



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Carlos Miguel Rodrigues Vilela Gomes

**Teste em protótipo de um sistema gerador
de eletricidade com entalpia dos gases de
escape**

Fevereiro de 2022



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Carlos Miguel Rodrigues Vilela Gomes

**Teste em protótipo de um sistema gerador
de eletricidade com entalpia dos gases de
escape**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação de

**Professor Doutor Francisco Carrusca Pimenta de Brito e
Professor Doutor Jorge José Gomes Martins**

Fevereiro de 2022

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição

CC BY

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

AGRADECIMENTOS

A realização da Dissertação de mestrado é um trabalho longo que apesar de ser individual, não seria possível sem o envolvimento de variadas pessoas a quem reservo este espaço para agradecer o seu contributo.

Em primeiro lugar ao Professor Doutor Jorge Martins como orientador e ao Professor Doutor Francisco Brito como coorientador, pela enorme disponibilidade e contributo com conhecimentos técnicos, teóricos e práticos e orientação ao longo de todas as etapas do desenvolvimento do projeto.

Aos alunos Rui Carvalho e Joaquim Costa pelo estímulo, disponibilidade, ajuda, companheirismo, bem como, pelos conhecimentos transmitidos, durante a execução das atividades laboratoriais envolvendo preparação do protótipo e testes com o motor.

Aos Engenheiros Filipe Marques, João Carvalho e Miguel Abreu pela disponibilização de materiais essenciais para a realização do projeto e ajuda nas reparações não planeadas de última hora.

À minha família e amigos por todo o apoio e motivação proporcionada durante estes anos, por estarem comigo de forma incondicional, durante os bons e os maus momentos que me proporcionaram a realização deste sonho.

Um especial Obrigado a todos os professores por todos os ensinamentos que direta ou indiretamente contribuíram para que eu me tornasse Mestre em Engenharia Mecânica.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

A eficiência energética na indústria automóvel é, nos dias que correm, um tema premente devido às exigências impostas pelas metas relativas às emissões de poluentes e gases com efeito de estufa. Os meios convencionais de produção de energia elétrica a bordo, nomeadamente o alternador, recorrem à energia mecânica produzida pelo motor. No entanto, existe um elevado potencial de recuperação de energia libertada pelos gases de escape que não tem vindo a ser aproveitada. A temperatura é bastante elevada e a potência térmica existente nos gases de escape é da mesma ordem de grandeza da potência útil do motor de combustão interna. O aproveitamento da energia de gases de escape pode ser feito de forma inovadora através da conversão de calor em energia elétrica com recurso a geradores termoelétricos (TEG) sem recurso a peças móveis. Para serem eficientes, necessitam de funcionar perto do seu limite de temperatura, sem, contudo, a ultrapassar. Uma das formas de o garantir é fornecer calor de escape por intermédio de um fenómeno de mudança de fase com temperatura de saturação controlada por intermédio de termossifões de condutância variável.

O presente trabalho é fundamentalmente experimental e tem como base um protótipo, existente no laboratório de motores e desenvolvido no âmbito do projeto *Exhaust2Energy*. Procurou-se testar de forma a otimizar este gerador termoelétrico de controlo de temperatura (TCTG) através da alteração de algumas variáveis, nomeadamente a utilização de gases como o azoto, hélio e árgon a diferentes pressões iniciais, diferentes regimes de funcionamento do motor e através da alteração da direção do fluxo de gás no protótipo.

Os resultados indicam que se conseguiu obter uma melhor estratificação dos gases permitindo uma melhor distribuição de calor pelos TEG de acordo com o calor disponível e melhor transferência de calor, permitindo um aumento na potência gerada e eficiência do sistema. Alterações de desenho e conceção do protótipo para permitir uma maior absorção do calor por parte do protótipo e equipamento que permita cargas mais elevadas são sugestões para trabalhos futuros.

PALAVRAS-CHAVE

Energia de gases de escape; Gerador termoelétrico de controlo de temperatura; Gerador termoelétrico; Termossifões de condutância variável.

ABSTRACT

Energy efficiency in the automotive industry is a pressing issue these days due to the requirements imposed by emissions targets. Conventional means of producing on-board electrical power, such as the alternator, rely on mechanical energy produced by the engine. However, there is a high potential for Exhaust waste heat energy recovery that is not being harnessed. The temperature is quite high and the thermal power existing in the exhaust gases is about the same magnitude as the useful power in the internal combustion engine. Exhaust gas energy can be used in an innovative way by converting heat into electrical energy using thermoelectric generators (TEG) with no moving parts. To be efficient, they need to work close to their temperature limit, without, however, exceeding it. One way of ensuring this, is to provide exhaust heat by means of a phase change phenomenon with controlled saturation temperature through variable conductance thermosiphons.

This work is mostly experimental and is based on an existing prototype, present in the engines laboratory, previously developed by *Exhaust2Energy* project. Several experimental tests were made in order to optimize this thermoelectric temperature control generator (TCTG) by changing some variables, namely the use of gases such as air, helium and argon at different starting pressures, different engine operating speeds and by changing the direction of gas flow in the prototype.

The results obtained indicate that a better stratification of the gases was achieved, allowing a better heat distribution by the TEG according to the available heat and better heat transfer, allowing an increase in the generated power and efficiency of the system. Changes in the design and conception of the prototype to allow higher heat absorption and equipment that allow higher thermal loads are suggestions for future work.

KEYWORDS

Exhaust waste heat energy recovery; Temperature control thermoelectric generator; Thermoelectric generator; Variable conductance thermosiphons.

ÍNDICE

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vi
Índice	vii
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xv
Lista de Abreviaturas e Acrónimos	xvi
Lista de símbolos	1
1 Introdução	2
1.1 Enquadramento e Motivação	4
1.2 Objetivos	7
1.3 Estrutura da Dissertação	9
2 Revisão de Literatura	10
2.1 Estado da Arte	10
2.1.1 Geradores Termoelétricos	10
2.1.2 Tipos de dispositivos Termoelétricos	17
2.1.3 Termossifões de Condutância Variável	19
2.2 Termodinâmica e Transferência de calor	22
2.2.1 Calor e temperatura	22
2.2.2 Transferência de calor e Convecção	24
2.2.3 Inércia térmica	26
2.2.4 Condutividade Térmica	26
2.3 Termoeletricidade	28
2.3.1 Efeito Seebeck	29
2.3.2 Efeito de <i>Peltier</i>	31
2.3.3 Efeito <i>Thomson</i>	32
2.3.4 Potência Elétrica	33
2.3.5 Eficiência Termoelétrica	36

2.3.6	Módulos Termoelétricos e Figura de Mérito	37
3	Protótipo	39
3.1	Visão global e funcionamento do protótipo	40
3.2	Componentes e fluidos relevantes e alterações	43
3.2.1	Fluido de trabalho	43
3.2.2	Gases não condensáveis	44
3.2.3	Evaporador	45
3.2.4	Condensador	46
3.2.5	Condensador de excesso.....	47
3.2.6	Válvulas	48
3.2.7	Válvula de segurança	50
3.2.8	Transdutores de pressão.....	50
3.2.9	TEG	51
3.2.10	Termopares	53
4	Preparação Para Testes	54
4.1	Sistema completo.....	55
4.2	Motor e Freio.....	58
4.2.1	Motor.....	58
4.2.2	Freio do Motor	59
4.3	Recolha e Tratamento de dados.....	61
4.3.1	Sistema de aquisição de dados	61
4.3.2	ECUMaster®	62
4.3.3	LabVIEW®	63
4.3.4	Matlab®	64
4.4	Procedimento de teste.....	67
5	Testes Experimentais	69
5.1	Azoto.....	70
5.1.1	Motor.....	71
5.1.2	Eficácia do permutador de calor	73
5.1.3	Análise de temperaturas e ativação dos TEG.....	75

5.1.4	Eficiência termoelétrica	78
5.1.5	Pressão e temperatura de saturação	79
5.2	Hélio	80
5.2.1	Teste 30 bar	81
5.2.2	Teste 20 bar	86
5.2.3	Teste 11 bar	89
5.2.4	Teste 8 bar V2 fechada	93
5.2.5	Pressão atmosférica e vácuo	97
5.3	Árgon	102
5.3.1	Teste 30 bar	103
5.3.2	Teste 20 bar	107
5.3.3	Teste 10 bar	109
5.3.4	V2 fechada	111
5.3.5	Pressão atmosférica	118
6	Reflexão Final	120
6.1	Conclusões	120
6.2	Reflexões finais sugestões e trabalhos futuros	123
	Referências Bibliográficas	125
	Anexo 1 – Instruções para manipulação de ficheiros e tratamentos de dados	128
	Anexo 2 – Teste Azoto 14 bar – potência elétrica por nível	133
	Anexo 3– Teste Hélio 30 bar – potência elétrica por nível	134
	Anexo 4– Teste Hélio 20 bar – potência elétrica por nível	135
	Anexo 5– Teste Hélio 11 bar – potência elétrica por nível	136
	Anexo 6– Teste Hélio 8 bar com V2 fechada – potência elétrica por nível	137
	Anexo 7– Teste Hélio 0.8 bar– potência elétrica por nível	138
	Anexo 8– Teste Hélio vácuo– potência elétrica por nível	140
	Anexo 9– Teste Árgon 30 bar– potência elétrica por nível	141
	Anexo 10– Teste Árgon 20 bar– potência elétrica por nível	142
	Anexo 11– Teste Árgon 10 bar– potência elétrica por nível	143
	Anexo 12– Teste Árgon 10 bar com V2 fechada– potência elétrica por nível	144
	Anexo 13– Teste Árgon 8 bar com V2 fechada– potência elétrica por nível	144

Anexo 14– Teste Árgon pressão atmosférica– potência elétrica por nível.....145

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – <i>Distribuição de energia no automóvel [11]</i>	4
Figura 2– <i>Simplificação de funcionamento de termossifão com condutância variável</i>	6
Figura 3 – <i>Gerador termoelétrico construído por M.Edmond em 1864</i>	10
Figura 4 – <i>Gerador termoelétrico Thermattaix, Museu de Ciência de Londres</i>	11
Figura 5 – <i>TEG desenvolvido na Universidade de Karlsruhe</i>	11
Figura 6 – <i>À esquerda o módulo e à direita, a montagem do sistema dos módulos ao dissipador de calor</i>	12
Figura 7 – <i>Sistema de testes e funcionamento do gerador termoelétrico</i>	13
Figura 8 – <i>Montagem do gerador termoelétrico</i>	13
Figura 9 – <i>Sistema bypass e gerador termoelétrico</i>	14
Figura 10 – <i>Projeto Thermoelectrics in motion</i>	15
Figura 11 – <i>TARDEC TEG dE 1000W</i>	15
Figura 12 – <i>Esquema de macro dispositivo</i>	17
Figura 13 – <i>Perspetiva de dimensão e estrutura de microdispositivos Micropelt</i>	18
Figura 14 – <i>Potencial da tecnologia com figuras de mérito superiores à unidade</i>	18
Figura 15 – <i>Heat Pipe com retorno por capilaridade</i>	19
Figura 16 – <i>Esquema de TS de condutância de variável com controlo de temperatura</i>	20
Figura 17 – <i>Comportamento de VCTS com variação de carga térmica</i>	21
Figura 18 – <i>Efeito Seebeck em sensores de temperatura e geradores elétricos</i>	29
Figura 19 – <i>Conversor termoelétrico</i>	30
Figura 20 – <i>Consequências da alteração do sentido da corrente</i>	31
Figura 21 - <i>Exemplo demonstrativo de circuito elétrico</i>	33
Figura 22 - <i>Curva de tensão e Potência em função da corrente, que resulta da aplicação de diversas resistências de carga, com a visualização do ponto de potência máxima</i>	34
Figura 23 – <i>Esquema detalhado de modulo configurado para geração de energia elétrica</i>	37
Figura 24 – <i>Protótipo em análise na Dissertação</i>	39
Figura 25 – <i>Esquema da vista principal e perfil do protótipo</i>	40
Figura 26 – <i>Esquema de VCTS</i>	42
Figura 27 – <i>Variação das condições de saturação da água com alteração de temperatura e pressão</i> ..	43
Figura 28 – <i>Esquema do evaporador</i>	45

Figura 29 – Condensador e isolamento.....	46
Figura 30 – Condensador de excesso assinalado pelas letras “C E”.....	47
Figura 31 – Válvulas do sistema (esquerda) e carregamento de GNC (direita).....	48
Figura 32 – Configuração normal à esquerda e invertida à direita.....	49
Figura 33 – Válvula de segurança.....	50
Figura 34 – Gems ® 3500 series.....	50
Figura 35 – Esquema de Módulos de cada um dos lados.....	51
Figura 36 – Resistência elétrica ARCOL HD50 com 0.47 Ohm.....	52
Figura 37 – Esquema de Termopares.....	53
Figura 38 – Foto de laboratório pronto para testes.....	54
Figura 39 – Foto da instalação.....	55
Figura 40 – Esquema da instalação.....	56
Figura 41 – Foto de settings padrão de teste.....	57
Figura 42 – Foto de freio do motor.....	59
Figura 43 – Foto do Controlador do travão.....	60
Figura 44 – Excel criado para a calibração do freio.....	60
Figura 45 – Foto de placa NI-6008 (à esquerda) e NI-9214 (à direita).....	61
Figura 46 – Software ECUmaster®.....	62
Figura 47 – LabVIEW® em funcionamento durante teste.....	63
Figura 48 – Foto de realização de um teste.....	68
Figura 49 – Fase de aquecimento do motor pré-teste.....	70
Figura 50 – RPM e TPS em função do tempo.....	71
Figura 51 – Primeiro regime de funcionamento do motor em teste.....	72
Figura 52 – temperatura dos gases de escape e eficácia.....	73
Figura 53 – Temperaturas no evaporador.....	75
Figura 54 – Evolução da temperatura das faces quentes das fileiras de módulos dos vários blocos....	76
Figura 55 – Potência elétrica.....	77
Figura 56 – Eficiência.....	78
Figura 57 – Pressão gases e vapor.....	79
Figura 58 – RPM e TPS teste 30 bar.....	81
Figura 59 – Pressão interna, temperatura de vapor e gases de escape.....	82
Figura 60 – Temperatura das faces dos TEG nos dois primeiros níveis, no bloco 1.....	82

Figura 61 – <i>Temperatura dos blocos</i>	83
Figura 62 – <i>Eficiência</i>	84
Figura 63 – <i>Potência elétrica nível 1 comparada com nível 6</i>	84
Figura 64 – <i>Potência elétrica total e por blocos</i>	85
Figura 65 – <i>Pressão, temperaturas de escape e de vapor</i>	86
Figura 66 – <i>Pressão, temperaturas de escape e de vapor</i>	87
Figura 67 – <i>TEG output do nível 1,2 e 3</i>	88
Figura 68 – <i>Potência máxima dos TEG</i>	88
Figura 69 – <i>Regime do motor</i>	89
Figura 70 – <i>Comportamento da temperatura e temperatura de vapor registada</i>	90
Figura 71 – <i>Temperaturas no evaporador</i>	90
Figura 72 – <i>Temperatura dos TEG nível 2 (esquerda) e nível 3 (direita)</i>	91
Figura 73 – <i>Contribuição de cada bloco para a potência elétrica</i>	92
Figura 74 – <i>Ciclo do motor durante teste</i>	93
Figura 75 – <i>Pressão, temperaturas de escape e vapor</i>	94
Figura 76 – <i>Temperaturas por bloco</i>	94
Figura 77 – <i>Temperaturas do condensador de excesso</i>	95
Figura 78 – <i>Contributo dos blocos</i>	96
Figura 79 – <i>Regime do motor</i>	97
Figura 80 – <i>Temperatura de entrada/saída dos gases de escape e potência absorvida</i>	97
Figura 81 – <i>Temperatura por blocos</i>	98
Figura 82 – <i>Contribuição por blocos</i>	99
Figura 83 – <i>Temperaturas do evaporador</i>	99
Figura 84 – <i>Ciclo motor</i>	100
Figura 85 – <i>Blocos e produção elétrica</i>	101
Figura 86 – <i>Remoção de fluidos do interior do sistema</i>	102
Figura 87 – <i>Regime do motor</i>	103
Figura 88 – <i>Pressão e temperatura de vapor registada</i>	104
Figura 89 – <i>Temperaturas do buffer e bloco 3</i>	104
Figura 90 – <i>Temperaturas por bloco</i>	105
Figura 91 – <i>Potência máxima obtida</i>	106
Figura 92 – <i>relação entre temperatura de gases de escape e potência elétrica dos TEG</i>	106

Figura 93 – <i>Ciclo do motor</i>	107
Figura 94 – <i>Pressão e temperatura de saturação 20 bar</i>	107
Figura 95 – <i>Temperaturas da zona superior do condensador</i>	108
Figura 96 – <i>Potência máxima dos TEG</i>	108
Figura 97 – <i>Potência máxima dos TEG com árgon a 10 bar</i>	109
Figura 98 – <i>Temperatura dos blocos e do coletor de vapor inferior</i>	110
Figura 99 – <i>Ciclo do motor com 10 bar e V2 fechada</i>	111
Figura 100 – <i>Pressão e temperatura de vapor</i>	112
Figura 101 – <i>Temperaturas de bloco 3 e coletor de vapor superior (buffer)</i>	112
Figura 102 – <i>Propagação do vapor</i>	113
Figura 103 – <i>Temperatura no evaporador</i>	113
Figura 104 – <i>Potência elétrica máxima</i>	114
Figura 105 – <i>Pressão e temperaturas de vapor e gases (esquerda) e ciclo utilizado (direita)</i>	115
Figura 106 – <i>Temperatura do evaporador e do bloco 3</i>	116
Figura 107 – <i>Potência elétrica máxima gerada</i>	117
Figura 108 – <i>pressão e temperatura de vapor (esquerda) regime do motor (direita)</i>	118
Figura 109 – <i>Produção de potência elétrica máxima</i>	119

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – <i>Cenário de redução das emissões de CO₂ até 2050 [2]</i>	2
Tabela 2 – <i>Características técnicas do motor Saxo Cup do grupo PSA</i>	58
Tabela 3 – <i>Constantes</i>	69

LISTA DE ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

B1	Bloco 1
B2	Bloco 2
B3	Bloco 3
°C	Graus Celsius
CO ₂	Dióxido de carbono
EU	European Union
GNC	Gases não condessáveis
GHG	Greenhouse-Gas
HE	Heat Exchanger
HP	Heat Pipes
IAT	Intake air temperature
RPM	Rotações por minuto
TCTG	Temperature controlled thermoelectric generator
TE	Thermoelectric
TEG	Thermoelectric generator
TPS	Throttle position sensor
TS	Termossifão
VCTS	Variable conductance thermosyphon
WLTP	Worldwide harmonized Light-duty vehicles test procedure

LISTA DE SÍMBOLOS

Q- Calor
 ΔT - Variação de temperatura
C- Capacidade calorífica
 c_p - Calor específico
m- Massa
CL- Calor latente
 L_v - Calor latente de vaporização
h- Coeficiente de transferência de calor por convecção
R- Resistência térmica
 \dot{Q} - Taxa de transferência de calor ou Potência térmica
K- Condutância térmica
L- Espessura
A- Área
 λ - Condutividade térmica
U- Coeficiente global de transferência de calor
 ΔV - Diferença de potencial elétrico
V- Potencial elétrico
 α - Coeficiente de *Seebeck*
 Π - Coeficiente de *Peltier*
 μ - Coeficiente de Thomson
T- Temperatura
 q_e - Fluxo de carga elétrica
I- Intensidade de corrente
q- Calor produzido por unidade de volume
n- Número de junções
 P_e - Potência elétrica medida na resistência
 η - Eficiência termoelétrica
ZT- Figura de mérito
 \dot{V} - Caudal volúmico
P- Densidade
 P_{TEG} —Potência elétrica gerada
 ϵ - Eficácia ou a eficiência térmica de um permutador

1 INTRODUÇÃO

A população mundial está em crescimento neste momento, conseqüentemente a procura de energia acarreta desafios cada vez mais difíceis que implicam uma constante evolução e desenvolvimento científico. Se no passado a resposta à procura de energia era feita à custa de queima de combustíveis fósseis sem grandes preocupações ambientais, hoje em dia o paradigma tem-se vindo a alterar de forma rápida e significativa. Cada vez mais, políticas internacionais forçam a indústria em geral e a indústria automóvel, em particular, para a inevitável transição energética sustentável [1]. Neste âmbito, relativamente aos gases com efeito de estufa (GHG), a Comissão Europeia tem como referência os valores de 1990 e propõe reduzir no setor dos transportes no mínimo em 55% até 2030 e 90% até 2050, ambicionando a neutralidade climática nesta data [2]. No que diz respeito às emissões de CO₂, as metas são bastante ambiciosas. Segundo o Regulamento (EU 2019/631), entre 2020-2024 os veículos ligeiros só poderão emitir no máximo 95 g CO₂/km e 147 g CO₂/km no caso de se tratar de veículos de mercadorias. A partir de 2021 os valores são baseados em testes *Worldwide harmonized Light-duty vehicles test procedure* (WLTP) e essa data passará a ser referência, sendo que a diminuição passará a ser contabilizada percentualmente relativamente a 2021, por exemplo no caso dos veículos ligeiros, a redução proposta será de 15% a partir de 2025 e 37,5% a partir de 2030 (como se pode observar na tabela 1). As metas vão se tornando ao longo dos anos cada vez mais restritivas relativamente as emissões de CO₂. Haverá incentivos e penalizações para os fabricantes dependendo de grau de cumprimento com o regulamento em vigor [2] [3].

Tabela 1 – Cenário de redução das emissões de CO₂ até 2050 [2]

Scenario	New cars CO ₂ target (vs. 2021)			New vans CO ₂ target (vs. 2020)			Road transport CO ₂ emission savings (vs. 1990)*	
	2025	2030	2035	2025	2030	2035	2030	2050
Adopted policies	-15%	-37.5%	—	-15%	-31%	—	—	-29%
Lower ambition	-20%	-50%	-70%	-15%	-50%	-70%	-2%	-79%
Moderate ambition	-30%	-70%	-100%	-25%	-70%	-100%	-6%	-89%
Higher ambition	-40%	-100%	-100%	-35%	-100%	-100%	-11%	-94%

A indústria automóvel não foge a estas imposições e tem já ao longo dos últimos anos enfrentado desafios relativos à diminuição da pegada ecológica. As emissões de CO₂ já, há algum tempo, são a principal preocupação da Comissão Europeia pelo que os departamentos de desenvolvimento e investigação dos principais fabricantes da indústria automóvel, vão ter que inovar ainda mais nos materiais e tecnologias para tornar os veículos mais leves e eficientes [4][5]. Estas indústrias terão, seguramente, que continuar a focar-se na melhoria da eficiência energética, nas metas de consumo de energia, na diminuição de emissões de poluentes, de gases com efeito de estufa, com particular destaque as emissões de CO₂ [6].

O surgimento de tecnologias [7] como motores com ciclos de combustão *Atkinson* em detrimento de ciclos *Otto*, para melhorar o consumo de combustível, o desenvolvimento de carros elétricos, ou a tecnologia híbrida com motores pequenos associados a baterias, com a adoção de sistema *start-and-stop*, travagem regenerativa, convertendo a energia cinética em energia elétrica são exemplos deste esforço da indústria e conseqüente inovação.

Existem ainda tecnologias em desenvolvimento bastante promissoras como as que recorrem à energia dos gases de escape sob a forma de calor que seria desperdiçada convertendo-a em energia elétrica. Esta recuperação é vantajosa no que toca a veículos híbridos e híbridos *plug-in*, pois leva a cabo a recarga da bateria quando o motor está a funcionar. Assim é possível melhorar os parâmetros mencionados que são essenciais para alcançar as metas exigidas. É sobre este tipo de tecnologia que a presente Dissertação se irá debruçar.

1.1 Enquadramento e Motivação

Apesar do esforço dos Fabricantes para diminuir as emissões e melhorar o consumo de combustível, os dados mostram que existe uma discrepância entre os valores oficiais divulgados pelas marcas e os valores reais registados na estrada [8]. Na União Europeia, 12% das emissões ainda se devem ao sector dos transportes [9], pelo que ainda existe um longo caminho para percorrer e uma enorme margem de melhoria para que se consigam atingir os valores propostos.

No setor automóvel, só cerca de 30% da energia química produzida, proveniente do combustível, se traduz em potência mecânica usada para locomover o veículo [10][4][5]. Uma grande fatia da energia produzida é gasta nos restantes sistemas do veículo, nomeadamente, sistema de arrefecimento, auxiliares, perdas de calor ou convertido em energia elétrica pelo alternador.

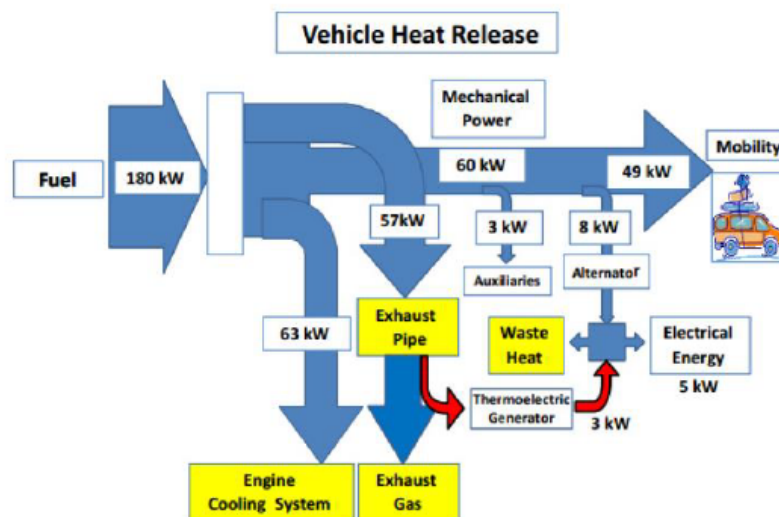


Figura 1 – Distribuição de energia no automóvel [11]

A presente Dissertação foca-se nos últimos dois pontos: a conversão da energia térmica desperdiçada pelos gases de escape e a sua conversão em energia elétrica recorrendo a um sistema que incorpora geradores termoelétricos (TEG). De facto, existe um elevado potencial de recuperação como se pode verificar pela imagem, uma vez que a potência térmica desperdiçada pelo escape é da mesma ordem de grandeza da potência útil do motor de combustão interna. Tendo em conta as necessidades cada vez maiores de energia elétrica a bordo, como os ecrãs digitais, os sensores, as luzes interiores, as ajudas ao estacionamento, entre outras, que sobrecarregam ainda mais os alternadores,

este aproveitamento de energia, que de outra forma, seria desperdiçada, faz ainda mais sentido.

Mesmo que a recuperação percentual desta energia seja marginal, o ganho na eficiência nos veículos, seja em consumo de combustível, seja em emissões, será considerável. Na verdade, estudos revelam que se apenas 6% dessa energia for recuperada, verificam-se melhorias no consumo de combustível na ordem dos 10%, graças à diminuição das perdas no alternador [12]. Os geradores termoelétricos (TEG) que usam o efeito de *Seebeck*, baseado na criação de energia elétrica através de um gradiente de temperaturas, são uma tecnologia iniciada na indústria automóvel em meados do século XX. No entanto, só nos últimos anos é que se conseguiu atingir níveis de eficiência entre 5 a 8% e potencial de redução de consumos na ordem dos 10 e 16% nos camiões leves e pesados respetivamente [12][13].

Como se pode concluir, a conversão de energia térmica em elétrica através de TEG, tem potencial e pode contribuir para alcançar as metas no aumento de eficiência, redução de consumos e melhoria nas emissões. Existe, no entanto, o seguinte constrangimento: as temperaturas dos gases de escape podem exceder os 800°C, pelo que ainda não existem geradores termoelétricos (TEG) que funcionem a estas temperaturas [14]. Para serem eficientes, estes dispositivos necessitam de trabalhar perto do seu limite de temperatura, sem, contudo, a ultrapassarem. Uma das formas de solucionar este problema é fornecer o calor do escape por intermédio de um fenómeno de mudança de fase, com temperatura de saturação controlada.

Um grupo de investigadores da UMinho tem abordado este tema e no âmbito do projeto *Exhaust2Energy* desenvolveram um protótipo que se encontra no laboratório de motores da referida instituição. Este protótipo utiliza um termossifão (TS) de condutância variável com tubos verticais que permite reduzir consideravelmente a resistência térmica do sistema e controlar a temperatura de trabalho dos TEG, garantindo que não sobreaqueçam [15][16][11].

De forma resumida, passa-se a explicar o princípio básico do funcionamento do protótipo. Contém um evaporador, em que o calor dos gases de escape é absorvido através de um fluido de mudança de fase, a água, que ferve e evapora, dirigindo-se para o condensador onde estão os TEG. O vapor transporta a energia térmica para a parte quente dos TEG. No lado oposto dos TEG existe um circuito de água fria com permutadores de calor que promove a remoção de calor e contribui para o

gradiente de temperaturas necessário para produzir energia elétrica. No interior do condensador, ao dar-se a troca de calor, o vapor condensa e escorre de novo para a zona do evaporador.

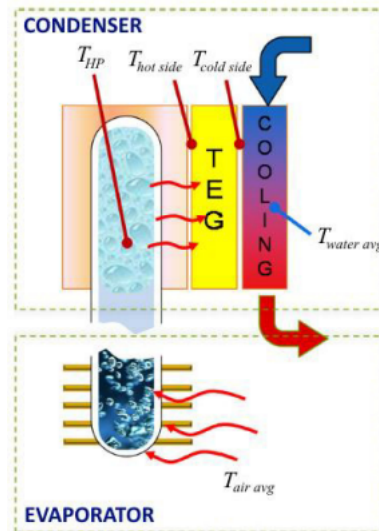


Figura 2– Simplificação de funcionamento de termossifão com condutância variável

Utiliza-se ainda um gás não condensável (GNC), por exemplo ar, azoto ou hélio, que pode ser comprimido, o que permite definir a pressão inicial do sistema e assim, controlar o ponto de ebulição da água. Assim, obtém-se uma estratificação entre esse gás compressível e não condensável e o vapor de água, permitindo a ativação progressiva dos TEG e assim possibilitando uma variação considerável da carga térmica. Todo o sistema será explicado detalhadamente no decorrer da Dissertação.

Comparativamente com os sistemas convencionais de condução/convecção, que estão otimizados para uma determinada carga térmica e utilizam sistemas de *by-pass* para rejeitar o calor em excesso, este sistema permite que os módulos termoelétricos ativos estejam sempre próximos da temperatura operacional ótima e sempre protegidos do sobreaquecimento independentemente da carga térmica a que são sujeitos.

