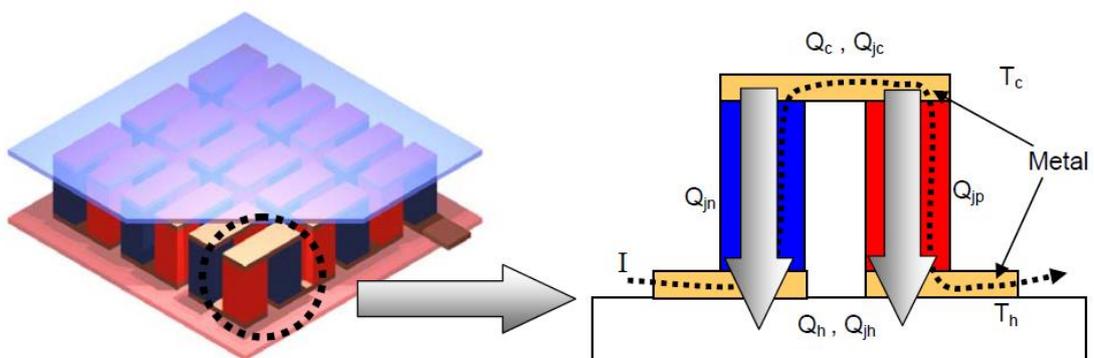


Figura 3.3-2 Dispositivo *Peltier*.

Reparando na parte inferior do gerador, a junção do metal N e a junção do metal P, ao ser atravessada pela corrente, liberta energia térmica aquecendo o gerador na parte inferior, por efeito de *Peltier*. Na junção do metal N e na junção do metal P no lado superior do gerador, é absorvido calor quando estas junções são atravessadas pela corrente elétrica. Os coeficientes de *Peltier* dos materiais termoelétricos utilizados são diretamente proporcionais à temperatura e ao coeficiente de *Seebeck*, Eq. 3.3-1, e, quando somados, refletem de forma proporcional o calor absorvido ou libertado [1] [10][16][18].

A corrente elétrica ao atravessar os materiais presentes no módulo de *Peltier*, (contactos, materiais termoelétricos e junções) origina libertação de calor. Esta libertação de calor é conhecida como libertação de calor por efeito de *Joule*.

Não só o valor da corrente elétrica faz depender a energia térmica libertada por efeito de *Joule* (Q_j), fatores como o comprimento e a secção do gerador, l e S , respetivamente, resistividade elétrica dos materiais utilizados, ρ , são essenciais para determinar qual a energia térmica libertada por efeito de *Joule*.

$$Q_j = RI^2 ; R = \rho \frac{l}{S}$$

Eq. 3.3-4

3.4 ANÁLISE DO MODELO TERMOELÉTRICO

O funcionamento dos módulos termoelétrico pode ser explicado e simulado através da elaboração de um modelo elétrico do mesmo. Através deste modelo é possível relacionar todas as variáveis presentes no funcionamento do módulos termoelétricos. Esta relação é feita com recurso a equações que ajudam a explicar o funcionamento dos módulos termoelétricos. Um módulo termoelétrico é construído com recurso a várias junções ligadas entre si como foi descrito anteriormente nesta dissertação. Estas junções possuem uma variável que é essencial para se determinar como funciona o módulo termoelétrico e o que podemos esperar dele. A resistência interna do módulo, a variável em questão, é calculada com base em diversas características da junção, do material usado e do número de junções existentes no módulo. O conhecimento da altura e comprimento de cada elemento da junção e suas características é determinante para o cálculo da resistência elétrica. Uma relação entre as características anteriores permite conhecer a altura do módulo termoelétrico [16][18].

Estas características são determinantes para conhecer as propriedades elétricas e térmicas do módulo termoelectrico.

A Figura 3.4-1 mostra as várias resistências presentes numa junção que compõe o módulo termoelectrico.

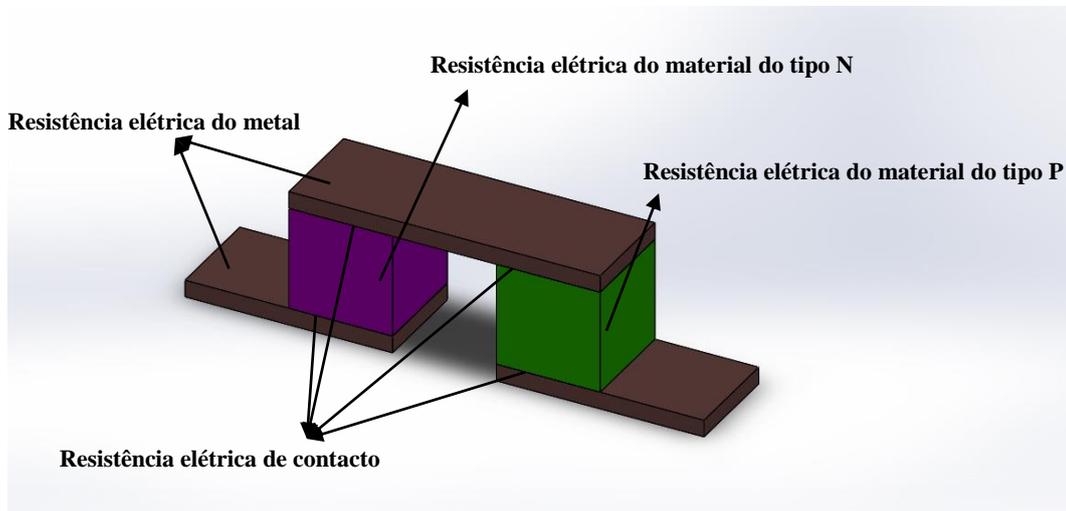


Figura 3.4-1 Exemplo de uma junção do módulo termoelectrico.

A resistência de uma junção pode traduzir-se através da equação a seguir apresentada [1] [10][18]:

$$R_{junção} = R_p + R_n + R_{metal1} + R_{metal2} + R_{metal3} + 4R_{contacto} \quad \text{Eq. 3.4-1}$$

$$R_{junção} = R_p + R_n + 2R_{metal1} + 4R_{contacto} \quad \text{Eq. 3.4-2}$$

A resistência elétrica do elemento tipo P, R_p , pode ser traduzida pela equação seguinte [1][10] [18]:

$$R_p = \rho_p \frac{\text{Comprimento do elemento}}{(\text{Profundidade do elemento} \cdot \text{Largura do elemento})} \quad \text{Eq. 3.4-3}$$

Semelhante ao cálculo da resistência do elemento tipo P é o cálculo da resistência elétrica do elemento tipo N, R_n , a equação seguinte traduz esta resistência [1] [10][18]:

$$R_n = \rho_n \frac{\text{Comprimento do elemento}}{(\text{Profundidade do elemento} \cdot \text{Largura do elemento})} \quad \text{Eq. 3.4-4}$$

A resistência do metal é calculada segundo as dimensões do metal presente na junção, assim como tendo por base o valor da sua resistividade.

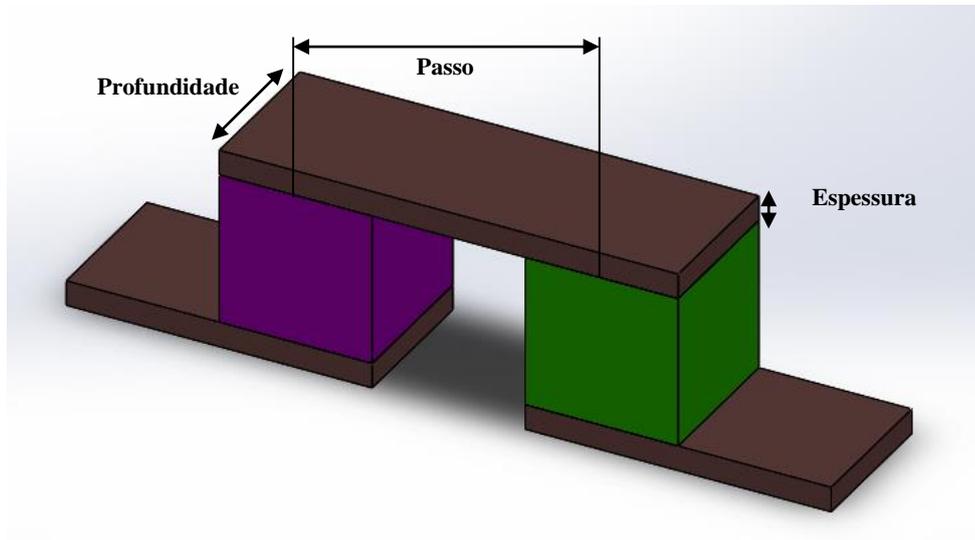


Figura 3.4-2 Junção com a representação da dimensão das junções.

Deste modo a resistência do metal pode ser traduzida através da equação seguinte:

$$R_{metal} = \rho_{metal} \frac{Passo}{(Profundidade\ do\ metal.\ Largura\ do\ metal)}$$

Eq. 3.4-5

A resistência de contacto, $R_{contacto}$, é a resistência criada entre os elementos termoeétricos tipo N e P, com o metal da junção. O cálculo desta resistência eléctrica tem em conta a profundidade do contacto e a sua largura assim como o valor da resistividade do contacto [10][18].

$$R_{contacto} = \frac{\rho_{contacto}}{(Profundidade\ do\ contacto.\ Largura\ do\ contacto)}$$

Eq. 3.4-6

Assim, determina-se a resistência eléctrica da junção, sendo agora possível calcular a resistência eléctrica do módulo termoeétrico. Para isto, é apenas necessário saber qual o

número de junções, $N_{junções}$, que o módulo termoeletrico possui e multiplicar este número de junções pela resistência da junção calculada pela Eq. 3.4-1 [10] [16][18].

$$R_{módulo} = N_{junções} R_{junção}$$

Eq. 3.4-7

O circuito elétrico do módulo termoeletrico é representado na figura seguinte. Este circuito elétrico representa o módulo a funcionar como gerador de potência elétrica. Através da simulação do circuito elétrico é possível prever o funcionamento do módulo para diferentes situações.

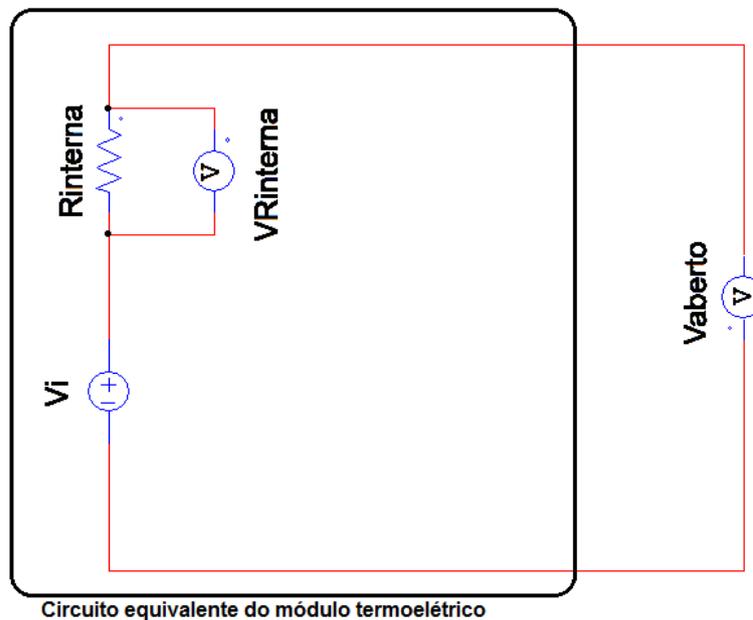


Figura 3.4-3 Circuito elétrico equivalente do módulo termoeletrico, sem qualquer carga a fechar o circuito.

A Figura 3.4-3 mostra o modelo elétrico de um módulo termoeletrico sem qualquer carga a fechar o circuito, ou seja, este encontra-se em aberto, ou vazio. Este modelo elétrico é composto por componentes básicos da eletrônica, uma fonte de tensão, V_i , que simula a tensão gerada pelo módulo termoeletrico quando sujeito a uma diferença de temperatura, e uma resistência, que simula a resistência interna do módulo termoeletrico. Este circuito estando em aberto não possui um valor de corrente significativo a percorre-lo.

O circuito da Figura 3.4-4 é muito similar da Figura 3.4-3, diferenciando-os a resistência de carga ligada à saída do módulo termoeétrico. Esta resistência de carga simula uma carga que fecha o circuito, passando a existir um corrente a percorrer todo o circuito.

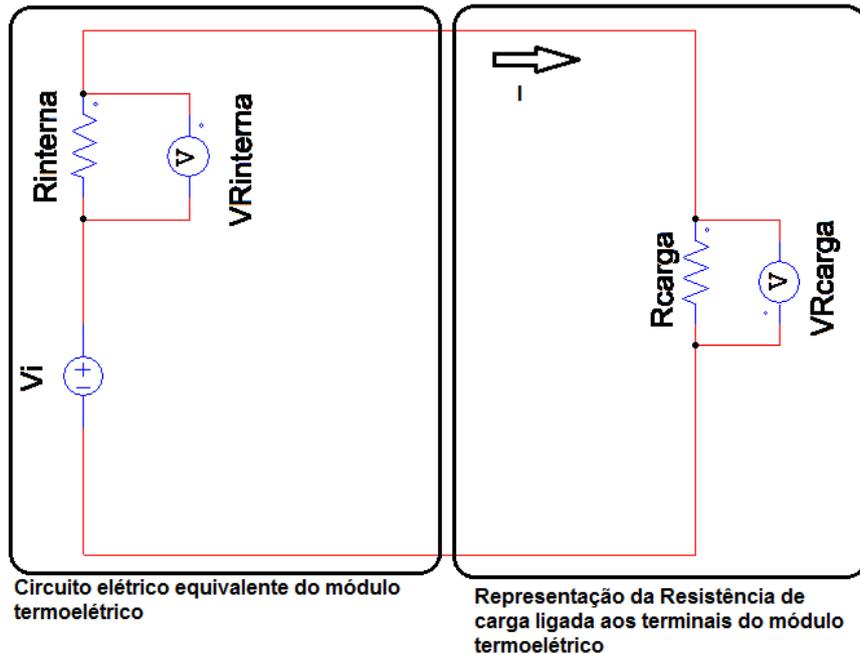


Figura 3.4-4 Circuito elétrico equivalente de um módulo termoeétrico, com uma carga ligada aos terminais do módulo termoeétrico.

Aplicando a lei das malhas é possível analisar o funcionamento do circuito matematicamente.

Aplicando esta ao circuito da Figura 3.4-4 obtém-se a seguinte equação para representar o valor de V_i .

$$V_i = V_{R_{interna}} + V_{R_{carga}}$$

Eq. 3.4-8

Como o circuito é percorrido por uma corrente, I , uma vez que se encontra com uma carga a fechar o circuito, desenvolvendo a Eq. 3.4-8, tem-se que:

$$V_i = (R_{interna} \cdot I) + (R_{carga} \cdot I)$$

Eq. 3.4-9

Pode-se obter o valor da corrente, I , aplicando a lei de Ohm à resistência de carga, assim sendo obtém-se:

$$I = \frac{V_{Rcarga}}{R_{carga}}$$

Eq. 3.4-10

Afim de calcular a resistência interna do módulo termoelétrico, faz-se a substituição da Eq. 3.4-10 na Eq. 3.4-9 e resolve-se a mesma em ordem a resistência interna, R_i .

$$V_i = (R_{interna} \cdot \frac{V_{Rcarga}}{R_{carga}}) + (R_{carga} \cdot \frac{V_{Rcarga}}{R_{carga}})$$

Eq. 3.4-11

Considera-se $V_i = V_{aberto}$ pois quando $V_{Rcarga} = 0V$, substituindo na Eq. 3.4-8:

$$V_i = V_{R_{interna}}$$

Eq. 3.4-12

Como o circuito está em aberto resistência interna não consome potência, logo a tensão em aberto é igual a V_i .

Continuando a resolução em ordem à resistência interna:

$$R_{interna} = \frac{R_{carga}(V_i - V_{carga})}{V_{carga}}$$

Eq. 3.4-13

Substituindo V_i pela Eq. 3.4-12:

$$R_{interna} = \frac{R_{carga}(V_{aberto} - V_{carga})}{V_{carga}}$$

Eq. 3.4-14

É através da Eq. 3.4-14 Que é possível calcular a resistência interna elétrica de um módulo termoelétrico. A utilização desta fórmula torna-se necessária quando não são conhecidas essencialmente as dimensões e características do módulo que se esta a trabalhar. Sendo então necessário efetuar ensaios em aberto e em carga para o cálculo da resistência interna.

A potência máxima disponibilizada pelo módulo é obtida quando a resistência de carga é igual à resistência interna do módulo. A potência elétrica é calculada da seguinte forma:

$$\text{Potência elétrica} = \frac{V_{carga}^2}{R_{carga}}$$

Eq. 3.4-15

Para determinar V_{carga} resolve-se Eq. 3.4-14 em ordem a V_{carga} :

$$V_{carga} = \frac{V_{aberto} \cdot V_{carga}}{R_{interna} + R_{carga}}$$

Eq. 3.4-16

Logo, substituindo V_{carga} na Eq. 3.4-15, obtém-se:

$$\text{Potência elétrica} = \frac{R_{carga} \cdot V_{aberto}^2}{(R_{interna} + R_{carga})^2}$$

Eq. 3.4-17

Se se considerar que a potência elétrica produzida é sempre máxima, temos que $R_{carga} = R_{interna}$, então a potência elétrica passa a ser calculada da seguinte forma:

$$\text{Potência elétrica} = \frac{V_{aberto}^2}{4R_{interna}}$$

Eq. 3.4-18

Se a resistência interna do módulo não for calculada pelo circuito equivalente elétrico, mas sim calculada pelas dimensões e características do módulo termoeletrico, Eq. 3.4-7, tem-se que a potência elétrica é dada por:

$$\text{Potência elétrica} = \frac{V_{aberto}^2}{4R_{módulo}}$$

Eq. 3.4-19

3.5 ANÁLISE DO MODELO TERMOELÉTRICO PARA MÓDULOS EM SÉRIE

Os ensaios efetuados durante esta dissertação foram realizados com os módulos ligados em série entre si, dois a dois. No mesmo bloco existem dois módulos de cada lado estando estes ligados em série de cada lado. Uma série encontra-se em carga e outra série encontra-se em aberto para efeitos de cálculo e análise ao longo dos ensaios efetuados.

A Figura 3.5-1 representa o equivalente elétrico de dois módulos termoelétricos ligados em série entre si.

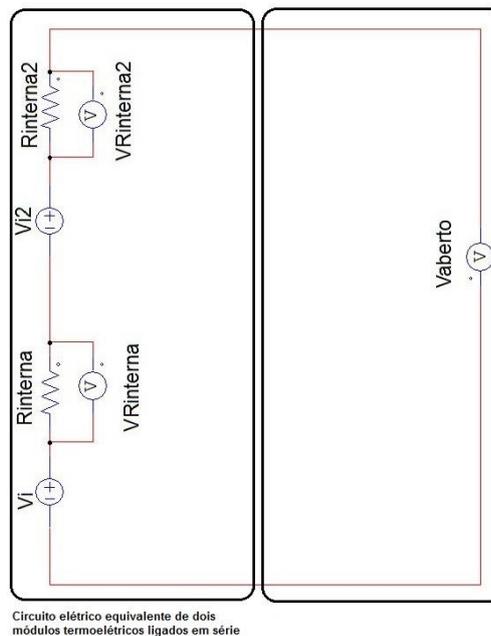


Figura 3.5-1 Circuito elétrico equivalente de dois módulos termoelétricos ligados em série, sem qualquer carga a fechar o circuito.

À semelhança da Figura 3.4-3, a Figura 3.5-1 é composta por componentes básicos da eletrónica e encontra-se sem qualquer carga a fechar o circuito, encontrando-se este em aberto, ou vazio.

A Figura 3.5-2 apresenta um circuito de todo igual ao da Figura 3.5-1, diferenciando-se apenas por uma carga ligada ao terminais da série dos dois módulos, representada por uma resistência. Esta resistência fecha então o circuito, fazendo circular uma corrente pelo mesmo.

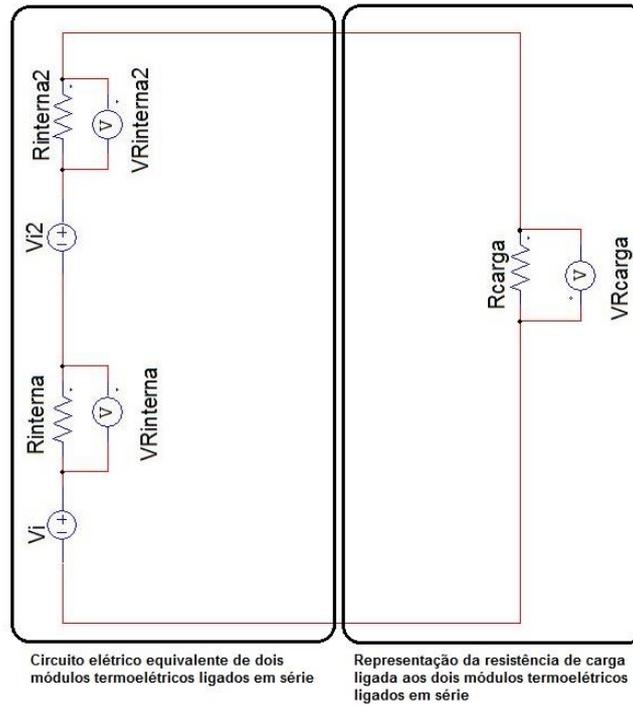


Figura 3.5-2 Circuito elétrico equivalente de dois módulos termoeétricos, com uma carga ligada aos terminais dos módulos termoeétricos.

Aplicando a lei das malhas é possível analisar do ponto de vista elétrico o circuito.

Aplicando esta ao circuito da figura anterior tem-se que:

$$V_i + V_{i2} = V_{R_{interna}} + V_{R_{interna2}} + V_{R_{carga}}$$

Eq. 3.5-1

Aplicando a lei de Ohm e sabendo que:

$$I = \frac{V_{R_{carga}}}{R_{carga}}$$

Eq. 3.5-2

Tem-se:

$$V_i + V_{i2} = (R_{interna} \cdot \frac{V_{R_{carga}}}{R_{carga}}) + (R_{interna2} \cdot \frac{V_{R_{carga}}}{R_{carga}}) + (R_{carga} \cdot \frac{V_{R_{carga}}}{R_{carga}})$$

Eq. 3.5-3

A tensão em aberto, V_{aberto} , é igual à soma de V_i com V_{i2} , pois o circuito se encontra em aberto não consome potência.

Resolvendo a Eq. 3.5-3 em ordem a $R_{interna}$ e $R_{interna2}$, de modo a se obter a equação para a resistência interna do circuito, obtém-se:

$$R_{interna} + R_{interna2} = \frac{R_{carga}((V_i + V_{i2}) - V_{carga})}{V_{carga}}$$

Eq. 3.5-4

Sabendo que:

$$V_{aberto} = V_i + V_{i2}$$

Eq. 3.5-5

$$R_{interna} = R_{interna2}$$

Eq. 3.5-6

Tem-se:

$$2R_{interna} = \frac{R_{carga}(V_{aberto} - V_{carga})}{V_{carga}}$$

Eq. 3.5-7

É através da Eq. 3.5-7 que é possível calcular a resistência interna elétrica da série dos dois módulos termoelétricos. Do mesmo modo que o circuito equivalente para apenas um módulo termoelétrico, a utilização desta fórmula é necessária quando não são conhecidas essencialmente as dimensões e características do módulo que se está a trabalhar. Sendo então necessário efetuar ensaios em aberto e em carga para o cálculo da resistência interna da série dos módulos.

A potência máxima disponibilizada pelos módulos é obtida quando a resistência de carga é igual a resistência interna dos dois módulos somada. A potência elétrica é calculada da seguinte forma:

$$Potência\ elétrica = \frac{V_{carga}^2}{R_{carga}}$$

Eq. 3.5-8

Para determinar V_{carga} resolve-se Eq. 3.5-7 em ordem a V_{carga} :

$$V_{carga} = \frac{V_{aberto} \cdot V_{carga}}{2R_{interna} + R_{carga}}$$

Eq. 3.5-9

Logo, substituindo V_{carga} na Eq. 3.5-8, obtém-se:

$$Potência\ elétrica = \frac{R_{carga} \cdot V_{aberto}^2}{(2R_{interna} + R_{carga})^2}$$

Eq. 3.5-10

Se se considerar que a potência elétrica produzida é sempre máxima, temos que $R_{carga} = R_{interna}$, então a potência elétrica passa a ser calculada da seguinte forma:

$$Potência\ elétrica = \frac{V_{aberto}^2}{4 \times 2R_{interna}}$$

Eq. 3.5-11

4 TERMODINÂMICA E TRANSFERÊNCIA DE CALOR

4 TERMODINÂMICA E TRANSFERÊNCIA DE CALOR

4.1 INTRODUÇÃO

A termodinâmica pode ser apelidada como a ciência da energia. Nos nossos dias é interpretada de modo abrangente, como incluindo todos os aspetos relacionados com a energia e as transformações energéticas, incluindo a geração de potência, a refrigeração e as relações entre as propriedades da matéria [24][25].