No entanto, a absorção de calor e produção de energia elétrica só ocorre assim que a temperatura/pressão de saturação seja atingida [17]. Por outro lado, a correta estratificação pode ser um desafio e a imprevisibilidade do comportamento e interação entre o GNC e o fluxo de vapor podem limitar o ótimo e eficiente funcionamento do equipamento.

No âmbito do protótipo em análise nesta Dissertação, apesar de já ter havido bastante trabalho de simulação, ainda faltava a validação experimental [18]. Este protótipo foi contruído em projetos anteriores, mas precisava ainda de ser cabalmente testado. Testes preliminares, anteriormente executados, indicaram que a estratificação não estava a ocorrer de forma satisfatória, o que levou a pensar no teste de outros gases não condensáveis (GNC).

1.2 Objetivos

O objetivo da Dissertação foi melhorar o funcionamento do protótipo de termossifões de condutância variável que promove recuperação de calor dos gases de escape, convertendo-o em energia elétrica. Este protótipo foi desenvolvido e testado com um motor num dinamómetro no Laboratório LaMoTA, por investigadores da UMinho no âmbito do projeto *Exhaust2Energy*, mas ainda existia espaço para trabalhos futuros, otimização e melhorias. Os objetivos foram os seguintes:

-Otimizar estratificação e concentração de calor nos módulos;

Pretendeu-se melhorar a estratificação entre o fluido de trabalho (água) e o GNC, concentrando a distribuição de calor por um número de TEG proporcional ao calor disponível. O *output* dos módulos é proporcional ao quadrado da diferença da temperatura, sendo preferível ter apenas metade dos módulos a funcionar em pleno que todos os módulos a funcionar a metade da diferença de temperatura. Por essa razão, pretende-se concentrar o calor disponível apenas nos módulos necessários para que funcionem em plena potência, evitando a distribuição do calor por todos os módulos e a consequente diluição térmica daí resultante. Assim, pretende-se otimizar a transferência de calor, de forma a aumentar a potência gerada e o rendimento de conversão do sistema.

-Testar o sistema com azoto;

Foram feitos testes com azoto, GNC originalmente pensado para o funcionamento do protótipo. Os testes serviram para aferir o funcionamento do sistema e identificar pontos a ser melhorados.

-Testar o sistema com Hélio como GNC;

A abordagem, aos problemas identificados, foi feita através da adaptação física do protótipo e utilização de gases não condensáveis, para além do azoto, de forma a garantir uma melhor estratificação entre o fluido de trabalho (água) e o GNC.

Utilizou-se o GNC hélio. Por ser um gás leve, em configuração de fluxo ascendente de vapor, esperava-se ser possível obter uma separação clara entre os dois fluidos, com o vapor a concentrar-se nos módulos mais abaixo e o hélio nos módulos mais acima.

-Testar o sistema com Árgon como GNC;

O protótipo foi também adaptado para permitir uma configuração de movimento descendente do vapor, com o objetivo de facilitar um fluxo circular de convecção natural: subida do vapor quente pelos tubos laterais e descida dos condensados pelos tubos principais do sistema. Para isso, utilizou-se o árgon que, por ser um gás mais denso, permite desta vez, que o vapor se concentre maioritariamente nos módulos superiores “empurrando” o árgon para os níveis inferiores dependendo da carga térmica e da consequente geração de vapor.

-Sugestão de Melhorias e trabalhos futuros;

Pretendeu-se também, realizar uma reflexão final onde se retiram conclusões e se sugerem melhorias e trabalhos futuros do protótipo em análise.

Em todos os testes com os diferentes GNC, foram testadas várias condições de funcionamento do motor e diferentes pressões de funcionamento inicial do protótipo, correspondentes a diferentes temperaturas de saturação do fluido de trabalho.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta Dissertação está dividida em 6 capítulos. No 1º capítulo, a introdução, faz-se um enquadramento no sentido de contextualizar o tema com as necessidades de inovação no assunto e procura-se explicar o potencial da tecnologia, bem como, definir os desafios e objetivos da Dissertação.

O capítulo que se segue, a revisão de literatura, pretende clarificar conceitos essenciais para perceber todo o funcionamento das variáveis envolvidas de forma a tomar decisões informadas durante o decorrer dos testes.

O 3º capítulo, o protótipo, é uma descrição detalhada do protótipo, do seu funcionamento, dos componentes mais relevantes e de algumas adaptações levadas a cabo para a realização dos testes. O próximo capítulo, a preparação para testes, foca-se nos restantes componentes do sistema, como o motor, medição de variáveis, softwares e sistema de aquisição utilizados.

O 5º capítulo, testes experimentais, pretende descrever o modo como decorreram os testes com os diferentes gases não condensáveis, azoto, hélio e argon, assim como dificuldades e problemas encontrados durante a realização dos mesmos. O 6º e último capítulo, é sobre as conclusões tiradas no decorrer do trabalho. Propõem-se também sugestões para futuros trabalhos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo pretende-se apresentar a evolução tecnologia de geradores termoelétricos, em particular TEG em sistemas de recuperação de calor dos gases de escape. Pretende-se também aprofundar alguns conceitos teóricos importantes na abordagem do problema.

2.1 Estado da Arte

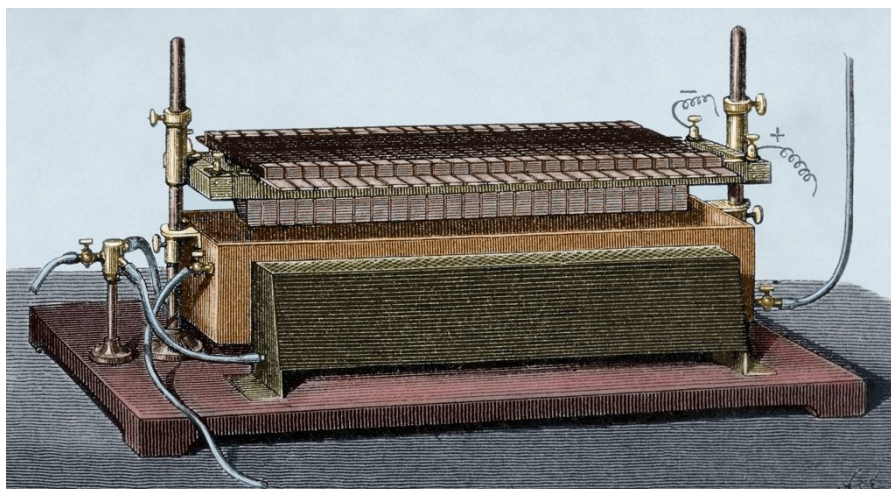
2.1.1 Geradores Termoelétricos

Os geradores termoelétricos têm sofrido, ao longo da história, adaptações nas suas aplicações e avanços tecnológicos significativos tornando-os mais eficazes e eficientes.

O primeiro marco digno de registo foi a descoberta do efeito de *Seebeck*. Descoberto entre 1821-1823 por Thomas Johann Seebeck, provou que era possível produzir energia elétrica a partir de uma diferença de temperatura entre dois metais. Este fenómeno termoelétrico está em linha com os posteriores estudos de Charles Peltier em 1834 (efeito de *Peltier*). Estes conceitos serão explicados com mais detalhe no capítulo de termoelectricidade.

Principalmente com o foco em aplicações de refrigeração [19] e aplicações militares [20], os geradores foram muito estudados nos anos que se seguiram, no entanto, sem grande sucesso. Uma das primeiras aplicações desta tecnologia foi na área industrial e surgiu por M. Edmond Becquerel em 1864 [21]. Este sistema continha de um lado uma camara de combustão e do outro um sistema de água que originavam uma diferença de temperatura gerando energia elétrica.

Figura 3 – Gerador termoelétrico construído por M. Edmond em 1864



[21]

Thermattaix, foi o nome dado ao primeiro TEG produzido em larga escala em 1925 e tinha a função de carregar baterias de chumbo-ácido de aparelhos rádio, principal meio de comunicação em massa daquela época.



Figura 4 – Gerador termoelétrico Thermattaix, Museu de Ciência de Londres [21]

A primeira ideia de um gerador termoelétrico aplicado à recuperação de calor dos gases de escape em veículos a ser publicado, foi construído em 1963 por A. Bayne Neild Jr. [20]. Este autor também desenvolveu um estudo aprofundado sobre o estado de arte à data, fundamentalmente da marinha americana durante a segunda guerra mundial, identificando problemas e apresentando sugestões para melhorias.

Só cerca de 25 anos mais tarde, Birkholz e a *Porsche* apresentaram resultados de uma implementação feita no escape de um dos modelos da marca. Este projeto foi publicado pela Universidade de Karlsruhe em 1988 onde se descreve um sistema de escape com TEG que usava materiais termoelétricos baseados em Fe (ferro) [22].

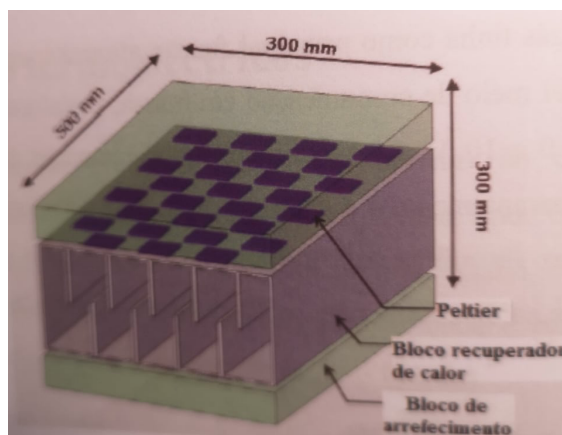


Figura 5 – TEG desenvolvido na Universidade de Karlsruhe [21]

O sistema estava colocado entre o lado quente (feito de liga de aço e carbono), e o lado frio (de alumínio), de um permutador de calor instalado num *Porsche 944*. Continha um total de 90 pares termoelétricos e conseguia produzir 58 W a partir de uma diferença de 490°C entre as faces dos conversores termoelétricos [21].

Por esta altura, algumas empresas abandonaram o investimento nesta tecnologia pela reduzida produção de eletricidade aliada ao baixo desempenho dos materiais termoelétricos [23]. No entanto a *Hi-Z Technology*, uma *spin-off* da empresa *General Atomics*, juntamente com um programa do departamento de energia dos Estados Unidos da América, em 1991 publicou um projeto de um gerador termoelétrico teoricamente capaz de gerar 200W. Numa segunda iteração em 1993, depois de várias adaptações e otimizações, implementou um sistema num camião *diesel* capaz de gerar 1068W de energia elétrica [24].

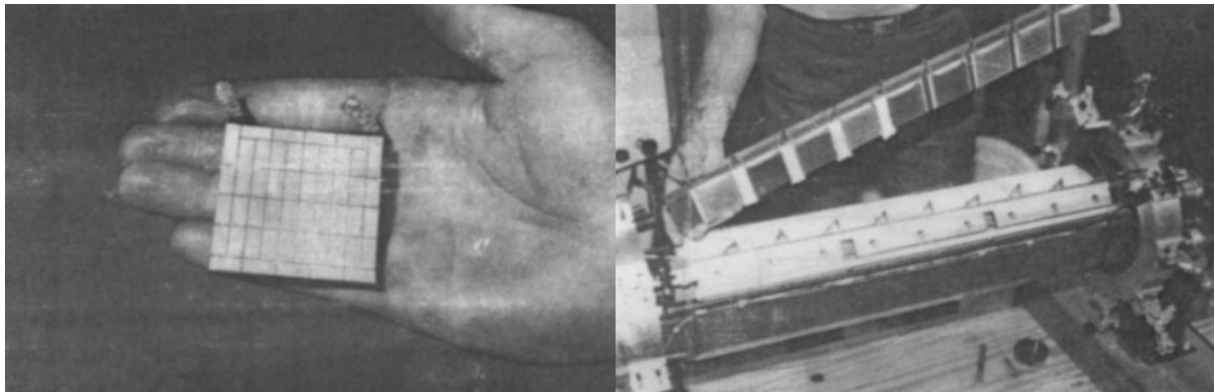


Figura 6 – À esquerda o módulo e à direita, a montagem do sistema dos módulos ao dissipador de calor

O sistema era constituído por 8 matrizes com 9 módulos por matriz de telureto de bismuto com a referência HZ-14 (14 W) [25]. Mais tarde, foi feita uma adaptação neste gerador termoelétrico de forma a integrar um *SUV* híbrido para gerar 180 W de energia elétrica e com capacidade de carregar baterias de 300 V.

Em 1998 a *Nissan Motors* recorreu a conversores termoelétricos feitos com SiGe (Silício germânio) e a um motor de 3000cc (centímetros cúbicos), para desenvolver um

gerador termoelétrico. Envolvendo a face quente do escape, foram instalados 72 conversores de 1,2 W e na face fria um sistema com água. Destaque para a existência de um *bypass* ao gerador e válvulas que permitiam modificar a relação ar-combustível e o fluxo de gases para os TEG.

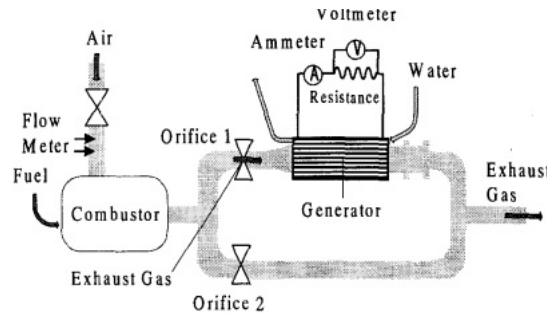


Figura 7 – Sistema de testes e funcionamento do gerador termoelétrico

No entanto, esta solução não teve sucesso, conseguindo apenas produzir 36,5 W, com uma diferença de temperatura de 290 °C e uma eficiência geral dos TEG de apenas 0,9% [26].

Em 1998 a *Hi-Z Technology* em colaboração com a *Clarkson University*, *General Motors* e *Delphi Corporation*, iniciaram um sistema de TEG para instalar numa *pick-up GM Sierra* a gasolina com 280 CV (cavalos). Este projeto que só terminou em 2004, ambicionava produzir 330 W, através dum sistema de gestão de energia e carregar baterias de 12 e 42 V. o TEG era composto por 2 matrizes com 8 módulos HZ-20 cada uma, bem isolados [27].

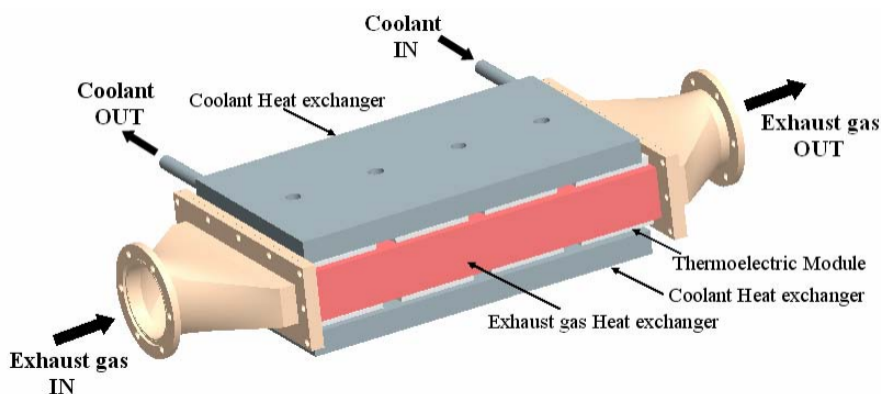


Figura 8 – Montagem do gerador termoelétrico [28]

No entanto, a potência produzida nunca ultrapassou os 140W com temperatura de arrefecimento de 80 °C e 255 W a 25 °C [28].

Na *DEER Conference*, em 2005 a *BSST, BMW, Visteon* e *Marlow Industries* publicaram os resultados de um estudo para a implementação de um gerador termoelétrico num BMW serie 5 com motor de 6 cilindros a gasolina com 3 litros e 190kW. Mais tarde, em 2006, foi anunciada a intenção de lançar o primeiro TEG comercial em 2011 nesses veículos. O sistema TEG contava com um circuito de arrefecimento do TEG e um sistema bypass, para controlar de forma mais eficiente o fluxo de gases e para evitar que sobreaquecesse. Prometia reduções de consumo na ordem dos 10%.

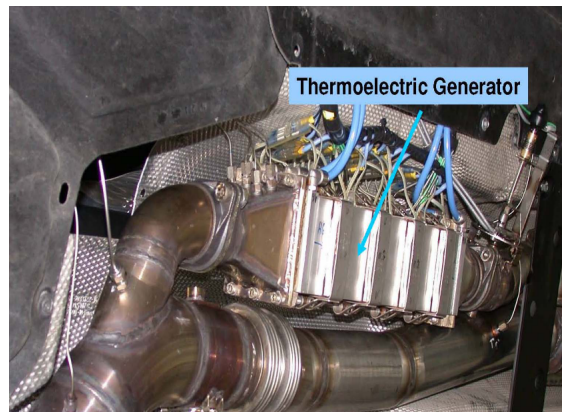


Figura 9 – Sistema bypass e gerador termoelétrico [29]

O gerador termoelétrico foi capaz de gerar 500 W em condução de cidade e 1 kW em autoestrada [30][29], mas não há registo de ter conseguido chegar aos consumos de combustível pretendidos [31].

A *IAV GmpH* e a *Volkswagen*, em 2008, iniciaram uma parceria construindo TEG constituídos por 24 módulos HZ-20 de 19 W com uma eficiência de 4,5% para implementar no seu modelo *Golf*. O sistema prometia produzir 600 W e suprimir cerca de 30% das necessidades elétricas do carro, mas foram feitos testes em circuito NEDC (*New European Driving Cycle*) que confirmaram potencias elétricas geradas ligeiramente inferiores a 250 W [10][23].

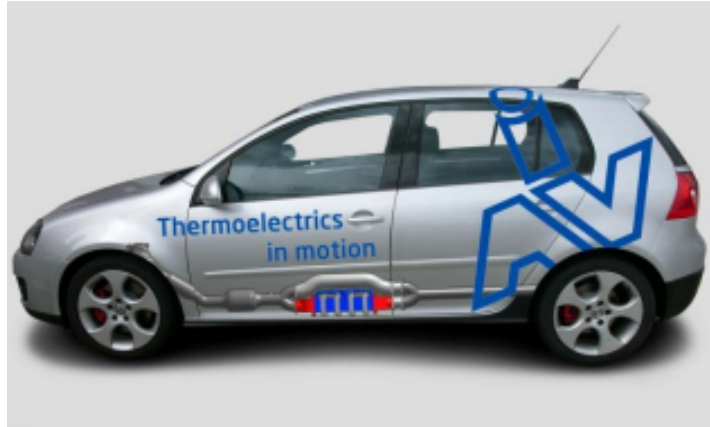
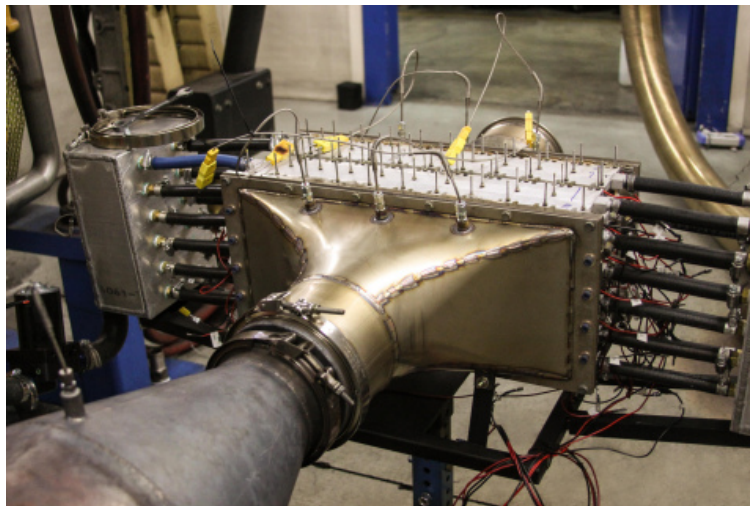


Figura 10 – Projeto *Thermoelectrics in motion*
[32]

A empresa IAV, através de previsões teóricas, estima que com a evolução dos materiais, nomeadamente a implementação de conversores termoelétricos com telureto de chumbo em detrimento dos usados com telureto de bismuto, permitirão triplicar a potência elétrica [33].

Mais recentemente a empresa *GMZ Energy*, com um motor V8 diesel com 15L do exército dos Estados Unidos da América conseguiu retirar uma potência do seu gerador termoelétrico de 1000 W.

Figura 11 – *TARDEC TEG de 1000W*



[34]

O Gerador termoelétrico foi batizado de *TARDEC TEG* e é composto por 5 módulos capazes de gerar 200 W cada um e aguentar temperaturas até 600°C [34].

Outros fabricantes e Universidades, como por exemplo a *Honda*, têm vindo a estudar, de forma intensiva, a implementação de geradores termoelétricos nos seus veículos [35][18]. Também tem havido avanços interessantes, graças a organizações como a *MIT's Lincoln Laboratory*, *the Research Triangle Institute* e *Hi-z Technology Inc*, usando materiais com estruturas nanométricas com figuras de mérito (ZT) claramente superiores a 1 que demonstram o potencial de crescimento desta tecnologia [36].

Uma área de enorme sucesso relativamente à utilização dos TEG são as aplicações espaciais com os RTG (Radiolotope Thermoelectric Generator) [37]. Estes produzem eletricidade para missões onde a energia solar não é suficiente ou a sua utilização não é exequível do ponto de vista prático. Um exemplo da sua utilização é a sonda *Voyager* que está há 40 anos no espaço e fora do sistema solar e que é alimentada por um TEG. Também nos *Rovers* marcianos se utilizam com frequência RTG [38].

Há vantagens inegáveis deste tipo de sistema de aproveitamento da entalpia dos gases de escape para criação de energia elétrica, tais como: diminuição da carga no alternador, a inexistência de peças moveis, a baixa necessidade de manutenção, o contributo para diminuir emissões e a melhoria do consumo dos veículos. Contudo, existem ainda algumas limitações a destacar: o desenvolvimento de materiais com estabilidade térmica e o custo da sua produção e desenvolvimento de forma competitiva. Por outro lado, o limite de temperaturas de trabalho dos TEG, em comparação com a temperatura dos gases de escape, é um fator crítico, pois, para serem eficientes, os TEG têm que funcionar perto da temperatura máxima, sem nunca a ultrapassar. Os sistemas de *bypass* são pouco eficientes, porque apenas aproveitam parte da energia libertada pelo sistema de escape dos veículos. Este problema tem vindo a ser também estudado nos últimos anos [35][18] e pode ser contornado, com já foi visto anteriormente, através de a introdução de um fluido de mudança de fase com temperatura de saturação controlada, através, por exemplo, de termossifões de condutância variável como no protótipo em teste nesta Dissertação.

2.1.2 Tipos de dispositivos Termoelétricos

Como se constatou no capítulo anterior, os dispositivos termoelétricos foram muito utilizados em aplicações de refrigeração, aplicações militares e, mais recentemente, na indústria automóvel como recuperadores de calor de gases de escape para geração de energia elétrica. Apesar de possuírem um baixo rendimento (cerca de 5% [39]), as suas reduzidas dimensões, enorme variedade e adaptabilidade a geometrias, gradual diminuição de custo e o facto de não possuírem partes móveis e, por isso, não necessitarem de manutenção, conferem-lhes um potencial merecedor de interesse por parte da indústria e comunidade científica.

Durante os anos foram diminuindo de tamanho, sendo que a partir dos anos 80 surgiram os chamados “Macro dispositivos Termoelétricos” (representado na figura 40), mais recentemente denominados de módulos termoelétricos, com dimensões que variavam entre 2 a 55 mm de comprimento e/ou largura e de 1 a 6,5 mm de espessura. Permitem gerar diferenças de potencial entre os seus terminais de 1 a 4,6 e quando associados em maior número, conseguem alimentar circuitos elétricos de grandes dimensões [40].

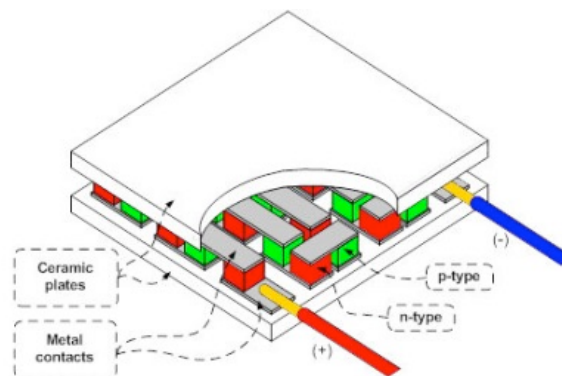


Figura 12 – Esquema de macro dispositivo [40]

Na tentativa de diminuir as dimensões dos dispositivos, D.M. Rowe patenteou os primeiros Microdispositivos em 1988 [41]. Estes dispositivos foram comercializados, pela primeira vez, pela empresa *Micropelt*, usando o efeito *Peltier*, e conseguindo obter mais de 100 junções termoelétricas por mm². Evoluções no fabrico (filme fino), permitiram desenvolver microdispositivos flexíveis. Os microdispositivos são muito úteis para alimentar dispositivos autónomos da *Internet of Things*.

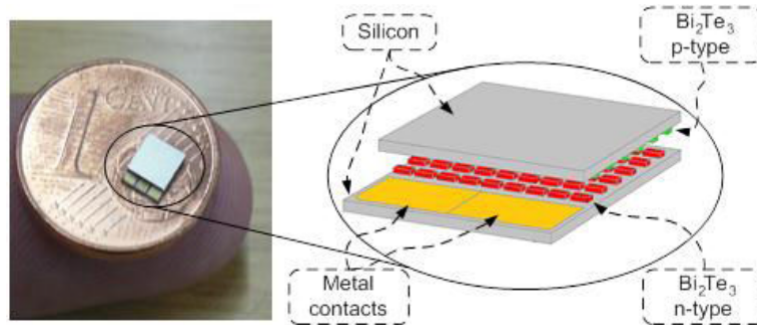


Figura 13 – Perspetiva de dimensão e estrutura de microdispositivos *Micropelt* [40]

Atualmente, as empresas e investigação estão voltadas para a utilização de dispositivos à escala nanométrica. Os nano dispositivos com nano fios de telureto de bismuto, por exemplo, com 50nm de diâmetro, permitem em testes teóricos já comprovados figuras de mérito (ZT) superiores à unidade o que permite muito melhores resultados [42]. A evolução e acessibilidade dos materiais permitirá tornar esta tecnologia ainda mais apetecível, quer na área da refrigeração, quer na área dos TEG para recuperação de calor e geração de eletricidade [10][42].

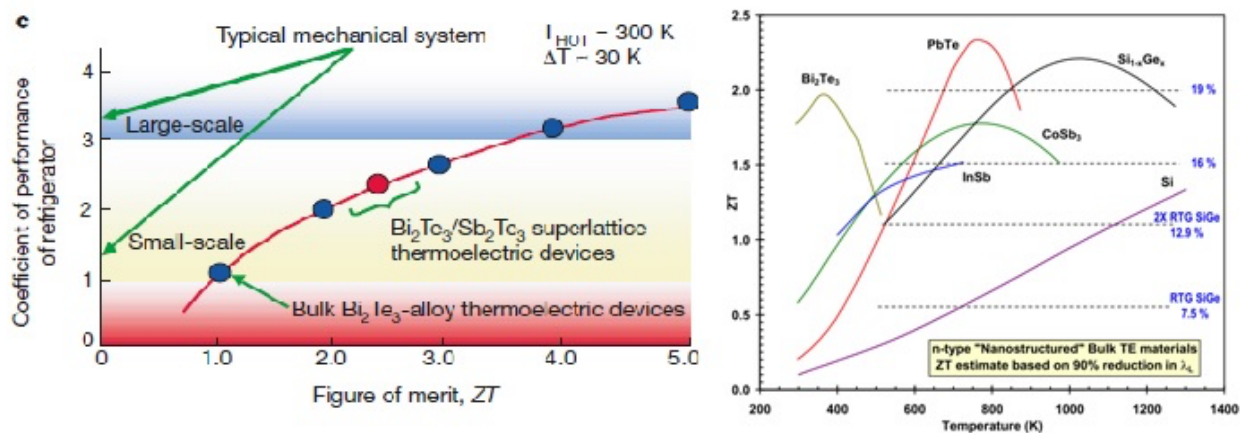


Figura 14 – Potencial da tecnologia com figuras de mérito superiores à unidade [10][42]

2.1.3 Termossifões de Condutância Variável

Como já foi referido anteriormente, existe a necessidade de haver o controlo de temperatura que vem dos gases de escape (pode superar os 800 °C) [35], demasiado quente para os limites operacionais dos TEG que existem hoje em dia. Para isso pode-se adicionar ao sistema um fluido de mudança de fase com temperatura de saturação controlada pela pressão. Isto requer a existência de um GNC juntamente com o fluido de mudança de fase, de modo a ser possível regular a pressão e indiretamente, a temperatura de saturação.

A ideia dos HP (*heat pipes*) e dos termossifões, surgiu em 1942 por Gaugler, mas só se popularizou mais tarde com a invenção de Grover em 1960 [43]. Os termossifões e os HPs são dispositivos que consistem em câmaras fechadas (de forma tubular ou prismática) contendo um fluido de mudança de fase. O seu funcionamento é muito simples. O TS/HP tem uma zona chamada evaporador, ligada à fonte quente, onde o fluido é vaporizado. Dispõem também de uma zona chamada de condensador, onde o vapor é condensado, libertando o calor para a fonte fria. Dado que o evaporador e o condensador podem estar distantes um do outro, a condutividade térmica equivalente deste dispositivo é muito elevada, pois um dispositivo sólido, com a mesma distância entre evaporador e condensador, teria muito maior resistência térmica de condução, mesmo sendo feito com materiais de elevada condutividade. A diferença entre TS e HP é que o retorno dos condensados ao evaporador é feito exclusivamente por gravidade no caso dos TS enquanto no HP este retorno é auxiliado por capilaridade através de um meio poroso, geralmente uma camada de espuma metálica nas paredes do HP (“*wick*”). A designação dos TS tubulares como HPs é apontada como incorreta por alguns autores, mas usada por outros como sinónimo, uma vez que a maioria dos HPs recorra à gravidade como principal método de retorno de condensados. Em resumo, são sistemas com alta condutividade térmica equivalente e têm características muito particulares que lhes permitem, na área de transferência de calor, responder a um vasto leque de aplicações.