A primeira lei da termodinâmica baseia-se no princípio de conservação de energia. A energia não pode ser criada ou destruída, apenas pode mudar de forma.

Este princípio permite concluir que, a variação da energia, ΔE , de um sistema durante um processo é igual à diferença entre a energia a entrar e a sair do sistema [1] [24][25].

$$\Delta E = E_{in} - E_{out}$$

Eq. 4.1-1

O calor recebido por um corpo, Q , é igual à soma da variação da energia interna, ΔE , com o trabalho realizado, W , pelo sistema.

$$\Delta E = Q - W$$

Eq. 4.1-2

A segunda lei da termodinâmica afirma que a energia possui um grau de qualidade além de quantidade. Segundo esta lei, os processos reais além de cumprirem o princípio de conservação de energia, acontecem numa dada direção, na direção decrescente da qualidade de energia.

A segunda lei da termodinâmica defende que dois corpos a temperaturas diferentes, colocados no mesmo ambiente, tendem a igualar as suas temperaturas ao fim de certo tempo. O corpo com uma temperatura maior irá perder energia térmica e o corpo com uma energia térmica menor irá absorver energia térmica até se atingir um estado de equilíbrio entre os dois corpos. Assim, a segunda lei determina a direção das trocas energéticas e não apenas a conservação de energia, ou seja, lida com o fenómeno das irreversibilidades termodinâmicas.

4.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor usa os conceitos e leis da termodinâmica, aplicando-os a sistemas concretos e, em particular, aos fluxos térmicos que ocorrem especialmente nesse sistema, em domínios sólidos (condução), fluidos (convecção) e até através do vácuo que separa vários corpos (radiação).

O conceito de transferência de calor engloba vários tipos principais de transferência de calor, como a condução, convecção, radiação e mudança de fases. Fisicamente não é possível isolar de modo real as interações dos diferentes tipos no mesmo sistema, pois a distribuição de temperatura é regida pelo efeito combinado dos vários tipos de transferência de calor [25][26] [27].

O tipo de transferência de calor por condução, define-se como o modo de transferência de calor em que a energia térmica passa das zonas de alta temperatura para as de baixa temperatura através da propagação da agitação molecular entre partículas contíguas. Este efeito vinga mais sobre os corpos sólidos, principalmente corpos que também são bons condutores elétricos, pois bons condutores elétricos são por norma bons condutores térmicos. A transferência de calor por condução acontece pela difusão do movimento cinético, á escala molecular/atômica. A energia de um corpo é transferida dos átomos com níveis de energia mais elevados para os átomos com níveis de energia mais baixos [26][27]. A taxa de transferência de calor por condução, $\dot{Q}_{condução}$, é proporcional à área normal ao fluxo de calor, à direção do fluxo, ao gradiente de temperatura e à condutividade térmica do corpo.

$$\dot{Q}_{condução} = -\kappa A \frac{dT}{dx}$$

Eq. 4.2-1

$$\dot{Q}_{condução} = -\kappa A \frac{T_1 - T_2}{\Delta x}$$

Eq. 4.2-2

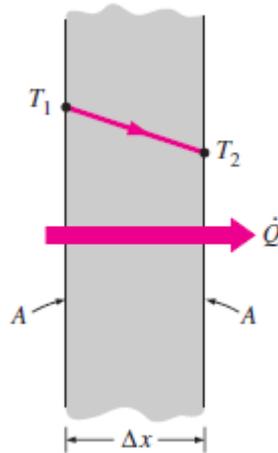


Figura 4.2-1 Condução de calor de um corpo com uma certa espessura[24].

A direção de fluxo de calor encontra-se orientada sobre o eixo do 'x', atravessando um corpo com uma espessura Δx , a partir da Lei de *Fourier* obtém-se a Eq. 4.2-2.

Convecção é o modo de transferência de energia entre uma superfície sólida e o líquido ou gás adjacente que está em movimento, envolve os efeitos combinados da condução e do movimento do fluido. Apesar da complexidade do fenómeno da convecção a taxa de transferência de calor devida a este fenómeno é proporcional à diferença de temperatura entre a superfície e o fluido, sendo a constante de proporcionalidade o coeficiente de transferência de calor por convecção, h . Valores médios para este coeficiente podem ser estimados a partir de correlações empíricas para diversas configurações práticas. A potência térmica transferida por convecção é assim definida pela Eq. 4.2-3, onde A é a área de superfície onde ocorre a transferência de calor [1] [10] [25][26][27]:

$$\dot{Q}_{convecção} = A \cdot h \cdot (T_{quente} - T_{fluido})$$

Eq. 4.2-3

A radiação é a energia emitida pela matéria sob a forma de ondas eletromagnéticas como resultado das mudanças nas configurações eletrónicas dos átomos ou moléculas. Ao contrário da condução e da convecção, a transmissão de energia por radiação não necessita da presença de nenhum meio físico. No caso da transferência de calor apenas interessa a radiação térmica, que é a forma de radiação emitida pelos corpos devido à sua temperatura [25][26].

Um corpo possui a característica, pelos materiais que é composto, de ser capaz de armazenar energia térmica, chama-se a este efeito a capacidade calorífica específica ou calor específico, C_p , para uma pressão constante [24][25][26].

$$C_p = \frac{C}{m}$$

Equação 4.2-1

O calor específico é a quantidade de calor que é necessária fornecer a um corpo de modo unitária para que se produza uma diferença de temperatura unitária.

$$C_p = \frac{Q}{m\Delta T}$$

Equação 4.2-2

Resolvendo a Eq. 4.2-2 em ordem a Q é possível determinar a quantidade de calor transferida para corpo com base no aumento de temperatura.

A potência térmica relaciona a quantidade de calor transferida para um corpo por unidade de tempo.

$$\text{Potência térmica} = m \cdot C_p \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

Equação 4.2-3

É possível também usar esta fórmula para calcular a potência térmica que é transferida para um determinado caudal de fluido, \dot{m} [26][24][25][27]:

$$\text{Potência térmica} = \frac{m}{\Delta t} \cdot C_p \cdot \Delta T = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Equação 4.2-4

É possível determinar a potência térmica dos gases de escape através da equação:

$$\text{Potência térmica gases} = \dot{m}_{gases} \cdot C_{p_{gases}} \cdot (T_{gases_{in}} - T_{gases_{out}})$$

Equação 4.2-5

Dado que o calor só pode ser transferido de um meio mais quente para um mais frio, apenas se conseguirá recuperar a energia dos gases de escape enquanto este tiver uma

temperatura superior à do *Heat Pipe*. Assim, a potência aproveitável pelo gerador termoelétrico, nos gases de escape, é determinada pela equação:

$$\text{Potência térmica aproveitável gases} = m_{\text{gases}} \cdot C_{p_{\text{gases}}} \cdot (T_{\text{gases}_{in}} - T_{\text{Heat Pipe}})$$

Equação 4.2-6

4.3 HEAT PIPES

Para o desenvolvimento desta dissertação é essencial aproveitar o máximo de calor disponível do escape, de modo a que o gerador termoelétrico tire máximo partido da energia térmica disponível para gerar energia elétrica. No entanto, é necessário não ultrapassar os limites de funcionamento, em termos de temperatura, dos módulos termoelétricos de modo a que estes não sejam danificados por excesso de temperatura. Com a utilização de *Heat Pipes* de condutância variável é possível o máximo aproveitamento de calor que a fonte de calor possui, conseguindo controlar a temperatura de operação dos *Heat Pipes* e por consequência do módulo termoelétrico.

A invenção do *Heat Pipes* é atribuída a *Gaugler*, 1942, sendo que o termo cunhado por *Grover*, que iniciou o desenvolvimento dos primeiros *Heat Pipes* nos anos 60 [27].

O princípio básico de funcionamento do *Heat Pipe* é a transferência de calor de uma fonte quente para uma fonte fria através de um fluido de mudança de fase que opera num espaço confinado. Evaporando com o calor da fonte quente e condensando ao libertar para a fonte fria.

O *Heat Pipe* possui uma elevada condutividade térmica efetiva, dado que opera segundo o conceito de mudança de fase. Por este motivo, torna-se um excelente condutor de energia térmica. Contém no seu interior um líquido (tipicamente água) numa quantidade mínima de modo a que o restante espaço do *Heat Pipe* contenha vapor ou um tipo de gás, como o ar, que não seja suscetível de condensar (no caso dos *Heat Pipes* de condutância) [27].

O *Heat Pipe* é composto por duas zonas principais, o condensador e o evaporador, os quais são colocados de forma oposta nas extremidades. A fonte de calor externa ao *Heat Pipe* aquece o evaporador, que contém no seu interior um líquido que é aquecido atingindo o ponto de ebulição. Neste ponto, o líquido passa do estado líquido para o estado de vapor, vapor esse que apresenta um movimento ascendente ao longo do *Heat Pipe* até

chegar à zona de condensação. É aqui que o calor é transmitido para um dissipador ou para, no contexto da dissertação, o módulo termoelétrico. Ocorre então a condensação do vapor e este volta para a zona de evaporação por ação da força gravítica, sendo este ciclo repetido enquanto a fonte de calor existir. A temperatura de ebulição do líquido, a temperatura de funcionamento do *Heat Pipe*, depende do líquido que está a ser usado, da pressão interna do *Heat Pipe* [27][28].

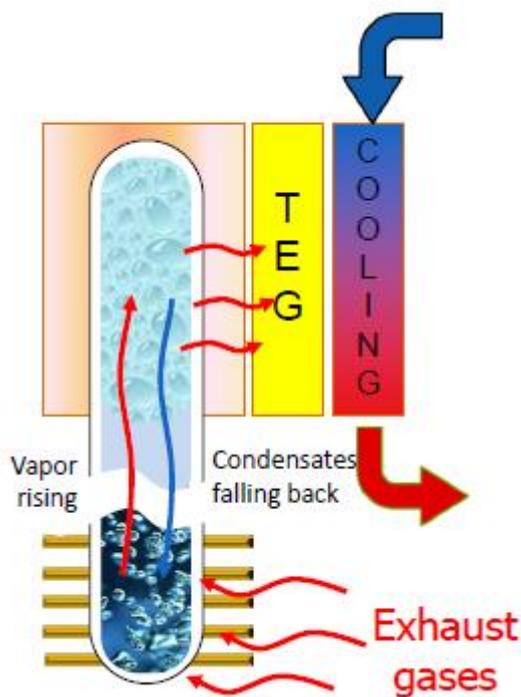


Figura 4.3-1 *Heat Pipe* básico[29].

Tendo em conta os aspetos citados, é possível escolher as condições de funcionamento que se adequam melhor ao tipo de aplicação pretendida, pois através do líquido de trabalho e da alteração da pressão é possível controlar o ponto de ebulição do líquido, assim como a temperatura de funcionamento do *Heat Pipe*. A alteração da pressão pode ser feita por subpressão ou sobre pressão. Quando a fonte de calor não é capaz de colocar o líquido em ebulição, diminui-se a pressão do *Heat Pipe* de modo a que o líquido entre em ebulição, passando o sistema a funcionar como pretendido. Ao aumentar a pressão do *Heat Pipe* altera-se também o ponto de ebulição do líquido, tornando assim mais elevadas as temperaturas de operação do *Heat Pipe* [27],[29].

O conceito de transferência de calor por convecção é essencial neste sistema, pois é normalmente a resistência térmica mais elevada que importa reduzir através do uso de alhetas e aumento de turbulência. A taxa de transferência de calor entre a fonte de calor e

o evaporador, onde se encontra o líquido, deve ser a maior possível, o que implica que a área de contacto entre o evaporador e a fonte de calor também seja a maior possível.

A utilização de *Heat Pipes* básicos não é de todo o ideal, exibindo diversos entraves em relação à estabilidade da temperatura de funcionamento ao longo do tempo. A pressão no interior do *Heat Pipe* modifica-se aquando do aumento da carga térmica, aumentando a pressão interna e, logo, a temperatura de funcionamento. Tendo em vista a solução deste problema surgem então, baseados nos *Heat Pipes* básicos, os *Heat Pipes de Condutância Variável*.

O *Heat Pipe de Condutância Variável*, é em tudo semelhante ao modelo de *Heat Pipe* básico, à exceção de apresentar um vaso de expansão a seguir à zona de condensação, que estabiliza a pressão de funcionamento e é usado em conjunção com um gás não condensável. É assim possível fazer com que a temperatura interna do *Heat Pipe* se mantenha praticamente estável ao longo do tempo, pois não há uma alteração da pressão interna do *Heat Pipe*, [27][29].

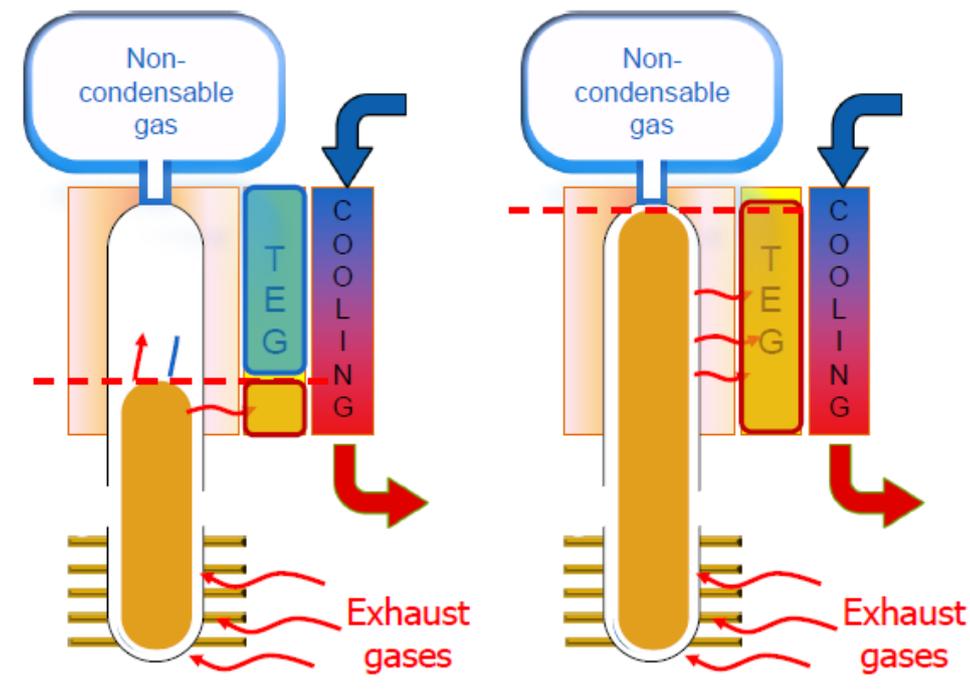


Figura 4.3-2 *Heat Pipe* de condutância variável[29].

Tabela 4.3-1 Possíveis líquidos de trabalho e respetivo ponto de ebulição para a pressão ambiente, um bar.

Líquido de Trabalho	Ponto de ebulição (°C)
Hélio	-261
Azoto	-196
Amoníaco	-33
Pentano	28
Acetona	54
Metanol	67
Etanol	78
Água	100
Flutec PP9	160
DowthermA	257
Mercúrio	361
Potássio	774
Sódio	892
Lítio	1340
Prata	2212

5 TRABALHO EXPERIMENTAL E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5 TRABALHO EXPERIMENTAL E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo da dissertação encontra-se descrito o trabalho e resultados relativos ao estudo e desenvolvimento do gerador termoelétrico. Continuando o estudo realizado em dissertações anteriores [1][10], o gerador termoelétrico encontra-se numa configuração em que os blocos são ligados em série entre si ao longo dos *Heat Pipes*, pois estudos anteriores concluíram que com esta nova configuração obtém-se melhores resultados. O gerador termoelétrico utilizado mantém-se com os blocos em serie tendo apenas uma alteração na orientação do evaporador. Este, no trabalho anterior, teria os blocos e o evaporador numa posição perpendicular à direção dos gases de escape, quando agora esta posição é paralela à direção dos gases de escape. Esta alteração tem como objetivo melhorar a eficácia do evaporador.

Este capítulo apresentará uma caracterização do gerador termoelétrico utilizado, seguido da nova aquisição dos dados e do seu tratamento, concluindo-se com a apresentação dos ensaios efetuados e seus resultados.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

O modelo de gerador termoelétrico aqui apresentado possui uma pequena alteração relativamente ao estudado e desenvolvido em trabalhos anteriores. Esta modificação resume-se a orientação do evaporador. As imagens a seguir apresentadas ilustram a visão geral do gerador termoelétrico implementado. Na Figura 5.2-1 pode-se observar o gerador termoelétrico antigo onde se observa a disposição dos blocos e do evaporador numa posição perpendicular à direção do caudal dos gases, fonte de calor para o evaporador.

Na Figura 5.2-2 observa-se em duas perspetivas distintas o que foi referido anteriormente, a disposição dos blocos e do evaporador encontram-se numa posição paralela à direção do caudal de gases. É este o modelo atual de gerador termoelétrico que foi usado no desenvolvimento prático da dissertação para os mais diversos testes e ensaios.



Figura 5.2-1 Modelo em *SolidWorks* do gerador termoelétrico antigo.



Figura 5.2-2 Modelo em *SolidWorks* do gerador termoelétrico atual.

As figuras apresentadas anteriormente ilustram um modelo virtual do gerador termoelétrico usado. Na imagem seguinte, apresentam-se duas fotografias do gerador termoelétrico (Figura 5.2-3).

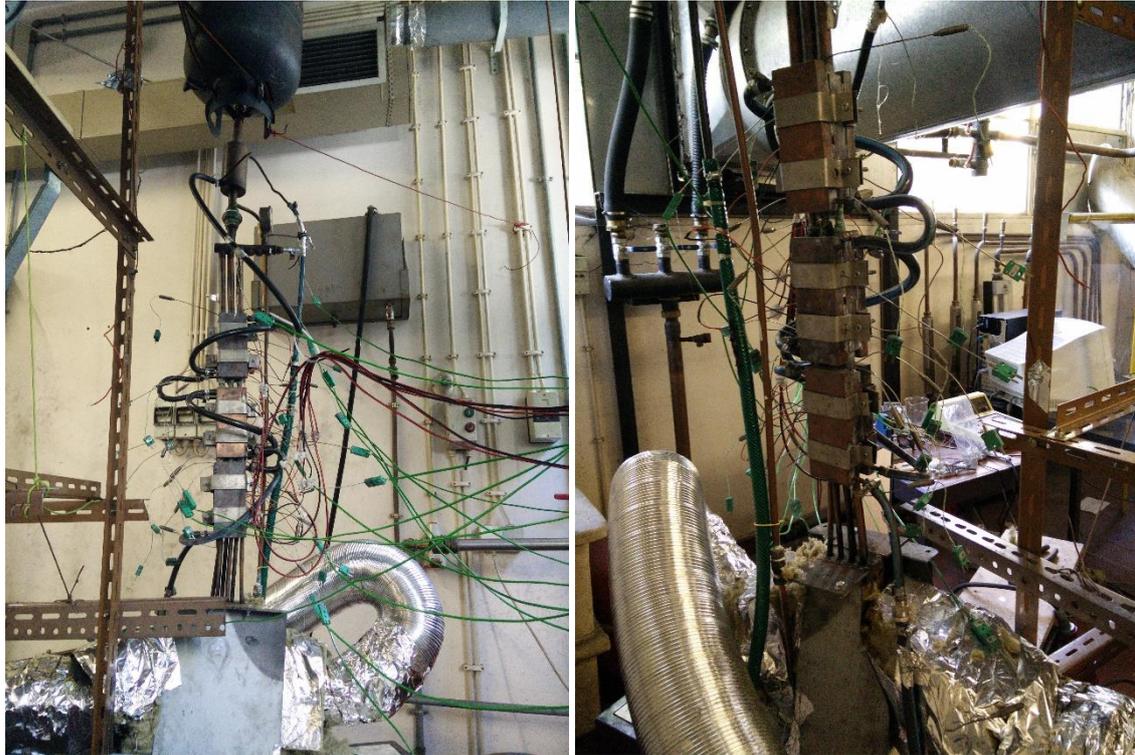


Figura 5.2-3 Gerador termoelétrico.

A alteração relativa à posição do evaporador pode ser observado nas figuras a seguir. A dimensão e construção do evaporador mantém-se em todas as suas características iguais.

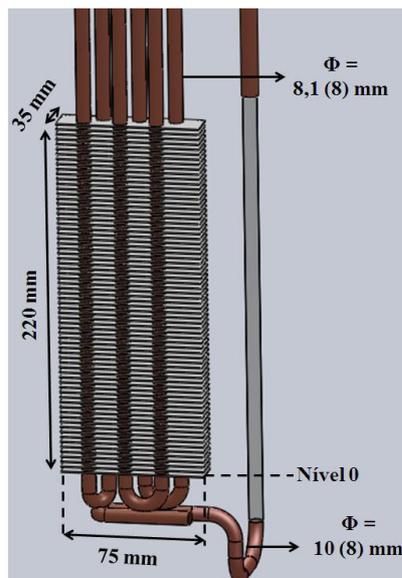


Figura 5.2-4 Modelo em *SolidWorks* do evaporador e respetivas dimensões.

A alteração da orientação do evaporador originou uma pequena alteração na estrutura da conduta de gases.

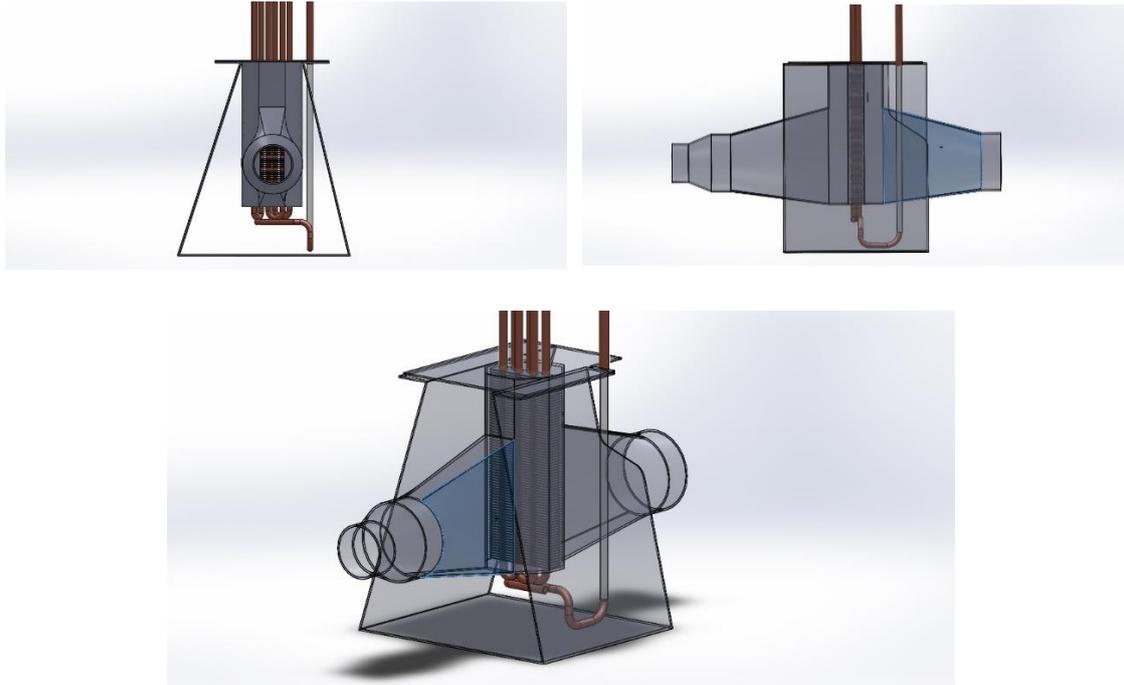


Figura 5.2-5 Modelo da conduta de gases em *SolidWorks*, modelo antigo.

Pode ser observado na Figura 5.2-6 o novo modelo de evaporador implementado no protótipo de testes para esta dissertação.

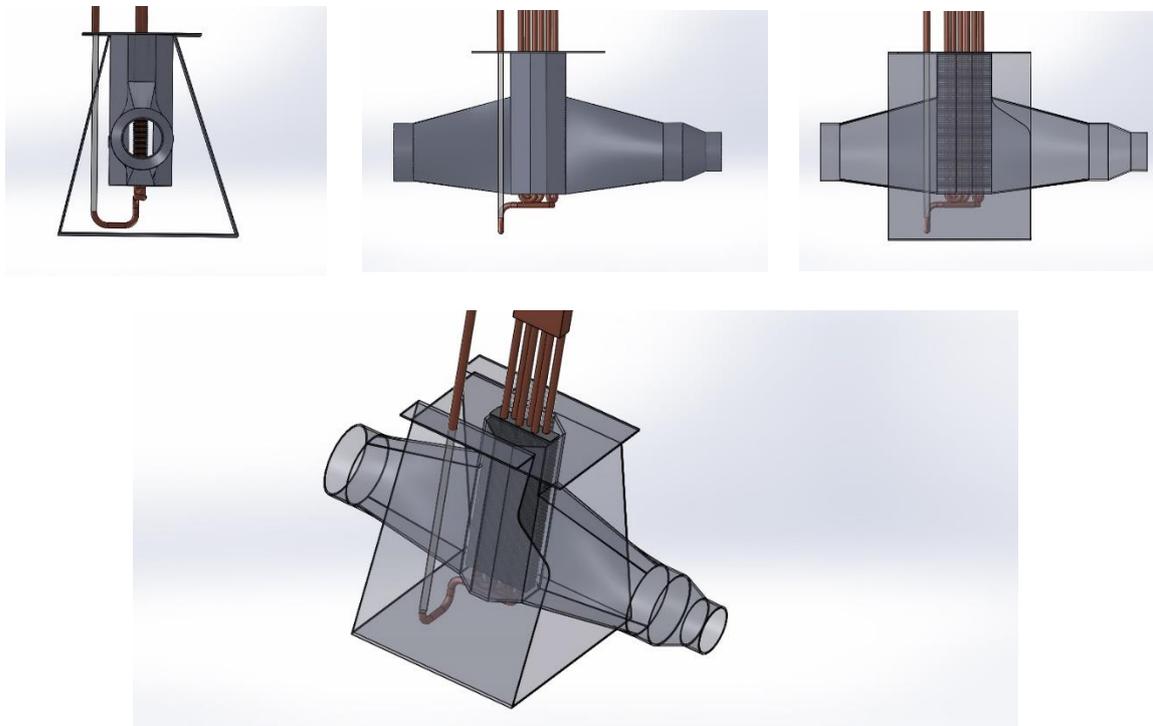


Figura 5.2-6 Modelo da conduta de gases em *SolidWorks*, modelo novo.

As figuras seguintes mostra o protótipo de testes assim como as suas dimensões.

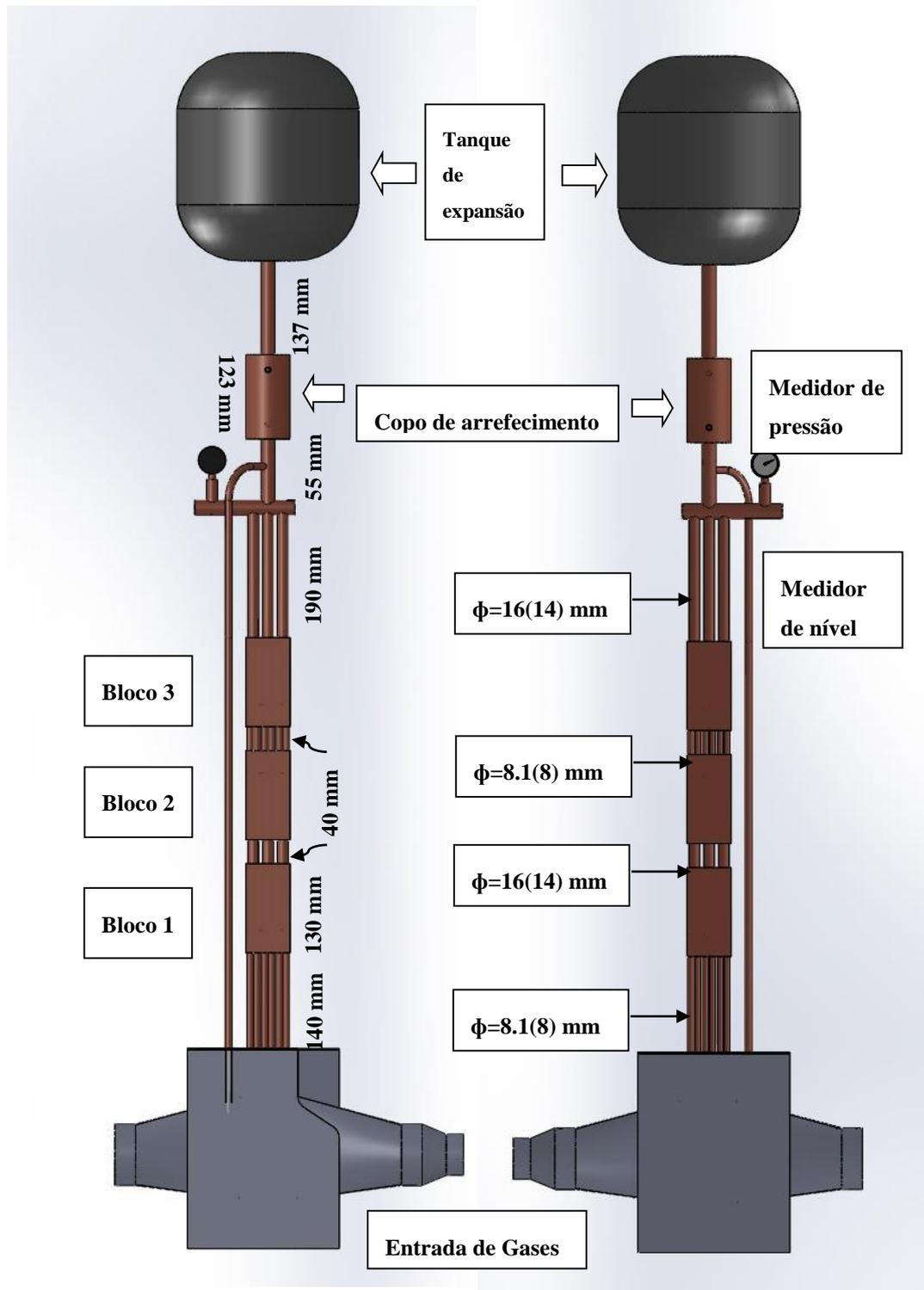


Figura 5.2-7 Modelo geral com respetivas dimensões, desenhado em *SolidWorks*.

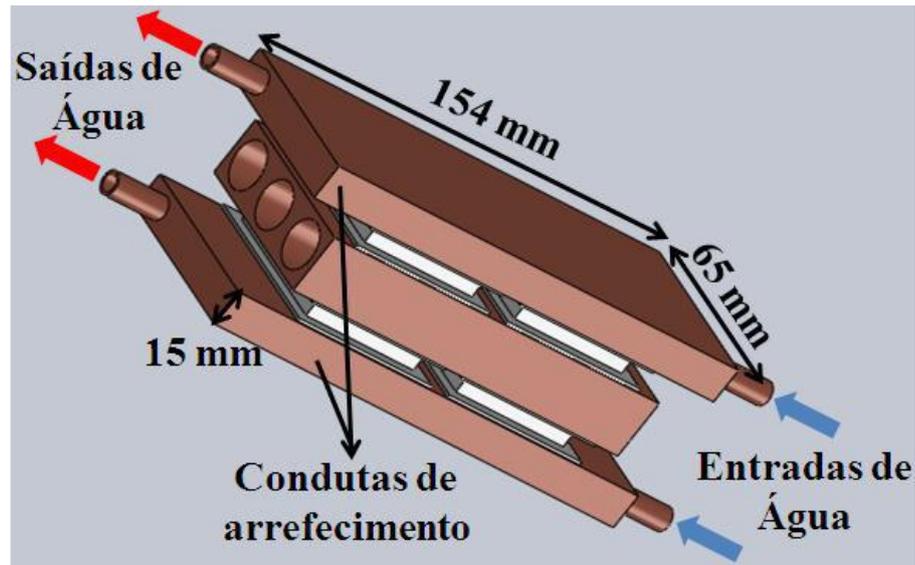


Figura 5.2-8 Bloco condensador com as condutas de arrefecimento e os módulos termoelétricos[10].

As condutas de arrefecimento, assim como todo o sistema de arrefecimento colocado nos módulos termoelétrico permanece igual neste caso.

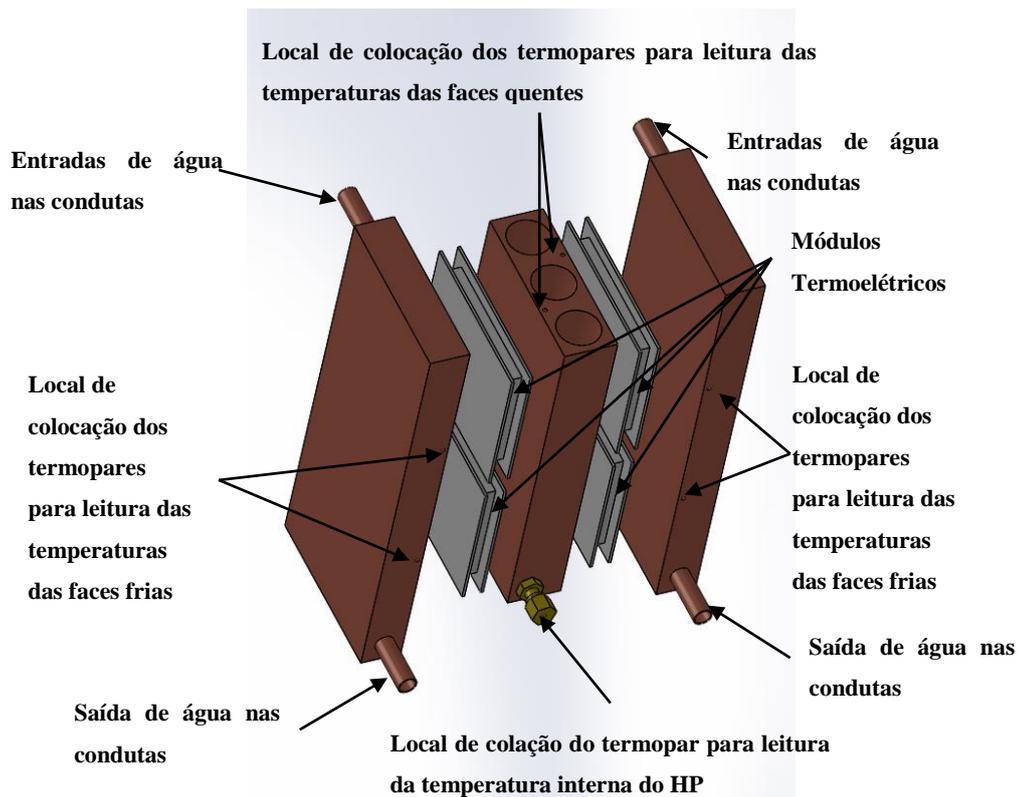


Figura 5.2-9 Condutas de arrefecimento colocadas num bloco com módulos termoelétricos.

As condutas de arrefecimento encontram-se ligadas em serie ao longo de todo o protótipo. As condutas que estão colocadas sobre os módulos termoelétrico do bloco 1 são as primeiras a receber a água de arrefecimento, subindo para as condutas do bloco 2, para as do bloco 3, sendo a saída desta ultima conduta ligada ao copo de arrefecimento.

Os módulos termoelétricos encontram-se em cada bloco ligados em série, estando um lado em aberto e o outro em carga.

5.3 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS

A aquisição de dados e o seu tratamento foram totalmente reformulados no presente trabalho. Foram realizadas leituras de temperaturas em diversos pontos do gerador termoelétrico e leituras de tensões produzidas nos módulos termoelétricos quando estes se encontravam em carga e em aberto/vazio. Em carga, quando se aplicava aos terminais dos módulos uma carga com resistência semelhante à resistência interna dos módulos de modo a ter o ponto de potência máxima do módulo.

Foram usadas novas placas de aquisição de dados para as temperaturas e tensões, da *National Instruments*, sendo estas a *NI 9214* e a *NI 9201*, respetivamente, ambas as placas se encontram ligadas num *NI cDAQ 9174* que é ligado ao computador com o software de aquisição *Labview*. A placa de aquisição *NI 9214* foi utilizada para a medição das diversas temperaturas. Esta placa permite a medição de 16 termopares através de um *ADC* do tipo *Sigma-Delta* com resolução de 24 bits e uma taxa de amostragem de 68 amostras por segundo. A sua repetibilidade é elevada, de $\pm 0.42^{\circ}\text{C}$ [30].



Figura 5.3-1 Placa da *National Instruments*, *NI 9214* para aquisição do sinal dos termopares e medição da temperatura.

Para a medição de temperaturas nos diversos pontos do gerador termoelétrico foram utilizados termopares tipo K com bainha metálica da *RS* que toleram uma gama de temperaturas entre os 0°C a 1100°C .



Figura 5.3-2 Termopares tipo K da RS que foram usados para a medição de temperaturas.

A placa de aquisição NI 9201 foi utilizada para a medição de tensões. Esta placa tem 8 entradas analógicas e possui um ADC com resolução de 12 bits do tipo SAR [31].

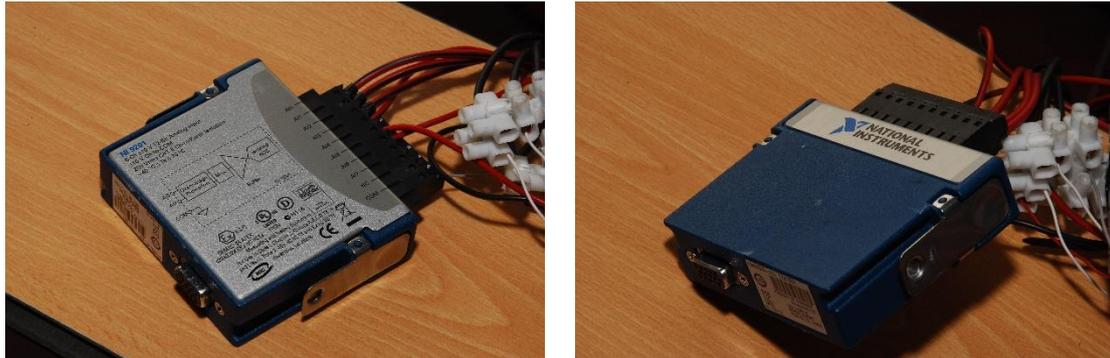


Figura 5.3-3 Placa de aquisição da National Instruments, NI 9201, para medição das tensões.

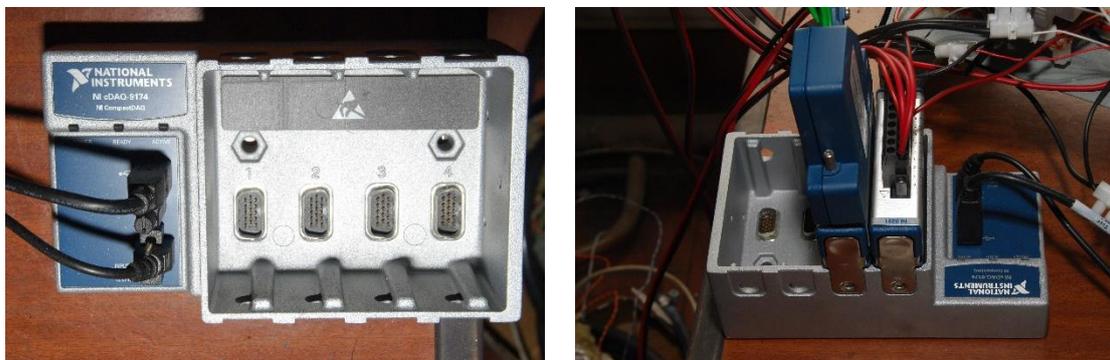


Figura 5.3-4 Gaveta de ligação ao computador da série CompactDAQ.

Para aquisição e leitura dos dados foi desenvolvido um *software* de aquisição utilizando programação *Labview*, da *National Instruments*. Este programa é capaz de fazer a aquisição das temperaturas e tensões assim como monitorizá-las em tempo real.

Como se pode observar na Figura 5.3-5, o programa, desenvolvido de raiz, apresenta um visual simples e básico, criado tendo em vista a fácil manipulação do mesmo por parte do utilizador.

Neste programa é possível monitorizar em tempo real as temperaturas e as tensões do sistema, assim como definir todas as condições de aquisição que se pretende. É

possível definir o tipo de termopar que é utilizado assim como em que unidade de medida se efetua a medição da temperatura. É possível definir o valor e o canal para estabelecer o valor da junção fria que, no caso, para utilização no nosso sistema usa-se medição deste valor de junta fria pelos sensores internos da placa de aquisição de dados. É possível definir o número de amostras por segundo que pretendemos adquirir no modelo, sendo esta opção válida para a aquisição de sinais dos termopares e das tensões. Para ambas as medições é possível na parte inferior de cada gráfico respetivo definir os canais de entrada das placas que se pretende monitorizar.

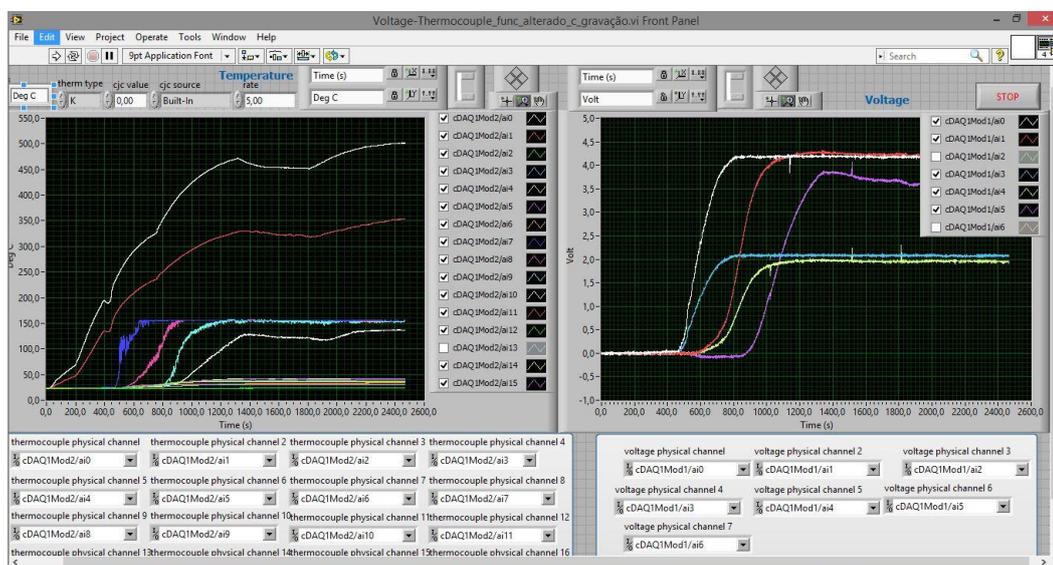


Figura 5.3-5 Programa de aquisição de dados em funcionamento.

Deste modo, o gráfico que se apresenta do lado esquerdo da Figura 5.3-5 é o referente às temperaturas que estão a ser medidas através dos termopares tipo K presentes em diversos sítios do gerador. O gráfico do lado direito apresenta as tensões que estão a ser produzidas no gerador termoelétrico aos terminais dos módulos termoelétricos presentes em cada bloco, sendo estes ligados em series de dois, em cada lado de cada bloco. Os módulos em serie que se encontram no bloco encontram-se num lado do bloco em aberto e no outro lado em carga, com uma carga com o valor de resistência aproximadamente igual a duas vezes a resistência interna do módulo termoelétrico.

Quando é pretendido concluir o ensaio, ao clicar no botão de ‘stop’, no canto superior direito do ambiente gráfico do programa, a aquisição de dados termina e um ficheiro em formato *Excel* é criado e é guardado com um nome que o utilizador pretenda. Este ficheiro

criado contém todos os valores adquiridos por todos os sensores e entradas analógicas das tensões, ao longo do tempo consoante a amostragem selecionada.

Os dados são exportados para uma folha de cálculo como a da Figura 5.3-6.

tempo	Temp 0	temp 1	temp 2	temp 3	temp 4	temp 5	temp 6	temp 7	temp 8	temp 9	temp 10	temp 11	temp 12	temp 13	temp 14	temp 15	Volt 0	Volt 1	Volt 2	Volt 3	Volt 4	Volt 5
0	24,222	24,3136	25,2496	25,256	25,2016	25,2872	24,5335	25,1525	25,1993	25,1488	25,125	25,245	25,1758	25,1504	25,1912	25,1608	-0,02886	0,00238	0,00759	-0,01311	0,00108	0,00241
0,2	24,222	24,3136	25,2496	25,256	25,2016	25,2872	24,5335	25,1525	25,1993	25,1488	25,125	25,245	25,1758	25,1504	25,1912	25,1608	0,00512	-0,01305	0,00245	0,00232	-0,00593	-0,00788
0,4	24,222	24,3136	25,2496	25,256	25,2016	25,2872	24,5335	25,1525	25,1993	25,1488	25,125	25,245	25,1758	25,1504	25,1912	25,1608	-0,00621	-0,00276	-0,00245	-0,00282	-0,00125	-0,01302
0,6	24,222	24,3136	25,2496	25,256	25,2016	25,2872	24,5335	25,1525	25,1993	25,1488	25,125	25,245	25,1758	25,1504	25,1912	25,1608	0,00512	0,00238	-0,00784	0,00232	0,00108	-0,01302
0,8	24,222	24,3136	25,2496	25,256	25,2016	25,2872	24,5335	25,1525	25,1993	25,1488	25,125	25,245	25,1758	25,1504	25,1912	25,1608	0,00512	-0,01819	-0,0027	0,00232	-0,00826	-0,00273
1	24,222	24,3058	25,2429	25,2424	25,2009	25,2768	24,5395	25,1453	25,1933	25,1368	25,1165	25,2274	25,1668	25,1495	25,1928	25,1599	-0,00621	0,00752	-0,00784	-0,00282	0,00342	-0,00273
1,2	24,222	24,3058	25,2429	25,2424	25,2009	25,2768	24,5395	25,1453	25,1933	25,1368	25,1165	25,2274	25,1668	25,1495	25,1928	25,1599	0,00512	0,00238	-0,00784	0,00232	0,00108	-0,00273

Figura 5.3-6 Exemplo da folha de cálculo exportada do programa em LabView.

Estes são colocados numa outra folha de *Excel* de modo a serem efetuados todos os cálculos necessários e todos os gráficos de estudo pretendidos.

A Tabela 5.3-1 representa a nomenclatura e significado das medições efetuadas, colocadas na folha de *Excel*.

Tabela 5.3-1 Nomenclatura e significado das medições efetuadas.

Nomenclatura modelo <i>Excel</i> exportado do <i>LabView</i>	Nomenclatura modelo <i>Excel</i> onde são efetuados os cálculos e gráficos de estudo	Significado da leitura
Tempo	Time	Tempo em segundos de cada amostra
Temp0	Temperature of the Inlet Exhaust Gas	Temperatura dos gases de escape à entrada do evaporador do gerador
Temp1	Temperature of the Outlet Exhaust Gas	Temperatura dos gases de escape à saída do evaporador do gerador
Temp2	Water Entry Block 1	Temperatura da água de arrefecimento no bloco 1
Temp3	Water Exit Block 1/Water Entry Block 2	Temperatura da água de arrefecimento na saída do bloco 1 / Temperatura da água de arrefecimento na entrada do bloco2
Temp4	Water Entry Block 3/Water Exit Block 2	Temperatura da água de arrefecimento na entrada do bloco 3 / Temperatura da saída da água de

		arrefecimento na saída do bloco 2
Temp5	Water Exit Block 3/Water Entry Cup	Temperatura da água de arrefecimento na saída do bloco 3 / Temperatura da água de arrefecimento na entrada do copo
Temp6	Water Exit Cup	Temperatura da água de arrefecimento na saída do copo
Temp7	Internal Temperature HP Block 1	Temperatura interna do <i>Heat Pipe</i> bloco 1 do gerador
Temp8	Internal Temperature HP Block 2	Temperatura interna do <i>Heat Pipe</i> bloco 2 do gerador
Temp9	Internal Temperature HP Block 3.1	Temperatura interna da parte inferior do <i>Heat Pipe</i> bloco 3 do gerador
Temp10	Internal Temperature HP Block 3.2	Temperatura interna da parte superior do <i>Heat Pipe</i> bloco 3 do gerador
Temp11	Cold Face Block 3	Temperatura da face fria do bloco 3 do gerador
Temp12	Temperature of the Hot Face Block 1	Temperatura da face quente do bloco 1
Temp13	Hot Face Block 2	Temperatura da face quente do bloco 2
Temp14	Temperature of the Cold Face Block 1	Temperatura da face fria do bloco 1
Temp15	Hot Face Block 3	Temperatura da face quente do bloco 3
Volt0	Voltage B1E	Tensão em aberto da série de 2 módulos do bloco 1
Volt1	Voltage B2E	Tensão em aberto da série de 2 módulos do bloco 2

Volt2	Voltage B3E	Tensão em aberto da série de 2 módulos do bloco 3
Volt3	Load Voltage B1D	Tensão em carga da série de 2 módulos do bloco 1
Volt4	Load Voltage B2D	Tensão em carga da série de 2 módulos do bloco 2
Volt5	Load Voltage B3D	Tensão em carga da série de 2 módulos do bloco 3

Foram efetuadas medições de diversas temperaturas, de modo a proceder-se ao cálculo das diferentes potências térmicas presentes no gerador.