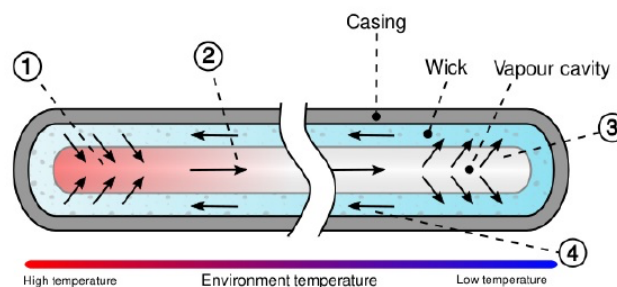


Figura 15 – *Heat Pipe* com retorno por capilaridade [44]

Os termossifões de condutância variável (VCTS) têm um princípio de funcionamento baseado nos sistemas anteriores. Existe também um fluido de trabalho num evaporador que, quando aquece, evapora. A pressão no interior deste sistema aumenta, o vapor dirige-se para uma zona do condensador que fica na superfície quente dos TEG. Existe normalmente, na parte exterior do sistema, um sistema de arrefecimento da parte fria dos TEG. É esta diferença de temperaturas entre a parte fria e a parte quente dos TEG que permite gerar energia elétrica. O fluido de trabalho, na zona do condensador, ao perder calor, condensa e volta para o evaporador por gravidade. Nos VCTS para além do fluido de trabalho é adicionado também um GNC.

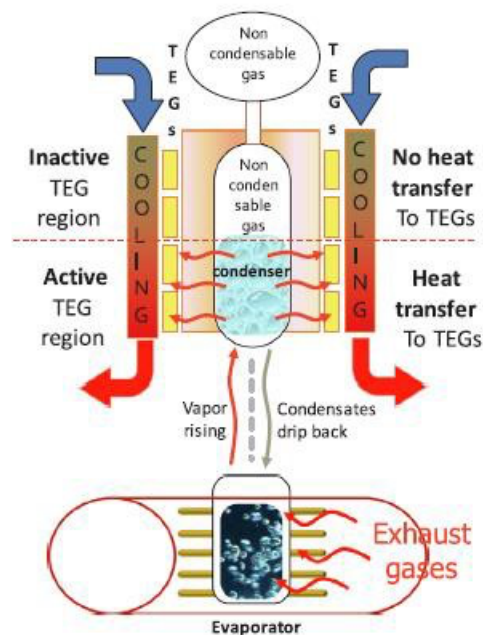


Figura 16 – Esquema de TS de condutância de variável com controlo de temperatura [18]

A grande diferença dos VCTS em relação aos HP e TS é a sua capacidade de ter condutância variável, que dá nome a estes termossifões. A condutância variável é a capacidade de variar a área de transferência de calor no condensador, dependendo da carga térmica recebida pelo evaporador. Para isso, é necessário adicionar um GNC no interior do sistema, para além do fluido de trabalho de mudança de fase. À medida que vai havendo mais vapor do fluido de trabalho, este vai ocupando um volume cada vez maior do VCTS, ocupando o lugar previamente ocupado pelo GNC, empurrando-o para fora da zona ativa [16][18]. Se o sistema estiver frio, haverá pouco vapor no sistema e o GNC ocupará a maior parte do contacto com os TEG. À medida que a carga térmica no evaporador e consequentemente a temperatura do sistema aumente, haverá mais produção de vapor que fará aumentar a pressão interna do sistema e fará com que o GNC se dirija para um tanque de expansão, ficando apenas o vapor quente em contacto com os TEG.

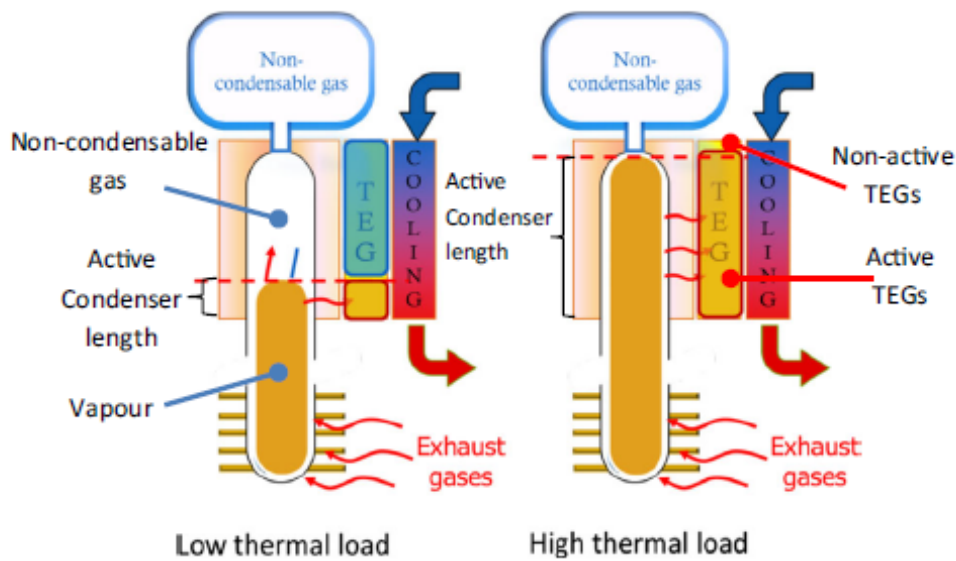


Figura 17 – Comportamento de VCTS com variação de carga térmica [35]

Assim, consegue-se de forma inovadora otimizar ao máximo o sistema, pois controla-se a pressão inicial e conseqüentemente a temperatura/pressão de saturação ideal para que os TEG funcionem sempre de forma eficiente.

Outra característica que já foi referida anteriormente dos VCTS é a capacidade de controlar a temperatura que chega à face quente dos TEG independentemente da carga térmica que chega ao evaporador. O calor que chega à superfície do TEG, nunca ultrapassa a temperatura de Vaporização do fluido de trabalho que, por sua vez, depende da pressão interna do sistema que pode ser controlada. Assim, a pressão vai depender do volume do sistema, das massas e densidades dos fluidos do sistema. Quanto mais baixo o volume do sistema, mais a pressão vai variar no interior do sistema [15][16]. Este protótipo descrito foi desenvolvido por uma equipa de investigadores da UMinho em colaboração com a *Exhaust2Energy* e será objeto desta Dissertação.

2.2 Termodinâmica e Transferência de calor

A Termodinâmica é a ciência que relaciona o estudo das transformações energéticas com as propriedades físicas das substâncias em jogo [45]. É uma área de estudo de enorme importância na área da Engenharia, envolvendo temas como refrigeração e ar condicionado, expansão e compressão de fluidos em motores, entre outras.

Neste capítulo, abordaremos também, resumidamente, alguns conceitos de transferência de calor mais relevantes para o objeto em estudo da Dissertação.

2.2.1 Calor e temperatura

A energia também pode ser transferida entre um sistema e o seu meio, sob a forma de trabalho, através de uma força exercida sobre o sistema. Calor e trabalho, ao contrário de temperatura, pressão e volume não representam propriedades intrínsecas de um sistema e só têm significado se transferirem energia para dentro ou para fora de um sistema. Por exemplo, se determinado meio transferir durante 3 minutos 15 Joule para um sistema é errado dizer que o sistema contém 15 Joule de calor.

Para perceber a forma como a temperatura se relaciona com o calor existe a capacidade calorífica (C) que é uma constante de proporcionalidade entre o calor (Q) absorvido e a variação de temperatura (ΔT) sofrida de determinado objeto, sem alteração de estado físico [46].

$$Q = C \cdot \Delta T = C \cdot (T_f - T_i)$$

Equação 1

Outro conceito importante é o conceito de calor específico (c_p), que tem em conta a influência da massa na capacidade calorífica, ou seja, é a capacidade calorífica por unidade de massa.

$$c_p = \frac{C}{m} \Rightarrow Q = c_p \cdot m \cdot \Delta T = c_p \cdot m \cdot (T_f - T_i)$$

Equação 2

Como é sabido, durante uma mudança de fase a temperatura de determinada substância não varia. Assim, o conceito de calor latente (CL) é a grandeza física que determina a quantidade de calor que determinada massa (m) deve receber para que mude de fase.

$$Q = CL \cdot m$$

Equação 3

Na vaporização de um líquido, para que as moléculas sejam libertadas da sua estrutura em forma de agregados (*clusters*), é necessário fornecer energia (calor latente de vaporização L_v). Já na condensação, é necessário retirar energia ao vapor, para que as moléculas se possam agregar novamente (calor latente de fusão L_f) [46].

2.2.2 Transferência de calor e Convecção

A transferência de calor é a movimentação de energia entre duas regiões originada por uma diferença de temperatura. Os mecanismos de transferência de calor são a convecção, condução e radiação. O principal mecanismo de transferência de calor no protótipo em análise nesta Dissertação é a convecção, apesar de existirem fenômenos de condução, alguns deles indesejados. Por este motivo, de seguida, abordaremos em jeito de apresentação o tema de forma muito resumida.

A lei básica para convecção define que o calor transferido por convecção, na unidade de tempo, entre uma superfície e um fluido, pode ser calculado através da relação proposta por Isaac Newton. Esta equação tem algumas limitações, pelo que, combinada com a equação do fluxo de calor por condução na camada limite térmica se obtém:

$$\dot{Q} = \frac{k_t A}{\delta_t} (T_s - T_\infty) = h A (T_s - T_\infty) \rightarrow h = \frac{k_t}{\delta_t}$$

Equação 4

O coeficiente de transferência de calor por convecção (h) pode ser calculado e é função da viscosidade dinâmica, massa volúmica, calor específico, condutividade térmica, da velocidade, da configuração do escoamento na vizinhança da geometria em análise, entre outros.

A convecção térmica é um fenómeno que ocorre em fluidos e sólidos, e onde se dá transferência de energia com deslocamento de partículas e movimento de massa. Existe a convecção forçada, ou advecção e a convecção natural ou convecção livre. Na primeira, o movimento de partículas é induzido por um agente externo, por exemplo, um ventilador.

A convecção natural, dá-se quando existe quando há um gradiente de temperatura que causa um gradiente de densidade suficiente para gerar o movimento do fluido. As partículas mais quentes, com menor densidade, sobem trocando calor com as restantes. Um exemplo paradigmático de convecção natural é o aquecimento de água numa panela. A equação empírica que descreve o fenómeno é número de Nusselt (Nu), que depende do número de Prandtl (Pr) e Grashof (Gr).

Em analogia à eletricidade, é usado o conceito de resistência térmica (R) que tem que ver com a resistência que determinado material tem em transferir calor e tem origem na equação de Newton.

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} = h A \Delta T \Rightarrow R = \frac{1}{h A}$$

Equação 5

O tema transferência de calor, e em particular convecção, é um assunto complexo, pelo que em caso de necessidade, serão abordados com mais detalhe no decorrer da Dissertação [47][46].

2.2.3 Inércia térmica

Este conceito diz respeito à capacidade dos materiais manterem a energia térmica armazenada ao longo do tempo.

É um conceito associado ao calor específico e à massa, que confere a um material a capacidade de reter energia térmica ao longo de mais tempo, pelo que retarda o aparecimento do estado de equilíbrio.

2.2.4 Condutividade Térmica

Existem fenómenos importantes relativos ao tema condutividade térmica que merecem ser revistos no âmbito do estudo de dispositivos termoelétricos, nomeadamente TEG. Esta propriedade física, quantifica a facilidade com que um material permite a transmissão de calor na presença de uma diferença de temperaturas (ΔT) entre as junções do dispositivo. Esta diferença provoca uma taxa de transferência de calor (\dot{Q}) que percorre os materiais termoelétricos, que é proporcional à diferença de temperatura entre a face quente (T_H) e a face fria (T_C). A condutância térmica (K) corresponde à soma das condutâncias de cada elemento termoelétrico e também é um fator influenciador da taxa de transferência de calor gerada.

$$\dot{Q} = K \cdot (T_H - T_C)$$

Equação 6

A condutância térmica (K) de determinado material depende das dimensões do material, nomeadamente a área (A), perpendicular ao fluxo de calor e da espessura (L). Depende ainda de uma propriedade inerente a cada material, a condutividade térmica (λ).

$$K = \lambda \cdot \frac{A}{L}$$

Equação 7

Podemos então concluir que a taxa de transferência de calor se pode escrever desta forma:

$$\dot{Q} = \lambda \cdot \frac{A}{L} \cdot (T_H - T_C)$$

Equação 8

Existe ainda um método de calcular a taxa de transferência de calor utilizando um parâmetro denominado de coeficiente global de transferência de calor (U), que em caso de se tratar de condução térmica, fica:

$$U = \frac{\lambda}{L}$$

Equação 9

Sendo que a taxa de transferência de calor se escreve assim:

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot (T_H - T_C)$$

Equação 10

Em casos reais, muitas vezes existem várias camadas de materiais sobrepostas por onde o calor se movimenta, sendo possível calcular o U contemplando os vários materiais, espessuras e condutividades térmicas. Existem também, mais formas de transferência de calor nomeadamente a convecção, pelo que também se pode incorporar a este coeficiente a influencia outros mecanismos de transferência de calor.

Depois de conhecidos os materiais utilizados, as suas dimensões e a diferença de temperaturas entre as faces, é então possível calcular a taxa de transferência de calor, ou o inverso.

Os materiais que têm maior condutividade térmica são os que geralmente também apresentam maior condutividade elétrica, tipicamente metais. Por oposição, os materiais com menor condutividade térmica são os isolantes, como fibra de vidro ou o ar.

2.3 Termoeletricidade

Neste capítulo, descrevem-se conceitos teóricos acerca de termoeletricidade, importantes para entender os princípios de geração de eletricidade.

A conversão de energia térmica em energia elétrica originada por uma diferença de temperatura, ou o inverso, é a base de estudo da termoeletricidade. É uma área com inúmeras aplicações nomeadamente na indústria automóvel e, por isso, amplamente estudada e desenvolvida ao longo dos anos. Thomas Seebeck (1770-1831), Jean Peltier (1785-1845) e William Thomson, conhecido por Lord Kelvin (1824-1907), foram os que mais se destacaram no contributo nesta área, descobrindo conceitos e efeitos que prevalecem nos fundamentos da teoria da termoeletricidade ainda hoje.

2.3.1 Efeito Seebeck

“Quando um metal, ou semicondutor, é aquecido numa das extremidades e arrefecido na outra, os eletrões da região aquecida tornam-se mais energéticos e deslocam-se para a região fria, onde encontram níveis de energia mais reduzidos. A zona quente fica com iões positivos e a zona fria com excesso de eletrões” [48], este é o fenómeno denominado por efeito *Seebeck*. Assim, Thomas Seebeck, através de um estudo experimental, onde descreve que junções de materiais diferentes sujeitos a uma diferença de temperatura (ΔT) geram uma diferença de potencial elétrico ΔV nas suas extremidades. Este fenómeno é quantificado pelo coeficiente de *Seebeck*, α , expresso em volts por grau.

$$\alpha = \Delta V / \Delta T$$

Equação 11

Este coeficiente representa o grau de alteração da tensão ΔV em Volt, em função da variação de temperatura entre as extremidades de determinado material. Este coeficiente é negativo quando os eletrões se propagam da região quente para a região fria e positivo quando as lacunas (*electron holes*), que podem ser consideradas para efeitos práticos partículas de carga positiva, o fazem [48]. Estes dois tipos de materiais são considerados materiais tipo n e tipo p. Geralmente são usados pares destes materiais, como no caso dos termopares e dos módulos termoelétricos, estes últimos incorporando múltiplos pares destes, como referido adiante [49].

O efeito *Seebeck* é amplamente usado em aplicações domésticas e industriais através de sensores de medição de temperatura e também de geradores de energia elétrica [19].

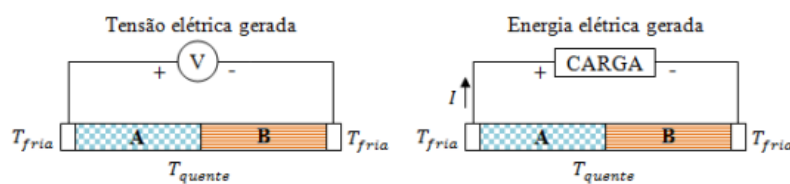


Figura 18 – Efeito Seebeck em sensores de temperatura e geradores elétricos [19]

Os termopares são também um exemplo comum da aplicação deste efeito em sensores de temperatura, em que a tensão gerada é proporcional à diferença entre os coeficientes de *Seebeck* dos dois materiais e da diferença de temperatura nas extremidades. Devido às reduzidas tensões geradas, são pouco precisos, pelo que apresentam erros de medição quase sempre superiores a 1 °C.

Outro exemplo de aplicação é a dos geradores termoelétricos, por exemplo em conversores termoelétricos.

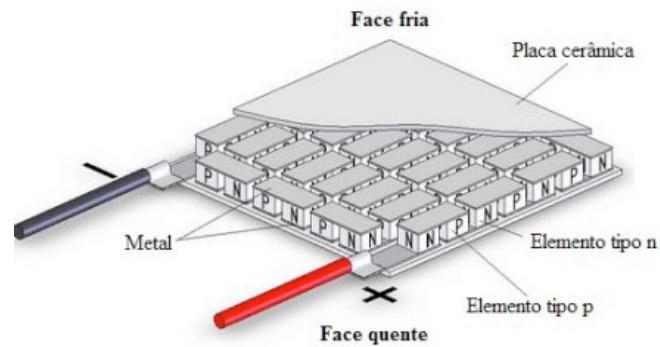


Figura 19 – Conversor termoelétrico

É composto por diferentes materiais (p e n) com coeficiente de *Seebeck* positivo e negativo, ligados eletricamente em série por junções metálicas e termicamente em paralelo. A tensão gerada na saída do conversor é proporcional ao número de pares de junções, multiplicado pela diferença do coeficiente de *Seebeck*, entre os elementos termoelétricos (p e n) e da diferença de temperatura entre as faces.

2.3.2 Efeito de Peltier

Doze anos mais tarde da descoberta do efeito de *Seebeck*, em 1834, Jean Peltier descobriu que, aplicando uma corrente elétrica, a diferença de potencial entre as junções de dois materiais, provocava uma diferença de temperatura entre as junções, devido à criação de um fluxo térmico, sendo que uma aquecia e a outra arrefecia. Isto deve-se à absorção ou libertação de energia térmica nas junções, graças ao fluxo de carga elétrica (qe), que será tanto maior quanto maior for a intensidade da corrente (I). Este efeito é quantificado pelo coeficiente de *Peltier* (π) e está relacionado com o coeficiente de *Seebeck* e a temperatura da junção (T).

$$\pi = \alpha \cdot T \quad qe = \pi \cdot I$$

Equação 12

Como já foi falado, a intensidade da corrente faz variar a quantidade de energia térmica absorvida/libertada. O sentido da corrente elétrica, por seu turno, determina se a junção liberta ou absorve calor [50]. Este efeito é bastante usado em aplicações de refrigeração.

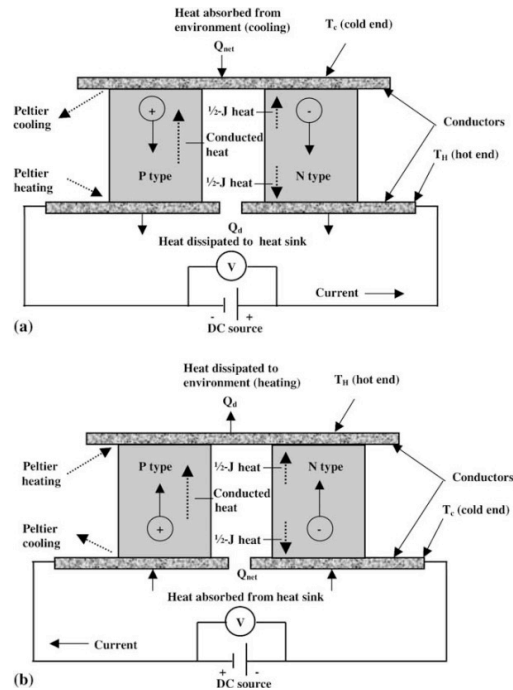


Figura 20 – Consequências da alteração do sentido da corrente [50]

2.3.3 Efeito *Thomson*

Em 1851, William Thomson descobriu o denominado efeito *Thomson*, uma abordagem teórica que relaciona o coeficiente de *Peltier* com o coeficiente de *Seebeck*. Se uma corrente de intensidade I circula por um condutor, o calor produzido por unidade de volume (q) pode ser encontrado através da seguinte equação [51]:

$$q = \rho \cdot I^2 - \mu \cdot I \cdot \frac{dT}{dx}$$

Equação 13

Em que μ é o coeficiente de *Thomson* e muda de sinal quando a corrente J muda de direção e $\frac{dT}{dx}$ é o gradiente de temperatura ao longo do condutor. O primeiro termo $\rho \cdot J^2$, em que ρ representa a resistividade do condutor, é o aquecimento pela lei de Joule que é irreversível.

Este efeito, de forma resumida, descreve a capacidade estendida de um condutor elétrico aquecer ou arrefecer quando submetido a uma corrente elétrica e um gradiente de temperatura [51].

2.3.4 Potência Elétrica

O circuito elétrico de um dispositivo termoelétrico a funcionar como um gerador pode ser representado pela figura 21. R_i representa a resistência interna, R_L a resistência de carga, V_0 , a tensão gerada pelo módulo em circuito aberto.

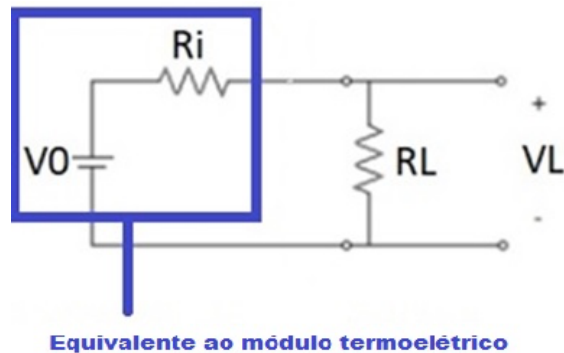


Figura 21 -Exemplo demonstrativo de circuito elétrico

A potência elétrica máxima destes equipamentos acontece quando a resistência interna é igual à resistência de carga como se irá demonstrar de seguida:

Segundo a Lei de Ohm, $V_L = R_L \cdot I$

e sabendo que $P_{elétrica} = V_L \cdot I$

substituindo obtemos a $P_{elétrica} = R_L \cdot I^2$

e sabemos que: $V_0 = R_i \cdot I + R_L \cdot I$, logo $V_0 = (R_i + R_L) \cdot I$,

em ordem a I fica: $I = \left(\frac{V_0}{R_L + R_i} \right)$

o que resulta em : $P_{elétrica} = \left(\frac{V_0}{R_L + R_I} \right)^2 \cdot R_L$

Equação 14

Sabemos ainda que a Potência elétrica máxima é dada pela Potência elétrica derivada e igualada a zero:

$$\frac{dP(R_L)}{dR_L} = V_0^2 \cdot \left[\frac{(R_I + R_L)^2 - 2 \cdot R_L \cdot (R_I + R_L)}{(R_I + R_L)^4} \right] = 0$$

Logo, $(R_I + R_L) - 2R_L = 0$, o que resulta em $R_L = R_I$

Assim provou-se que a potência elétrica máxima se obtém quando a resistência interna é igual à resistência de carga. Por este motivo, conclui-se que existe uma relação entre a tensão e a corrente ideal para que a potência elétrica seja máxima, ou seja, em que $R_L = R_I$.

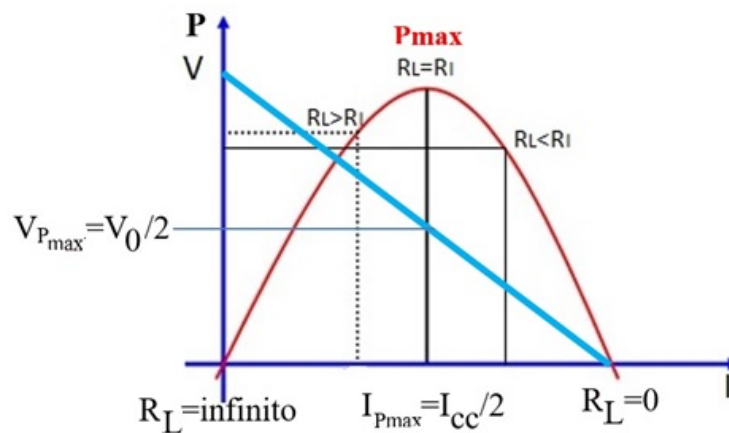


Figura 22 - Curva de tensão e Potência em função da corrente, que resulta da aplicação de diversas resistências de carga, com a visualização do ponto de potência máxima

Sabendo então que a potência máxima se obtém quando a resistência interna e a resistência de carga se igualam, podemos simplificar. Assim temos:

se $P = \left(\frac{V_0}{R_L + R_I} \right)^2 \times R_L$ e $R_L = R_I$ quando a Potência elétrica é máxima,

Então, $P_{elétrica\ Máxima} = \frac{V_0^2}{4 \cdot R_I}$

Seria então importante definir a equação de Potência elétrica máxima, partindo da fórmula anteriormente demonstrada e considerando o efeito *Seebeck* para o número de junções termoeletricas (n) e entrando com as variáveis com diferença de temperatura, coeficiente de *Seebeck* positivo (p) e negativo (n):

$$P_{elétrica\ Máxima} = \frac{V_0^2}{4 \cdot R_I} = \frac{(n \cdot (\alpha_p - \alpha_n) \cdot \Delta T)^2}{4 \cdot n \cdot R_I}$$

Relativamente ao termo n, número de junções termoeletricas, ele surge devido à substituição da tensão de saída V_0 pela expressão do efeito *Seebeck* anteriormente mostrado, isto é, o efeito de um par termoeletrico é multiplicado pelo número total de pares que constituem o dispositivo termoeletrico.

No caso de não termos uma resistência de carga exatamente igual à resistência interna, podemos estimar qual seria a potência máxima que obteríamos caso estes valores fossem efetivamente iguais. A partir de: $P_{elétrica\ Máxima} = \frac{V_0^2}{4 \cdot R_I}$ e sabendo que $V_0 = R_i \cdot I + R_L \cdot I$

Podemos chegar a:

$$P_{elétrica\ Máxima} = \frac{(R_i + R_L)^2 \cdot I^2}{4 \cdot R_i} \text{ com } I = \frac{V_L}{R_L} \text{ ficamos com :}$$

$$P_{elétrica\ Máxima} = (R_i + R_L)^2 \cdot \frac{V_L^2}{4 \cdot R_i \cdot R_L^2}$$

Sabendo que:

$$P_{elétrica} = \frac{V_L^2}{R_L}, \text{ chegamos finalmente à expressão da potência elétrica máxima escrita em}$$

função da potência elétrica medida na resistência P_L :

$$P_{elétrica\ Máxima} = \frac{(R_i + R_L)^2}{4 \cdot R_i \cdot R_L} \cdot P_L$$

Equação 15

2.3.5 Eficiência Termoelétrica

A eficiência termoelétrica é outro parâmetro merecedor de análise nesta área. A potência térmica que se transfere entre as faces do dispositivo em função da diferença de temperatura em função da condutância térmica dos módulos (K) é dada por:

$$Q = n \cdot K \cdot (T_H - T_C)$$

Equação 16

A eficiência termoelétrica (η) de um dispositivo termoelétrico é a relação que existe entre a potência elétrica ($P_{elétrica}$) com a potência térmica de entrada (Q) e é dada por:

$$\eta = \frac{P_{elemax}}{Q_i}$$

Equação 17

Juntando as duas equações anteriores com a equação demonstrada de potência elétrica máxima no capítulo 2.2.5. obtemos:

$$\eta = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2 \cdot \Delta T}{4 \cdot K \cdot R_I}$$

Equação 18

Pode então concluir-se que a eficiência termoelétrica de um dispositivo aumenta com o aumento da diferença de temperatura nas suas faces e com a diminuição da resistência interna do dispositivo. Condutibilidades e condutâncias térmicas elevadas contribuem negativamente para a eficiência termoelétrica dos equipamentos.

2.3.6 Módulos Termoelétricos e Figura de Mérito

Os módulos termoelétricos (TE) são dispositivos, que geram energia elétrica a partir de diferença de temperatura e usam os efeitos e conceitos anteriormente referidos.

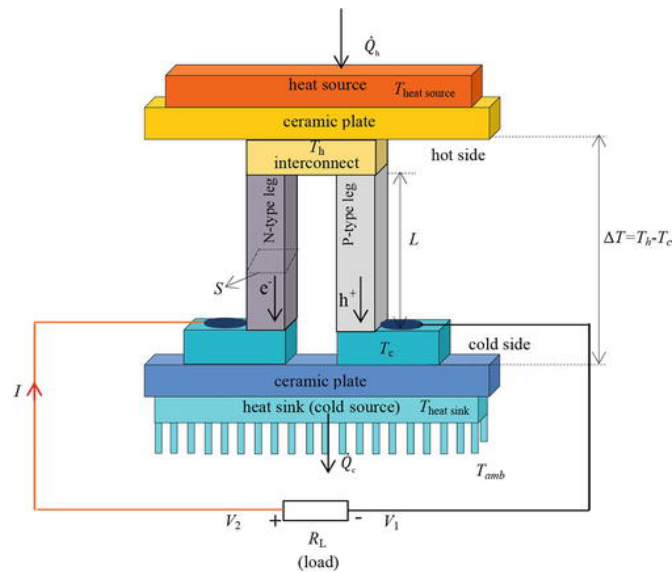


Figura 23 – Esquema detalhado de módulo configurado para geração de energia elétrica [52]

São compostos por pares conectados eletricamente em série e termicamente em paralelo. Cada um destes pares tem dois materiais semicondutores, do tipo-p com α positivo e tipo-n com o α negativo, já referidos no decorrer da Dissertação. A diferença de temperatura vai causar uma movimentação/difusão das partículas portadoras de carga (*charge carriers*) positiva (lacunas) e negativa (elétrões), gerando uma tensão. Na prática, o movimento de cargas positivas para o lado frio é o mesmo que o movimento de cargas negativas para o lado quente, e vice-versa. Deste modo, é criado um fluxo de carga que se desloca num único sentido no que toca ao circuito elétrico. Cada par termoelétrico n-p multiplica a tensão gerada.