A diferença de temperatura relativa a entrada de água de arrefecimento do gerador e á saída da água de arrefecimento do gerador é dada pela seguinte equação:

$$\Delta t_{\text{Água}_{TEG}} = \text{Water Exit Block 3} | \text{Water Entry Cup} - \text{Water Entry Block 1}$$

Eq. 5.3-1

A diferença de temperatura presente no copo do gerador é dada pela seguinte equação:

$$\Delta t_{\text{Água}_{Copo}} = \text{Water Exit Cup} - \text{Water Exit Block 3} | \text{Water Entry Cup}$$

Eq. 5.3-2

A diferença de temperatura no bloco 1 do gerador é calculada através da seguinte equação:

$$\Delta t \text{ Bloco 1} = \text{Water Exit Block 1} | \text{Water Entry Block 2} - \text{Water Entry Block 1}$$

Eq. 5.3-3

A diferença de temperatura no bloco 2 e 3 do gerador é calculada de forma semelhante.

É possível calcular a potência térmica transferida para a água de todos os módulos utilizando a Eq. 5.3-1:

$$\text{Potência térmica (total)} = \text{Caudal de arrefecimento} * C_{p_{\text{água}}} * \Delta t_{\text{Água}_{TEG}}$$

Eq. 5.3-4

Do mesmo modo é possível calcular as potências térmicas transferidas para a água através do bloco 1:

$$Potência\ térmica\ bloco\ 1 = Caudal\ de\ arrefecimento * C_{p_{água}} * \Delta t\ Bloco\ 1$$

Eq. 5.3-5

Expressões semelhantes aplicam-se ao bloco 2, bloco 3 e copo de arrefecimento.

Os cálculos que são mostrados seguidamente referem-se ao cálculo da resistência interna elétrica da série dos dois módulos termoelétricos em aberto em cada bloco. Com o cálculo da resistência interna é possível calcular a potência elétrica disponibilizada por cada bloco do gerador.

A Eq. 5.3-6 seguinte refere-se ao cálculo da resistência elétrica:

$$Ri_{bloco\ 1} = R_{carga} * \left(\frac{Tensão\ bloco\ 1 - Tensão\ em\ carga\ bloco\ 1}{Tensão\ em\ carga\ bloco\ 1} \right)$$

Eq. 5.3-6

É calculada de modo semelhante a resistência interna para a série dos módulos do bloco 2 e bloco 3.

A potência elétrica de cada bloco pode então ser calculada com base na resistência interna calculada anteriormente. Deste modo tem-se que:

$$Potência\ elétrica\ bloco\ 1 = \frac{(Tensão\ bloco\ 1)^2}{8Ri_{bloco\ 1}}$$

Eq. 5.3-7

A potência elétrica do bloco 2 e bloco 3, é calculada de modo semelhante ao cálculo da potência elétrica no bloco 1.

A potência elétrica total do gerador é dada pela soma das potências elétricas de cada bloco.

Com o cálculo da potência térmica e potência elétrica é possível efetuar o cálculo da eficiência do sistema, do bloco 1, do bloco 2 e bloco 3:

$$Eficiência = \frac{Potência\ elétrica}{Potência\ térmica\ total} 100$$

Eq. 5.3-8

$$Eficiência\ bloco\ 1 = \frac{Potência\ elétrica\ bloco\ 1}{Potência\ térmica\ bloco\ 1} 100$$

A eficiência do bloco 2 e bloco 3 é calculada de modo semelhante.

Os cálculos apresentados são efetuados numa folha de cálculo *Excel*, para cada amostra por segundo definida nas placas de aquisição de dados. Consegue-se assim uma análise extremamente completa ao longo de todo o ensaio experimental efetuado.

5.4 ENSAIOS E RESULTADOS

Neste subcapítulo são descritos e apresentados os ensaios realizados, nomeadamente as condições em que foram efetuados e a preparação concebida para a realização dos mesmos.

Foram realizados ensaios em dois motores diferentes. Num ensaio inicial utilizou-se um motor *Yanmar* modelo *L100N* com uma potência de 10 cavalos (7,4 kW), os quais não foram concluídos com sucesso por deficiência do sistema. Posteriormente utilizou-se um motor *Diesel PSA 1.6HDi* de 75 cavalos (55 kW). Em ambos os motores os gases de escape foram direcionados para a conduta do gerador. O objetivo destes ensaios é verificar o funcionamento do gerador para determinado líquido de trabalho, a várias pressões e várias condições de funcionamento.

Utilizou-se como líquido de trabalho a água, com um volume de 77 ml. Esta é a quantidade de água necessária para cobrir as alhetas do evaporador imerso no interior da conduta de gases.

Tabela 5.4-1 Pressões do líquido de trabalho, água, e respetivos pontos de ebulição.

Pressão absoluta (bar)	Ponto de ebulição (°C)
1	100
1.5	110
2	120
3	133
4	144
5	150
7	165

10	180
12	188
15	200
20	212
25	223
40	250

Como foi referido em subcapítulos anteriores, a potência máxima que é possível obter de um módulo termoeletrico é conseguida quando a resistência de carga é igual a resistência interna do módulo termoeletrico. Assim sendo, nos ensaios efetuados possui-se dois módulos ligados em série, então, a potência máxima dos módulos é disponibilizada quando a resistência de carga é igual à soma das resistências internas dos dois módulos termoeletricos.

Para os ensaios dos módulos em carga, de modo a produzirem a potência máxima, foram utilizadas resistências da *RS MP930 TO-220* de 0.5Ω com uma tolerância de 1% e com uma potência máxima de 30W.

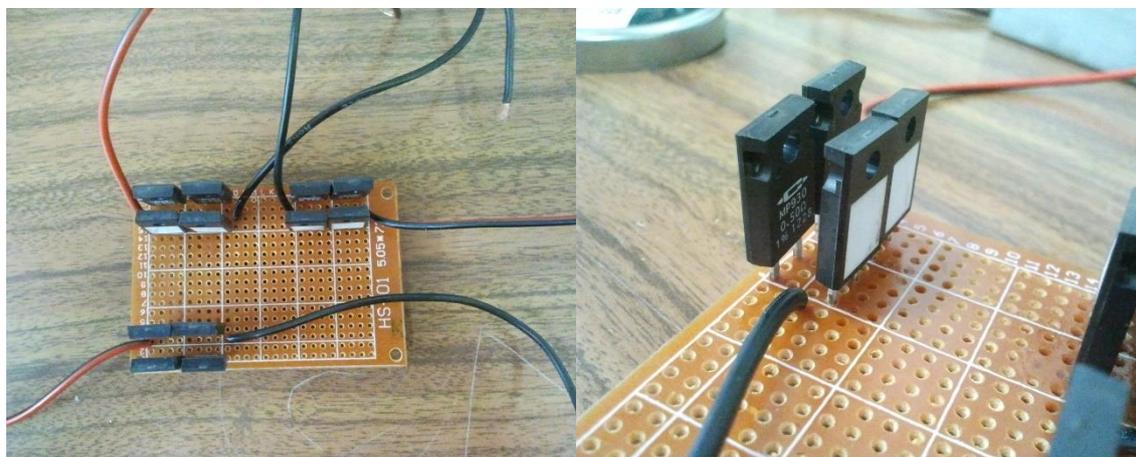


Figura 5.4-1 Resistências de carga usadas para simular uma carga nos módulos.

5.4.1 Instalação Experimental do Motor

Para a realização dos ensaios experimentais foi necessário utilizar o motor *Diesel PSA 1.6HDi* de 75 cavalos (55 kW), assim como desenvolver a linha de escape para direcionar os gases de escape do motor para o gerador termoeletrico. A Figura 5.4-2

mostra o motor utilizado e, a Figura 5.4-3, a linha de escape desenvolvida para direccionar os gases de escape para o gerador termoelétrico.

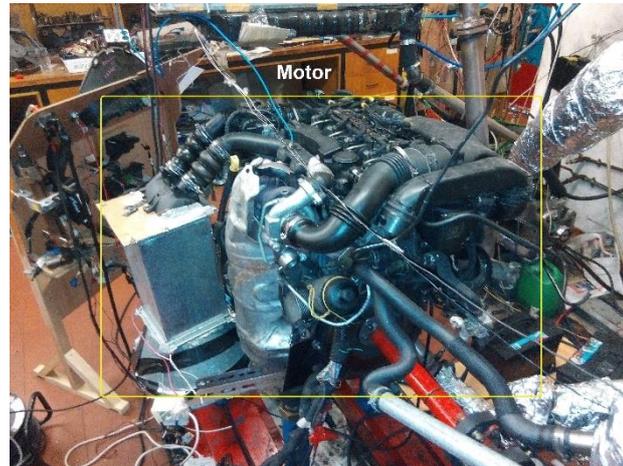


Figura 5.4-2 motor *Diesel PSA 1.6 HDi* de 75 cavalos (55 kW).



Figura 5.4-3 Linha de escape que direciona os gases de escape do motor para gerador termoelétrico.

A carga fornecida ao motor foi controlada através de um travão eléctrico de camião. Este era controlado por um transformador eléctrico variável. A Figura 5.4-4 mostra como o travão eléctrico de um camião é acoplado ao motor utilizado e o transformador eléctrico variável de controlo do travão eléctrico de um camião.

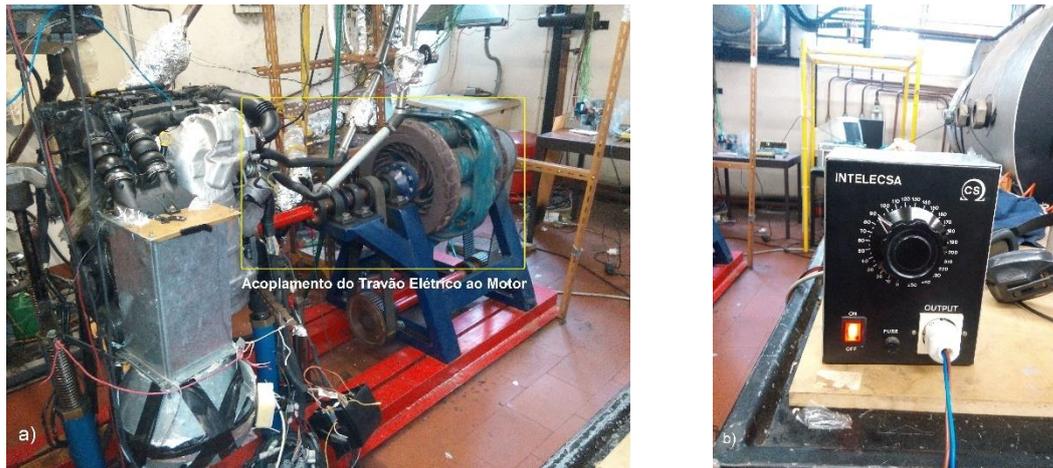


Figura 5.4-4 a) Travão elétrico de um camião acoplado ao motor utilizado; b) Transformador elétrico variável para controlo do travão elétrico de camião.

A aceleração pretendida para o ensaio foi controlada a partir de um acelerador manual presente no painel de controlo referente ao motor utilizado, Figura 5.4-5.

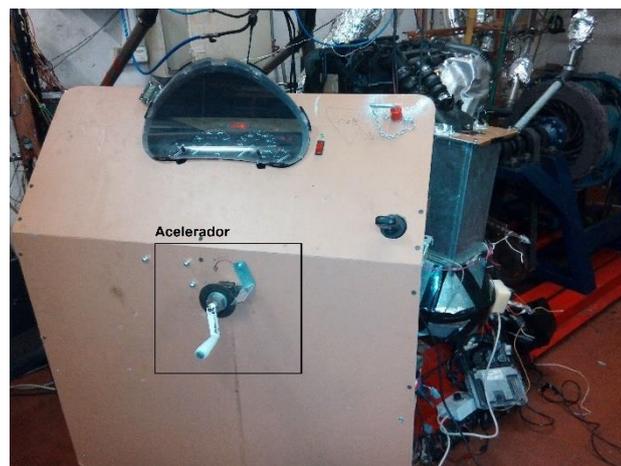


Figura 5.4-5 Painel de controlo do motor usado para o ensaio.

5.4.2 Ensaio experimental utilizando a água como fluido de trabalho

Neste subcapítulo são apresentados os testes efetuados utilizando água como fluido de trabalho. Foram utilizados 77 ml de água, este volume de água refere-se à quantidade de água que foi necessária para cobrir todas as alhetas do evaporador do gerador. O líquido de arrefecimento das faces frias dos módulos foi água corrente, com um caudal de arrefecimento de 81 L/h. O motor usado para produção de caudal de gases foi o motor *PSA 1.6HDi* de 75 cavalos (55 kW), em que se manteve sempre o regime de 2000 rotações por minuto ocorrendo apenas uma variação forçada da carga fornecida ao motor

refletindo-se esta na variação do binário do motor. A Tabela 5.4-2 indica os regimes de binários testados, mantendo-se as 2000 rotações por minuto.

Tabela 5.4-2 Regimes de binários testados às 2000 rpm e respetiva potência mecânica.

Binário (N.m)	Potência Mecânica (kW)
22.5	5
65.5	14
100	21
137	29
155	33

De modo a se conseguir condições de ensaios iguais para todas as pressões, controlou-se sempre de igual forma a carga fornecida ao motor. Conseguiu-se assim aproximadamente o mesmo regime de binário para todos os ensaios. A carga aplicada ao motor era variada, aumentada, quando se observava que as temperaturas dos gases de escape, que entravam no evaporador e que saíam ficavam estabilizadas.

Foram efetuados ensaios em condições diferentes no que se refere à pressão interna do gerador. A pressão interna do gerador foi alterada de modo a se conseguir ensaios em que a temperatura variasse entre os 100°C e a máxima temperatura possível de testar em segurança, neste caso, 180°C de ebulição do líquido de trabalho.

Tabela 5.4-3 Pressões a que o gerador foi sujeito nos ensaios e respetivo ponto de ebulição da água.

Pressão (bar)	Ponto de ebulição (°C)
1	100
2	120
3	133
4	144
5	150
7	165
10	180

A tabela anterior apresenta valores de pressão a que o gerador foi submetido com recurso a um compressor de ar comprimido.

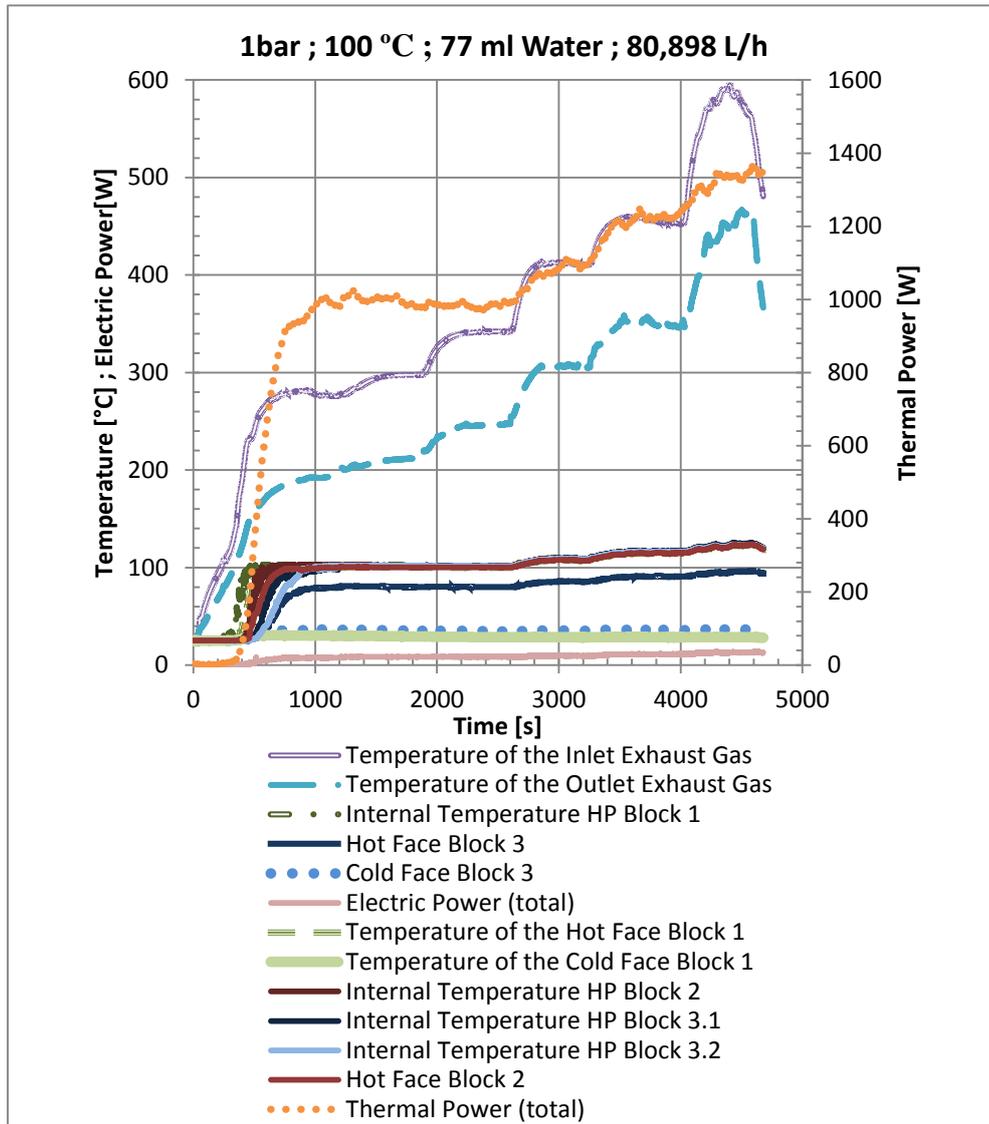


Gráfico 5-1 Potências e temperaturas calculadas e medidas relativamente ao teste com pressão de 1 Bar.

O Gráfico 5-1 refere-se ao ensaio efetuado a 1 bar de pressão do *Heat Pipe*, com as condições descritas anteriormente. Neste gráfico pode-se observar a evolução e variação das diferentes temperaturas medidas assim como a potência elétrica e térmica total do sistema, sendo observado o seu comportamento ao longo do tempo. Os vários degraus de temperatura indicam as várias cargas testadas (ver Tabela 5.4-2) em ordem crescente ao longo do tempo.

Por observação do mesmo gráfico pode-se confirmar que, a temperatura interna do bloco 1 do *Heat Pipe* é a primeira a atingir aproximadamente 100°C por volta dos 400

segundos. Seguindo-se a temperatura interna dos restantes blocos a atingirem a mesma temperatura. Verifica-se até cerca dos 1000 segundos um aumento significativo da potência térmica do sistema assim como da potência elétrica. Verifica-se aos 1000 segundos uma estabilização das temperaturas das faces quentes dos blocos, notando-se que a temperatura da face quente do bloco 3 se encontra um pouco inferior à dos restantes blocos. Significa que no interior do bloco 3 se encontra não só vapor mas também ar, a partir deste ponto o copo começa a entrar em funcionamento. Este copo absorve o excesso de potência. A temperatura da água de arrefecimento na entrada do copo é inferior à da saída, o que indica que há potência térmica a ser transferida para a água. O facto referido é demonstrado no gráfico seguinte.

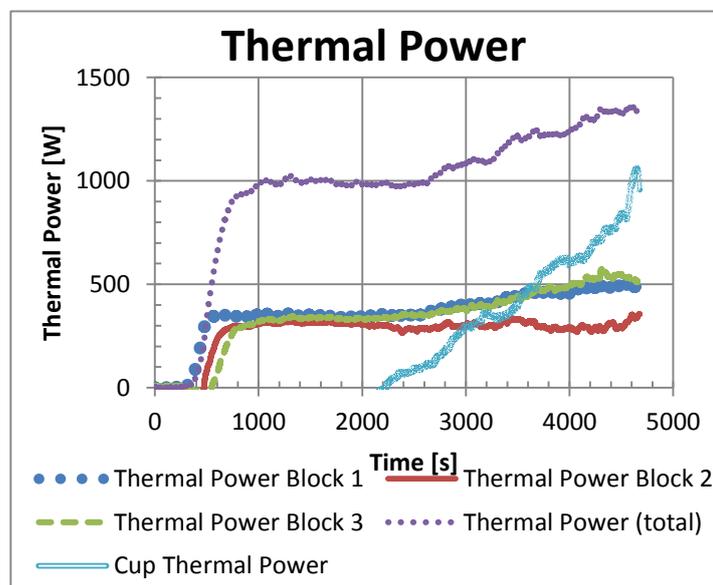


Gráfico 5-2 Potências térmicas dos blocos, do copo e total.

Entre os 1000 e 2000 segundos o gerador encontra-se num regime estável de funcionamento. Não se verifica nenhuma alteração nas temperaturas de funcionamento do gerador, mantendo-se as potências térmicas e elétricas também estáveis. A partir dos 2000 segundos verifica-se uma variação das temperaturas internas e das faces quentes dos blocos, sendo esta mais notada por volta dos 2900 segundos. Este fenómeno deve-se ao facto de se verificar um aumento da pressão interna do *Heat Pipe* por carga térmica significativa (confirmado pelo funcionamento do copo de arrefecimento). Esta variação de pressão reflete-se num aumento da potência térmica total, do copo e dos blocos, assim

como, um pequena variação da potência elétrica total produzida em cada bloco, não sendo esta uma variação insignificante. Como pode ser observado no Gráfico 5-1 e Gráfico 5-2.

O Gráfico 5-3 permite observar as tensões geradas nos blocos na serie dos módulos em aberto e em carga ao longo do tempo.

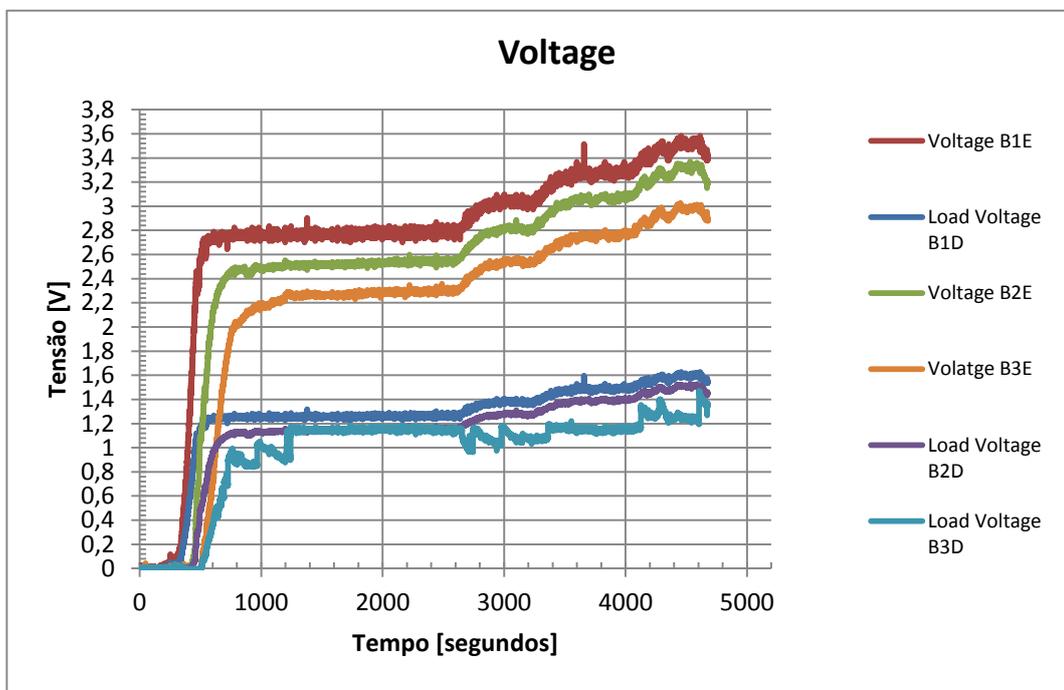


Gráfico 5-3 Tensões produzidas em aberto e em carga em cada bloco para uma pressão de 1 bar.

Analisando o gráfico observa-se que apenas funciona em pleno o bloco 1, ou seja, este bloco recebe todo calor necessário para o funcionamento pleno dos módulos nestas condições. O bloco 2 e 3 não se encontram a funcionar em pleno, pois não recebem calor suficiente para chegar ao nível de produção do bloco 1, o que se deve ao facto de não existir o mesmo nível de energia térmica que existe no bloco 1.

O Gráfico 5-4 representa as potências elétricas geradas em cada bloco do gerador assim como a potência elétrica total do sistema.

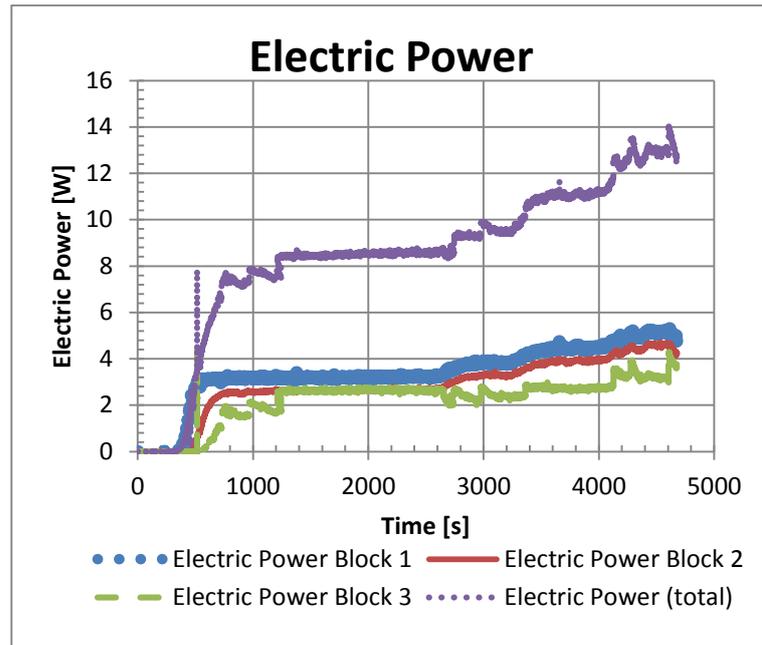


Gráfico 5-4 Potências elétricas de cada bloco e potência total do gerador para uma pressão de 1 bar.

Por análise do Gráfico 5-4 verifica-se que volta dos 2900 segundos verifica-se um aumento da potência, devido ao aumento da pressão interna do *Heat Pipe*, como já foi mencionado anteriormente. A eficiência máxima do gerador conseguida rondou os 0.85% para a pressão de 1 bar em ensaio.

Analisando a relação entre a potência elétrica e potência térmica no Gráfico 5-5, observa-se que o aumento da potência térmica é proporcional ao aumento da potência elétrica. Esta situação é observada nos blocos e por consequência nos valores totais da potência elétrica e térmica.

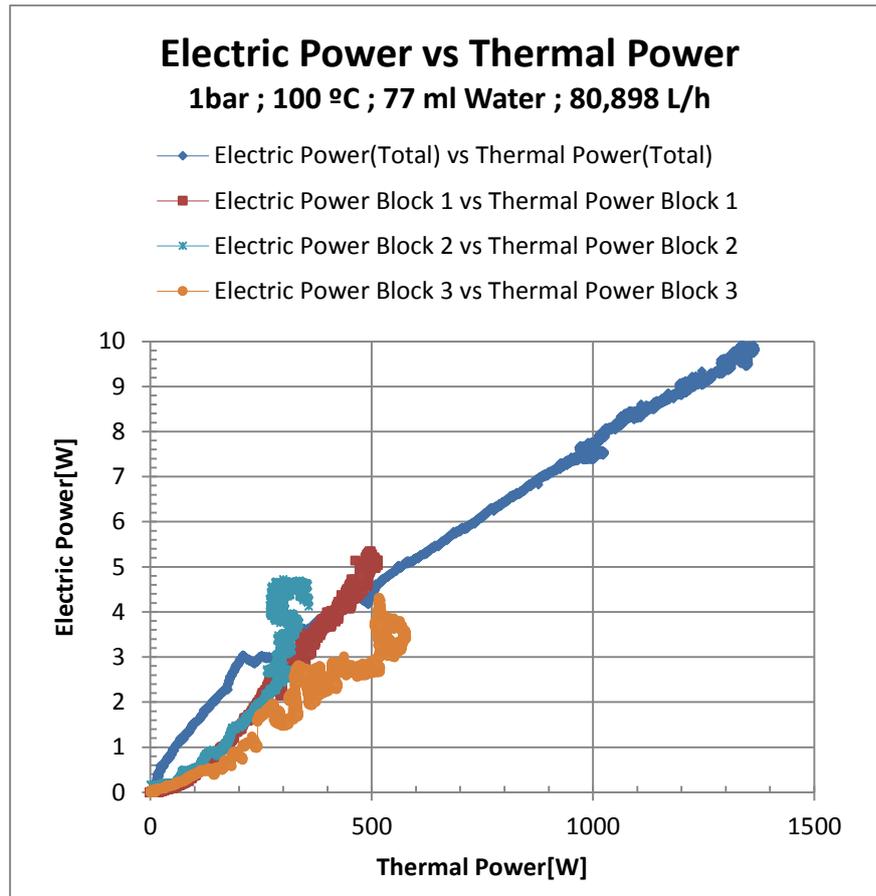


Gráfico 5-5 Potência elétrica em função da potência térmica do gerador para a pressão de 1 bar.

O ensaio seguinte foi realizado com o *Heat Pipe* sujeito a uma pressão de 4 bar. Com isto a temperatura de ebulição do líquido de trabalho aumentou, tendo por consequência o maior intervalo de tempo que demorou a realizar o ensaio.

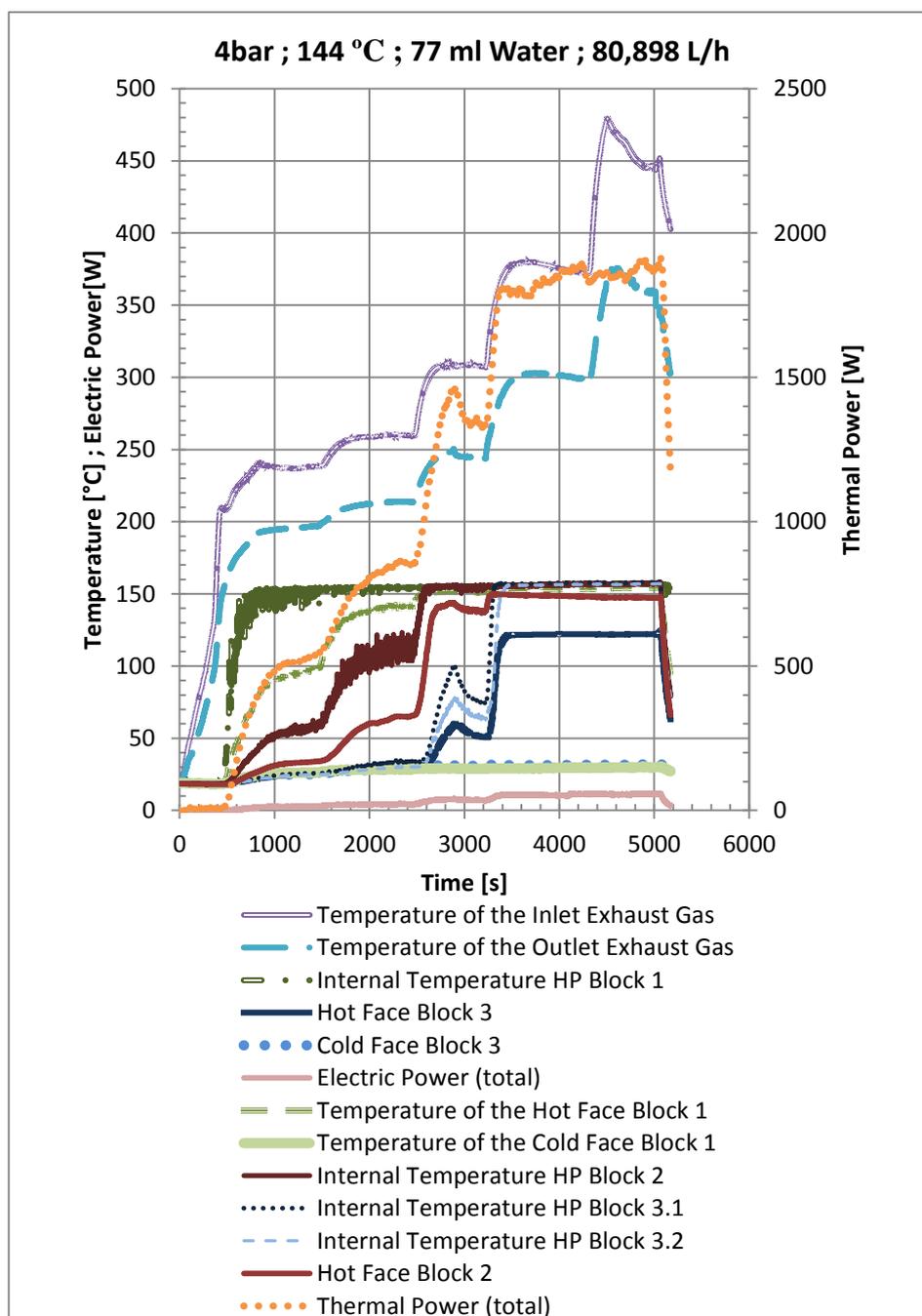


Gráfico 5-6 Potências e temperaturas calculadas e medidas relativamente ao teste com pressão de 4 Bar.

Tal como no ensaio anterior, o Gráfico 5-6, representa as temperaturas medidas e as potências elétrica e térmica calculadas quando o *Heat Pipe* foi sujeito a uma pressão de 4 bar. Neste gráfico, pode-se observar a evolução e variação das diferentes temperaturas medidas assim como a potência elétrica e térmica total do sistema, sendo observado o seu comportamento ao longo do tempo.

Verifica-se, por observação do gráfico, que o bloco 1 atinge a temperatura de funcionamento aproximadamente aos 600 segundos. De notar a temperatura de entrada e saída dos gases de escape, que pela pequena diferença (entre 50°C e 100°C) denota a

pouca eficácia do permutador de calor, já muito deteriorado (alhetas desfeitas pela corrosão). De notar que quando a temperatura num dos blocos estabiliza o bloco seguinte entra em funcionamento, pois o bloco atual já se encontra no máximo de funcionamento e não absorve mais energia térmica.

O bloco 2 apenas atinge a temperatura de funcionamento pleno por volta dos 2500 segundos, sendo notório que é neste ponto que a temperatura da face quente do primeiro bloco se encontra na temperatura ideal de funcionamento de modo a fornecer calor máximo a face quente dos módulos termoelétricos. O bloco 3 entra em funcionamento máximo aproximadamente ao 3200 segundos de ensaio, a medição de temperatura interna do bloco foi efetuada na parte inferior e superior do mesmo, em que se verifica que demora algumas frações de tempo para o bloco se encontrar todo à mesma temperatura, verificando-se esta situação entre os 2900 e os 3150 segundos.

Ainda aos 3200 segundos a face quente do bloco 2 atinge a temperatura máxima de funcionamento, sendo esta um pouco inferior à temperatura interna do *Heat Pipe*, devido possivelmente a alguma diluição do vapor com o ar. Neste contexto observa-se então que a temperatura da face quente do terceiro bloco se encontra muito inferior à temperatura interna do *Heat Pipe*, quando estabiliza ao fim de 3600 segundos, apresentando um valor de apenas 122°C quando deveria ser aproximadamente 150°C. Isto acontece pois não existe potência térmica absorvida suficiente.

No Gráfico 5-7, podemos observar o comportamento do copo, se inicia ou não o seu funcionamento ao longo do ensaio para que seja possível a verificação de possíveis falhas no gerador termoelétrico e qual o comportamento do mesmo quando sujeito a diferentes pressões. Assim, aos 4603 segundos verifica-se o início do funcionamento do copo, isto quer dizer que, o bloco 3 e os restantes blocos, já não são capazes de absorver mais calor e este começa a ser consumido no copo, onde se verifica que a temperatura do líquido de arrefecimento de saída do copo é superior à temperatura do líquido de arrefecimento de entrada começando a produzir potência térmica. No entanto, tendo em conta o ensaio para 1 bar, poderia pôr-se a questão de a temperatura da face quente do bloco 3 não estar à temperatura de funcionamento do *Heat Pipe*, e o copo ter entrado em funcionamento. Este acontecimento resume-se ao facto de a energia térmica dos gases de escape que é absorvida pelo evaporador não conseguir que o vapor do interior do *Heat Pipe* tenha pressão suficiente para alimentar o bloco 3 de modo a que a sua temperatura da face quente chegue a temperatura ideal. Este fenómeno é consequência do aumento da pressão

interna do *Heat Pipe* e de caudal de gases de escape não ser capaz de fornecer a energia térmica necessária para alimentar todo o sistema.

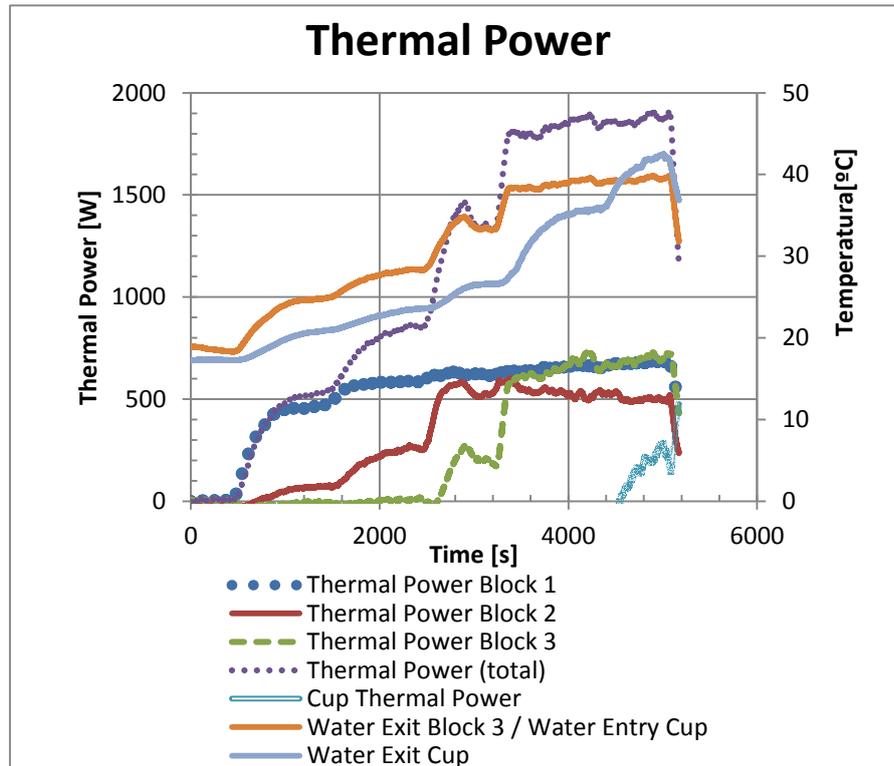


Gráfico 5-7 Potências térmicas dos blocos e copo, e potência térmica total com monitorização da temperatura da água de arrefecimento à entrada e saída do copo ao longo do tempo.

Analisando Gráfico 5-8, relativo às tensões geradas na série de módulos presentes no gerador, pode-se observar que a tensão produzida é proporcional às temperaturas das faces quentes dos blocos, assim como, com o aumento e variação das potências térmicas dos blocos.

Observa-se, entre os segundos 1900 e 2500, uma variação acentuada na tensão em carga na série de módulos do bloco 2, podendo dever-se a uma deficiência nos módulos devido ao seu estado físico neste ensaio. Neste espaço de tempo verificou-se uma vibração anormal do gerador termoelétrico, a qual poderia ter afetado a medição neste instante. A partir do segundo 3321, a tensão em carga do bloco 2 dever-se-ia encontrar entre o gráfico da tensão em carga do bloco 1 e do bloco 3, teoricamente. Tal não se verifica, devendo-se a uma variação da resistência interna da série de módulos que se encontravam em carga no bloco 2.

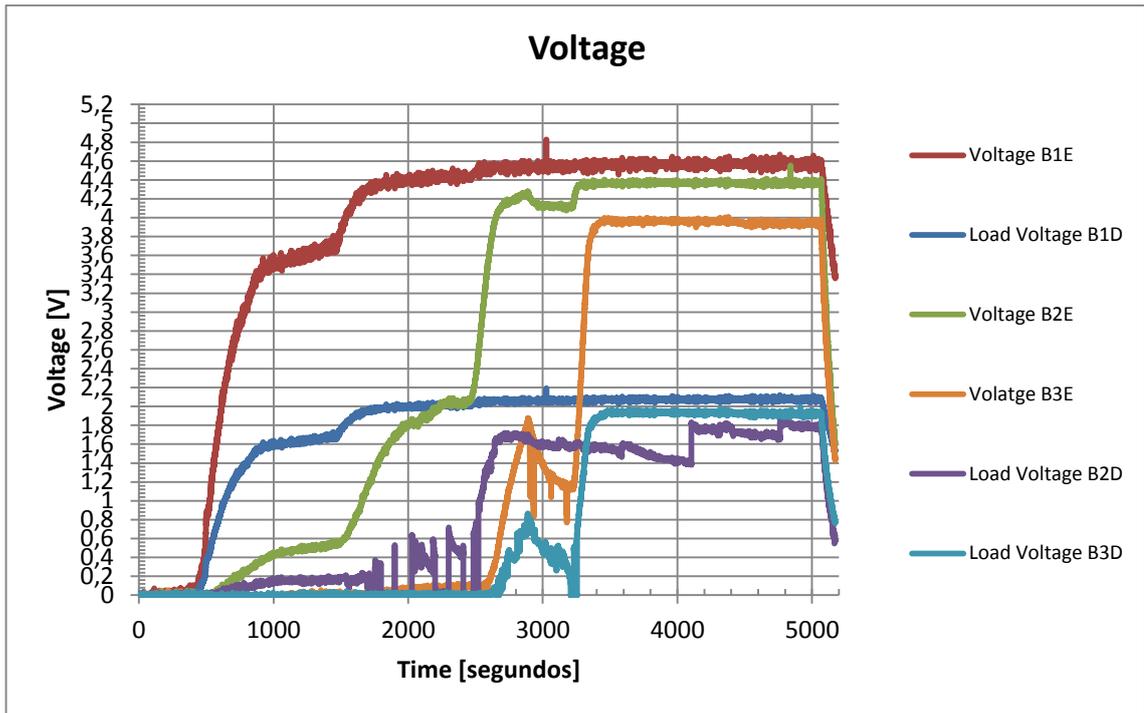


Gráfico 5-8 Tensões geradas nos blocos do gerador termoelectrico para uma pressão de 4 bar.

A potência produzida no gerador é observada no gráfico a seguir apresentado, no qual a potência é diretamente ligada à variação da tensão produzida nos diversos pontos do gerador.

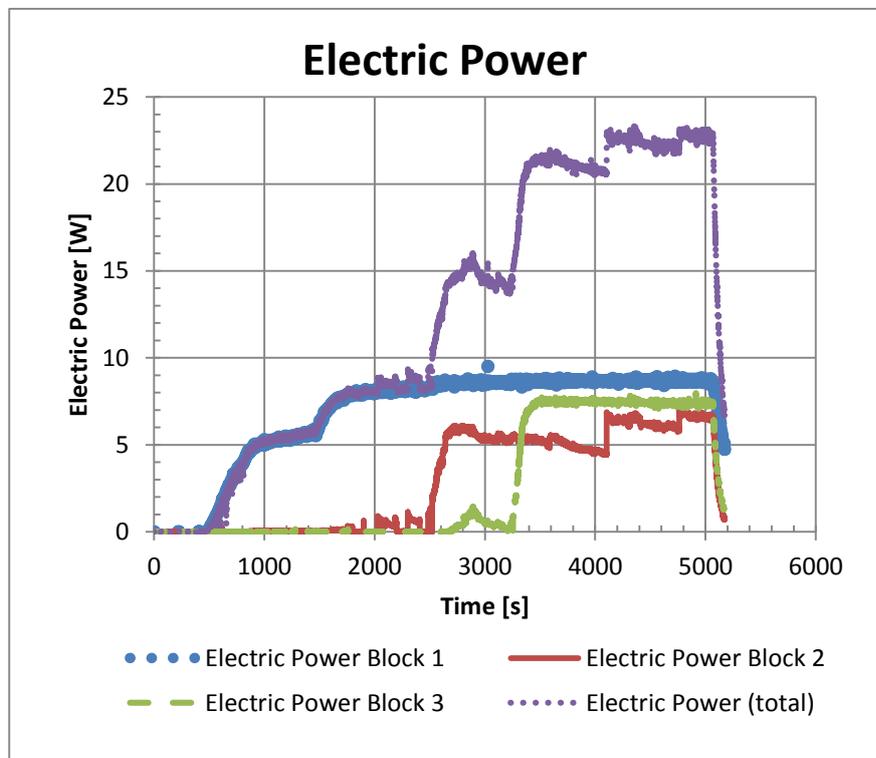


Gráfico 5-9 Potência elétrica produzida nos diversos pontos do gerador para uma pressão de 4 bar.

Para a pressão de 4 bar a potência térmica também varia de forma proporcional relativamente à variação da potência elétrica produzida, esta situação é verificada em todos os blocos do gerador e por consequência nos valores totais da potência térmica e elétrica.

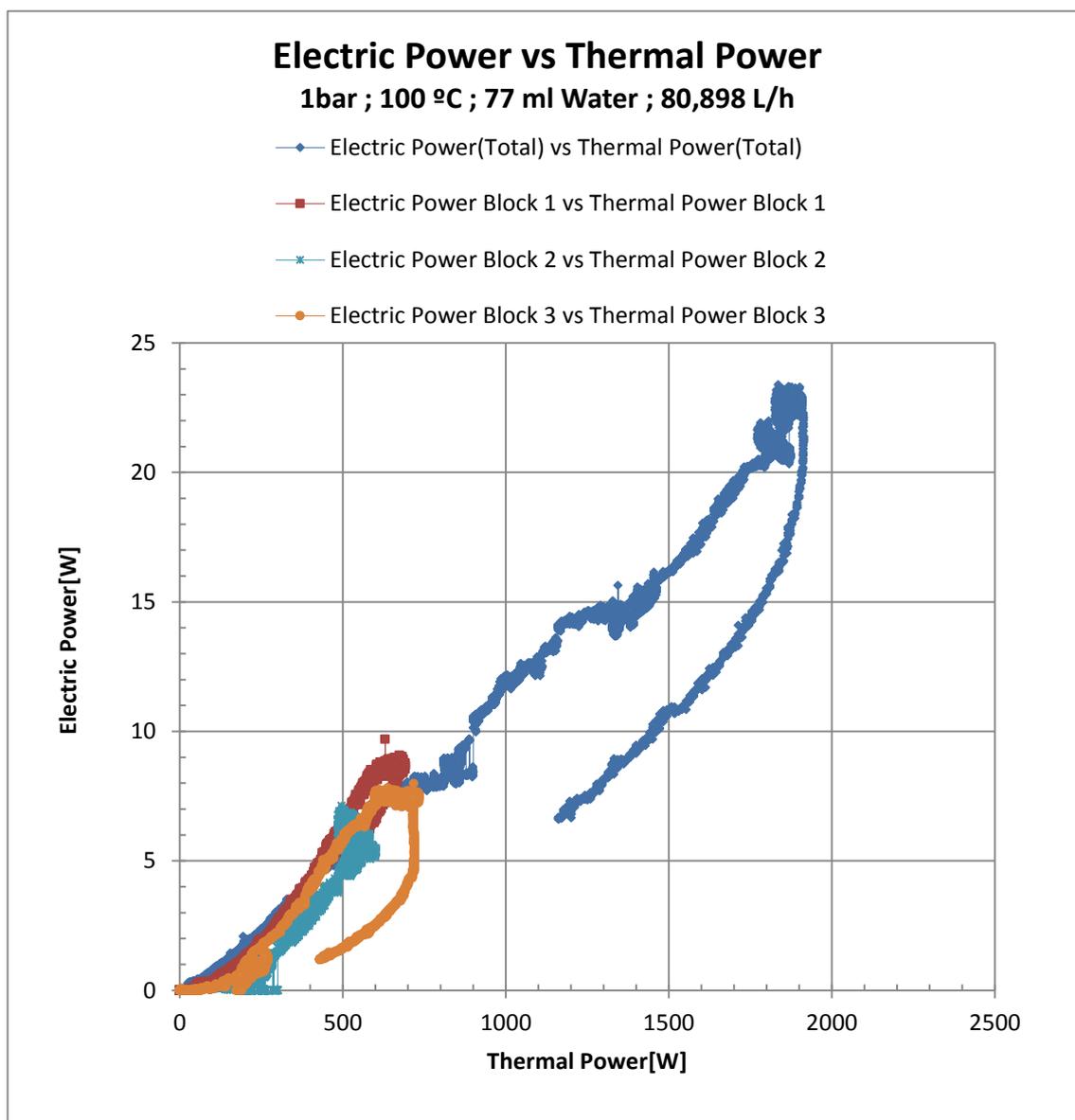


Gráfico 5-10 Potência elétrica em função da potência térmica dos blocos do gerador e valores totais para uma pressão de 4 bar.