No capítulo de eficiência termoelétrica verificou-se que a eficiência termoelétrica é o quociente entre a potência elétrica máxima absorvida e o calor absorvido na junção. Estabeleceu-se também relação com variáveis relevantes, mas para avaliar a conversão da eficiência de energia térmica para energia elétrica em materiais termoelétricos, é importante referir uma propriedade adimensional denominada de figura de mérito (ZT):

$$ZT = \frac{\alpha^2 \cdot k \cdot T}{\lambda_m}$$

Equação 19

Em que α é a difusividade térmica, k a condutibilidade elétrica, λ_m é a condutividade térmica do material e T é a temperatura. Quanto mais alto o valor de ZT mais elevada será a geração de eletricidade de determinado dispositivo termoelétrico. Complementando a fórmula da eficiência termoelétrica apresentada no capítulo 2.2.5. apresentamos a equação que define a eficiência termoelétrica máxima, tendo em conta o conceito introduzido de figura de mérito (ZT) e em função da temperatura da face fria (T_c) e da face quente (T_h) [53]:

$$\eta_{Max} = \frac{\left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right)}{2 - \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) + \frac{4 \cdot \frac{T_c}{T_h}}{ZT \cdot T_c}}$$

Equação 20

Relativamente aos materiais utilizados nos dispositivos termoelétricos, o valor do ZT é um parâmetro de elevada relevância. Os teluretos de bismuto têm sido os mais utilizados com temperaturas operacionais máximas a rondar os 320°C, apesar do seu ZT baixar significativamente de valor com temperaturas elevadas. Ainda assim, o valor está muito aquém da temperatura dos gases de escape, (pode ultrapassar os 800°C [35]). Por isso, nesta matéria, ainda há muito por estudar e descobrir para que o potencial de aproveitamento do calor dos gases de escape seja totalmente aproveitado. Apesar disso, materiais para uso em aplicações termoelétricas estão a emergir e estão a ser estudados novas combinações de materiais para obter valores de ZT altos para temperaturas elevadas [53]. São de assinalar os materiais termoelétricos feitos a partir de materiais abundantes na natureza que aguentam temperaturas de cerca de 400°C e que foram recentemente desenvolvidos no âmbito de projetos em que o LaMoTA participou. São disso exemplo o Siliceto de Magnésio (material tipo n) e as tetrahedrites (material tipo p) [54][55].

3 PROTÓTIPO

Nos capítulos anteriores, nomeadamente no capítulo 2.1.3, explicou-se o princípio básico do funcionamento dos termossifões de condutância variável com controlo de temperatura (VCTS). Nesse capítulo explicou-se também o motivo da sua existência, assim como as vantagens e os seus desafios.

No presente capítulo, pretende-se apresentar o protótipo em análise nesta Dissertação, que está presente no laboratório de motores e que foi desenvolvido por investigadores da UMinho no âmbito do projeto *Exhaust2Energy*. É feita uma descrição geral do protótipo em análise, assim como se destacam os fluidos e componentes de maior relevância, bem como, as alterações que foram necessárias para o funcionamento do sistema e posteriores testes.



Figura 24 – Protótipo em análise na Dissertação

3.1 Visão global e funcionamento do protótipo

Vai-se usar a figura 25 com a vista principal e de perfil para explicar o funcionamento do protótipo:

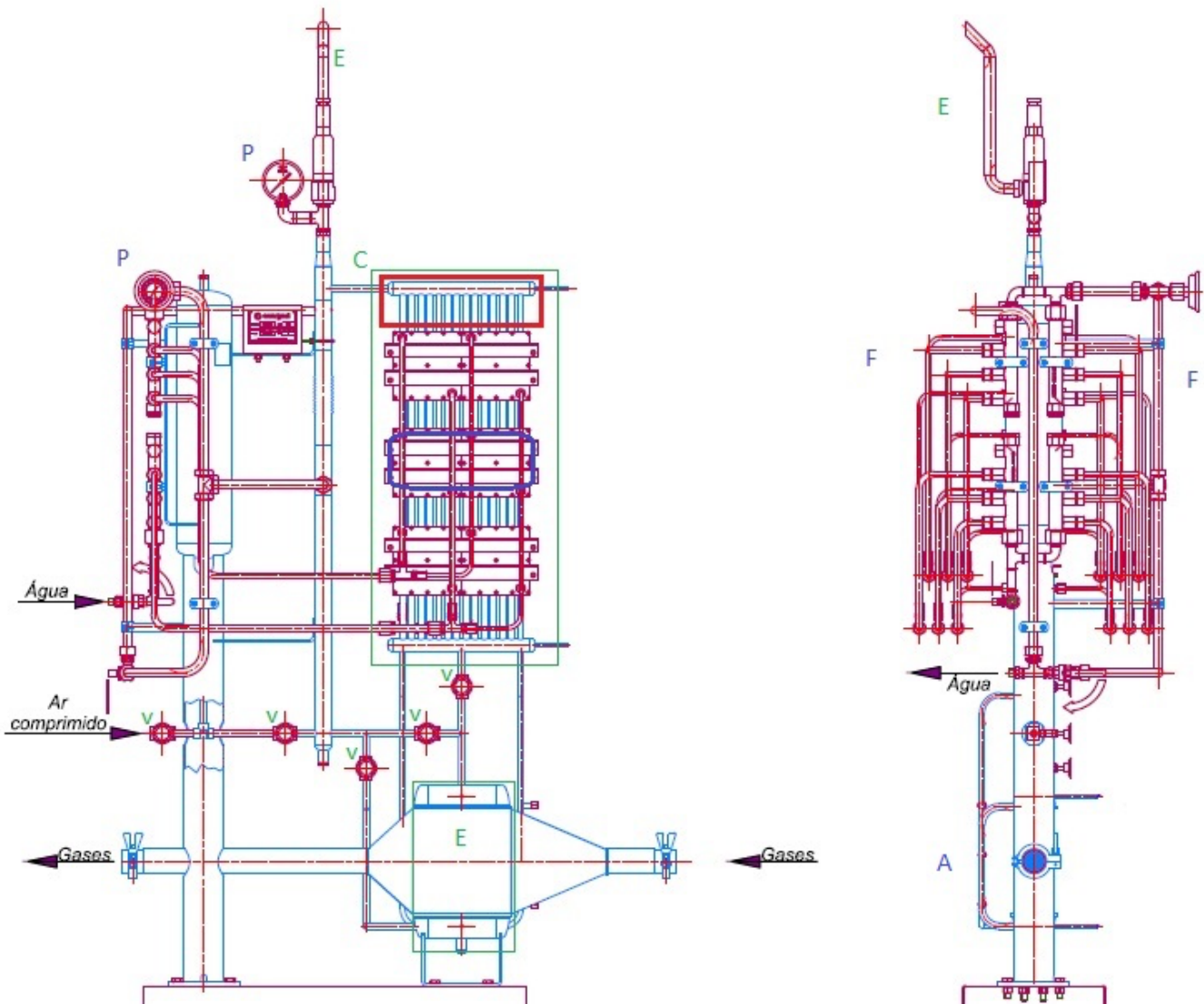


Figura 25 – Esquema da vista principal e perfil do protótipo

O protótipo usa os gases de escape para alimentar o sistema. Na vista de frente consegue-se observar o sentido do fluxo dos gases: entra pela direita e sai pela esquerda, sendo que é libertado para o exterior através de uma conduta ventilada. O azoto comprimido, que será um dos gases não condensáveis utilizados no decorrer dos testes, é inserido por onde está indicado de forma a pressurizar o sistema para se obter um controlo da pressão inicial e assim controlar a temperatura de saturação. O fluido de trabalho é a água e é injetado por onde é inserido o ar comprimido antes do mesmo. Existe ainda um sistema de válvulas (v) que permite isolar partes do sistema ou controlar o sentido da circulação dos fluidos no interior do sistema.

O evaporador, na figura representado por um E, tem como função trocar calor com os gases de escape, absorvendo-o e evaporando o fluido de trabalho (água). O evaporador é um permutador com tubos verticais dispostos em quincôncio (*staggered*) onde se encontra o fluido de mudança de fase (neste caso água). Ao evaporar, o fluido de trabalho sobe pelo tubo vertical, passando pelo coletor de vapor inferior até ao condensador (C). O condensador consiste em tubos de *inox* “ensandwichados” em placas de alumínio sobre as quais assentam as faces quentes dos TEG.

No condensador, o vapor (com temperatura controlada) entra em contacto com a face quente dos TEG. Este calor é transferido para a superfície quente dos TEG por fenómenos combinados de convecção no interior dos tubos (condensação) e condução. Existem 3 blocos com TEG (bloco nº2 assinalado pelo quadrado azul, bloco 1 em baixo e bloco 3 em cima), cada um com 2 níveis (bloco 1 com nível 1 e 2) com 8 TEG cada andar (4 de cada lado). De referir que existem TEG dos 2 lados do sistema, perfazendo um total de 48 TEG.

Para que o calor absorvido pela face quente não se acumule na face fria e para garantir a diferença de temperatura entre faces, existe um conjunto de placas arrefecedoras alhetadas sobre as quais assentam as faces frias dos TEG. Estas placas arrefecedoras são alimentadas (vista de frente) por um sistema de tubagens (F). Depois de absorver o calor, a água aquecida do sistema de arrefecimento da face fria dos TEG, flui para o exterior do sistema. Tudo isto permite aos TEG obterem uma diferença de temperatura através das suas faces, gerando tensão que pode ser aproveitada na geração de energia elétrica.

À medida que a carga térmica vai sendo maior, mais vapor vai sendo gerado e a área por ele ocupada no condensador também aumenta, os TEG vão sendo ativados de baixo para cima (conceito de condutância variável explicado no capítulo 2.1.3). O GNC é empurrado para cima, para o tanque de

expansão (à esquerda na vista de frente), até que eventualmente todos os níveis se encham de vapor, ou seja, todos os níveis estejam ativados (caso o sistema absorva o calor suficiente para esse efeito), isto porque o aumento do vapor faz aumentar a pressão do sistema comprimindo ainda mais o GNC. Assim, com todos os TEG ativos, teoricamente e se houver uma correta estratificação entre o fluido de trabalho água e o GNC, o condensador estará ocupado apenas por vapor e o GNC no restante volume do protótipo, sendo produzida a máxima energia elétrica. Em caso de produção excessiva de vapor, existe um *buffer*, um coletor de vapor superior (sinalizado com o quadrado vermelho) que tem como função acomodar algum vapor quando a carga térmica sobre o sistema for superior à que ele consegue utilizar para gerar energia. Este *buffer* será também responsável por redistribuir o vapor pelos TEG quando a carga térmica sobre o sistema voltar a baixar. Se, porventura, o vapor gerado for demasiado, existe um condensador de excesso (caixa vermelha na vista principal da figura 25) que condensa o vapor em água líquida, posteriormente reconduzida por gravidade para a base do evaporador.

O vapor vai trocando calor com os TEG no interior do condensador, acabando por condensar e escorrer por gravidade até ao coletor de vapor inferior que tem uma ligação externa com a base do evaporador (A) onde acaba por se armazenar, possibilitando a repetição de todo o processo.

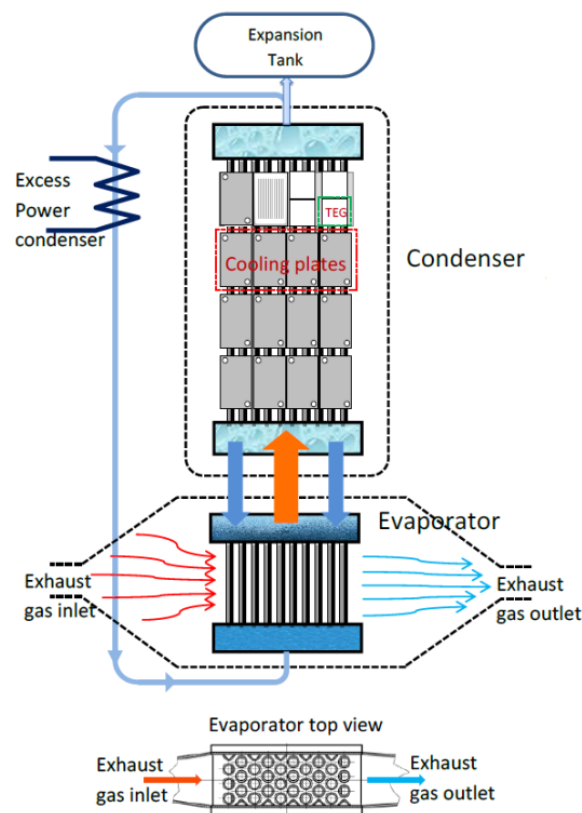


Figura 26 – Esquema de VCTS

3.2 Componentes e fluidos relevantes e alterações

3.2.1 Fluido de trabalho

A água foi escolhida como fluido de trabalho condensável que permanece no interior do protótipo. Evapora e condensa, sendo o veículo de transferência do calor proveniente dos gases de escape (pode ultrapassar os 800°C) e interagindo com os TEG, aquecendo a sua face quente de forma controlada. Esta escolha deve-se às suas características muito particulares, que lhe conferem um estatuto de fluido de transferência de calor ideal em muitos aspetos (capítulo 2.2). O carregamento da água no sistema é feito pela válvula V1 (figura 31), durante o qual, para controlar visualmente o nível da água foi utilizado um tubo transparente vertical ligado a A (figura 25). No final do carregamento foi posteriormente retirado devido às elevadas pressões no decorrer dos testes. A água ficou no 3º nível (1606 ml) e aí se manteve durante o decorrer dos testes.

Importa relevar que, apesar de se ter incluído um depósito de expansão com o objetivo de estabilizar a pressão, esta ainda varia consideravelmente no interior do protótipo de acordo com a carga térmica a que está sujeito, devido à produção de vapor que induz. Esta variação de pressão faz alterar o valor da pressão/temperatura de saturação do fluido de trabalho água. No caso da água, a pressão necessária para que o vapor seja gerado a 250°C é cerca de 40 bar como pode ser verificado na figura 27. Resumindo, a pressão/temperatura de saturação do fluido de trabalho vai variar no decorrer de cada um dos testes podendo ser controlada a pressão inicial.

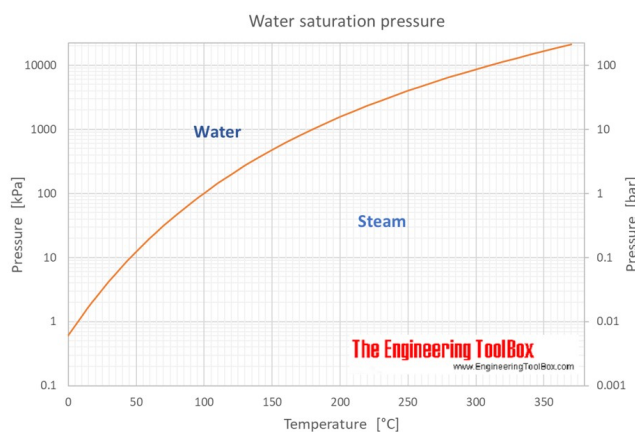


Figura 27 – Variação das condições de saturação da água com alteração de temperatura e pressão [56]

Este aumento de pressão considerável para temperaturas elevadas, faz com que o protótipo tenha que ter a capacidade de ser estanque no que às fugas diz respeito, por outras palavras, pressurizado e construído com componentes (tubagens, válvulas, entre outros) capazes de suportar este aumento de pressão.

3.2.2 Gases não condensáveis

Os gases não condensáveis, têm um papel importante no decorrer dos testes. Eles são responsáveis por conferir uma pressão inicial ao protótipo termossifão, contribuindo para o controle da pressão/temperatura de saturação do fluido de trabalho no interior do protótipo. Por outro lado, como já foi abordado nesta Dissertação, são eles que permitem ao sistema ser um termossifão de condutância variável (VCTS), permitindo que os TEG sejam ativados progressivamente à medida que a carga térmica aumenta (para mais detalhes consultar capítulo 2.1.3). Um aumento de carga térmica tem como consequência a produção de mais vapor, consequentemente aumenta a pressão interna o que fará com que o GNC se desloque progressivamente para o exterior do condensador, permitindo que o vapor esteja sempre em contacto com os TEG. Caso este gás não existisse, todo o volume do sistema seria ocupado por água líquida e vapor, não sendo possível concentrar o calor disponível num conjunto proporcional de módulos termoelétricos. Além disso, não seria possível controlar as condições de saturação do sistema e, portanto, a temperatura de transferência de calor para os módulos termoelétricos.

Para que este processo funcione devidamente, é fundamental haver uma efetiva separação entre as massas de vapor e o GNC, ou seja, haver uma separação efetiva entre os fluidos, por outras palavras, uma boa estratificação. A forma de analisar uma boa estratificação é verificar por um lado, as potências elétricas geradas em cada um dos TEG dentro de cada nível e por outro lado, verificar se os TEG estão a ser ativados efetivamente de forma progressiva, comparando as potências elétricas de nível para nível.

Para a escolha dos fluidos, os fatores importantes a considerar, foram a sua disponibilidade e densidade. Para isso, escolheu-se para o funcionamento normal e descrito no capítulo 3.1, o azoto e o hélio, este último claramente mais leve que o vapor de água e, por isso, à partida, com mais potencial de uma boa estratificação, ou seja, conseguir manter o vapor na zona inferior e o hélio na zona superior. Para uma configuração diferente do VCTS, com inversão do sentido do fluxo de trabalho, com ativação progressiva dos TEG de cima para baixo, era importante adicionar um GNC claramente mais denso. Por esse motivo, o gás escolhido foi o árgon.

3.2.3 Evaporador

O evaporador contém um pequeno reservatório de água na parte inferior com uma sequência de 3 filas, com 10 tubos alhetados cada uma, com água líquida no seu interior. Para maximizar a transferência de calor, estes tubos estão estrategicamente distanciados e não são alinhados, tendo a disposição em quincôncio (em inglês, “*staggered*”). A imagem abaixo permite compreender a disposição dos Tubos verticais e disposição esquemática do evaporador.

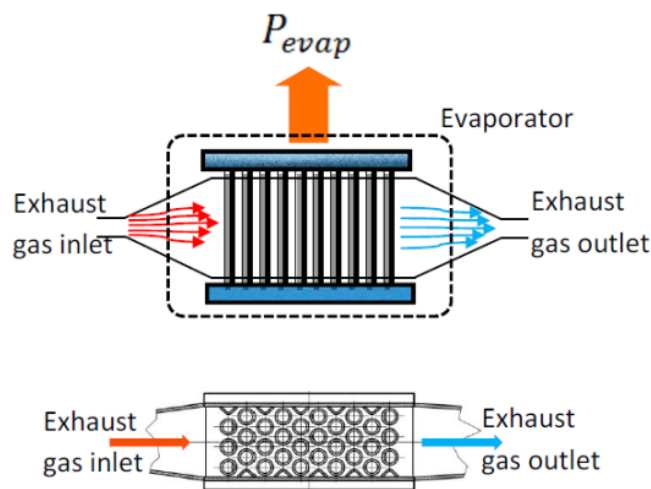


Figura 28 – Esquema do evaporador

Nos trabalhos anteriores realizados para conceber este protótipo, usou-se um modelo em Matlab® nomeadamente para calcular a potência de vaporização, P_{evap} , usando informações provenientes do motor, caudal mássico e temperaturas dos gases de escape. A transferência de calor por convecção entre os gases de escape e as superfícies dos tubos do evaporador são um fator importante, pelo que é necessário calcular o coeficiente de transferência de calor e que depende essencialmente da configuração dos tubos do evaporador. Outros fatores importantes, são o coeficiente de transferência de calor na água pressurizada no interior dos tubos verticais, a área interna dos tubos alhetados e a diferença de temperatura entre a o interior e o exterior dos tubos alhetados. Tudo isto permite chegar a um valor de potência térmica de vaporização e a correspondente taxa de geração de vapor, que permitiu dimensionar o condensador.

3.2.4 Condensador

O condensador consiste numa série de 14 tubos alinhados, com um coletor de vapor em cima e em baixo. Tem como função condensar o vapor proveniente do evaporador e permitir a transferência de calor de condensação aos dispositivos termoeletrônicos para a produção de energia elétrica. Tem também como função interagir com o evaporador, permitindo que haja água disponível no evaporador mesmo em cargas térmicas elevadas. Se houver excesso de vapor, existe um volume acima da última fileira de módulos, designado de buffer que o permite armazenar e distribuir posteriormente para a área dos dispositivos termoeletrônicos para otimizar a geração de energia elétrica. Tem 3 blocos de TEG com 2 níveis cada um e com 4 TEG cada nível de cada um dos lados do condensador. A face quente destes dispositivos termoeletrônicos está em contacto com placas de alumínio que envolvem os tubos, recebendo o fluxo de calor proveniente deles. A face fria destes dispositivos está em contacto com as placas arrefecedoras, através das quais passa um fluxo de água de arrefecimento que mantém estas faces tão frias quanto possível para maximizar o efeito *Seebeck*. Todo o condensador está devidamente isolado com cortiça. Os tubos de água que alimentam as placas arrefecedoras também estão isolados.

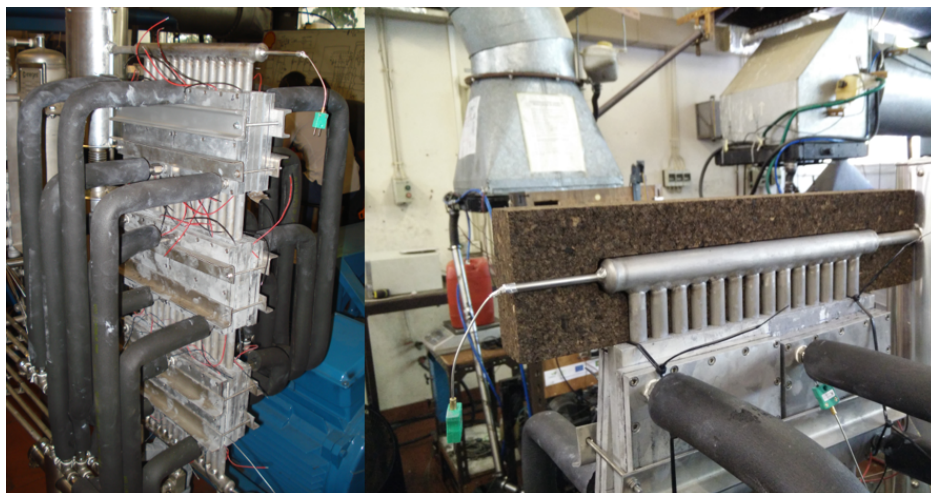


Figura 29 – Condensador e isolamento

3.2.5 Condensador de excesso

Se com cargas térmicas muito elevadas o sistema estiver com produção de vapor exagerada, o protótipo conta ainda com um condensador de excesso, capaz de converter esse vapor em água que é conduzida novamente para a parte inferior do mesmo. O condensador de excesso está integrado no tubo vertical que fica entre o condensador e o depósito de expansão. Consiste numa manga concêntrica com um tubo de vapor por onde passa um fluxo de água líquida.

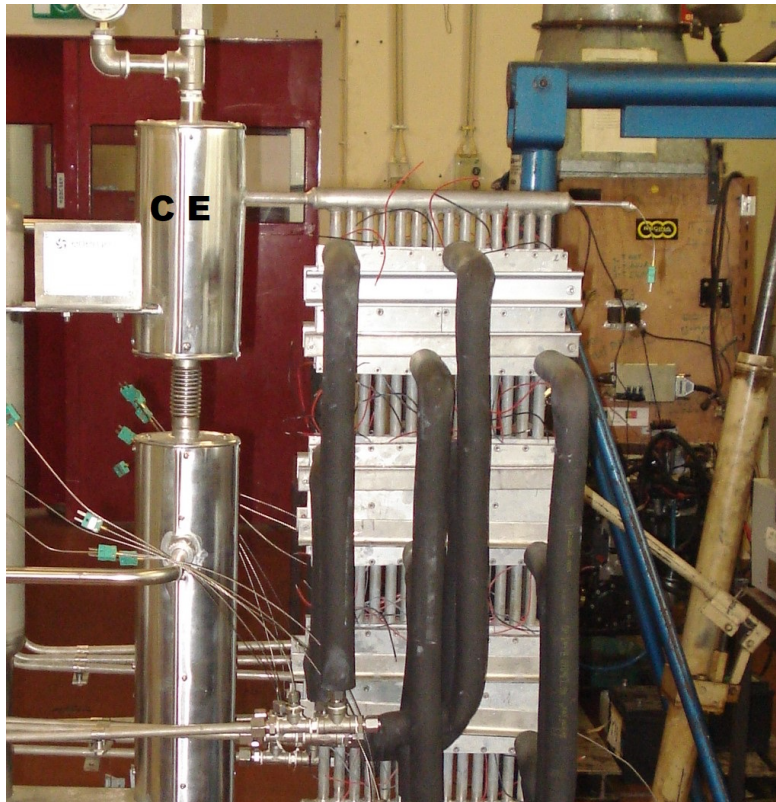


Figura 30 – Condensador de excesso assinalado pelas letras “C E”

3.2.6 Válvulas

O protótipo tem um conjunto de 5 válvulas capazes de suportar elevadas pressões, apresentadas na imagem abaixo e são importantes para a realização dos testes. A válvula V1 serve para carregar o sistema tanto de fluido de trabalho (água), como de GNC, sendo que em configuração de testes está sempre fechada (ver foto de carregamento). Em configuração normal de teste, com GNC mais leve que o vapor de água, V1 e V4 são as únicas válvulas fechadas pelo que o vapor sobe diretamente pelo tubo vertical para o condensador. No caso de se pretender alterar o sentido do fluxo terá que se fechar a válvula V5 e abrir a válvula V4 sendo que o condensador, neste caso, será alimentado de cima para baixo. Deste modo, obriga-se o vapor a subir pelo tubo central e entrar no condensador pela parte de cima. A válvula V2 fechada permite isolar o vaso de expansão, passando-se a usar um volume muito menor do sistema, permitindo alterações de pressão no sistema consideravelmente superiores.

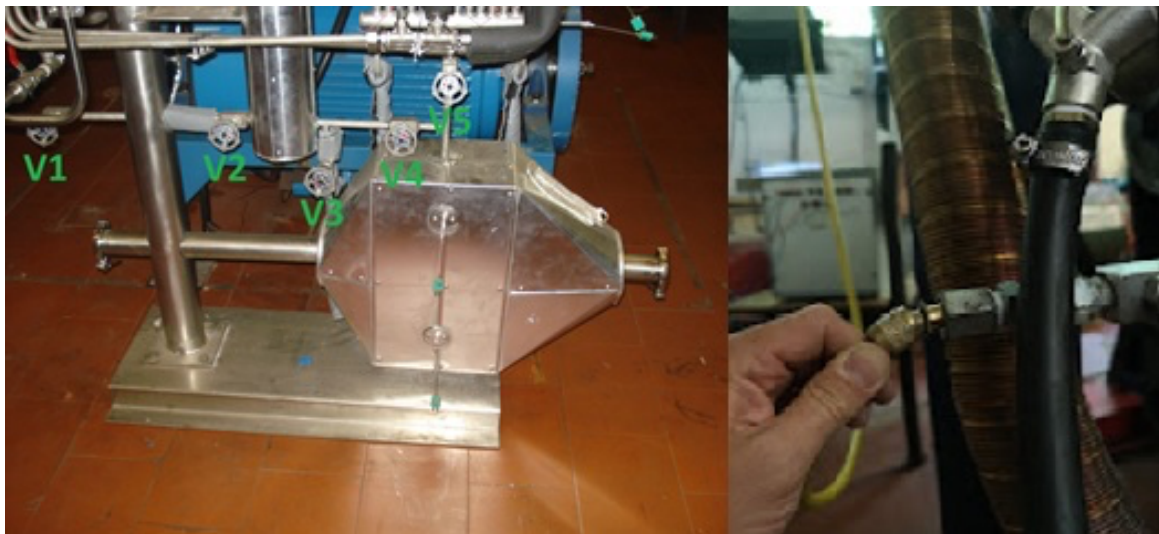


Figura 31 – Válvulas do sistema (esquerda) e carregamento de GNC (direita)

Em jeito de resumo, de seguida apresenta-se o funcionamento do sistema em configuração normal (usado nos testes com azoto e hélio) e em configuração invertida (usado nos testes com árgon).

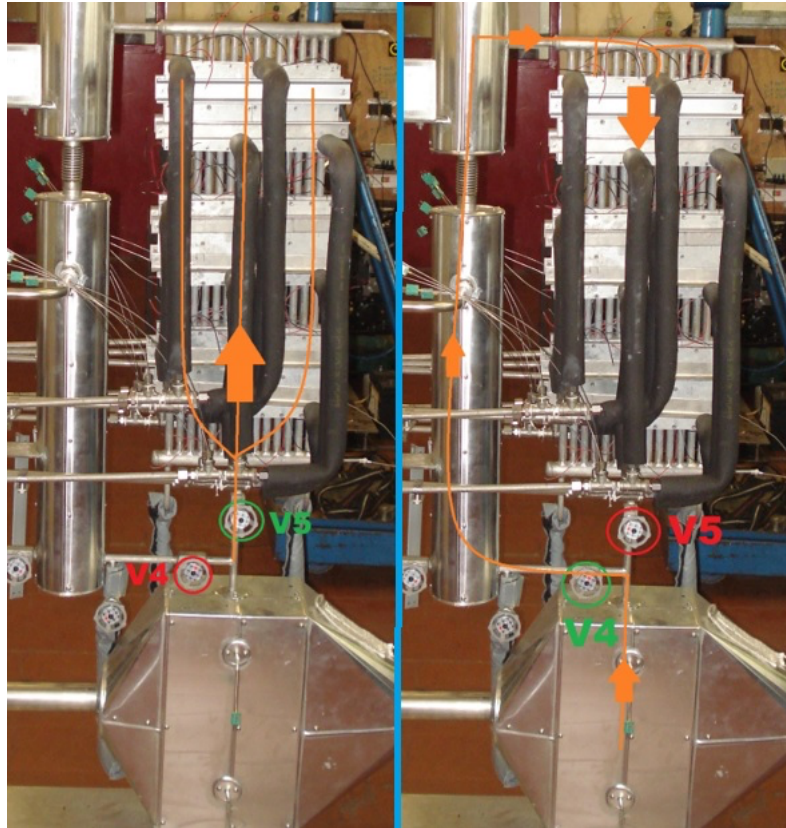


Figura 32 – Configuração normal à esquerda e invertida à direita

As válvulas a vermelho estão fechadas e as verdes abertas. As setas a laranja pretendem identificar o sentido do fluxo de vapor em cada uma das configurações de funcionamento do sistema. De referir que, no caso do sistema em funcionamento invertido, se inativou o condensador de excesso, removendo-se os tubos de água de saída e entrada do mesmo.

3.2.7 Válvula de segurança

Por segurança, foi adicionado na zona mais elevada do protótipo uma válvula de segurança que é acionada aos 60 bar e que permite evitar que o sistema tenha pressões demasiado elevadas, pondo em causa a integridade estrutural do mesmo.