Submeteu-se o gerador a uma pressão de 10 bar, equivalente a uma temperatura de ebulição de 180°C. O ensaio em questão teve uma duração de aproximadamente 5000 segundos, onde se verificou que, apesar de se conseguir a potência elétrica mais elevada de todos os ensaios, o caudal de gases não possui energia térmica suficiente para alimentar os blocos de modo a que os módulos funcionem num regime máximo.

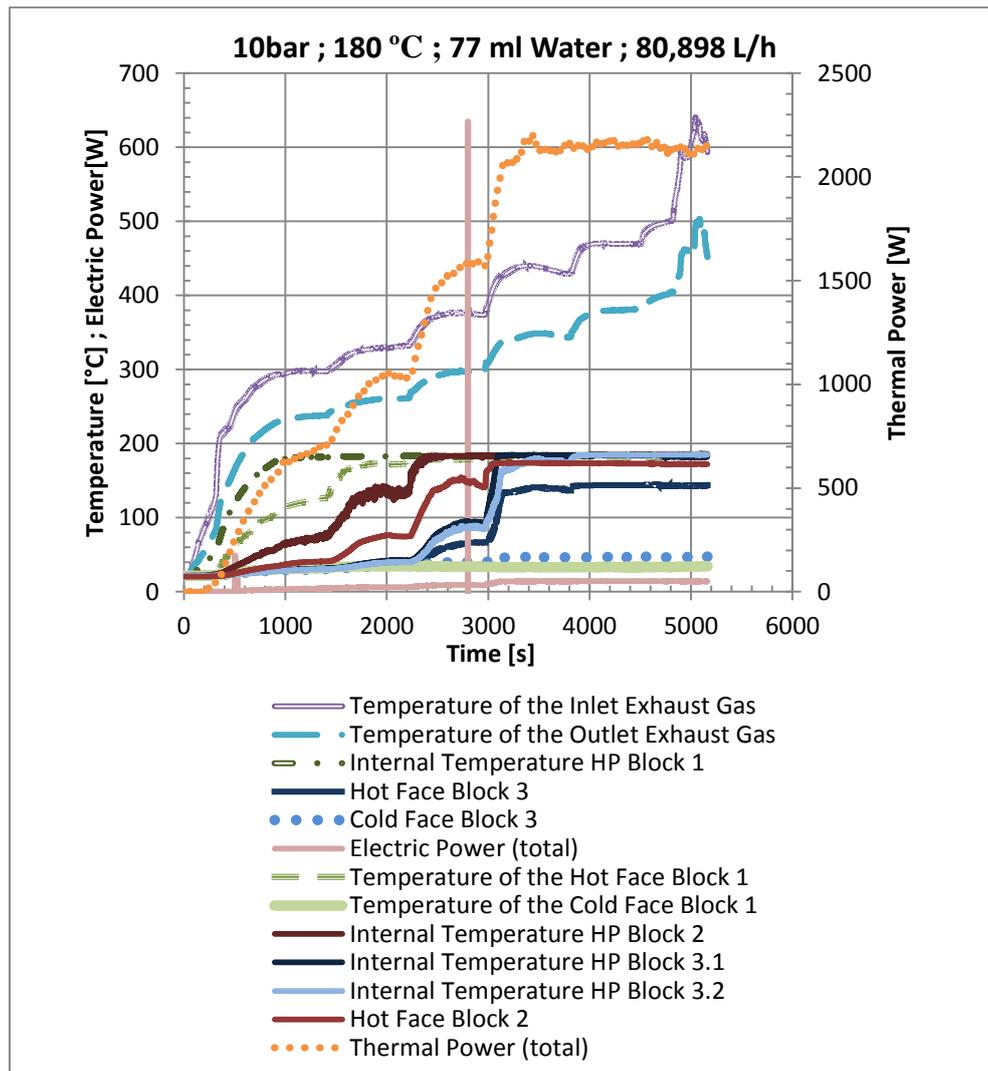


Gráfico 5-11 Potências e temperaturas calculadas e medidas relativamente ao teste com pressão de 10 Bar.

O Gráfico 5-11 refere-se ao ensaio efetuado a 10 bar de pressão, com as condições descritas no início do presente subcapítulo mantidas. É possível observar no gráfico a evolução e variação das diferentes temperaturas medidas, assim como a potência elétrica e potência térmica total do gerador, ao longo do tempo.

O comportamento do gerador é de todo semelhante ao comportamento do ensaio com 4 bar de pressão. O regime permanente do gerador é atingido aos 3000 segundos aproximadamente. É neste ponto que todos os blocos se encontram em funcionamento, apesar de apenas funcionar em pleno o bloco 1. Verifica-se que os três blocos atingem temperatura de funcionamento no seu interior, mas, a nível das faces quentes que alimentam os módulos em termos térmicos, apenas o bloco 1 atinge a temperatura ótima de funcionamento. Este facto deve-se à não existência de potência térmica disponível para que a temperatura em todas as faces quentes se eleve. O caudal de gases de escape, assim

como a capacidade do evaporador, são responsáveis pelo mencionado. É possível observar o referido anteriormente a partir da observação a linha do gráfico relativo à potência térmica, a partir dos segundos 3488, onde a potência térmica estabiliza apesar da temperatura dos gases de escape aumentar.

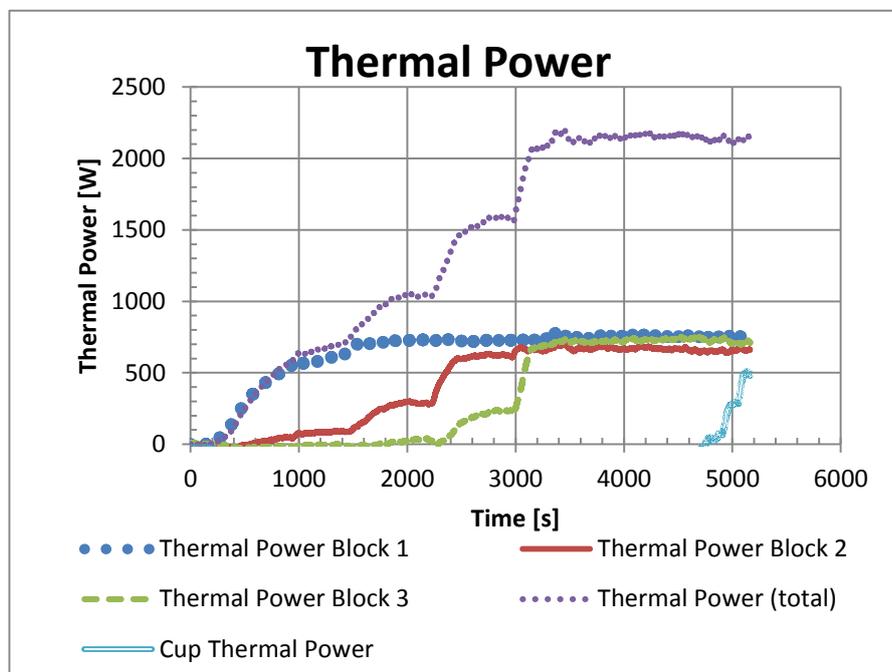


Gráfico 5-12 Potências térmicas para uma pressão interna de 10 bar.

Analisando o Gráfico 5-12, observa-se que o copo apenas entrou em funcionamento aos 4800 segundos. Indica assim que no estado de regime permanente entre os 3000 segundos e os 4800 segundos, o caudal de gases produzido, perto do binário máximo, não foi capaz de fornecer a energia térmica suficiente ao sistema para este funcionar em pleno. Aos 3800 o copo entra em funcionamento o que indica que os blocos não eram capazes de absorver mais energia térmica, sendo esta absorvida no copo.

As tensões produzidas pelo gerador para uma pressão de 10 bar observam-se no Gráfico 5-13. De notar que a tensão em carga do bloco 2 encontra-se abaixo da tensão em carga do bloco 3, deve-se ao facto de a resistência interna da série dos módulos ser um pouco diferente da resistência interna do bloco 3.

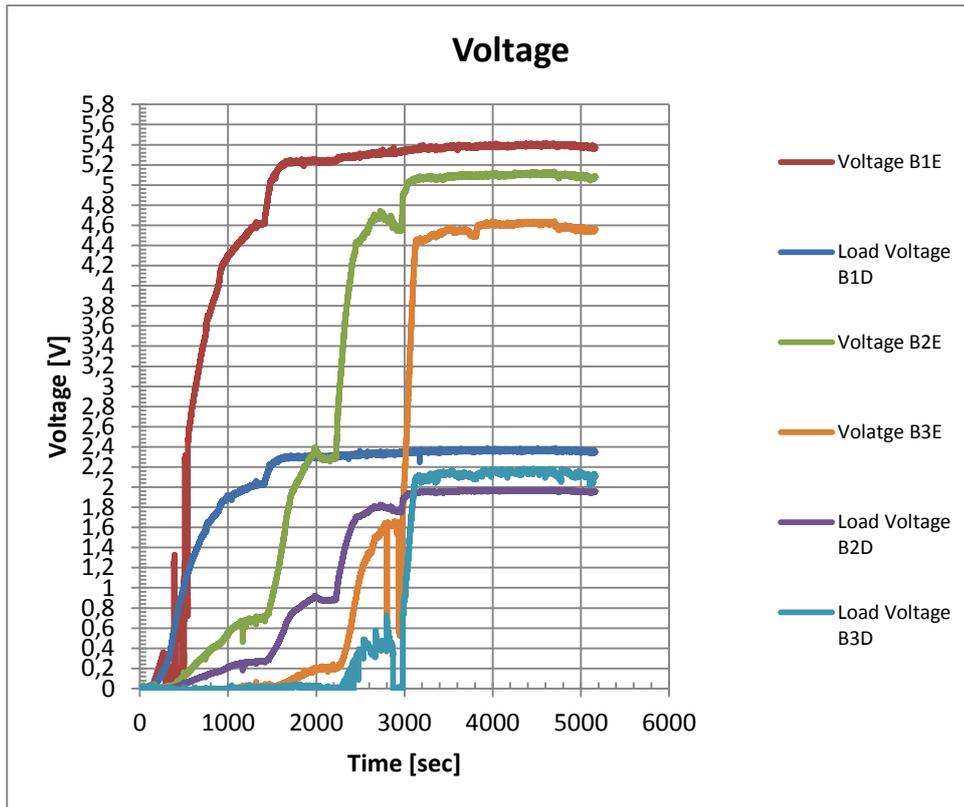


Gráfico 5-13 Tensões geradas pelo gerador para uma pressão de 10 bar.

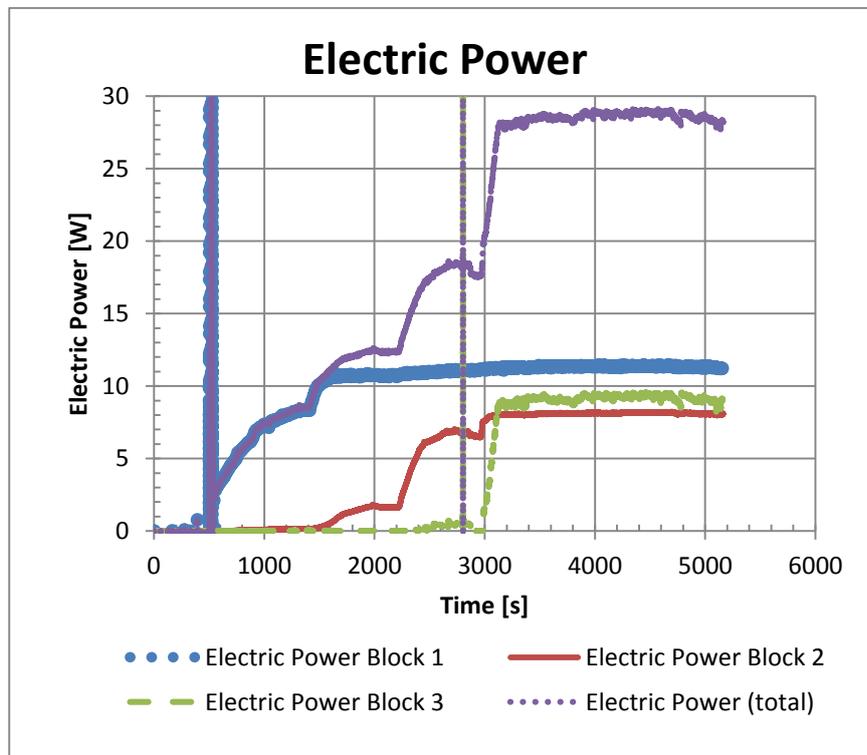


Gráfico 5-14 Potência elétrica total e dos blocos do gerador para uma pressão de 10 bar.

O Gráfico 5-14 apresenta as potências elétricas gerada. Verifica-se que a potência do bloco 2 é menor que a do bloco 3, pelos motivos explicados no parágrafo anterior.

No presente ensaio a 10 bar construi-se o gráfico da potência elétrica total em função da potência térmica total de modo a se verificar o mesmo funcionamento do gerador para esta pressão relativamente aos ensaios anteriores.

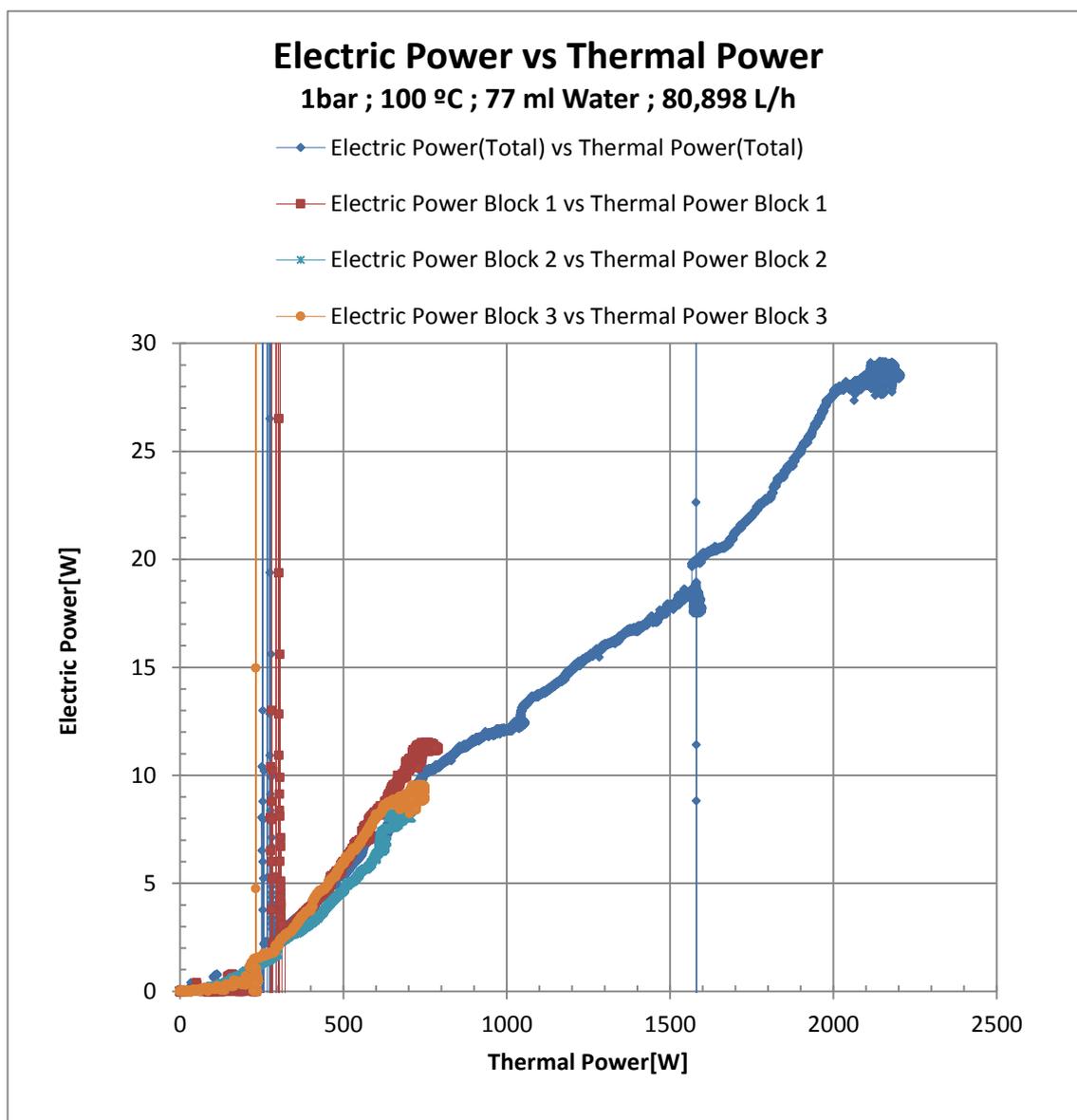


Gráfico 5-15 Potencia elétrica total em função da potência térmica total, para uma pressão interna de 10 bar.

Saber a eficiência do gerador nos diversos ensaios efetuados é necessário de modo a saber-se quais as condições de funcionamento do gerador que proporcionam maior estabilidade e produção de energia elétrica e térmica. Assim, os gráficos a seguir apresentados representam a eficiência do gerador assim como de cada um dos blocos para os diferentes ensaios apresentados neste subcapítulo.

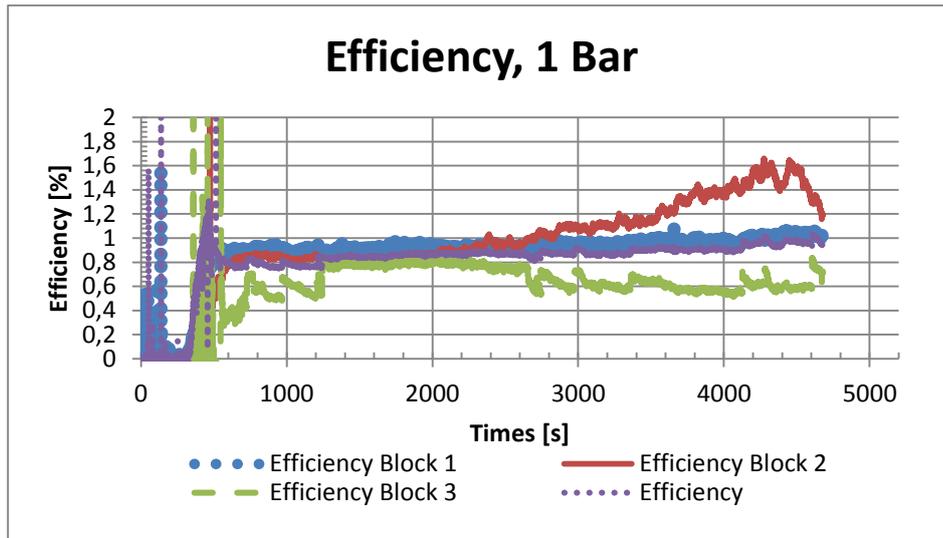


Gráfico 5-16 Eficiência dos blocos e eficiência total do gerador para a pressão de 1 bar.

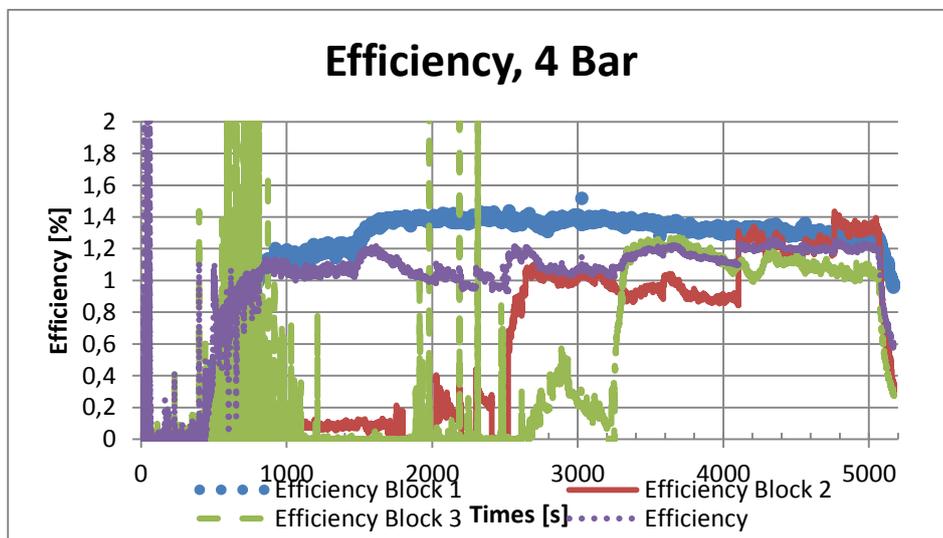


Gráfico 5-17 Eficiência dos blocos e eficiência total do gerador para a pressão de 4 bar.

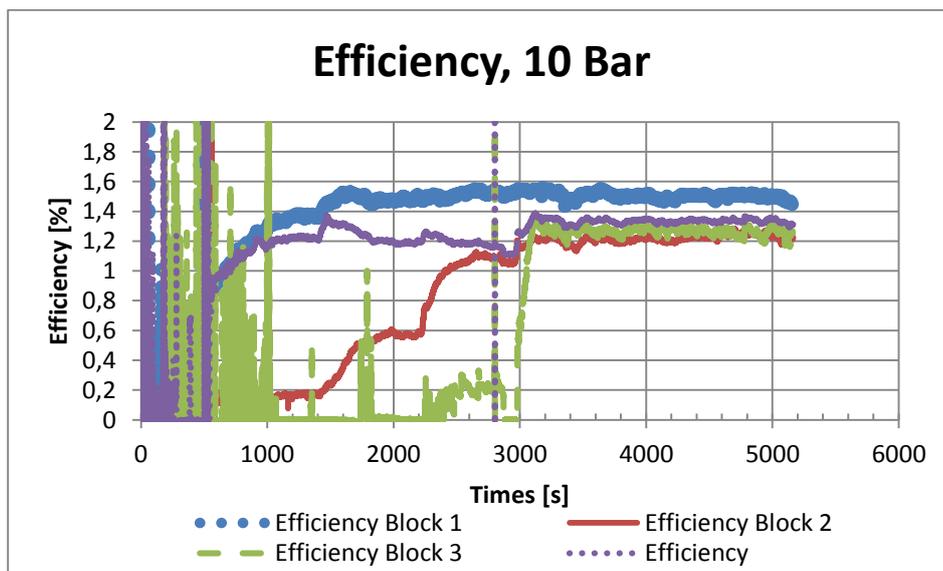


Gráfico 5-18 Eficiência dos blocos e eficiência total do gerador para a pressão de 10 bar.

Observando os gráficos anteriores, a eficiência do sistema aumenta com o aumento da pressão interna do *Heat Pipe*. Para a pressão de 1 bar a eficiência total do sistema situa-se pelos 0.85%, para a pressão de 4 bar a eficiência total do sistema encontra-se pelos 1.15% e para a pressão de 10 bar a eficiência total do sistema é de aproximadamente 1.3%. Concluindo-se então que quanto mais elevada é a pressão interna do *Heat Pipe* a eficiência total do sistema aumenta.

5.4.3 Resultados Globais utilizando água como fluido de trabalho

Neste subcapítulo, são apresentados os resultados globais dos ensaios experimentais utilizando água como fluido de trabalho. Para as pressões internas do gerador de 1 bar e 10 bar, estes resultados globais correspondem aos valores médios medidos para cada condição (pressão do *Heat Pipe* e carga do motor), sendo feita uma média dos valores após atingida a sua estabilização.