Figura 33 – Válvula de segurança

3.2.8 Transdutores de pressão

Os medidores de pressão têm a função de monitorizar e medir a pressão interna do sistema e por isso a temperatura de vaporização do fluido de trabalho. Foram feitas alterações à disposição dos medidores de pressão no protótipo. Na parte esquerda do sistema foi adicionado um medidor analógico e na parte direita, por baixo da válvula de expansão, foi adicionado um medidor digital que permite registar os valores de pressão através do sistema de aquisição de dados. O transdutor de pressão digital utilizado foi o GEMS® 3500 series, capaz de monitorizar pressões elevadas no interior do sistema (*input* de 0.35 a +40 bar, *max. Overload* 80 bar e *Bursting pressure* 120 bar).



Figura 34 – Gems @ 3500 series

3.2.9 TEG

Os módulos de geração de energia elétrica utilizados estão expostos na figura 35.

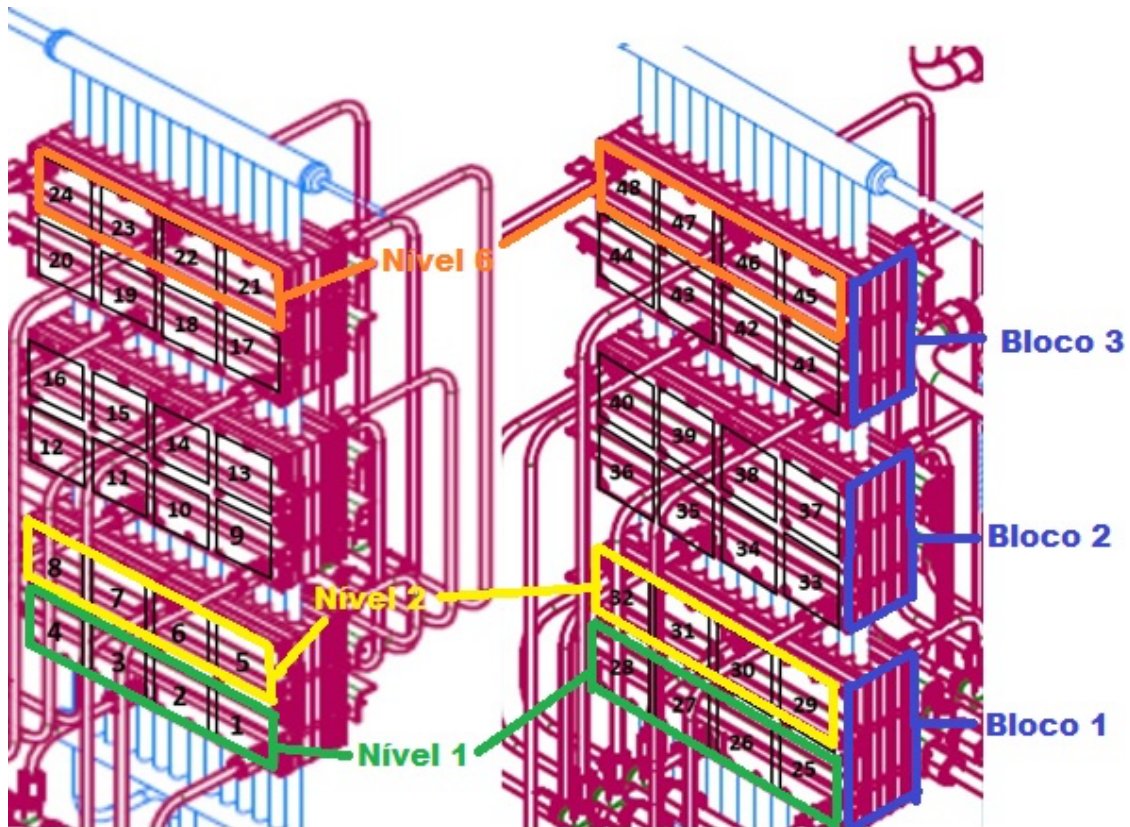


Figura 35 – Esquema de Módulos de cada um dos lados

Estão distribuídos por um total de 6 níveis, 3 blocos (com dois níveis cada). Cada nível conta com 4 módulos termoelétricos de cada lado, totalizando um conjunto de 48 módulos. No decorrer da Dissertação, vai-se denominar o bloco 1 o bloco inferior (com o nível 1 e 2), o bloco 2 o do meio (nível 3 e 4) e o bloco 3 o de cima (nível 5 e 6). Existem ainda dois tipos de módulos utilizados, os GM49 e os GM127. Nos níveis mais baixos foram utilizados os GM49 que funcionam melhor em baixos regimes não precisando de tanto calor para trabalharem em pleno e para começarem a produzir eletricidade, sendo por isso “ativados” mais cedo. Aos módulos de níveis superiores foram aplicados módulos GM127, com potências elétricas máximas superiores em altos regimes, produzindo por isso mais potência elétrica por módulo para uma determinada diferença de temperatura, mas também consumindo mais calor. Esta diferença de comportamento entre módulos tem muito que ver com a espessura dos mesmos e, por

isso, com a sua resistência térmica (1.1 K/W para o GM49 e 0.6 K/W para o GM127) e também com o *fill factor* do material termoelétrico no seu interior (rácio da área do módulo efetivamente ocupada por elementos termoelétricos). Nos módulos com maior resistência térmica, há menor fluxo de calor por condução ao longo do módulo, resultando em maior diferença de temperatura entre a face fria e face quente, para um dado fluxo de calor. Em ambos os módulos, a potência elétrica máxima obtém-se com temperaturas das faces quentes a 250°C o que corresponde à temperatura máxima admissível dos módulos. A eficiência de conversão é também semelhante, cerca de 5% a 220°C de diferença de temperatura. No entanto, dado que os GM127 necessitam de um maior fluxo de calor, isto quer dizer que as perdas de diferença de temperatura disponível devido a resistências térmicas exteriores como as resistências de contacto, serão superiores. Ou seja, para as mesmas temperaturas de fonte quente e fonte fria, a temperatura das faces quentes será ligeiramente inferior e a temperatura das faces frias será ligeiramente superior. De referir que, para medir a tensão elétrica gerada pelos módulos termoelétricos, foram adicionadas e soldadas resistências elétricas em cada um deles. Estas resistências de carga são bastante semelhantes à resistência interna dos módulos termoelétricos.



Figura 36 – Resistência elétrica ARCOL HD50 com 0.47 Ohm

3.2.10 Termopares

Importa ainda entender a distribuição dos termopares no protótipo. Para isso, recorreu-se ao seguinte esquema que contempla os termopares existentes no sistema. Resumidamente estão localizados em cada uma das partes quentes e frias dos módulos, entradas e saídas de água e outros locais relevantes do protótipo como o coletor de vapor inferior e superior, entre outros.

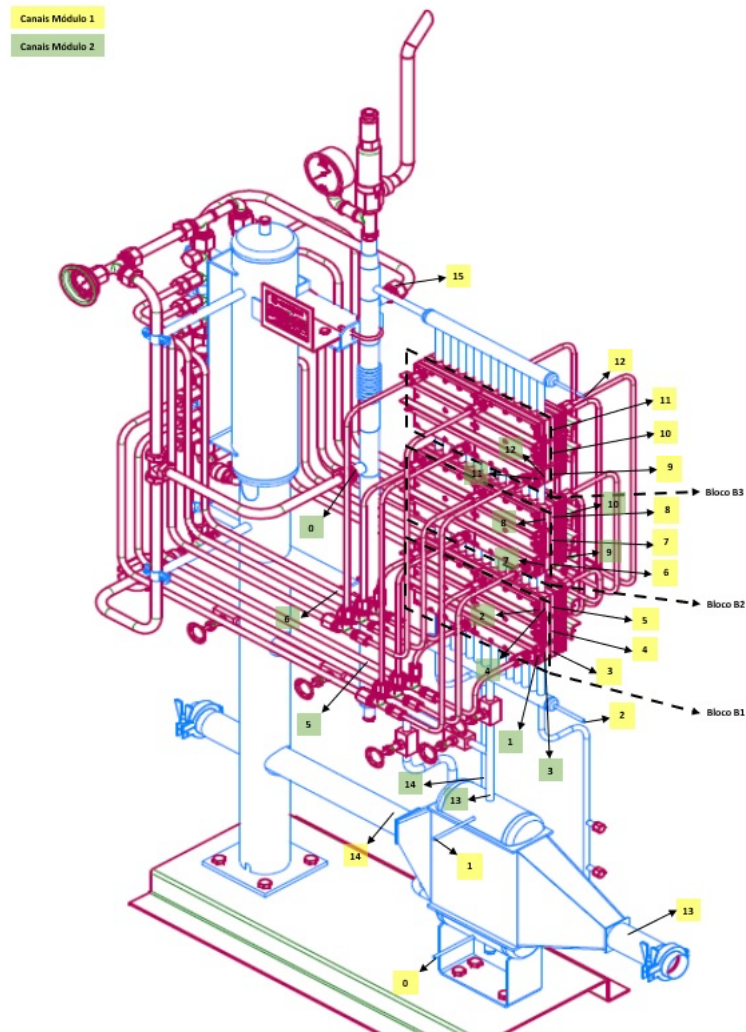


Figura 37 – Esquema de Termopares

Os termopares são parte integrante e fundamental no estudo levado a cabo pelo que permitem não só calcular variáveis importantes, como interagir com o sistema de aquisição de dados na obtenção de resultados. Os termopares utilizados foram Tipo K 1.5mm x 150mm.

4 PREPARAÇÃO PARA TESTES

Neste capítulo pretende-se aprofundar o sistema que permite elaborar os testes experimentais. Para além do Protótipo propriamente dito, para que os testes sejam levados a cabo, é necessário contemplar uma série de periféricos essenciais, nomeadamente o motor, o freio do motor, o sistema de escape, assim como os softwares necessários para recolher e tratar informação, como: parâmetros do motor, temperaturas ao longo do sistema, pressões, entre outros.

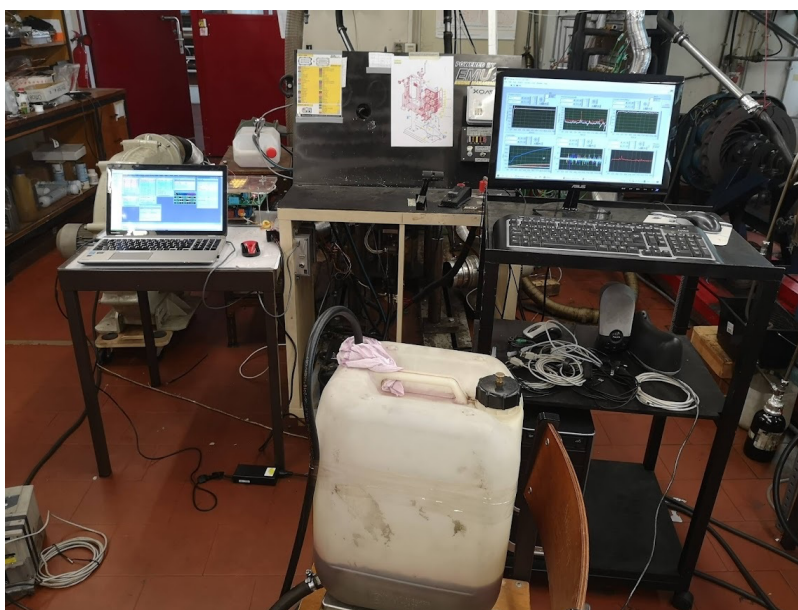


Figura 38 – Foto de laboratório pronto para testes

4.1 Sistema completo

O sistema completo para a realização dos testes consiste num motor travado por um freio para a obtenção de binário, cujo escape está conectado ao protótipo por via de uma conduta trocando calor com o mesmo. De seguida, os gases de escape são conduzidos e expelidos para o exterior através de um sistema de ventilação.



Figura 39 – Foto da instalação

Como foi referido no capítulo anterior, existe um circuito de água que arrefece através de umas placas arrefecedoras a face fria dos módulos termoelétricos. O caudal de água referido foi mantido aproximadamente constante ao longo dos testes laboratoriais e rondou os 18,08 L/min e com temperaturas ambiente perto dos 23°C.

Todos os sensores de medição de parâmetros utilizados no sistema de aquisição de dados, nomeadamente, de pressão, de temperatura (termopares), tensão (*voltage*), foram previamente conectados a um computador com o software LabView®, gerando um ficheiro texto, (.txt). No que diz respeito aos parâmetros do motor, foi utilizado o software ECU master®, que gerou um ficheiro *Excel*, (.csv). Para consumo de combustível em tempo real foi utilizado uma balança conectada a um computador com o LabView®. Os ficheiros gerados foram posteriormente utilizados por um programa de Matlab® capaz de gerar resultados. De seguida, apresenta-se uma figura que pretende esquematizar a instalação que permitiu a realização dos testes.

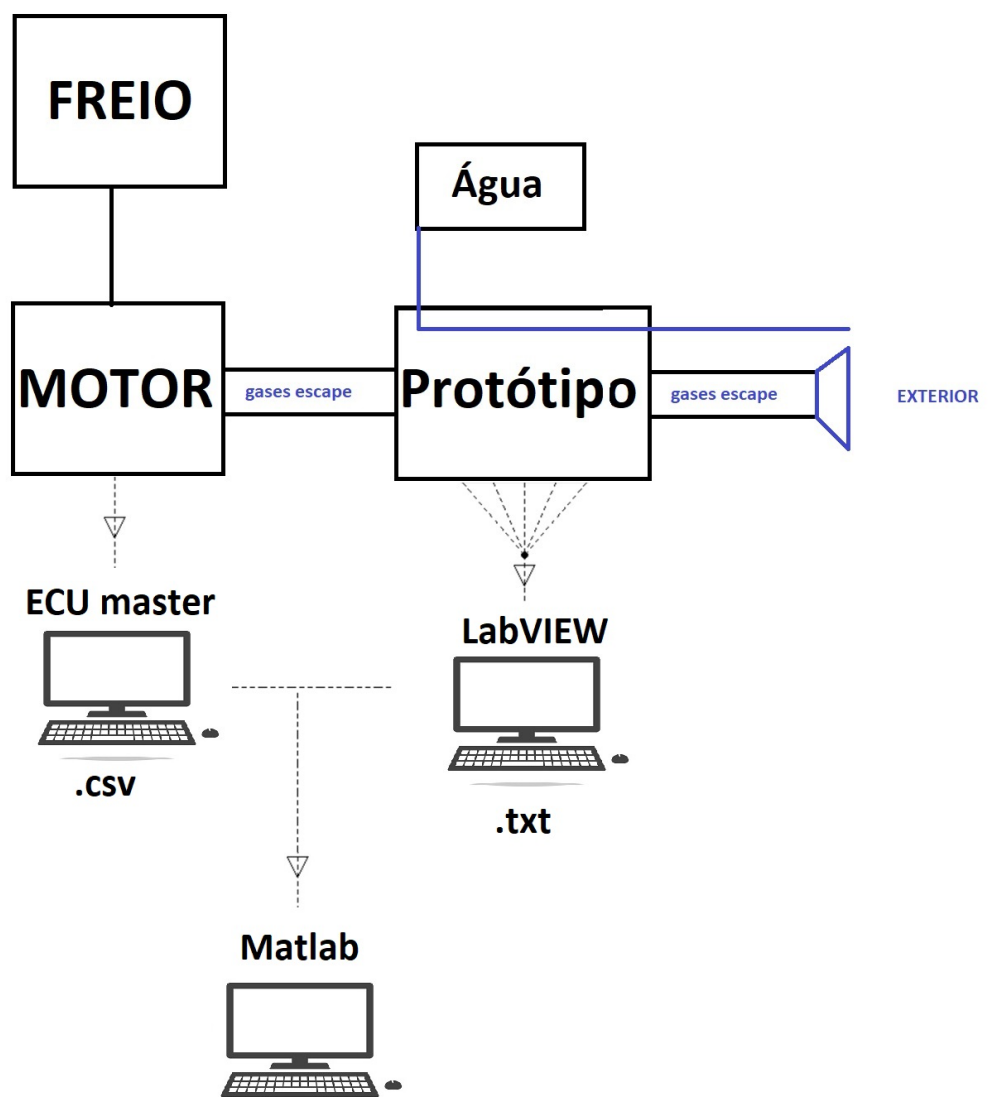


Figura 40 – Esquema da instalação

Como já foi referido e será explicado com mais detalhe nos seguintes capítulos, foram utilizados vários fluidos não condensáveis: o azoto, o hélio e o argon, carregados através da válvula V1 (cap. 3.2.6). Para os resultados serem comparáveis entre os diferentes fluidos não condensáveis, procurou-se fazer uma série de testes à mesma pressão para cada um dos gases, sendo por isso definidas, as pressões iniciais de 30, 20 10 e 1 bar como referência para os testes. Relativamente às condições de funcionamento, foram feitas algumas experiências, no entanto, para cada um dos testes estabeleceu-se como padrão pré-definido as 3500 RPM e as 2000 RPM com uma posição do acelerador (TPS) perto dos 35%, correspondendo a uma potência do motor de cerca de 80 kW (108 cv) e 46 kW (62 cv), respetivamente.

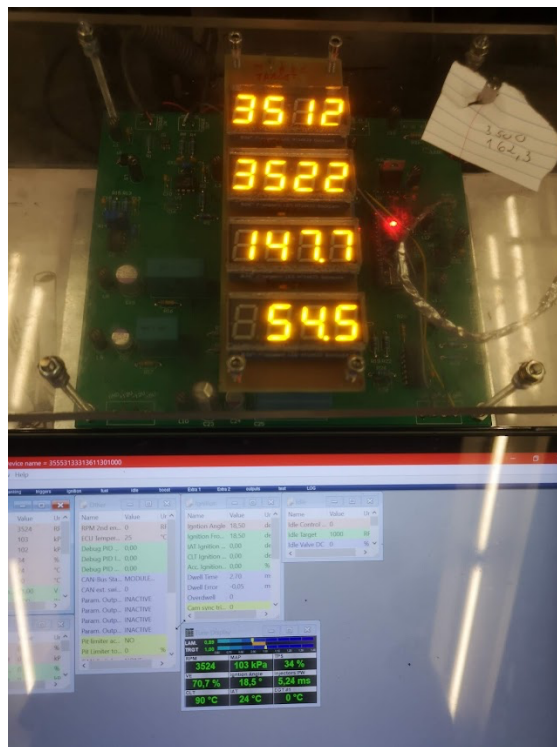


Figura 41 – Foto de settings padrão de teste

Detalhes sobre motor, freio e software utilizados pelo sistema de aquisição de dados são devidamente detalhados no decorrer deste capítulo.

4.2 Motor e Freio

4.2.1 Motor

O motor utilizado é de um veículo ligeiro de passageiros, 1.6 a gasolina. A escolha deste motor teve que ver com ser o motor a gasolina disponível para testes no laboratório de motores da Universidade do Minho. Devido à sua recente escassa utilização, foi necessário garantir o seu bom funcionamento antes de iniciar os testes. As especificações do mesmo estão detalhadas na seguinte tabela:

Tabela 2 – Características técnicas do motor Saxo Cup do grupo PSA

Referência	TU5JP4
Cilindrada	1587 cm ³
Nº de cilindros	4
Taxa de compressão	11:1
Potência máxima	88kW a 6000rpm
Binário máximo	160N.m a 4250rpm
Sistema de injeção	Multipoint Bosch Spark
Combustível	I.O. 95

4.2.2 Freio do Motor

Para que seja possível gerar carga sobre o motor e produzir binário é necessário “travar” o motor. Para isso utilizou-se o Freio do motor disponível no Laboratório que funciona com o princípio das correntes de *Eddy/Foucault*. O freio apresentou, durante os testes, limitações de temperatura de funcionamento que fizeram com que nem sempre fosse possível manter as condições de teste até se obter a estabilização do sistema.

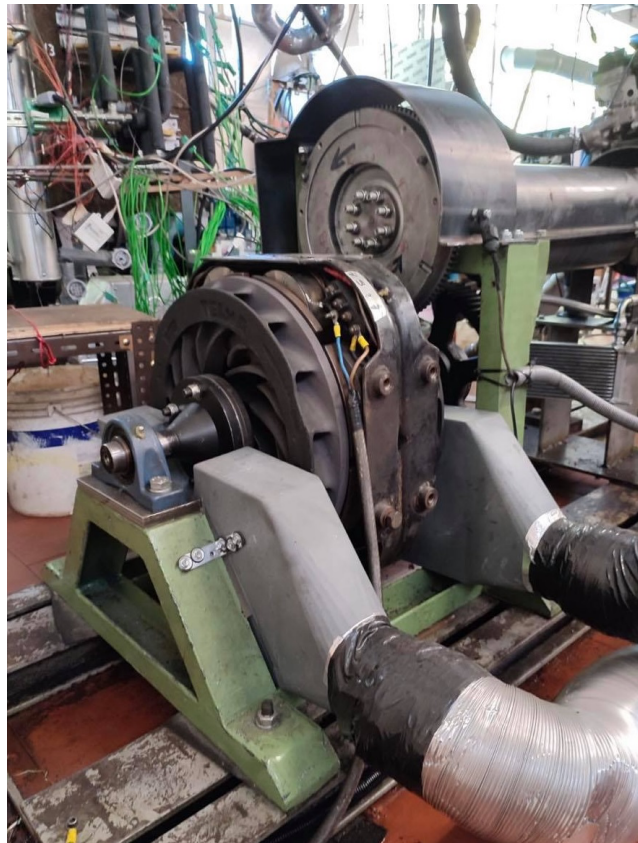


Figura 42 – Foto de freio do motor

Para a realização dos testes, contou-se com um controlador, para permitir definir e alterar, durante o teste, parâmetros variáveis resultantes da dinâmica motor/freio. Para além disso, o controlador permite recolher informação necessária para a análise de resultados, nomeadamente através da interação com a Centralina.

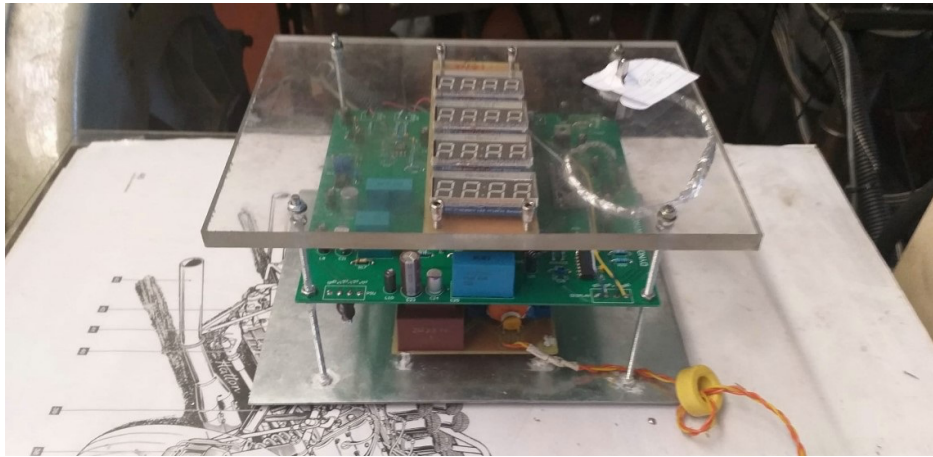


Figura 43 – Foto do Controlador do travão

O freio teve de ser previamente calibrado através da utilização de um braço centrado com o eixo do mesmo, carregado progressivamente com pesos, permitindo o cálculo manual do binário real gerado (com a massa do braço desprezada).

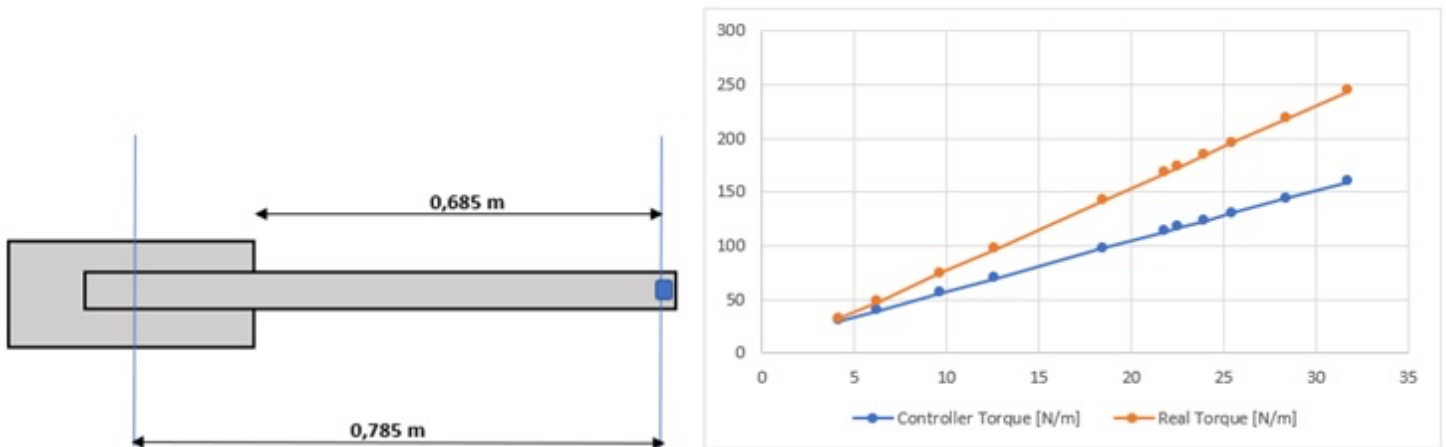


Figura 44 – Excel criado para a calibração do freio

O binário real foi comparado com o binário do controlador. Estes valores serviram para corrigir os valores dados pelo controlador, que estavam desatualizados.

4.3 Recolha e Tratamento de dados

De seguida, pretende-se aprofundar os *softwares* utilizados para a recolha e tratamento de dados necessários para abordar o problema.

4.3.1 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados é essencial para a recolha de dados, mais concretamente, nas tensões e temperaturas dos módulos termoeletrônicos, pressão interna do protótipo e temperaturas em diversos pontos relevantes de todo o sistema. É graças a esta recolha de informação que é possível executar a posterior análise e manipulação dos dados.

A escolha das placas de aquisição de dados utilizadas teve que ver com a disponibilidade das mesmas em laboratório e compatibilidade com LabVIEW®. Assim, para os termopares usou-se as placas NI-9214, para as tensões os NI-9205 D-SUB e NI-6008 e finalmente para a leitura de pressões utilizou-se as NI-9201, todas elas da *National Instruments*.

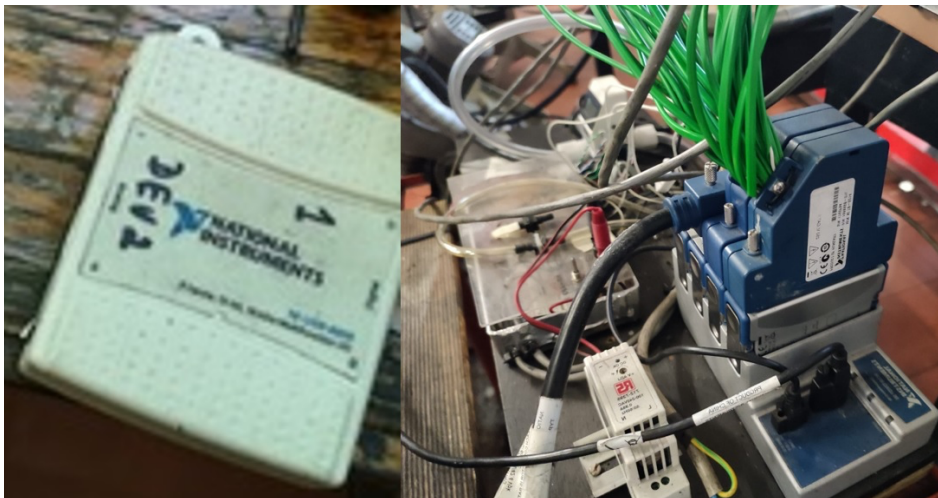


Figura 45 – Foto de placa NI-6008 (à esquerda) e NI-9214 (à direita)

4.3.2 ECUMaster®

Como já foi referido anteriormente, o ECUMaster® foi o *software* utilizado para predefinir parâmetros de funcionamento do motor, como rotação (RPM), posição do acelerador (TPS), IAT (Intake Air Temperature), consumo de combustível, lambda, entre outros. Este *software* está instalado num computador e interage com a Centralina (EMU®, *Engine Management Unit*). Para além da definição prévia de parâmetros do motor, permite interagir e obter informação relevante durante os testes e, finalmente, gerar um ficheiro Excel, .csv que é utilizado posteriormente pelo Matlab®. Os parâmetros de funcionamento do motor gerados são utilizados para estudar a desempenho do protótipo em análise.

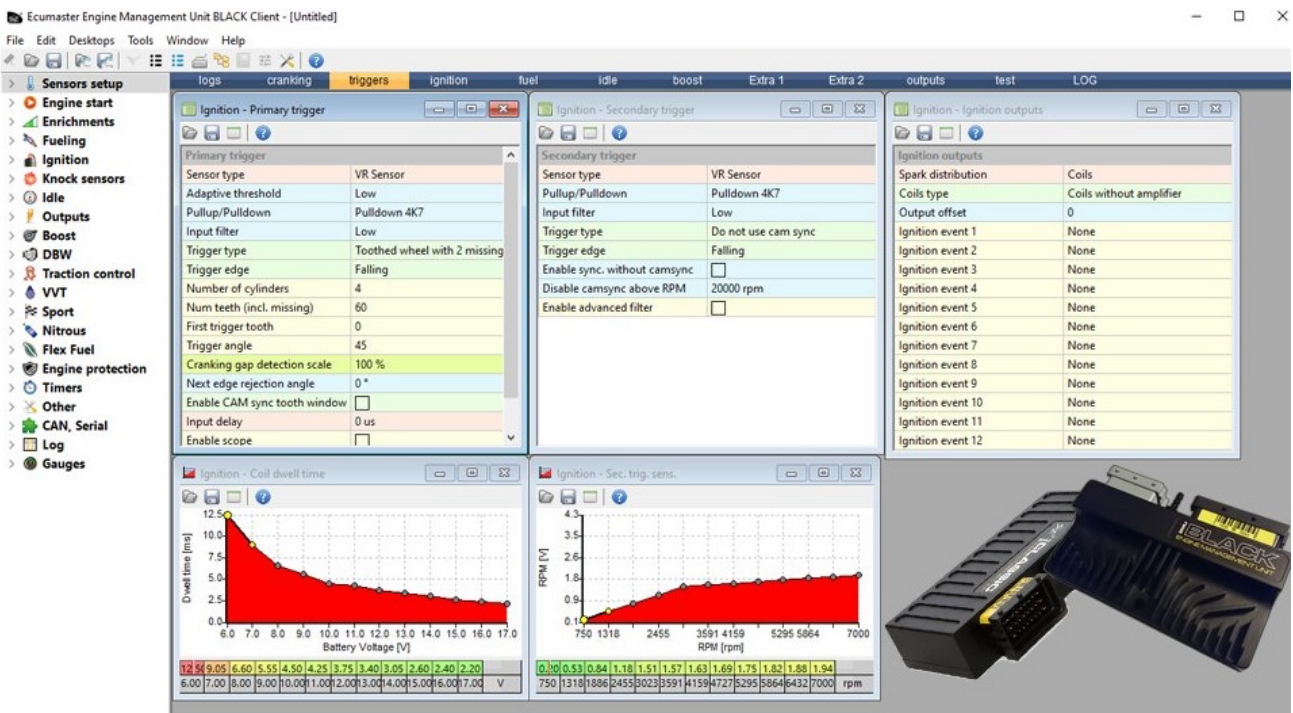


Figura 46 – Software ECUMaster®

4.3.3 LabVIEW®

O LabVIEW tem um papel fundamental durante a realização dos testes, pois permite verificar em tempo real, alterações de parâmetros de funcionamento do protótipo. Permite identificar por exemplo, quando a pressão do protótipo aumenta, quando cada um dos níveis de módulos termoeletrônicos é ativado, ou temperaturas relevantes de diferentes zonas do sistema. A informação proporcionada por esta ferramenta facilita o ajustamento em tempo real os parâmetros de funcionamento do motor para se obter os resultados pretendidos, com foco na otimização do protótipo. É também uma importante ferramenta de segurança, permitindo monitorizar potenciais excessos de pressão e temperatura. Existe ainda um segundo LabVIEW em funcionamento durante os testes, associado a uma balança, “desenhado” para registar o consumo real de combustível. Como já foi referido esta ferramenta cria também um ficheiro texto, .txt que é utilizado no Matlab®.

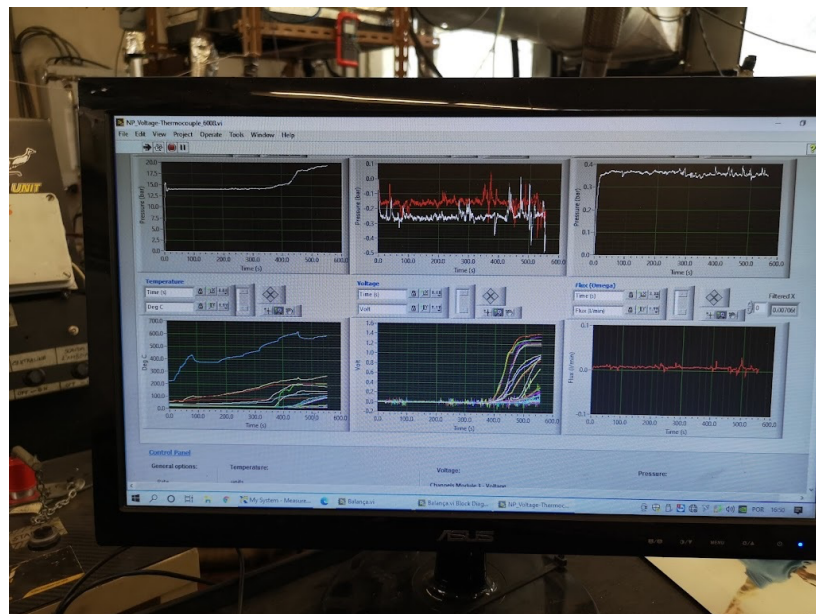


Figura 47 – LabVIEW® em funcionamento durante teste

4.3.4 Matlab®

O Matlab® foi elaborado no âmbito de trabalhos prévios e tem um papel fundamental na análise dos testes levados a cabo, gerando gráficos e tabelas. Para isso, como foi referido anteriormente, usa os ficheiros .csv e .txt (consultar anexo 1). A informação gerada pelo Matlab®, tem que ver essencialmente com a performance do protótipo e irá ser exposta nos próximos capítulos. Importa então expor alguns conceitos teóricos e expressões mais relevantes por de trás do Matlab® utilizado (ver capítulo 2).

Potência dos TEG:

Segundo a Lei de Ohm:

$$I = V/R$$

Equação 21

I – Corrente [A]

V – tensão [V]

R – Resistência [Ω]

A potência elétrica, por outro lado, avalia o grau de absorção de energia num circuito e pode ser expressa segundo a Lei de Joule:

$$P = I^2 \cdot R$$

Equação 22

P – Potência [W]

Combinando as expressões anteriores chegamos à seguinte expressão:

$$P = \frac{V^2}{R}$$

Equação 23

Potência teórica máxima:

A potência elétrica máxima em função da resistência interna R_i , resistência de carga R_L e potência elétrica medida na resistência P_L é dada pela equação 15 (ver capítulo 2.3.4).

Potência térmica absorvida:

A equação geral de transferência de calor é dada pela equação 2 (ver capítulo 2.2.1). Esta expressão pode ser adaptada para uma potência térmica (W):

$$Q = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot dT$$

Equação 24

Q – Potência térmica [W]

\dot{V} – caudal volúmico [m^3/s]

ρ – densidade [kg/m^3]

c_p – calor específico [$J/kg \cdot K$]

dT – diferença de temperatura ($^{\circ}C$)

Eficiência:

Para um dispositivo termoelétrico, a eficiência é o rácio entre a potência elétrica gerada P_{TEG} e o calor de entrada da face quente Q_H . No entanto, apenas medimos o calor Q_C , que é o calor removido da face fria. Pelo princípio a conservação da energia, o calor de entrada é igual ao calor de saída mais a energia elétrica gerada, PTEG. Logo,

$$\eta = \frac{P_{TEG}}{Q_H} = \frac{P_{TEG}}{Q_c + P_{TEG}}$$

Equação 25

Eficácia:

A eficácia ou a eficiência térmica de um permutador (ϵ) representa o rácio entre o calor absorvido, $Q_{exhaust}$ e o calor máximo que teoricamente pode ser absorvido, $Q_{exhaust\ available}$. É dada pela seguinte expressão:

$$\epsilon = \frac{Q_{exhaust}}{Q_{exhaust\ available}} = \frac{T_{exh\ in} - T_{exh\ out}}{T_{exh\ in} - T_{water\ in}}$$

Equação 26

4.4 Procedimento de teste

De forma a cumprir com as normas de segurança do laboratório e garantir que todos os passos necessários para a realização de cada teste são cumpridos, realizou-se um *Checklist*. Devido ao facto de ser necessário desempenhar, ao longo do decorrer dos testes, tarefas em simultâneo, para cada teste foi necessário a presença de pelo menos 1 pessoa a assistir.

Segurança

1. Colocação de 2 extintores nas proximidades;
2. Inspeção visual de motor freio e protótipo, garantindo a ausência de peças soltas e líquidos inflamáveis;
3. Medidor de temperatura digital junto ao freio do motor (Tmax admissível de 100°C);
4. Abrir portas e janelas e ligar todos os ventiladores para o exterior e para arrefecimento de freio e radiador;

Arranque

1. Ligar Freio a 170W;
2. Ligar conexões de sistema de recolha e tratamento de dados;
3. Correr *softwares* ao mesmo tempo;
4. Ligar e aquecer motor a 2000 rpm até parâmetros normais de funcionamento;
5. Ligar e medir caudal de água para arrefecer faces frias dos módulos termoelétricos;
6. Verificar eventuais maus funcionamentos ou fugas de fluidos em todo o sistema;

Teste

1. Primeiro *target* de motor é 3500 RPM a 35% de TPS;
2. Aguardar valor de tensão estabilizar;
3. Verificar temperaturas do motor e freio;
4. Segundo *target* de motor 2000RPM a 35% de TPS;
5. Aguardar valor de tensão estabilizar;
6. Verificar temperaturas do motor e freio;

(Nota- estes valores são apenas de referência, no decorrer dos testes, devido a diferentes circunstâncias, parâmetros a testar ou limitação de temperaturas de motor ou freio, podem ser alteradas.)

Fim do Teste

1. Encerrar softwares ao mesmo tempo;
2. Reverter todas as etapas na parte de arranque;
3. Gravar todos os ficheiros gerados;
4. Aplicar correção de intervalo de tempo entre os diferentes ficheiros gerados (ver anexo 1);
5. Correr Matlab® e analisar dados e gráficos gerados;



Figura 48 – Foto de realização de um teste

5 TESTES EXPERIMENTAIS

Neste capítulo pretende-se expor alguns dos muitos testes que foram realizados ao longo da Dissertação, dando, naturalmente, destaque aos mais relevantes e com resultados mais promissores. Devido ao elevado número de testes, a explicação/exposição dos testes é desenvolvida com mais profundidade nos primeiros testes, sendo que nos seguintes, se faz referência aos pontos mais importantes, quando necessário, ou para assinalar mudanças ou melhorias relevantes. Os fluidos não condensáveis e a sua escolha, já foram abordados anteriormente (ver capítulo 3.2.2). O fluido de trabalho foi introduzido no início dos testes e não foram registadas fugas durante os testes (capítulo 3.2.1).

As variáveis assumidas como constantes no decorrer de todos os testes são apresentadas na seguinte tabela:

Tabela 3 – *Constantes*

Variáveis consideradas constantes:		
Variável	Valor	Unidades
Caudal total da água	18,08	[l/min]
Número de placas arrefecedoras	12,00	[unidades]
Calor específico da água (25°C)	4,18	[kJ/kg.K]
Calor específico dos gases de escape (800 K)	1,10	[kJ/kg.K]
Massa volúmica da água líquida (25°C)	997,05	[kg/m ³]
Massa volúmica do combustível	750,00	[g/l]
Calor específico do ar	0,29	[kJ/kg.K]

5.1 Azoto

O primeiro GNC utilizado nos testes foi o azoto. Este fluido já tinha sido testado em trabalhos anteriores, não sendo o GNC mais relevante em estudo nesta Dissertação, pois não é o fluido que proporciona melhor estratificação. No entanto, os testes com azoto serviram para afinar a metodologia de testes e verificar o bom funcionamento do sistema após *setup* e alterações. Finalmente, os testes realizados ajudaram a identificar potencialidades e limitações resultantes da utilização deste fluido que é de mais fácil acesso.

De seguida é descrito um teste realizado com azoto a uma pressão inicial de 14 bar, resultando numa temperatura de saturação inicial ligeiramente inferior a 200°C, como exemplo. A configuração de válvulas utilizada neste teste foi uma configuração normal, com fluxo ascendente do vapor e com o volume total em utilização (ver capítulo 3.2.6).

O aquecimento do motor foi feito antes do arranque dos *softwares* de teste, ou seja, os testes só foram iniciados e registados após parâmetros normais de funcionamento do motor. O sistema de aquisição de dados, nomeadamente o *software* LabVIEW®, pronto para testes, possibilita a monitorização de parâmetros como a pressão, temperaturas em vários pontos do sistema e tensões.

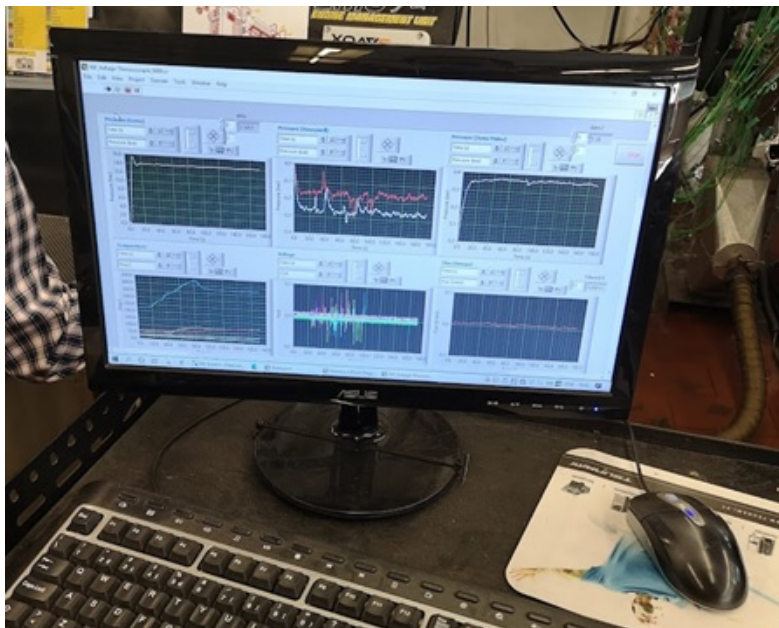


Figura 49 – Fase de aquecimento do motor pré-teste

5.1.1 Motor

Os dados como os parâmetros de funcionamento do motor foram obtidos a partir do *software* ECUMaster®, de forma a conseguir avaliar ao longo do tempo vários parâmetros, como por exemplo valores de rotação e TPS (posição de acelerador). Na imagem seguinte consegue-se ver a variação destas variáveis ao longo do teste:

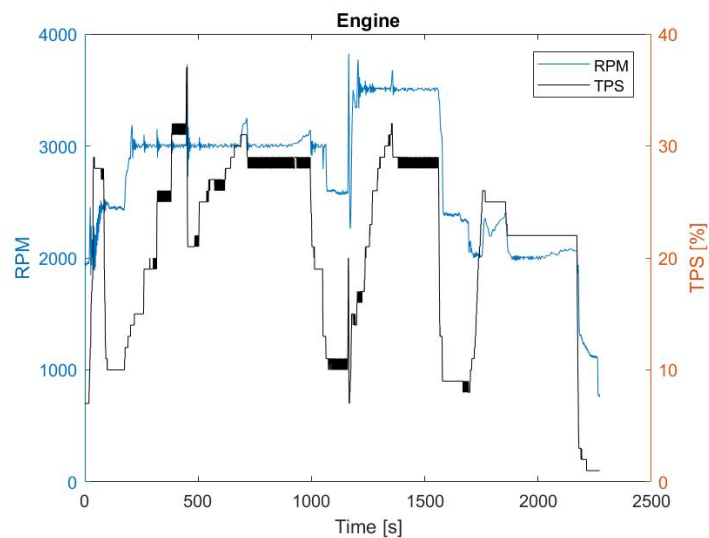


Figura 50 – RPM e TPS em função do tempo

Inicialmente aqueceu-se o motor até obter parâmetros de funcionamento normal (não se encontra contemplado na figura 50). Durante o teste, procurou-se inicialmente atingir a rotação de 3000 RPM, seguida de 3500 RPM e 2000 RPM (representado por linhas azuis). As variações de TPS (representado por linhas pretas) são as que foram executadas através da operação manual da manete de controlo da aceleração do motor (posição do *throttle*).

Na figura 51, está um exemplo do primeiro regime testado, a 3000 RPM, que aconteceu desde aproximadamente 200 segundos até pouco antes dos 1000 segundos. À esquerda podemos ver o controlador e, à direita, vemos o software ECUMaster®. No controlador temos nas primeiras duas linhas o *target* de rpm e a rpm atingida. Conseguimos ainda monitorizar o binário e a potência do motor (nas últimas duas linhas respetivamente).

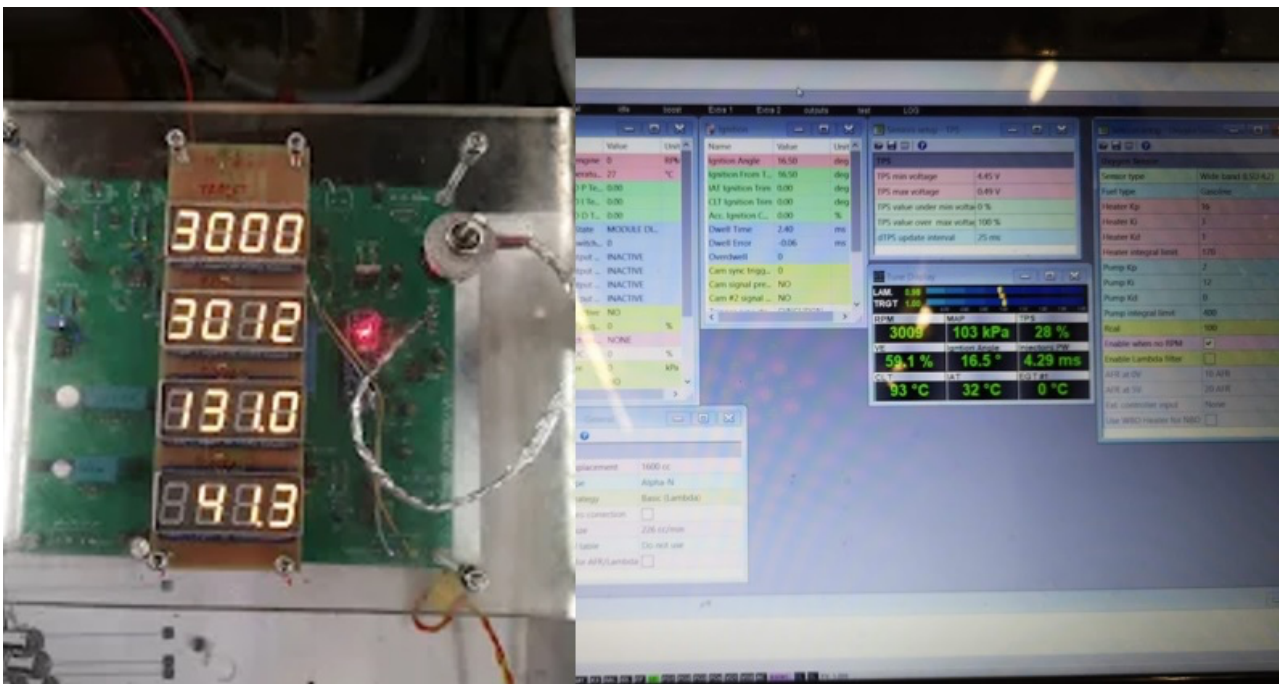


Figura 51 – Primeiro regime de funcionamento do motor em teste

O regime de funcionamento do motor influencia o caudal e a temperatura dos gases de escape, o que vai influenciar a quantidade de vapor gerado e a pressão no interior do protótipo. Um fator limitador neste teste foi o excesso de temperatura verificado no freio do motor, que não permitiu o prolongamento do mesmo, principalmente em regimes de funcionamento do motor mais elevados.

5.1.2 Eficácia do permutador de calor

A quantidade de calor disponível para a produção de energia elétrica corresponde ao calor absorvido pelo sistema e é proporcional à diferença de temperatura entre a entrada e a saída dos gases de escape, para um dado caudal mássico (potência térmica absorvida). A seguinte imagem permite, em primeiro lugar, confirmar o funcionamento do sistema, permitindo verificar uma diferença entre a temperatura dos gases à entrada e saída do sistema, provando a existência de absorção de algum calor ao longo do tempo. A área entre os dois gráficos indica a potência térmica absorvida pelo sistema e é determinante na eficácia. Para que a eficácia no limite fosse 100%, a temperatura de saída dos gases de escape teria que ser igual à temperatura do fluido de trabalho no interior do sistema. Assim, em teoria, todo o calor disponível dos gases de escape teria sido absorvido pelo sistema.

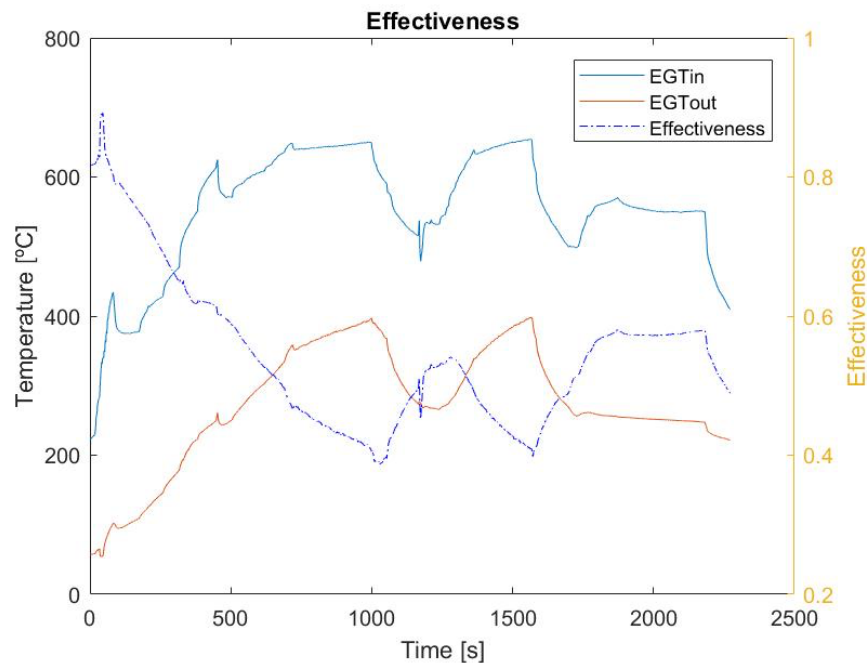


Figura 52 – temperatura dos gases de escape e eficácia

Analisando a figura 52, verificou-se que eficácia foi máxima na fase inicial, antes do primeiro *Target de setting* do motor (3000RPM), onde as temperaturas de escape eram relativamente baixas, sendo a fase em que a diferença de temperatura entre os gases à entrada e saída foram mínimas. A partir do momento que se aumentou o TPS para aumentar a rotação do motor para 3000 RPM e o binário produzido, a curva mostrou uma tendência negativa. Um pouco antes do segundo 1000 foi feita uma breve redução para 2500 RPM, aliviando também a carga do freio. Este alívio momentâneo, provocou uma menor produção de gases de escape e a menor temperatura (e ΔT menor), que fez com que um sistema anteriormente sobrecarregado conseguisse absorver mais calor disponível. Este fenômeno pode ser verificado através da inversão da tendência da curva da eficácia. Assim que se fez aumentar o regime do motor novamente, a eficácia voltou a descer. Para alcançar o último *setting* de potência testado, 2000 RPM, reduziu-se novamente a carga do freio e TPS (segundo 1600), tendo acontecido o mesmo fenômeno referido anteriormente, aumentando a eficácia. Apesar disso, as 2000 RPM provou ser o mais indicado para obter uma eficácia relativamente estável.

O sistema em análise aparenta ter dificuldades em absorver uma percentagem considerável de calor disponível para regimes de motor mais elevados. Em breves alívios de regimes do motor, verifica-se um aumento da eficácia resultado da diminuição do ΔT , graças ao aumento momentâneo de capacidade de absorção de calor por parte do permutador de calor. No entanto, eficácias abaixo dos 50% são bastante baixas, sendo que o evaporador absorve muito menos calor do que seria de esperar. O motivo para este comportamento poderá estar ligado à possibilidade de se ter atingido o fluxo de calor crítico de aquecimento do fluido, que causa a mudança de um regime de *pool boiling* normal para um regime de *film boiling*, em que dada a elevada temperatura das paredes se cria um filme de vapor junto à parede que dificulta o acesso do líquido a esta. Isto causa uma queda abrupta na transferência de calor por ebulição. Evidências para a possibilidade de este problema estar a ocorrer são apresentadas de seguida

5.1.3 Análise de temperaturas e ativação dos TEG

A geração de vapor no evaporador começou aproximadamente aos 100 segundos do teste, como se pode verificar pela linha amarela referente à temperatura do coletor de vapor inferior (figura 53). A temperatura de saturação correspondeu à temperatura esperada para a pressão atingida. Analisando as temperaturas do evaporador, verificam-se temperaturas elevadas em algumas zonas do mesmo, podendo ser esse o motivo da dificuldade de absorção de calor. A temperatura da base do evaporador (onde deve estar água líquida representada pela linha azul), aproximou-se da temperatura do vapor em regimes de motor mais elevados, o que indica que a água se encontra perto da temperatura de ebulição devido à mistura do fluido. Pode também estar a ocorrer um fenómeno designado de efeito de *Leidenfrost*, em que se atinge o fluxo de calor crítico e o regime de “*film boiling*”. Este fenómeno ocorre por haver excesso de calor, formando-se uma película de vapor que isola o líquido da parede, reduzindo drasticamente a taxa de vaporização.

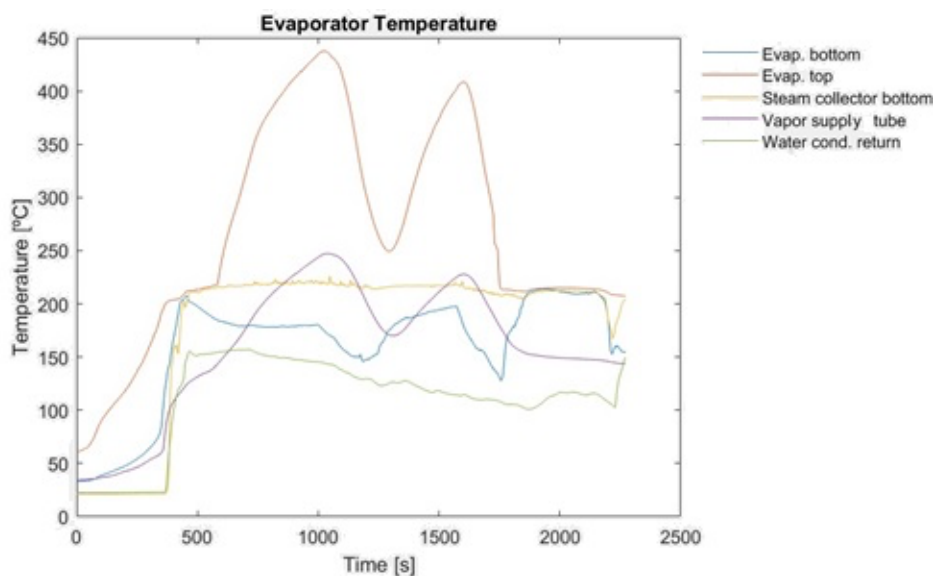


Figura 53 – Temperaturas no evaporador

Como já foi referido, o protótipo em análise tem 3 blocos, cada um com 2 níveis, totalizando 6 níveis, com 8 TEG cada um (ver capítulo 3.1). Devido aos regimes elevados do motor conseguiu-se, com este teste, ativar todos os níveis, com maior produção de potência elétrica nos níveis mais abaixo e menor nos níveis mais acima (ver anexo 2). De facto, o bloco 1 (2 primeiros níveis, ver capítulo 3.1 e capítulo 3.2.9), é o primeiro a estar em contacto com o vapor proveniente do evaporador, e por isso, não só é o primeiro a ser ativado, como também o que tem mais contacto com o vapor durante todo o

funcionamento do sistema. Assim, como se pode observar no Anexo 2, apesar de todos os níveis terem sido ativados, os níveis superiores tiveram uma produção de potência elétrica marginal comparativamente aos níveis inferiores, indicando a existência de alguma estratificação. Verificou-se, como era de esperar, um comportamento idêntico dos TEG em relação aos seus recíprocos. No entanto, verificou-se uma assimetria, isto é, os TEG da parte direita do condensador, tiveram uma produção de potência elétrica superior, quando comparados com a parte esquerda. Este facto teve tendência para se agravar ao longo do teste e indica que o vapor esteve mais presente na parte direita do condensador. Este fenómeno terá que ser analisado nos seguintes testes, mas poderá ter que ver com o imprevisível comportamento de interação entre os fluidos em jogo, resultando numa mistura de fluidos (vapor e azoto) devido à insuficiente estratificação, ou até com a conceção do protótipo.

Relativamente às temperaturas, observando a figura 54, pode-se verificar que previsivelmente, foram mais elevadas nos blocos mais abaixo (B1 medido entre nível 1 e nível 2). Em cada um dos blocos, a temperatura foi também, por vezes, notoriamente mais elevada na parte inferior dos mesmos quando comparada com a parte superior. A temperatura do Bloco 3 foi muito baixa, o que leva a concluir que não houve potência térmica absorvida suficiente para que o vapor chegasse a esse nível.

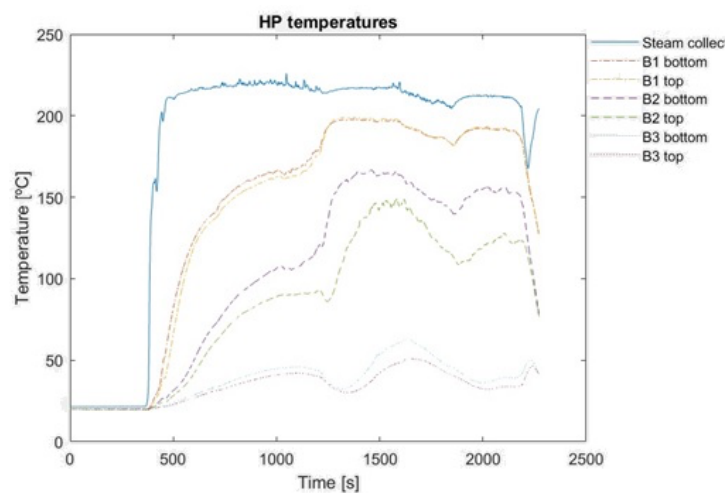


Figura 54 – Evolução da temperatura das faces quentes das fileiras de módulos dos vários blocos

É curioso verificar que apesar de o bloco B1 se aproximar, nenhum deles atingiu a temperatura do vapor, o que indica que, apesar de ter havido alguma estratificação, esta não foi absoluta. De facto, o vapor é mais leve que o azoto, concluindo-se, mais uma vez, que provavelmente existiu alguma mistura

entre o azoto e o vapor, impedindo a temperatura das faces quentes dos TEG de atingirem a temperatura do vapor saturado, limitando a sua produção de potência elétrica.

A tensão gerada (Capítulo 2.3.1) é tanto maior quanto maior for a diferença de temperatura entre faces (quente e fria). A tensão registada e o valor da resistência permitem chegar a uma potência térmica. Na figura 55, expõe-se as potências elétricas alcançadas por bloco e a potência total, que é a soma da potência dos três blocos.