O Gráfico 5-19 mostra a potência térmica disponível nos gases de escape, a potência térmica aproveitável nos gases, a potência térmica efetivamente absorvida pela água de arrefecimento através dos módulos e a potência em excesso dissipada pelo copo de arrefecimento, em função da potência mecânica disponível no motor. Manteve-se o regime de 2000 rotações por minuto e variou-se a carga fornecida ao motor de igual forma, para ambos os ensaios (ver Tabela 5.4-2 para as cargas utilizadas).

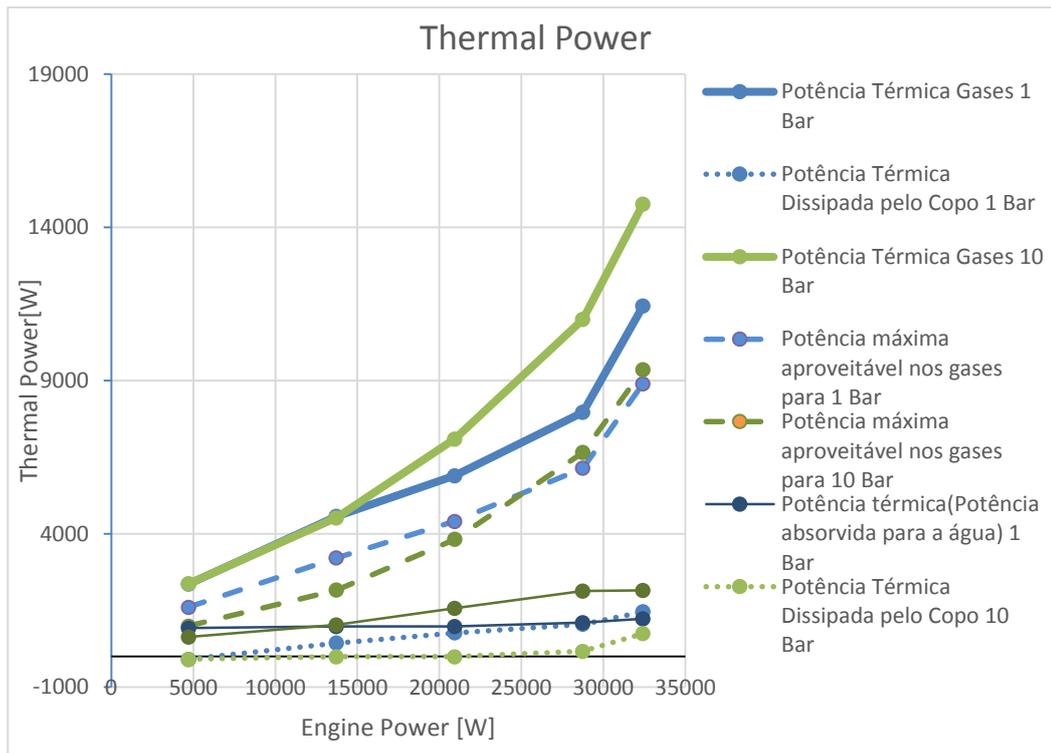


Gráfico 5-19 Resultados globais das potências térmicas para as pressões de 1 bar e 10 bar.

A potência térmica dos gases deveria ser aproximadamente igual, tal não se verifica pois entre o ensaio a 10 bar e o ensaio a 1 bar o motor sofreu algumas modificações, que alteraram ligeiramente o caudal de gases assim como a temperatura dos mesmos.

Idealmente, a potência térmica absorvida total (absorvida pela água + a dissipada pelo copo), deveria aproximar-se da igual à potência aproveitável nos gases, tal não se verifica devido a baixa eficiência do evaporador.

É possível verificar que os blocos do gerador, no ensaio a 1 bar, se encontram em funcionamento pleno para regimes baixos aos altos de carga. Isto verifica-se porque o copo está ativo em praticamente todos os casos. Aos aproximadamente 29 kW de potência mecânica, a potência térmica absorvida pela água, aumenta ligeiramente devido à pressão interna do *Heat Pipe* elevar, aumentando assim a sua temperatura interna. Ou seja, neste ponto a pressão superou ligeiramente o 1 bar. No ensaio a 10 bar, os blocos apenas atingem o funcionamento pleno perto do regime máximo de potência mecânica. Efetivamente, só para a carga máxima o copo entra em funcionamento, dissipando o calor em excesso.

É interessante verificar que a baixa carga o calor é melhor aproveitado no caso da temperatura do *Heat Pipe* mais baixa. Isto acontece porque a potência aproveitável é maior, pois há maior ΔT aproveitável pelo sistema ($T_{\text{gases in}} - T_{\text{heat pipe}}$).

No entanto, potências mais altas do *Heat Pipe* permitem uma maior potência a cargas elevadas.

No Gráfico 5-20 observa-se os dados referentes à potência térmica total e potência elétrica total para os ensaios a 1 bar e a 10 bar. É possível observar que a potência elétrica total aumenta de forma proporcional aquando do aumento da potência térmica. A eficiência do gerador para a pressão de 1 bar é aproximadamente 0.83%, a qual é menor do que a eficiência do gerador para a pressão de 10 bar, 1.3%.

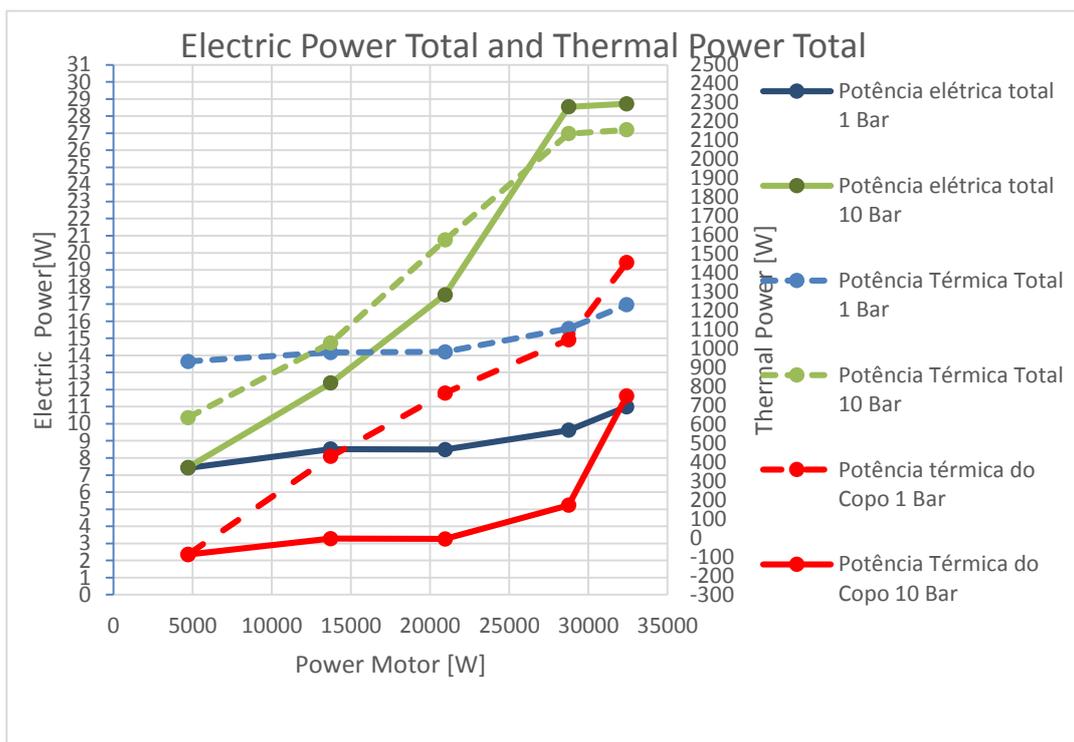


Gráfico 5-20 Potência elétrica total e potência térmica total para a pressão de 1 bar e 10 bar.

O Gráfico 5-21 e o Gráfico 5-22, mostram as potências térmicas totais em cada bloco para a pressão de 1 bar e de 10 bar.

Tal como já notado, observa-se que à pressão de 1 bar os blocos do gerador encontram-se em funcionamento desde a fase inicial do ensaio. No ensaio à pressão de 10 bar tal já não se verifica. Os blocos entram em funcionamento gradualmente, ou seja, quando o primeiro bloco estabiliza a sua temperatura e potência térmica, o segundo bloco começa a entrar em funcionamento. O mesmo acontece em relação ao bloco 3. Apenas na parte final do ensaio é que os blocos se encontram em funcionamento estável. Apesar de na parte inicial apenas o primeiro bloco se encontrar em funcionamento, a potência térmica total já é superior à verificada no ensaio à pressão de 1 bar. Deve-se ao facto de

a temperatura de ebulição, para a pressão de 10 bar ser superior, em relação à pressão de 1 bar.

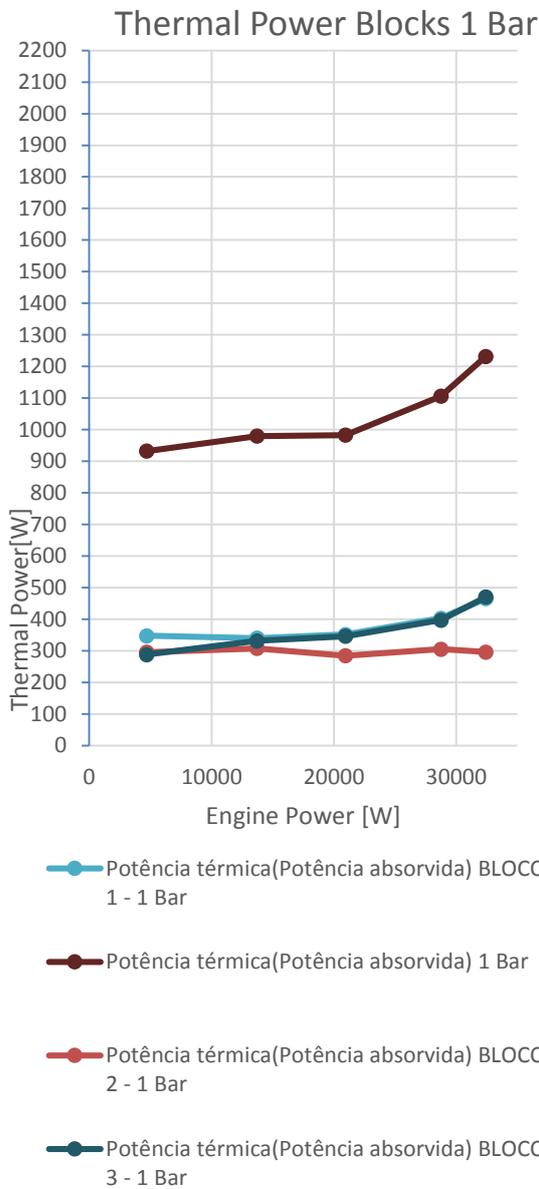


Gráfico 5-21 Potências térmicas para a pressão de 1 bar

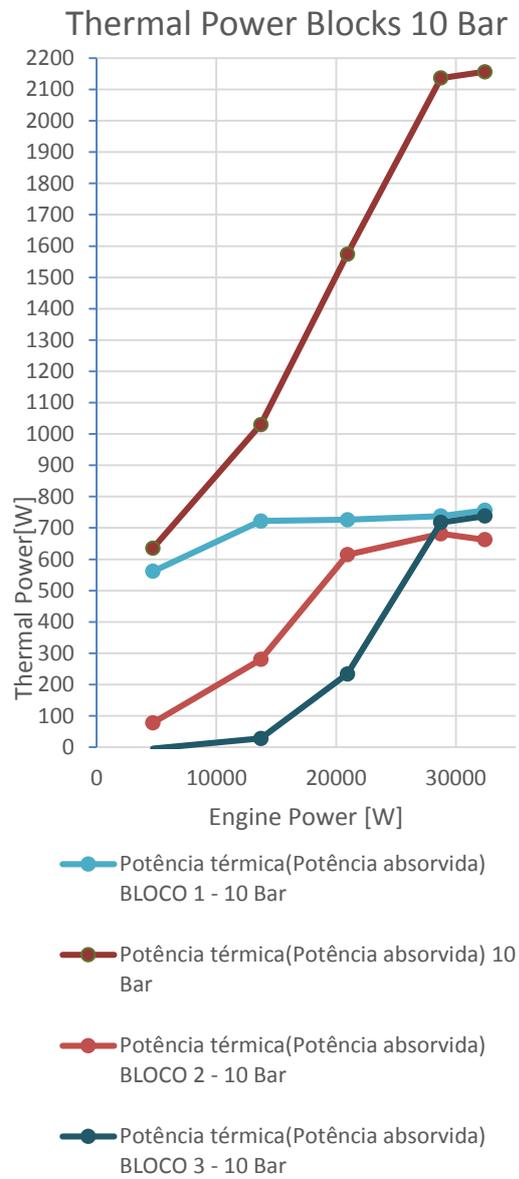


Gráfico 5-22 Potências térmicas para a pressão de 10 bar.

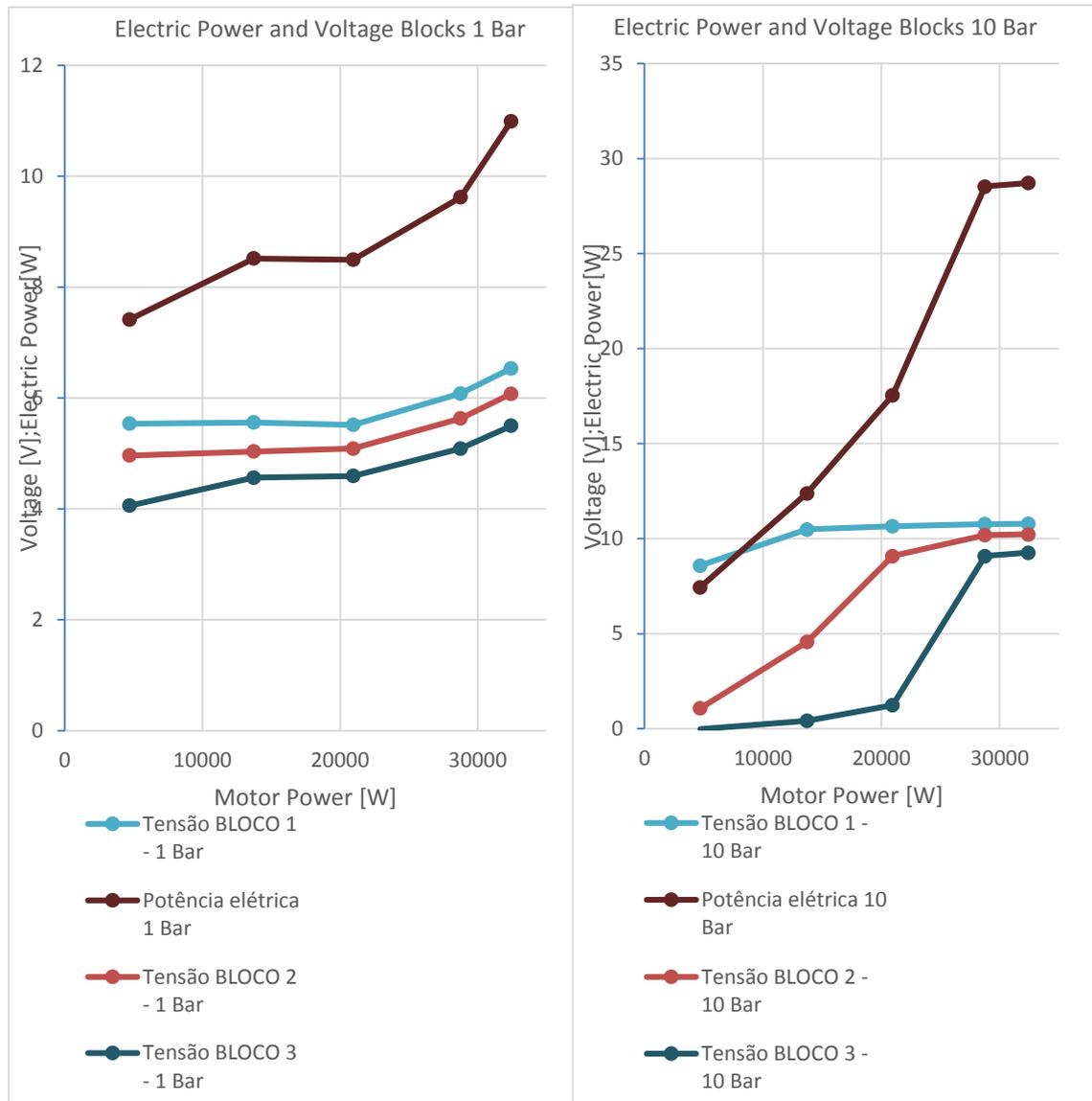


Gráfico 5-23 Potência elétrica total e tensões nos blocos para a pressão de 1 bar

Gráfico 5-24 Potências elétrica total e tensões nos blocos para a pressão de 10 bar.

5.4.4 Ensaios experimentais utilizando *Dowtherm A* como fluido de trabalho

Neste subcapítulo, são apresentados resultados dos ensaios experimentais utilizando como líquido de trabalho o *Dowtherm A*. Foram utilizados 77 ml de modo a que o evaporador ficasse cheio com líquido de trabalho e uma pressão de trabalho de 1 bar, o que corresponde a uma temperatura de trabalho de 257°C.

Tabela 5.4-2 Propriedades do *Dowtherm A* e da Água.

	Temperatura de Ebulição à pressão de 1 atm (°C)	Cp do líquido saturado (J/kg K)	Calor Latente de Vaporização (kJ/kg)	Massa Volúmica (kg/m ³)
Dowtherm A	257	2218	299.8	3.446
Água	100	4186	2256	0.59

Quando comparado com a água, o *Dowtherm A*, possui um C_p de 2218 J/ kg K, muito inferior ao da água, 4186 J/ kg K. Esta é uma das características que poderá influenciar em parte, o comportamento do sistema. No entanto, dado que o *Heat Pipe* funciona praticamente a temperatura constante e sob o princípio da mudança de fase, é provável que este fator tenha muito menos influência que as diferenças no calor latente de vaporização. Será este último o fator decisivo pois determina a energia que o fluido de trabalho consegue absorver/ceder, ao evaporar/condensar, por unidade de massa de fluido. Sendo o calor latente de vaporização do *Dowtherm A* 10 vezes inferior ao da água, isto quer dizer que o fluxo evaporativo, e consequentemente a potência transferida, será proporcionalmente menor.

Na realização do ensaio experimental, seria espectável a presença de um único líquido de trabalho no interior do gerador, o que previa que a temperatura interna do bloco 2 aumentasse quando a temperatura interna do bloco 1 estabilizasse aproximadamente nos 250°C. A mesma reação seria esperada no bloco 3 quando o bloco 2 estabilizasse a sua temperatura interna. O mesmo acontecendo ao bloco 3 em relação ao bloco 2. No entanto, perante os resultados obtidos, representados no Gráfico 5-25, não se verifica o comportamento previsto teoricamente.

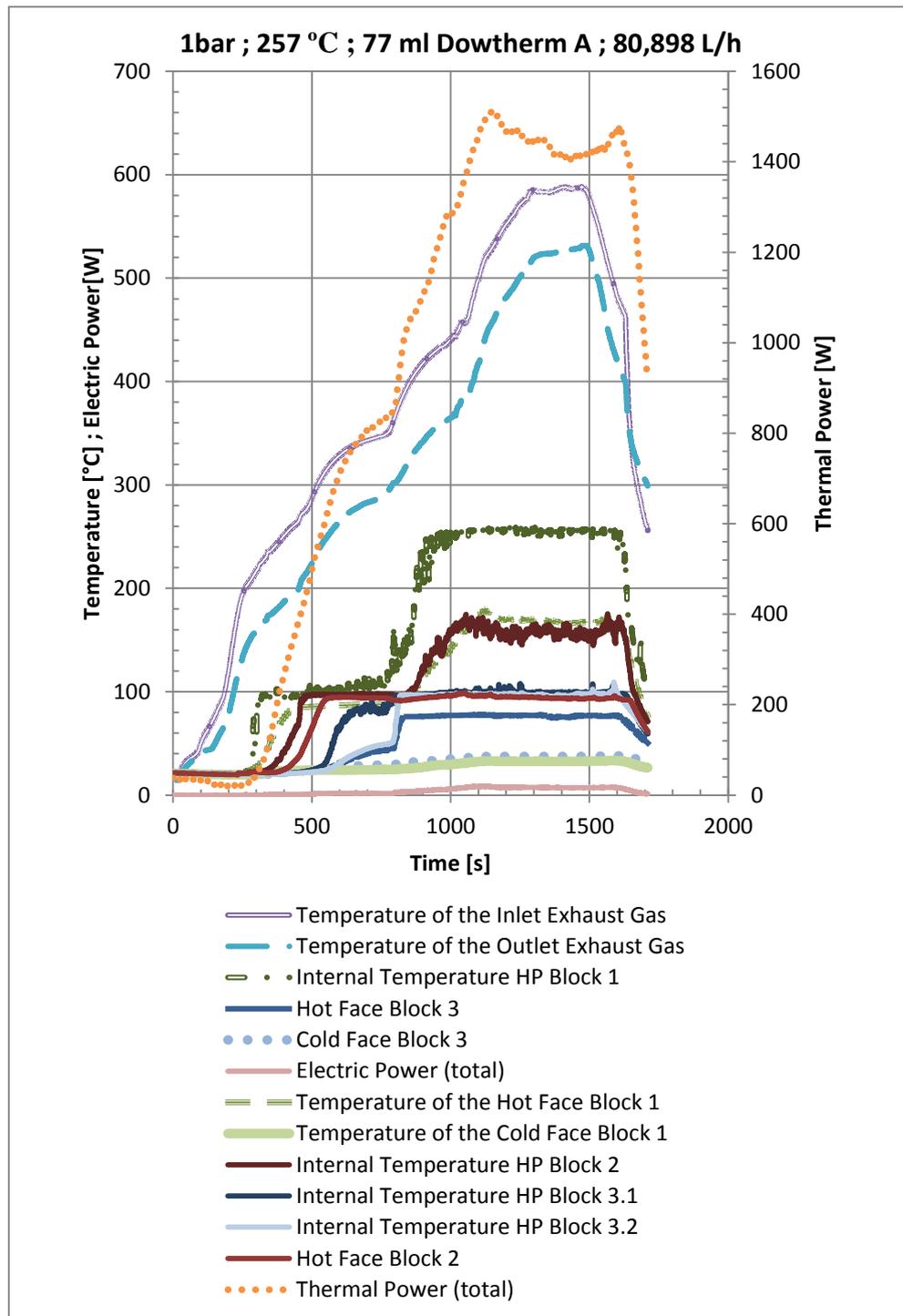


Gráfico 5-25 Potências e temperaturas calculadas e medidas relativamente ao teste de *Dowtherm A* com pressão de 1 bar.

Pela análise do Gráfico 5-25, verifica-se que existem zonas do *Heat Pipe* a funcionarem a 100°C, o que faz concluir que o gerador apresenta água no seu interior, influenciando o comportamento do *Dowtherm A*. Observa-se que a passagem dos gases de escape no permutador de calor faz com que a água, atingindo aproximadamente 100°C, condense no bloco 1 decorridos 300 segundos de ensaio. Por volta dos 750 segundos a temperatura do *HeatPipe* na sua zona inferior deixa de ser 100°C e começa a subir até aos

250°C. Isto significa que a água vaporizou totalmente na zona inferior do *Heat Pipe* e é somente o *Dowtherm A* que está a evaporar no evaporador a partir dos 800 segundos.

No entanto, depois dos 1000 segundos continuam a existir zonas a 1000°C, por exemplo, no bloco 3. Curiosamente, quando a temperatura do bloco 1 termina de estabilizar nos 250°C, a temperatura no bloco 2 começa a aumentar, atingindo aproximadamente os 200° C mas não os 250°C como seria de esperar.

Esta sucessão de acontecimentos poderá ser justificada pela existência de um *loop* de condensação/vaporização da água entre os blocos 3 e 2. Ou seja, no bloco 2 está a ocorrer condensação de *Dowtherm A* e vaporização da água. Aqui, a água, está a retirar parte da energia térmica libertada pela condensação do *Dowtherm A*, no estado gasoso, para voltar a vaporizar, motivo pela qual, a temperatura do bloco 2 não atinge a temperatura do bloco 1 (250°C aproximadamente) mas apenas 170°C, aproximadamente. Ao longo do ensaio, esta situação torna-se um ciclo. Apenas o bloco 1 se encontra com uma temperatura interna aproximadamente igual á temperatura de ebulição do líquido de trabalho. A densidade do vapor de *Dowtherm A* é muito superior à do vapor de água. Quando deixa de existir água no evaporador e começa a ser vaporizado *Dowtherm A*, este, força a passagem do vapor de água do bloco 2 para o bloco 3, justificando o aumento de temperatura deste para os 100°C, aproximadamente.