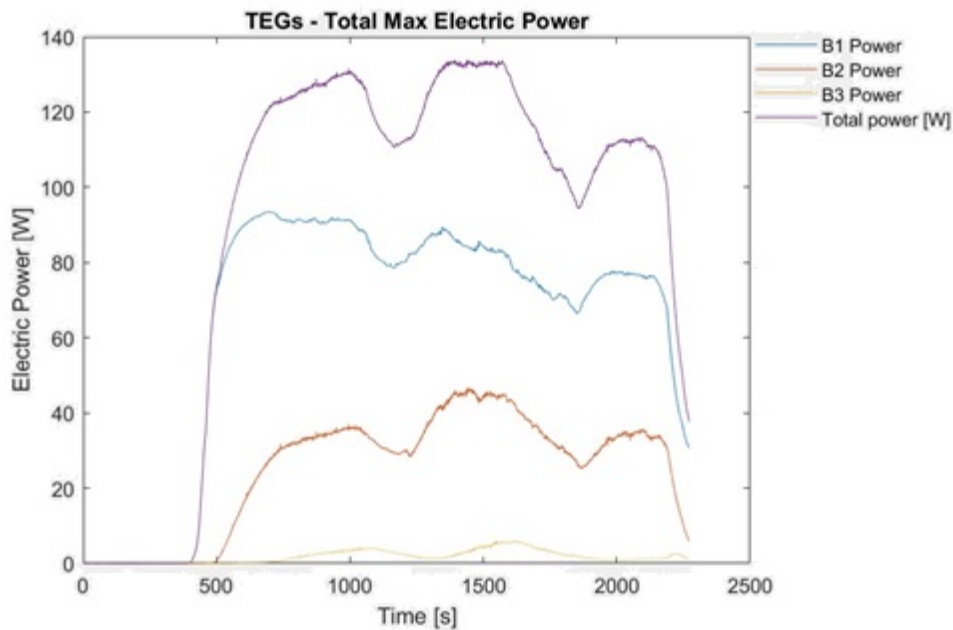


Figura 55 – Potência elétrica

Para regimes de motor mais elevados, apesar da eficácia do permutador ser mais reduzida, a produção de potência elétrica beneficia significativamente em todos os níveis e blocos, tendo atingido 135 W neste teste. Apesar disso, o contributo do bloco 3, para o resultado obtido, foi marginal.

5.1.4 Eficiência termoelétrica

A eficiência termoelétrica expressa a relação entre a potência térmica absorvida pelo sistema e a potência elétrica gerada pelos TEG (capítulo 2.3.5). A figura 56 representa a eficiência registada durante o decorrer do teste.

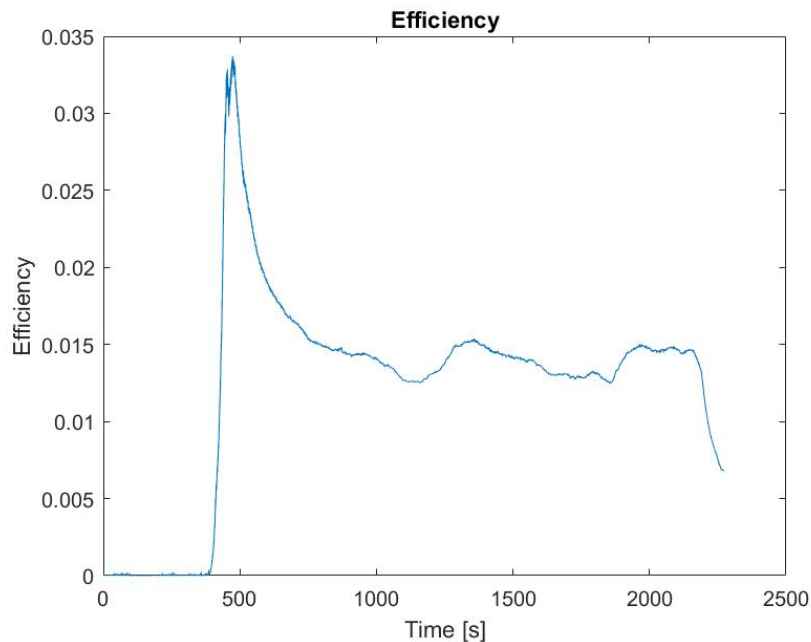


Figura 56 – Eficiência

O pico inicial verificado, justifica-se com o início de produção de vapor por parte do evaporador o que provocou um repentino aumento do diferencial de temperatura entre faces dos TEG. Quando a temperatura das faces estabilizou, a eficiência baixou e manteve-se sempre próxima dos 1,5%, bastante abaixo da eficiência máxima dos TEG utilizados (cerca de 5%, capítulo 3.2.9). A explicação tem, provavelmente, que ver com o facto de tanto a temperatura do vapor como, ainda menos, a temperatura das faces quentes, terem estado relativamente longe de atingir os 250°C, simultaneamente temperatura máxima operacional e temperatura de maior eficiência dos TEG. Uma maior absorção de calor para que a fração do sistema que está ativa seja maior é fundamental para melhorar o resultado. Pressões iniciais mais altas, conseqüentemente, temperaturas de saturação mais elevadas, juntamente com uma melhor estratificação sem mistura de fluido de trabalho com GNC, são fatores que podem contribuir para um aumento de eficiência dos TEG.

5.1.5 Pressão e temperatura de saturação

Como já foi abordado anteriormente, o caudal de gases de escape troca calor com a água do evaporador, aquecendo-a, originando vapor. O protótipo em análise, inicialmente a 14 bar e temperatura de saturação ligeiramente inferior a 200°C, com a introdução de vapor, tende a aumentar a sua pressão interna (ver capítulo 3.2.1). Na figura 57 observa-se a variação de pressão, em função das temperaturas dos gases de escape e da produção de vapor.

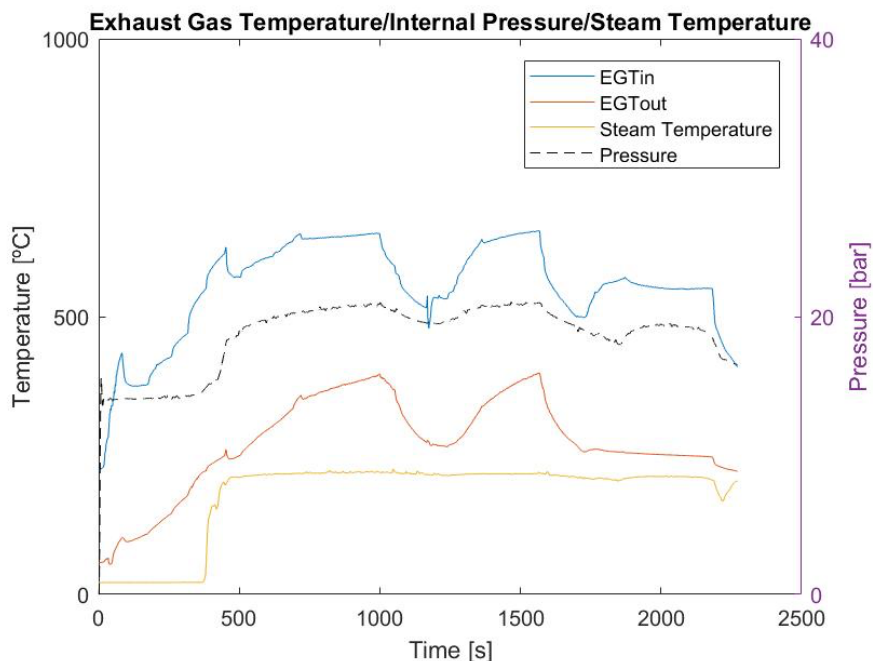


Figura 57 – Pressão gases e vapor

Como se pode verificar, assim que se deu a produção de vapor, a pressão subiu dos 14 bar para aproximadamente 20bar, sendo este fator que motivou a subida da temperatura de saturação verificada acima dos 200°C, cerca de 220°C. Para diferentes cargas térmicas e regimes do motor, a pressão manteve-se relativamente estável.

Uma forma de otimizar a eficiência dos TEG e, conseqüentemente, aumentar a produção de potência elétrica, como já vimos, pode ser através do aumento da temperatura de saturação por via do aumento de pressão interior do protótipo durante o seu funcionamento. Este pode ser obtido através do aumento da pressão inicial, ou da diminuição do volume do sistema, fechando o acesso ao vaso de expansão.

5.2 Hélio

O hélio, por ser menos denso que o vapor, poderá ser um GNC promissor, com o sistema a funcionar em configuração normal (capítulo 3.2.6). Este facto, em teoria, contribuirá para a melhor estratificação de gases no interior do protótipo, diminuindo a mistura entre fluidos.

O gás foi inserido lenta e progressivamente através da válvula V1, sob pressão, permitindo, simultaneamente, a saída do azoto. Seguidamente, foi pressurizado até aos 30 bar de pressão de teste inicial. Os testes efetuados iniciaram-se à pressão inicial indicada, sendo o protótipo, sucessivamente despressurizado para cada um dos testes que se seguiram. Foi também testado a configuração de válvulas (válvula V2 fechada) que permite a diminuição de volume interno do protótipo referido anteriormente, potenciando o aumento de pressão durante o teste. Este processo está limitado pela pressão máxima operacional do protótipo, sendo que a pressão inicial desta configuração também estará limitada (a válvula de segurança abre aos 60 bar).

No decorrer deste subcapítulo expõem-se alguns dos testes realizados, assim como se retiram algumas conclusões.

5.2.1 Teste 30 bar

Com pressão inicial de 30 bar, o ciclo de motor utilizado, ou seja, o regime de funcionamento do motor está exposto na seguinte imagem:

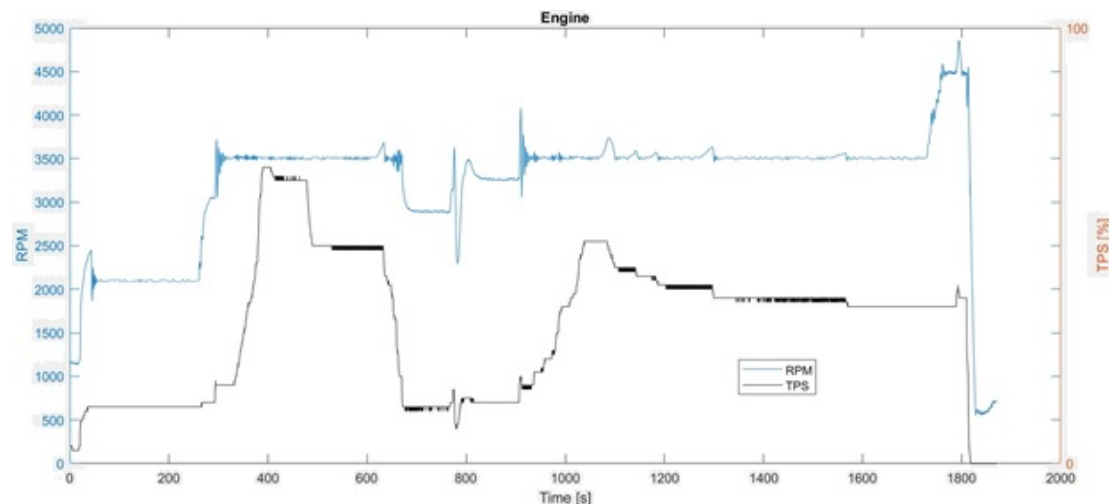


Figura 58 – RPM e TPS teste 30 bar

Os primeiros 300 segundos correspondem ao aquecimento do motor até parâmetros normais de funcionamento. Após aquecimento, o *setting* de potência procurado foi os 3500 RPM. Aos 650 segundos, verificou-se um sobreaquecimento do freio do motor, pelo que se aliviou a carga durante alguns segundos. Existe também algum ruído indesejado no gráfico do regime do motor.

A eficácia do permutador de calor teve, como era de esperar, pelos testes anteriormente realizados, um comportamento semelhante (capítulo 5.1.2), devido ao regime do motor elevado. Desta forma, o permutador demonstrou novamente dificuldades em absorver uma percentagem considerável de calor disponível nestes regimes.

A pressão interna do sistema, evoluiu a partir dos 30 bar até estabilizar ligeiramente abaixo dos 50 bar.

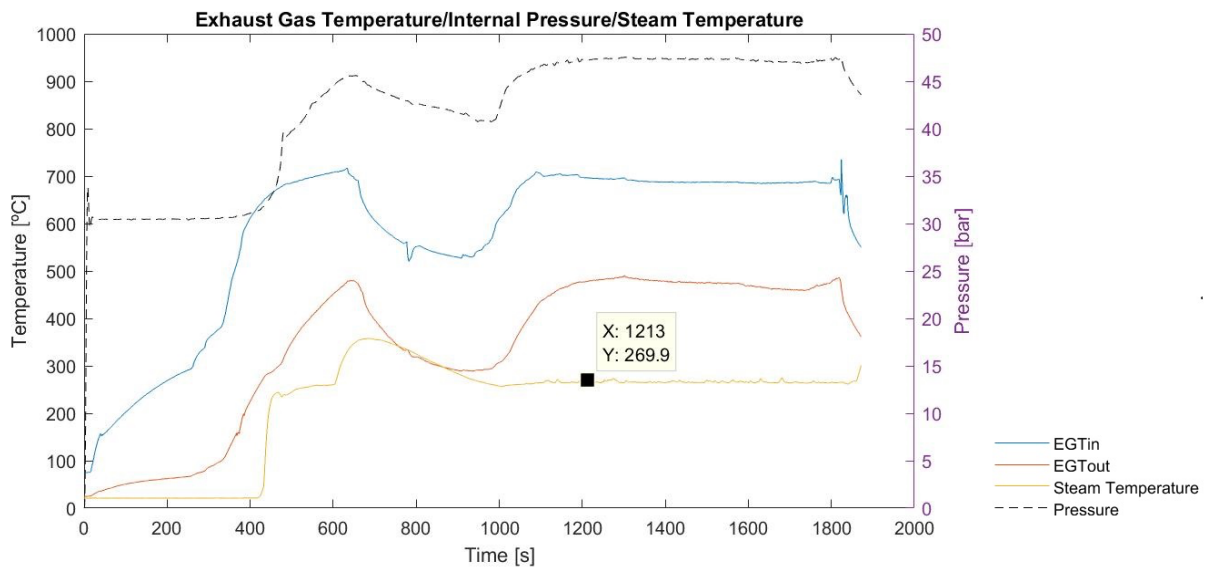


Figura 59 – Pressão interna, temperatura de vapor e gases de escape

A temperatura de vapor registada pelo termopar ultrapassou os 250°C tendo estabilizando perto dos 270°C. Apesar disso, a temperatura máxima registada pela face quente dos TEG nunca ultrapassou os 250°C (temperatura máxima operacional e ótima de funcionamento dos TEG), tendo estabilizado nos 240°C. As temperaturas do bloco 1, os dois primeiros níveis em contacto com o vapor estão presentes na figura 60.

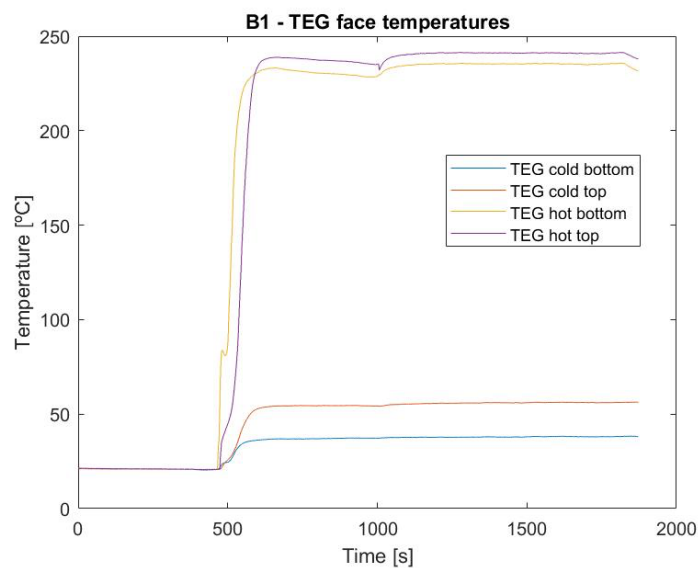


Figura 60 – Temperatura das faces dos TEG nos dois primeiros níveis, no bloco 1

É possível verificar a diferença de temperatura entre as duas faces frias: a água entra a temperatura ambiente para as placas arrefecedoras e sai já mais quente, confirmando a remoção de calor pretendida.

Havendo uma estratificação correta entre fluido de trabalho (vapor de água) e o GNC (hélio), era espectável que o vapor alcançasse de forma faseada e progressiva, de baixo para cima, cada um dos blocos, começando no bloco 1. Analisando os dados obtidos, verificamos que a partir da estabilização do motor no regime das 3500 RPM, deu-se uma subida brusca do bloco 1. Assim que a temperatura do bloco 1 estabilizou, deu-se então uma subida brusca do bloco 2.

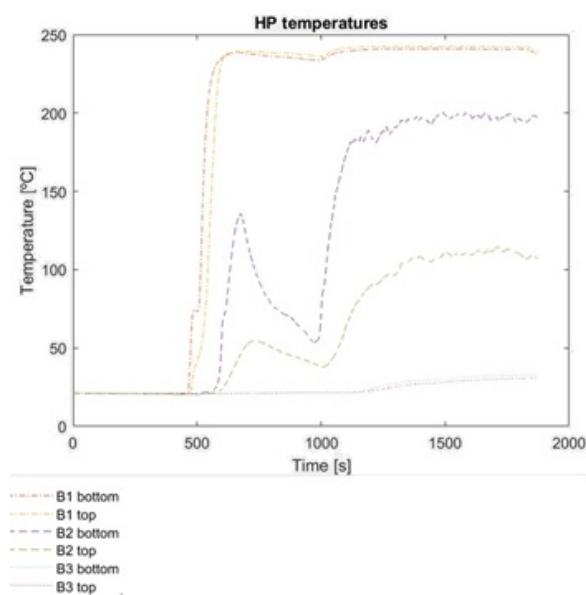


Figura 61 – Temperatura dos blocos

Infelizmente, como referido anteriormente, o processo foi interrompido ao segundo 650, devido ao sobreaquecimento do freio. No entanto, é possível verificar o fenómeno de subida do vapor novamente por volta do segundo 1000, pouco depois do repetir de aumento de regime de motor. Estes factos indiciam uma melhor estratificação mediante a utilização do hélio como GNC, quando comparado com o azoto.

Devido, possivelmente, à insuficiente carga térmica absorvida, limitada pela temperatura do travão, o vapor não chegou da forma desejada ao bloco 3, situando-se aproximadamente entre o nível 3 e o nível 4.

Relativamente à eficiência termoelétrica registada, esta estabilizou próxima dos 3%, aproximando-se da máxima anunciada pelo fabricante, de cerca de 5%. Esta é uma eficiência média e por isso o valor de 5% apenas seria alcançado se todos os módulos ativos estivessem a funcionar à temperatura máxima.

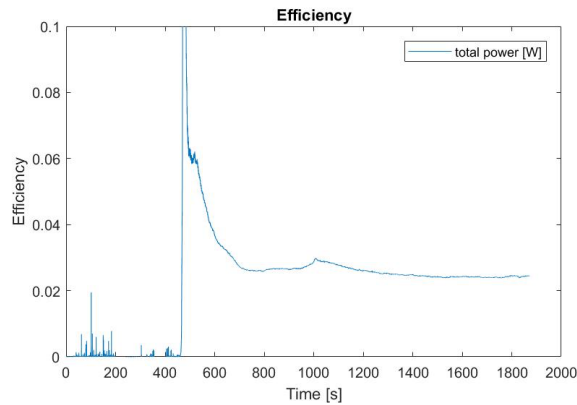


Figura 62 – Eficiência

O pico registado durante brevíssimos segundos, deve-se a erros provocados pela inércia térmica do sistema (o calor que atravessa os módulos demora tempo a chegar à água de arrefecimento, de modo que a medição do aumento da temperatura da água tem um atraso relativamente à medição da tensão gerada), sendo apenas relevante a zona relativa à estabilização do valor. Assim, como era de esperar, com pressão interna do sistema superior, a temperatura de saturação do vapor aumentou, permitindo aos TEG trabalharem numa gama de temperaturas muito aproximada à ótima.

Apesar de todos os TEG terem sido ativados, a potência elétrica máxima gerada pelo nível 6 (o nível superior), foi mais de 10 vezes menor que o verificado no nível 1.

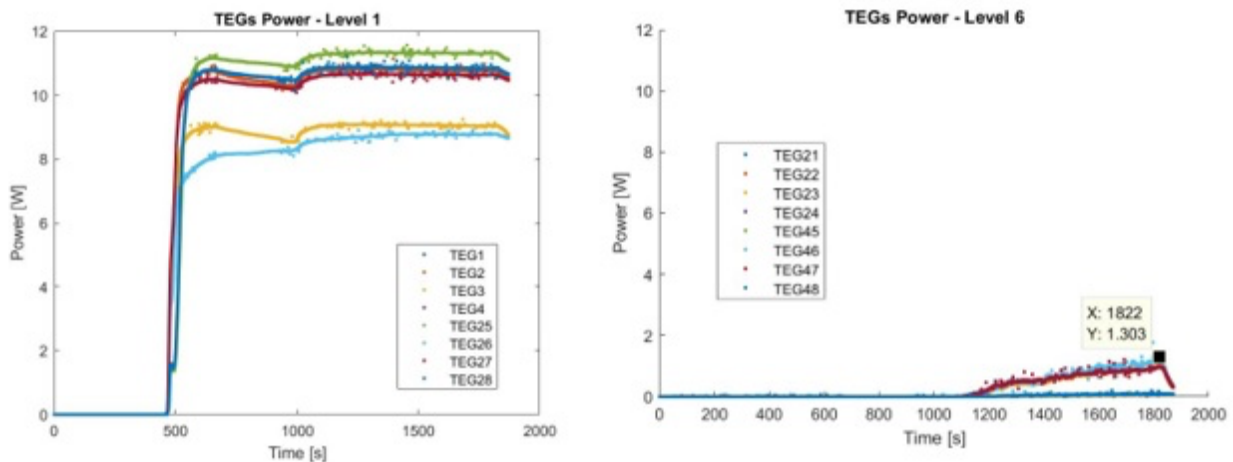


Figura 63 – Potência elétrica nível 1 comparada com nível 6

Como se pode verificar pela imagem, existe também neste teste uma assimetria na produção dos TEG. Este fenómeno é menos pronunciado do que na utilização de azoto como GNC, mas é tanto

maior quanto mais acima for o nível considerado, como se pode verificar, consultando o anexo 3. Mais uma vez, os TEG do lado direito do protótipo obtiveram uma produção de potência elétrica ligeiramente superior.

A potência elétrica máxima gerada pelos TEG foi de quase 250 W. Comparando com o regime de potência utilizado de 3500 RPM, quando o azoto foi utilizado (com estabilização de potência elétrica máxima a 135 W), é um aumento considerável. Pressões mais elevadas, temperatura de saturação de vapor mais aproximadas do funcionamento ótimo dos TEG e melhor estratificação poderão ser fatores que contribuíram para este aumento.

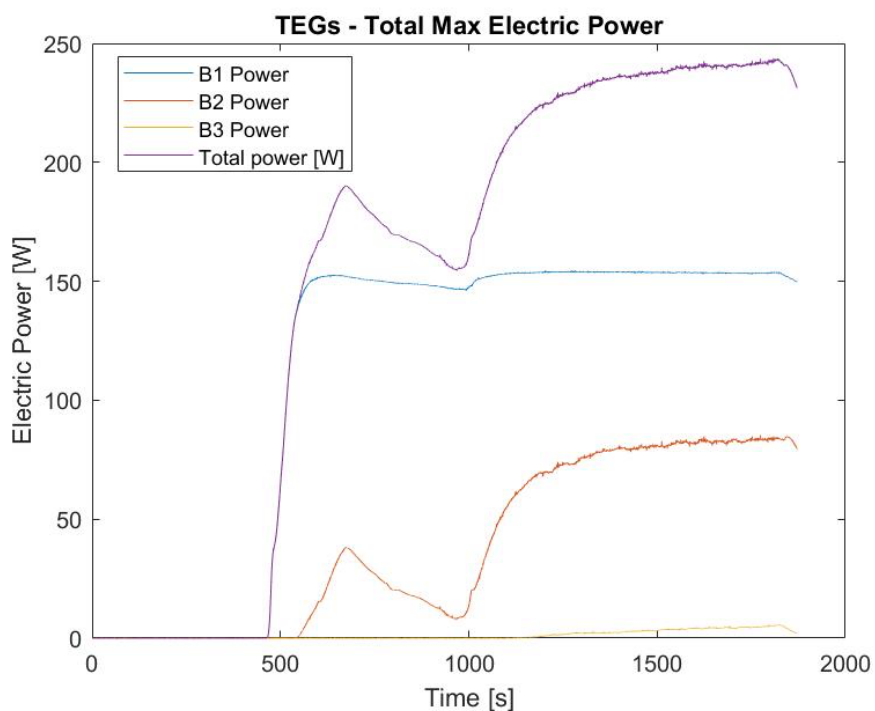


Figura 64 – Potência elétrica total e por blocos

Apesar disso, o potencial de potência elétrica do sistema está longe do seu máximo, sem o contributo de metade dos níveis disponíveis. A limitação da temperatura do freio, a falta de eficácia do permutador de calor ou a quantidade de água disponível no evaporador em funcionamento, podem ser razões que explicam o *déficit* de vapor nos níveis superiores.

5.2.2 Teste 20 bar

Depois de uma despressurização parcial do sistema, chegou-se à pressão interna inicial de funcionamento de 20 bar. A configuração das válvulas manteve-se normal (capítulo 3.2.6). Ao segundo 170, depois de pré-aquecimento do motor, iniciou-se o teste com cerca de 20% de TPS, a 3500 RPM de *target*. No segundo 400 verificou-se um brusco aumento da temperatura de gases de escape, pressão (30 bar) e iniciou-se a produção de vapor, atingindo-se uma temperatura de vapor próxima dos 240°C, estabilizando a essa temperatura.

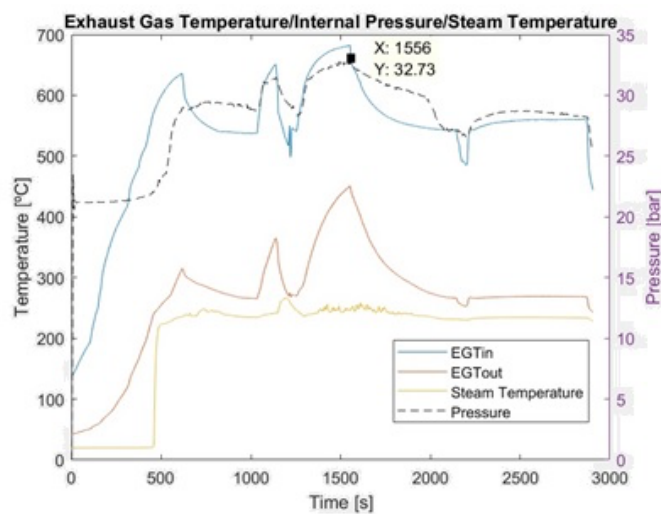


Figura 65 – Pressão, temperaturas de escape e de vapor

No segundo 1000, iniciou-se um aumento da carga sobre o freio, ou seja, de binário produzido, aumentando o TPS para 36% e mantendo o *target* de 3500 RPM. Seguiu-se um aumento de temperaturas e pressões. Infelizmente, um dos ventiladores responsável pelo arrefecimento do freio deixou de funcionar pelo que se teve de aliviar novamente o regime do motor. Ao segundo 1300, após resolução do problema, voltou-se a aumentar o regime do motor com um TPS de 30% e com ligeiramente menos esforço sobre o freio do motor relativamente à tentativa anterior. A pressão atingiu os 32 bar. Finalmente, no segundo 2000, o freio sobreaqueceu e teve que se diminuir a rotação para 2000 RPM, com conseqüente diminuição de pressão e temperaturas referidas.

Quanto à eficácia do permutador de calor, não houve alterações de comportamento relativamente aos testes anteriores.

À pressão de 32 bar, máxima atingida, a temperatura de vapor registada corresponde aproximadamente à temperatura de saturação esperada. Apesar disso, a temperatura da face quente dos TEG dos primeiros níveis ficaram consideravelmente abaixo desse valor. Assim a eficiência termoelétrica dos TEG ficou abaixo da obtida a pressões mais elevadas, nomeadamente do teste anterior, registando um valor médio de 2,8%. As temperaturas da face quente dos TEG do bloco 1, ficaram assim mais longe da sua temperatura ótima de funcionamento.

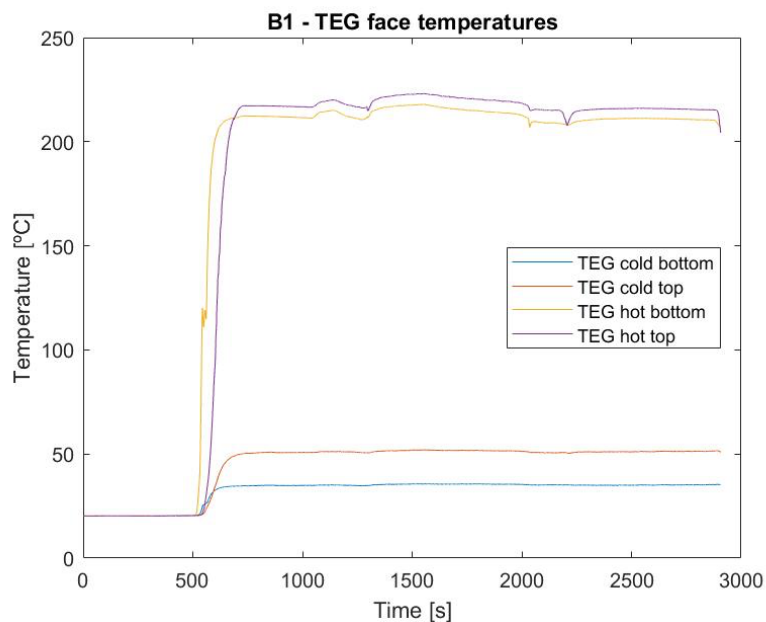


Figura 66 – Pressão, temperaturas de escape e de vapor

A temperatura máxima atingida pela parte inferior do bloco 1, foi de 222°C, valor próximo da temperatura de vapor registada. Na zona inferior do Bloco 2 (nível 3), a temperatura baixou consideravelmente, nunca atingindo os 180 °C. O vapor gerado pelo sistema nunca atingiu o bloco 3, situando-se na zona entre o nível 2 e o nível 3.

Apesar de todos os TEG terem sido ativados, a partir do nível 3 a produção de potência elétrica foi marginal. De seguida, apresenta-se os níveis de TEG que mais contribuíram para a produção máxima dos TEG.