É observada também uma menor diferença de temperatura entre a entrada de gases no permutador e a saída do mesmo, quando o *Dowtherm A* entra em ebulição. Este fenómeno deve-se ao facto de o *Dowtherm A* possuir um valor de calor latente muito inferior ao da água, necessitando de menos calor para aumentar um grau na sua temperatura.

No Gráfico 5-25 observa-se também, que a temperatura máxima na face quente dos módulos nunca ultrapassou os 160°C, no bloco 1. Apesar de a temperatura interna deste bloco estar à temperatura de ebulição do *Dowtherm A*, a temperatura da face quente deste nunca atingiu o mesmo valor de temperatura. No espaço de tempo compreendido entre os 1000 e o final do ensaio, observa-se que esta situação é estável, indicando que o permutador não é capaz de absorver mais calor dos gases de escape.

No Gráfico 5-26, observa-se a potência elétrica produzida em cada bloco assim como a total. Quando comparada com as potências obtidas utilizando a água como líquido de trabalho, os resultados são piores. Relativamente á potência total, o valor obtido é muito

próximo nos dois ensaios. Analisando os blocos em separado, observa-se que apenas o comportamento do bloco é melhor no ensaio do *Dowtherm A*.

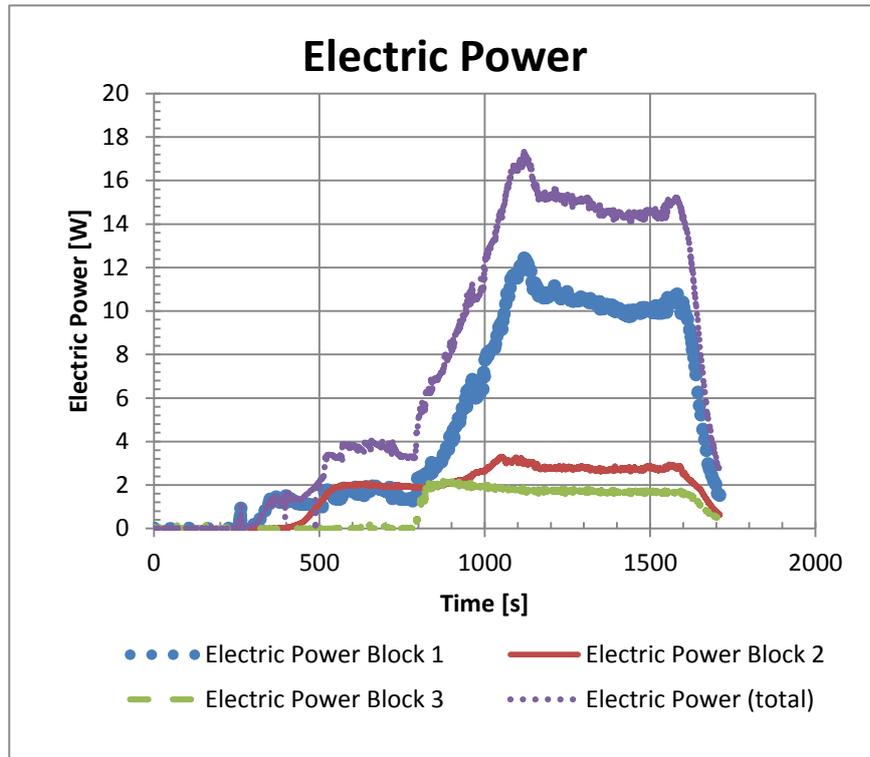


Gráfico 5-26 Potências elétricas dos blocos e potência total.

O Gráfico 5-27 mostra a eficiência do gerador para este ensaio. Contrariando o que acontece com a potência, a eficiência do gerador apresenta um pouco mais elevada do que a conseguida no ensaio utilizando líquido de trabalho, a água para a mesma pressão. Como se pode observar a eficiência máxima conseguida é aproximadamente de 1%.

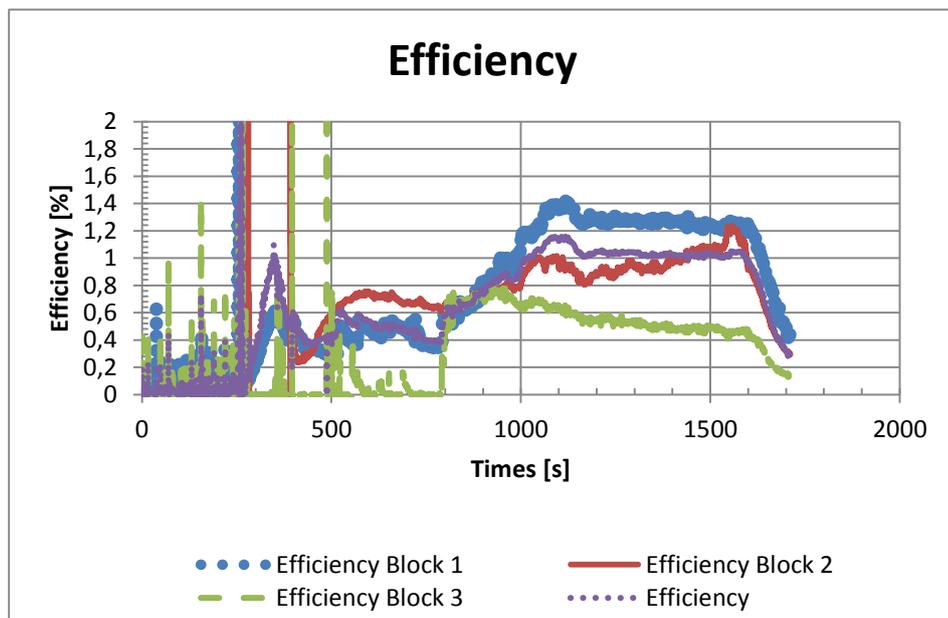


Gráfico 5-27 Eficiência dos blocos e total.

6 CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

6 CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

6.1 CONCLUSÕES

Esta dissertação tinha como objetivo projetar, simular, construir e caracterizar um protótipo para geração de energia elétrica utilizando a energia térmica desperdiçada na exaustão dos motores de combustão e utilizando *Heat Pipes* de condutância variável no controlo de temperatura de funcionamento dos módulos termoelétricos disponíveis comercialmente. Tal desenvolvimento relaciona-se com o facto de existir um elevado calor libertado pelos gases de escapes provenientes de um motor de combustão. Este elevado calor libertado possibilita o seu aproveitamento de forma a gerar energia elétrica, tendo como objetivo a redução dos consumos do veículo. Esta redução acontece, uma vez que com este aproveitamento seria possível reduzir a carga do alternador do motor do veículo o que diminuiria a carga mecânica do motor, e por consequência os consumos do mesmo assim como a emissão de gases poluentes.

Inicialmente, foi feito um estudo teórico do funcionamento de módulos termoelétricos usados para conversão de energia térmica em energia elétrica, assim como os efeitos presentes no módulo, efeito de *Seebeck* e *Peltier*. Foi feito um estudo do tipo de transferências de calor existentes, e as quais seriam aplicadas ao protótipo de geração de energia. Foi elaborado o circuito elétrico correspondente a série de dois módulos para determinar as expressões de cálculo que são usadas para elaboração dos gráficos. Depois de efetuado o estudo teórico, procedeu-se à caracterização do gerador termoelétrico já construído e implementado. Este apresenta uma configuração de blocos colados em série, como o modelo anteriormente estudado apenas com uma modificação na posição do evaporador e orientação dos módulos que se encontram numa orientação paralela ao fluxo dos gases de escape.

Foram adquiridas no início da dissertação novas placas de aquisição de dados da *National Instruments*, sendo necessário desenvolver um novo programa de aquisição de dados para o gerador termoelétrico. Foi necessário o estudo de um novo tipo de programação orientado para as novas placas de aquisição, programação *Labview*. O programa de aquisição e monitorização dados desenvolvido é capaz de efetuar a

aquisição de todas as temperaturas necessárias para o estudo do gerador assim como das tensões presentes nos módulos termoelétricos.

Foi necessária a construção de uma nova linha de escape antes de iniciar os testes. Inicialmente, construiu-se uma linha de escape para efetuar a ligação entre o motor *Yanmar* e o protótipo do gerador termoelétrico. Esta fase foi bastante demorada pois esta linha de escape foi totalmente construída no laboratório. Após se efetuarem testes iniciais com este motor, verificou-se que este não seria o mais apropriado para o estudo pretendido. Trata-se de um motor monocilíndrico com o qual não se obtinha um funcionamento constante do gerador, associado o outro problema, pois este motor tem um depósito de combustível pequeno, que não permitia que se efetuassem os testes até ao fim e mesmo que o gerador atingisse a temperatura de funcionamento. Usando este motor também não seria possível saber dados relativos ao binário e rotações do motor, devido a uma deficiência do sistema de aquisição destes dados, de modo que não seria possível determinar em que condições se efetuavam os ensaios.

Com este entrave, recorreu-se a outro motor presente no laboratório, *PSA 1.6HDi*, de forma a proporcionar condições de efetuar os ensaios em circunstâncias adequadas. Foi então necessário efetuar a construção de uma nova linha de escape de modo a criar ligação entre o motor e o gerador termoelétrico. Esta fase, tal como na situação anterior, apresentou alguns entraves, entre os quais o longo período de tempo para a sua realização, uma vez que a linha de escape foi totalmente construída no laboratório onde decorriam os ensaios.

O protótipo do gerador termoelétrico apresentou numa fase inicial de ensaios alguma fragilidade. A estrutura deste não foi capaz de suportar as condições de ensaios e pressões experimentais, acabando por ceder. Esta situação proporcionou assim mais um entrave ao início dos ensaios experimentais definitivos.

Apesar de ao longo da dissertação e dos ensaios experimentais terem surgido diversas limitações, as anteriormente descritas destacam-se, tendo sido as responsáveis pelos maiores entraves nos ensaios experimentais.

Foram efetuados ensaios em que o gerador foi sujeito a diferentes pressões internas, com o objetivo de se ter várias temperaturas de funcionamento do *Heat Pipe*. As pressões testadas foram, 1 bar, 2 bar, 3 bar, 4 bar, 5 bar, 7 bar e 10 bar. Destas, destacam-se as pressões de 1 bar, 4 bar e 10 bar. Relativamente às restantes, por análise dos resultados

obtidos, verifica-se que são semelhantes às pressões mais próximas destacadas, apenas alterando a temperatura de funcionamento e a tensão obtida nos módulos. Manteve-se para todos os ensaios condições de testes idênticas, o volume de líquido de trabalho usado foi 77mL de água e o caudal do líquido de arrefecimento situou-se nos 80.9 L/h.

O ensaio de 1 bar, equivale a uma temperatura de ebulição do líquido de trabalho referente a 100°C. Neste ensaio verifica-se que os blocos chegam mais rápido à temperatura de funcionamento, quando comparado com os restantes. Ao fim de 1000 segundos de funcionamento tem-se os 3 blocos em regime permanente de funcionamento. Verifica-se que as temperaturas das faces quentes dos blocos 1 e 2 chegam ao mesmo nível de temperatura que o interior do bloco respetivo. A temperatura da face quente do terceiro bloco não consegue atingir a temperatura igual à temperatura interior do bloco 3, o que indica que mesmo os blocos funcionando em pleno e o copo de arrefecimento entrar em funcionamento, os gases de escape não possuem energia térmica suficiente para elevar a temperatura descrita anteriormente. A presença de ar no interior da estrutura também interfere nesta ocorrência, pois este mistura-se com o vapor de água no bloco 3. Neste ensaio obteve-se uma potência total de aproximadamente 8W, com a eficiência do gerador a situar-se nos 0.85%. A potência térmica transferida para água chegou aos 1333.65W.

O ensaio referente a 4 bar de pressão interna do *Heat Pipe*, possui uma temperatura de ebulição do líquido de trabalho na ordem dos 144°C. Neste ensaio o período de tempo para os blocos atingirem o regime permanente, temperatura de funcionamento, foi superior ao ensaio de 1 bar. Neste ensaio foram necessários 3000 segundos para o conjunto dos três blocos se encontrar à temperatura de funcionamento. A única face quente que atingiu a temperatura igual à temperatura interna do *Heat Pipe* foi a face quente do bloco 1. Com o aumento da pressão verificou-se que as temperaturas das faces quentes dos blocos 2 e 3 não eram capazes de atingir uma temperatura igual à temperatura interna do bloco respetivo. Os motivos que levam a esta situação são os mesmos dos mencionados anteriormente para o caso da pressão ser 1 bar, mas neste caso aplica-se ao bloco 2 e 3. Neste ensaio obteve-se uma potência total máxima de aproximadamente 23W com uma eficiência de 1.2%. A potência térmica transferida para a água de arrefecimento chegou aos 1846.8W.

Em relação ao ensaio de 10 bar, obteve-se a potência total mais elevada de todos os ensaios, no entanto, como a pressão interna do *Heat Pipe* é mais elevada, verifica-se que a diferença de temperatura da face quente dos blocos 2 e 3 em relação à temperatura

interna do bloco respetivo é maior quando comparada com a diferença dos mesmo em relação ao ensaio com pressão de 4 bar. A potência total conseguida situou-se nos 28W aproximadamente, com uma eficiência máxima de 1.35%. A potência térmica total do sistema chegou aos 2154W.

Em relação aos ensaios previstos com o fluido de trabalho *Dowtherm A*, não houve tempo para os efetuar por completo. Apenas foi possível realizar um ensaio em que a pressão interna do gerador era 1 bar. Não foi possível verificar o correto funcionamento do *Dowtherm A* pois constatou-se a existência de água no interior do gerador. Na fase inicial do ensaio apenas a água era vaporizada, pois os blocos apresentavam uma temperatura interna de aproximadamente 100°C, indicando a existência de vapor de água.

Decorridos 750 segundos de ensaio, verificou-se o aumento de temperatura do bloco 1 para cerca de 250°C. Nesta fase do ensaio apenas *Dowtherm A* estava a ser vaporizado, mas verificava-se a existência de vapor de água no interior do gerador. O bloco 3 possuía uma temperatura interna de aproximadamente 100°C e o bloco 2 uma temperatura de cerca de 165°C. Estes dados são indicativos que o bloco 1 possuía vapor de *Dowtherm A* e o bloco 2 uma mistura de vapor de *Dowtherm A* e água. Esta água foi resultado da condensação de vapor de água no bloco 3, a qual correu para o bloco 2 e voltou a ser vaporizada para o bloco 3 pelo vapor de *Dowtherm A*, tornando-se num ciclo.

Foi conseguida uma eficiência do gerador de cerca 1%, onde a potência térmica total rondou os 1420W e a potência elétrica total atingiu os 14W, aproximadamente.

Após a análise dos dados de todos os ensaios efetuados observa-se que, quando a pressão interna do *Heat Pipe* é elevada, aumentando o ponto de ebulição do líquido de trabalho, as temperaturas das faces quentes dos blocos 2 e 3 nunca conseguem chegar à temperatura igual à temperatura interna do bloco respetivo. Com isto, depreende-se que o caudal de gases disponibilizado pelo motor (mesmo em regime máximo de funcionamento) não possui energia térmica suficiente para elevar esta temperatura. Constata-se também que o evaporador poderá não estar em condições ideais de funcionamento, uma vez que não é capaz de absorver também toda a energia térmica disponibilizada pelos gases de escape. Estes dois fatores são cruciais para o melhor funcionamento do gerador termoeletrico.

Constatou-se também, após a análise dos resultados globais, que a alteração das condições de funcionamento do motor entre o teste de 1 Bar e 10 Bar criou alterações no

caudal de gases de escape disponível e conseqüentemente na potência térmica disponível no mesmo.

Sintetizando, foi adaptada uma instalação para aproveitamento de energia dos gases de escape de motores usando geradores termoelétricos e *Heat Pipes* e usada para efetuar testes com um motor *Diesel* de automóvel, utilizando um novo sistema de aquisição e tratamento de dados.

O gerador termoelétrico foi testado para várias cargas do motor (de 22.5 a 155 N.m, a 2000 rpm) e várias pressões/temperaturas de trabalho, tendo como fluidos de trabalho a água e o *Dowtherm A*.

Observou-se que a baixas temperaturas do *Heat Pipe*, o sistema opera em pleno já desde cargas do motor muito baixas.

Para temperaturas do *Heat Pipe* elevadas o motor necessita estar a uma carga elevada para operar em pleno. Mesmo assim, o *output* elétrico do sistema com alta pressão foi sempre superior ao do sistema com baixa pressão devido à maior temperatura atingida pelos módulos ativos.

Os resultados do sistema com *Dowtherm A* ainda não foram satisfatórios devido à contaminação do sistema com água, o que levou à redução do seu desempenho.

A baixa eficácia do permutador existente (muito danificado pela corrosão) impediu tirar todo partido da elevada potência térmica disponível nos gases de escape.

Contudo, com base no estudo efetuado no desenvolvimento desta dissertação, pode afirmar-se que, o estudo e desenvolvimento de geradores termoelétricos associados a um *Heat Pipe* de condutância variável, revelou-se muito eficaz para o controlo de temperatura de funcionamento e a segurança dos módulos contra excessos de temperatura, sendo um incitamento ao desenvolvimento do estudo nesta área.

6.2 TRABALHO FUTURO

Continuar o estudo e desenvolvimento efetuado até à data desta dissertação é algo fundamental para alcançar um protótipo viável de utilização num veículo. Evoluir o programa de aquisição e monitorização seria uma solução com vista a um melhor e mais completo estudo do sistema. Este deveria ter capacidade de medir intensidade de correntes presentes na carga, assim como, a variação da resistência interna da carga.

Desenvolver um gerador termoelétrico mais fácil de manusear, mais sólido e mais compacto deveria ser uma etapa a alcançar. Seria ainda mais benéfico a possibilidade de criar um bloco com uma geometria onde fosse possível colocar mais módulos termoelétricos.

Desenvolver um gerador em que o *Heat Pipe* se encontraria a diferentes pressões, com o intuito de ser aproveitado qualquer energia térmica disponível nos gases de escape, qualquer que fosse o regime de funcionamento do motor utilizado.

Realizar ensaios em condições aproximadamente iguais do motor utilizado, para que, as propriedades inerentes ao caudal de gases de escape fossem em todos os ensaios, semelhantes. Idealmente deveriam ser realizados com um novo evaporador.

Repetir os testes com *Dowtherm A* sem a contaminação de água.

A utilização de um gás inerte, e não ar, para criar pressão no interior do gerador, aquando a utilização de um fluido de trabalho que não água, seria o ideal. Com o aquecimento do gerador, existindo ar no interior do gerador, este ao condensar, origina o aparecimento de água no interior do gerador.

REFERÊNCIAS

REFERÊNCIAS

- [1] R. M. A. Sousa, “Gerador Termoelétrico para Escape do Automóvel com Controlo de Temperatura,” 2011.
- [2] J. Martins, L. M. Goncalves, J. Antunes, and F. P. Brito, “Thermoelectric Exhaust Energy Recovery with Temperature Control through Heat Pipes,” pp. 1–19, Apr. 2011.
- [3] F. P. Brito, J. Martins, L. M. Goncalves, N. Antunes, and D. Sousa, “Influence of Heat Pipe Operating Temperature on Exhaust Heat Thermoelectric Generation,” vol. 7.
- [4] F. P. Brito, J. Martins, L. M. Goncalves, and R. Sousa, “Temperature Controlled Exhaust Heat Thermoelectric Generation,” pp. 561–571, Apr. 2012.
- [5] “Redução das emissões poluentes dos veículos ligeiros.” [Online]. Available: http://europa.eu/legislation_summaries/environment/air_pollution/l28186_pt.htm. [Accessed: 10-Sep-2014].
- [6] “Regulamento(CE) N.º 715/2007 do Parlamento Europeu do Conselho.” [Online]. Available: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32007R0715&from=PT>. [Accessed: 10-Sep-2014].
- [7] K. Saqr and M. Musa, “Critical review of thermoelectrics in modern power generation applications,” *Therm. Sci.*, vol. 13, no. 3, pp. 165–174, 2009.
- [8] D. T. Crane and L. E. Bell, “Progress Towards Maximizing the Performance of a Thermoelectric Power Generator,” *2006 25th Int. Conf. Thermoelectr.*, pp. 11–16, 2006.
- [9] E. Velmre, “Thomas Johann Seebeck and his contribution to the modern science and technology,” *2010 12th Bienn. Balt. Electron. Conf.*, pp. 17–24, Oct. 2010.
- [10] D. Sousa, “Reaproveitamento de Calor em Automóveis para Geração de Energia Elétrica Utilizando Módulos Termoelétricos.”
- [11] J. LaGrandeur, D. Crane, S. Hung, B. Mazar, and a. Eder, “Automotive Waste Heat Conversion to Electric Power using Skutterudite, TAGS, PbTe and BiTe,” *2006 25th Int. Conf. Thermoelectr.*, pp. 343–348, 2006.
- [12] “Green Car Congress: Volkswagen Shows Thermoelectric Generator for Waste Heat Recovery.” [Online]. Available: <http://www.greencarcongress.com/2009/02/volkswagen-show.html>.

- [13] “Waste heat recovery systems in vehicles - Energy Harvesting Journal.” [Online]. Available: <http://www.energyharvestingjournal.com/articles/waste-heat-recovery-systems-in-vehicles-00003754.asp?sessionid=1>.
- [14] S. Kumar, S. D. Heister, X. Xu, J. R. Salvador, and G. P. Meisner, “Thermoelectric Generators for Automotive Waste Heat Recovery Systems Part II: Parametric Evaluation and Topological Studies,” *J. Electron. Mater.*, vol. 42, no. 6, pp. 944–955, Mar. 2013.
- [15] G. P. Meisner, “Advanced Thermoelectric Materials and Generator Technology for Automotive Waste Heat at GM,” 2011.
- [16] L. M. Gonçalves, “Microsistema termoelétrico baseado em teluretos de bismuto e antimónio.” 15-May-2008.
- [17] “History of Thermoelectrics.” [Online]. Available: <http://www.thermoelectrics.caltech.edu/thermoelectrics/history.html>. [Accessed: 18-Sep-2014].
- [18] D. M. Rowe, *CRC Handbook of Thermoelectrics*. 1994.
- [19] “Thermoelectrics.” [Online]. Available: <http://www.thermoelectrics.caltech.edu/thermoelectrics/index.html>. [Accessed: 19-Sep-2014].
- [20] “Precision Analog Applications Seminar Thermocouple Application Section 3.” [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ml/slyp161/slyp161.pdf>. [Accessed: 24-Sep-2014].
- [21] “Tables of Thermoelectric Voltages for All Thermocouple Types - National Instruments.” [Online]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/4231/en/#toc8>. [Accessed: 24-Sep-2014].
- [22] “Estatica - Instrumentação e tecnologia Industrial.” [Online]. Available: <http://www.estatica-metrologia.com.br/termopares.php>. [Accessed: 24-Sep-2014].
- [23] “Thermocouple Type K | Type K Thermocouple | Chromel/Alumel Thermocouple.” [Online]. Available: <http://www.thermometriccorp.com/thertypk.html>. [Accessed: 24-Sep-2014].
- [24] Y. A. Cengel, J. M. Cimbala, and R. H. Turner, *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences*, 3rd ed. 2012.
- [25] J. P. Holman, *Heat Transfer*. Singapore, 1989.
- [26] M. N. Özisik, *Transferência de Calor*. Rio de Janeiro, 1990.
- [27] D. Reay and P. Kew, *Heat Pipes, Theory, Design and Applications*, Fifth Edit., vol. 40, no. 6. 2006, p. 9823.

- [28] L. M. Gonçalves, J. Martins, F. P. Brito, J. Antunes, and R. Rocha, “Heat-Pipe Assisted Thermoelectric Generators for Exhaust Gas Applications,” pp. 12–18, 2010.
- [29] F. P. Brito and J. Martins, “Thermoelectric Exhaust Heat Recovery with Heat Pipe-based Thermal Control,” 2014.
- [30] National Instruments, “OPERATING INSTRUCTIONS AND SPECIFICATIONS NI 9214 with NI TB-9214.”
- [31] National Instruments, “OPERATING INSTRUCTIONS AND SPECIFICATIONS.”