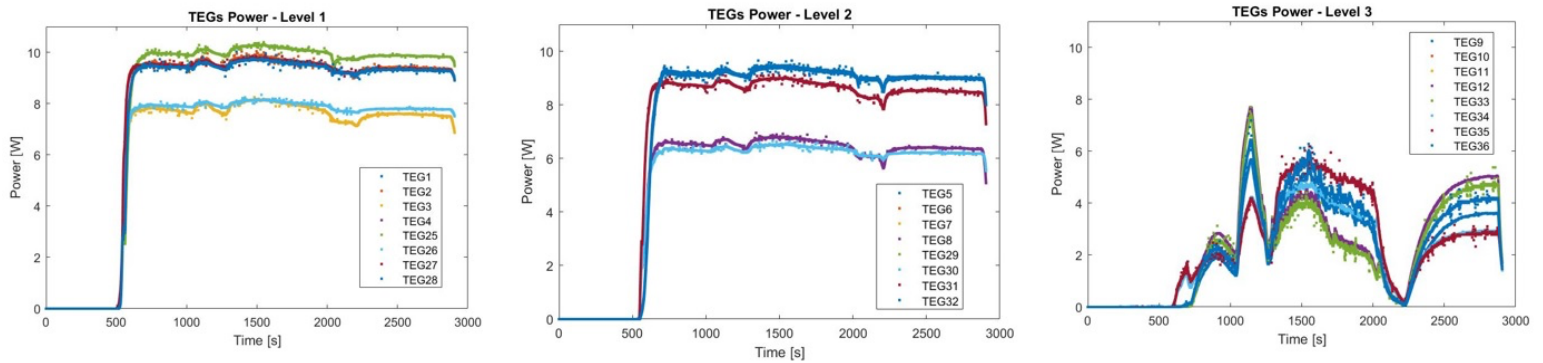


Figura 67 – TEG output do nível 1,2 e 3

Através da análise da figura 67, é possível verificar novamente a assimetria de produção dos TEG dentro de cada nível, que pode ser confirmada através de consulta do anexo 4 e análise de temperaturas de blocos.

A potência elétrica máxima atingida não atingiu os 200 W, já com tendência de estabilização. O pico foi registado no regime de motor mais elevado, antes do sobreaquecimento do freio. Se o sistema de testes tivesse a capacidade de aguentar a carga necessária seria possível aumentar a potência máxima, mas esta dificilmente conseguiria atingir a alcançada a pressões internas superiores.

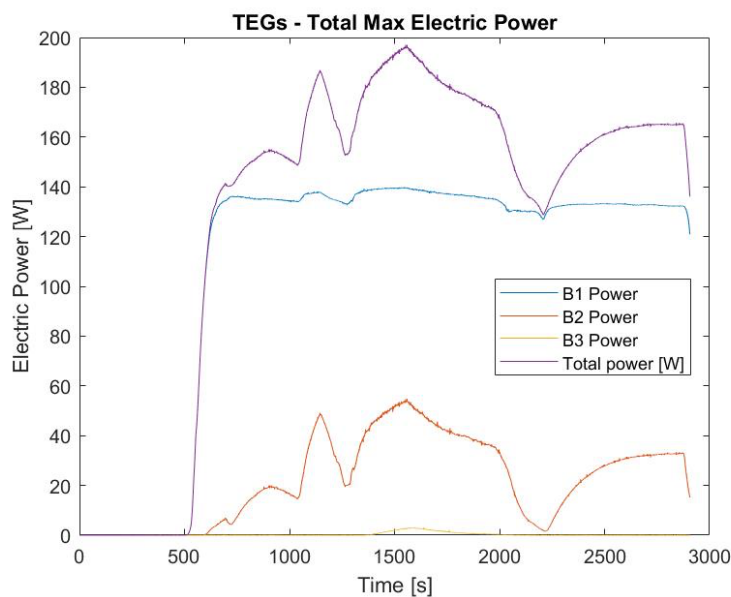


Figura 68 – Potência máxima dos TEG

5.2.3 Teste 11 bar

Antes do início deste teste, realizou-se uma troca de óleo do motor, assim como uma limpeza e lubrificação do freio do motor. De seguida, voltou-se a despressurizar o sistema até à pressão interna inicial de 11 bar. O início do teste foi executado com o motor pré aquecido, com motor a 3500 RPM, cerca de 35% de TPS e binário próximo do máximo possível. A partir do segundo 1050, houve uma redução de TPS, para cerca de 25%, seguida de uma nova redução no segundo 1250. Finalmente, no segundo 1500, testou-se o regime de motor a 2000 RPM e cerca de 30% TPS. Apesar do binário aplicado neste teste, notou-se uma melhoria da capacidade do freio, apresentando temperaturas mais baixas para os regimes utilizados.

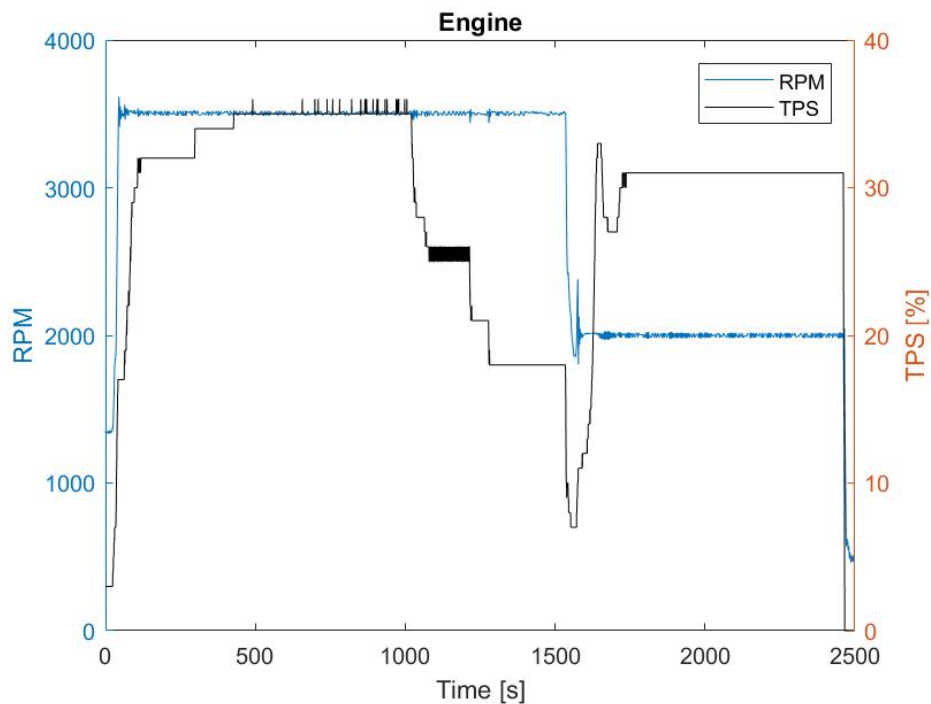


Figura 69 – Regime do motor

A 11 bar e com uma posterior subida de pressão até um máximo de 17 bar, graças ao início de produção de vapor, seria de esperar uma temperatura de saturação do vapor bastante inferior a 250°C e próxima dos 220°C.

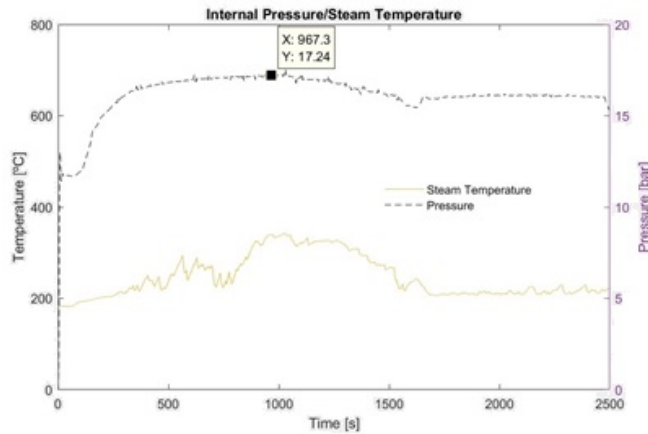


Figura 70 – Comportamento da temperatura e temperatura de vapor registada

Surpreendentemente, o termopar responsável pela monitorização da temperatura do vapor (*steam temperature*, linha amarela da figura 70), registou valores muito acima do esperado. Para além disso, dos 400 aos 1600 segundos, registou-se uma inesperada falta de estabilização da temperatura. Apesar de ter sido o teste com o regime mais elevado de forma mais prolongada até agora apresentado, a partir do segundo 750, esta temperatura e este fenómeno evidenciou-se ainda mais. A localização do termopar pode ter tido influência de transferência de calor por condução, com a possível ausência de condensados a descer nessa zona.

Na figura 71, observa-se o sobreaquecimento do coletor de vapor inferior (linha amarela). Mais uma vez, este fenómeno evidencia a ausência de retorno dos condensados pela zona mais próxima aos gases de escape. Em vez disso, o retorno foi feito preferencialmente pelos tubos laterais (*water cond. return*, representado pela linha verde) provocando a secagem de algumas zonas mais próximas dos gases de escape.

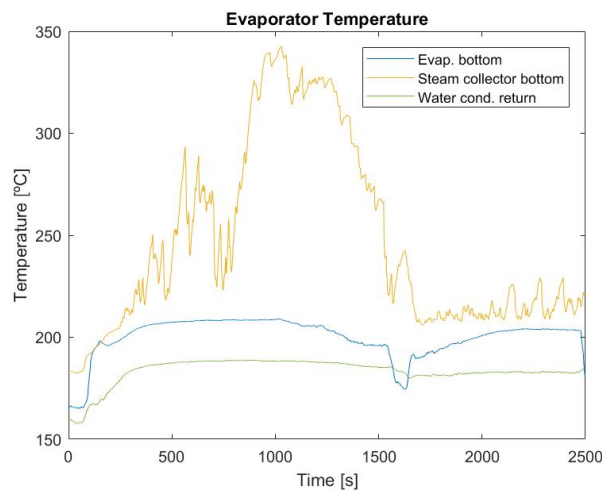


Figura 71 – Temperaturas no evaporador

Analisando agora a temperatura da base do evaporador (linha azul da figura 71), verifica-se que apesar de elevada, esta encontra-se ligeiramente abaixo da temperatura de saturação do vapor a esta pressão. Para além disso, se a zona da base do evaporador não estivesse molhada, devido a fenómenos de condução e devido à proximidade física dos gases de escape, a sua temperatura seria muito mais elevada.

A temperatura da face quente dos TEG mais exposta no protótipo, nunca atingiu os 200°C. A seguinte imagem espelha bem a subida gradual da temperatura de bloco para bloco à medida que o vapor sobe:

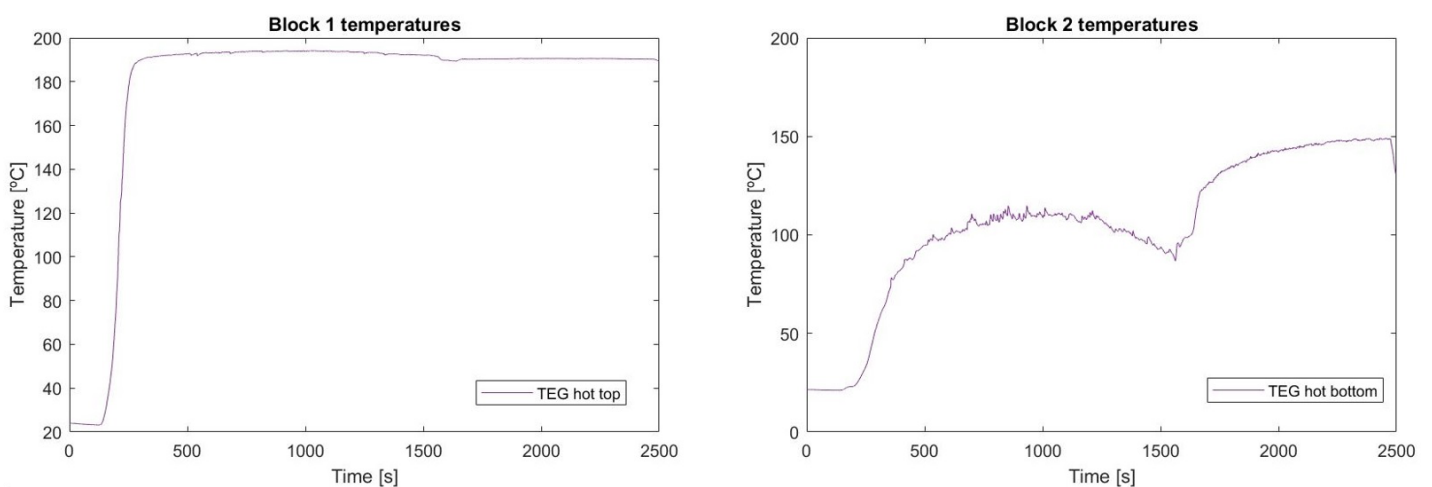


Figura 72 – Temperatura dos TEG nível 2 (esquerda) e nível 3 (direita)

Verifica-se que assim que os TEG do nível 2 (zona superior do bloco 1, ver capítulo 3.2.9) estabilizaram a sua temperatura (300 segundos), os TEG dos níveis 3 contactaram, muito ligeiramente, com o vapor. É interessante verificar que, a redução do regime de motor, aos 1500 segundos, resultou num aumento de produção de vapor e numa nova subida de vapor no sistema, permitindo um aumento da temperatura das faces quentes do nível 3 (parte inferior do bloco 2). Assim, o vapor situou-se mais uma vez, entre o nível 2 e o nível 3. Apesar disso, o nível 3 teve um contacto com o vapor marginal o que se traduziu numa baixíssima produção de energia elétrica.

A eficiência termoelétrica foi, sem surpresas, inferior às verificadas a pressões mais elevadas, devido à temperatura de vapor mais longe da temperatura ótima de funcionamento dos TEG.

Na figura 73 pode-se observar a potência elétrica máxima obtida, nunca ultrapassando os 150 W, assim como o contributo de cada bloco (informação mais detalhada no anexo 5).

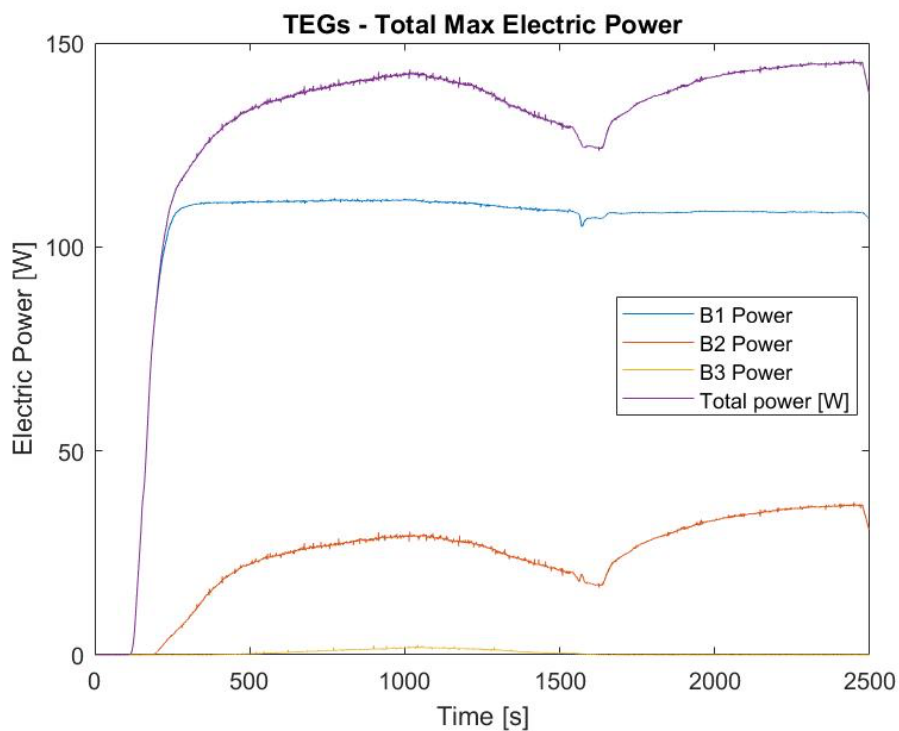


Figura 73 – Contribuição de cada bloco para a potência elétrica

No regime de motor mais baixo, a partir dos 1500 segundos, graças à subida do vapor, coincidente com a diminuição e estabilização da temperatura de vapor registada, verificou-se um aumento de contribuição do nível 3, sendo nesta fase que a potência elétrica máxima foi registada. O bloco 3, a esta pressão teve um contributo muitíssimo baixo.

5.2.4 Teste 8 bar V2 fechada

Após ligeira despressurização, o teste a 8 bar foi feito com uma diferente configuração do sistema. Assim, fechou-se a válvula V2, fazendo assim diminuir o volume interno total do sistema (ver capítulo 3.2.6). Esta diminuição teoricamente permite um aumento mais acentuado da pressão durante o funcionamento do sistema, quando a produção de vapor se iniciar.

Após 170 segundos de aquecimento do motor, aumentou-se o TPS para 35% e 3500 RPM. Aos 1250 segundos de teste, reduziu-se a rotação para 2000 RPM e TPS para 30%.

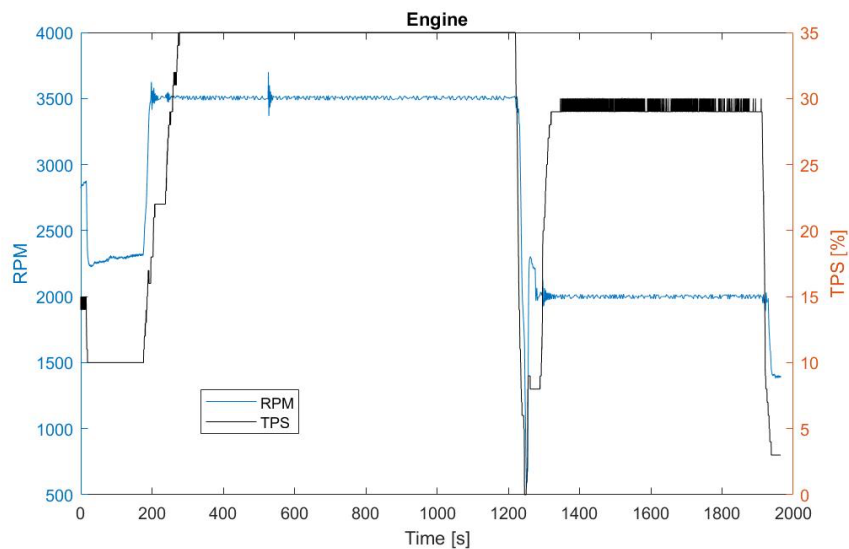


Figura 74 – Ciclo do motor durante teste

O primeiro regime provocou uma criação de vapor no segundo 300, fazendo aumentar bruscamente a pressão interna do sistema para 49 bar. Como esperado, em configuração do sistema com menos volume, o aumento de pressão foi bastante mais pronunciado. Como foi evidente durante todos os testes, regimes elevados provocam maiores temperatura de gases de escape, mais formação de vapor e maior aumento de pressão.

A esta pressão seria de esperar uma temperatura do vapor bastante superior à registada.

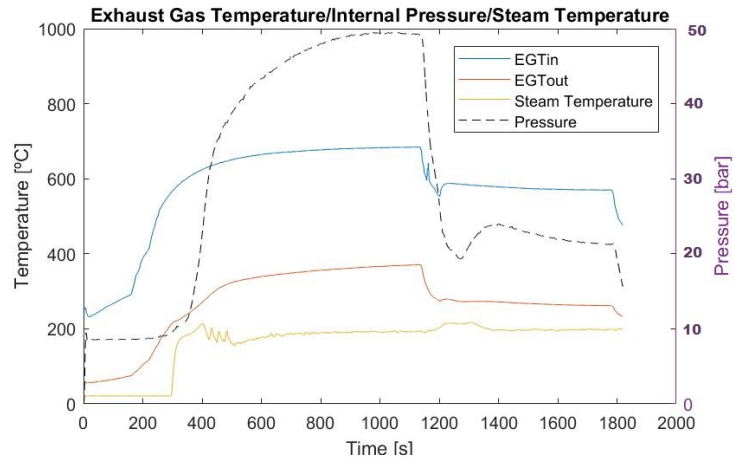


Figura 75 – Pressão, temperaturas de escape e vapor

Devido à relativamente baixa temperatura da face quente dos TEG, a eficiência termoelétrica atingiu apenas 2% no regime de funcionamento mais elevado, sendo que a 2000 RPM estabilizou a 1,4%.

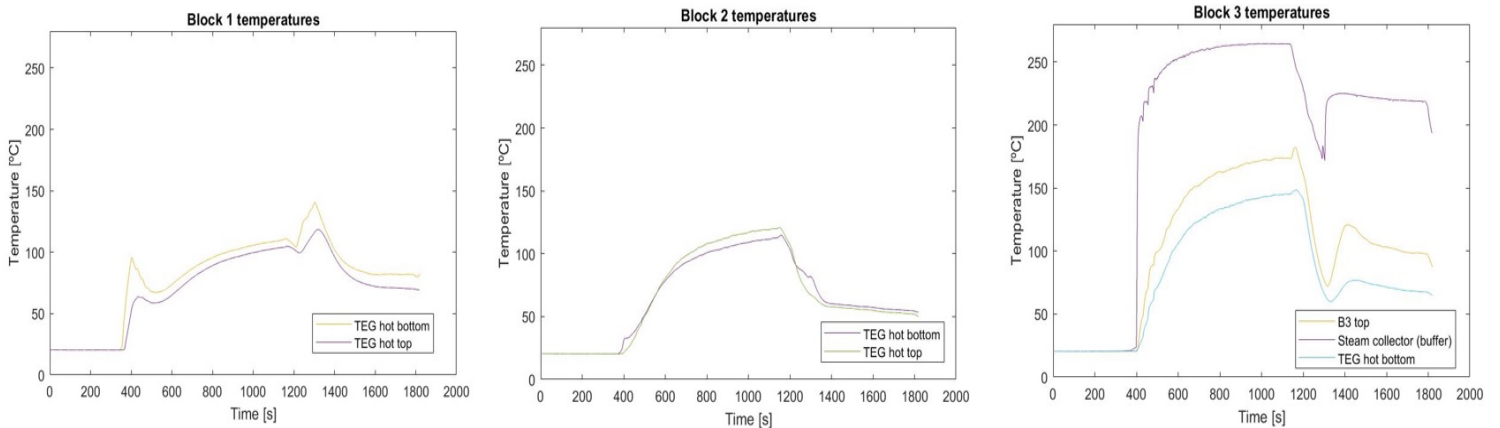


Figura 76 – Temperaturas por bloco

Surpreendentemente, verificou-se uma temperatura muito semelhante entre blocos e muito abaixo da temperatura de saturação de vapor esperada para a pressão interna durante funcionamento. Na verdade, verificou-se até uma maior temperatura no *buffer* (capítulo 3.1), o que indica uma acumulação de vapor na parte superior do protótipo.

Existem várias possibilidades que podem explicar o sucedido. A primeira, é a inversão indesejada do funcionamento, ou seja, o vapor para além de subir pelo tubo vertical, pode também ter-se dirigido inadvertidamente pelo tubo lateral e subido pelo condensador de excesso ou pelo tubo dedicado à descida de água do condensador. No entanto, essa possibilidade não parece provável, pois as temperaturas do condensador de excesso nunca ultrapassaram os 32 graus, nunca sendo ativado. É possível também que a produção de vapor tenha provocado um aumento de pressão demasiado repentina, obrigando o hélio a ocupar a zona do protótipo sem TEG, sendo o condensador ocupado apenas por vapor estratificado de baixo para cima de acordo com a sua temperatura, com o vapor quente em cima. À medida que o condensador, converte o vapor em água, esta escorre arrefecendo os níveis mais abaixo.

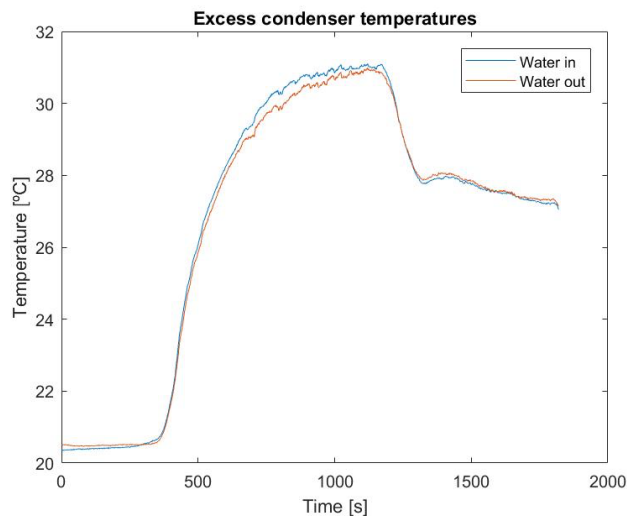


Figura 77 – Temperaturas do condensador de excesso

Uma explicação que não se pode excluir é a possibilidade de existir ar no sistema, formando uma estratificação entre ar (bloco de 2) e vapor (bloco 1 e bloco 3) no condensador. No entanto, os testes realizados com azoto não demonstraram este comportamento na temperatura entre blocos.

Apesar dos fenómenos inesperados, a produção de potência elétrica foi a mais uniforme registada (consultar anexo 6). Com temperaturas das faces quentes dos TEG quase idênticas, devido à utilização de modelos de TEG diferentes entre níveis (ver capítulo 3.2.9), verificou-se uma maior produção de potência elétrica nos 2 níveis superiores (bloco 3). Considerando que nesses níveis, os TEG produzem mais em regimes mais baixos, a maior potência gerada não é surpreendente. De seguida, expõem-se o contributo de cada bloco na potência elétrica gerada.

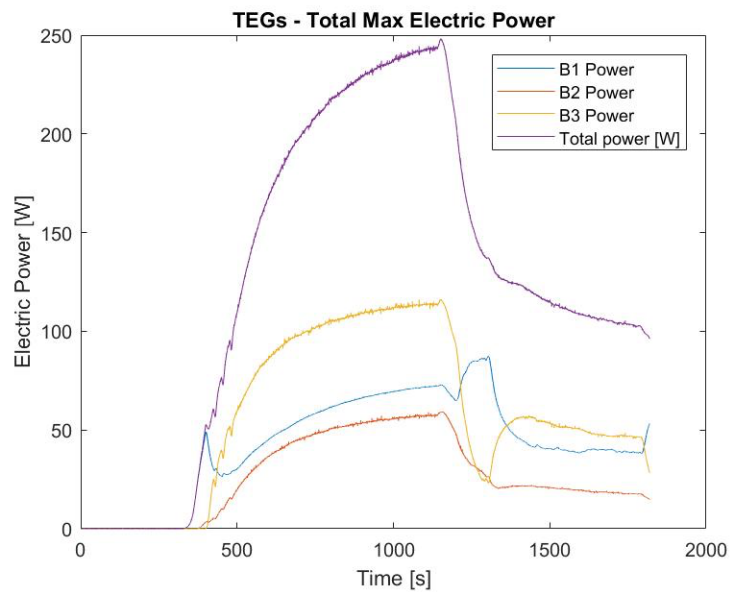


Figura 78 – Contributo dos blocos

No regime de motor mais elevado, a potência elétrica máxima ainda não tinha estabilizado, e ficou a ideia que seria possível ultrapassar ligeiramente os 250 W.

5.2.5 Pressão atmosférica e vácuo

5.2.5.1 Pressão atmosférica

Despressurizou-se o sistema até 0.8 bar, de forma a testar o sistema aproximadamente à pressão ambiente. Desta vez, voltou-se a abrir a válvula V2, de forma a utilizar a totalidade do volume interno do sistema. O regime de motor utilizado foi o da figura 79:

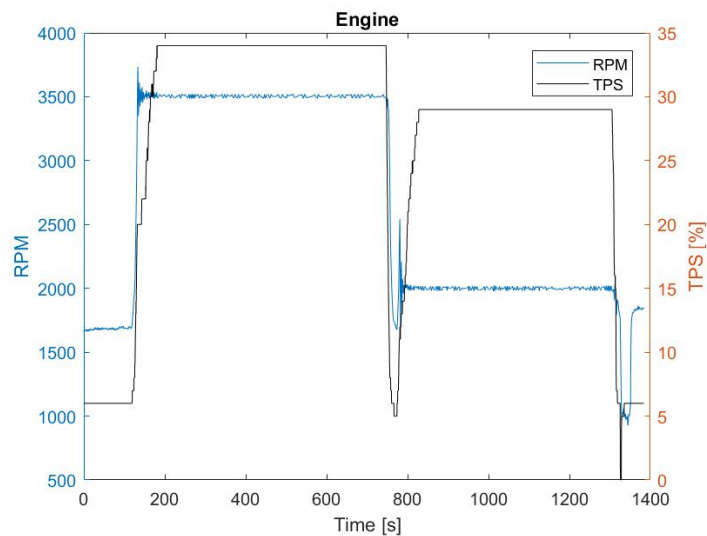


Figura 79 – Regime do motor

Assim, aumentou-se aos 160 segundos o TPS para 34% com target de 3500 RPM e aos 800 segundos para os 20% de TPS e 2000 RPM. Após início de produção de vapor, pouco antes dos 200 segundos, a pressão aumentou, estabilizando perto de 1,6 bar. A figura 80, representa a temperatura de entrada/saída de gases de escape e a potência absorvida.

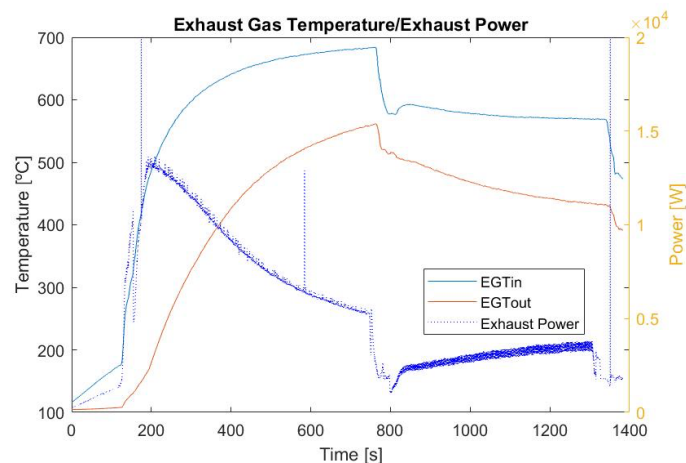


Figura 80 – Temperatura de entrada/saída dos gases de escape e potência absorvida

Como se pode verificar, a potência absorvida foi consideravelmente mais baixa que a verificada nos testes a pressões de funcionamento superiores.

A temperatura de vapor registada foi próxima dos 130°C, correspondendo à temperatura de saturação esperada para esta pressão interna. Para esta temperatura de saturação relativamente baixa, a eficiência termoelétrica não ultrapassou os 1,4%, ou seja, bastante mais baixa que as verificadas a pressões mais altas, como seria de esperar. A eficácia do permutador de calor registou um comportamento idêntico ao registado nos restantes testes.

Avaliando a distribuição de temperaturas na face quente dos TEG e por bloco, nota-se uma progressiva diminuição de temperatura dos níveis mais a baixo para os níveis mais acima e, por isso, uma boa estratificação.

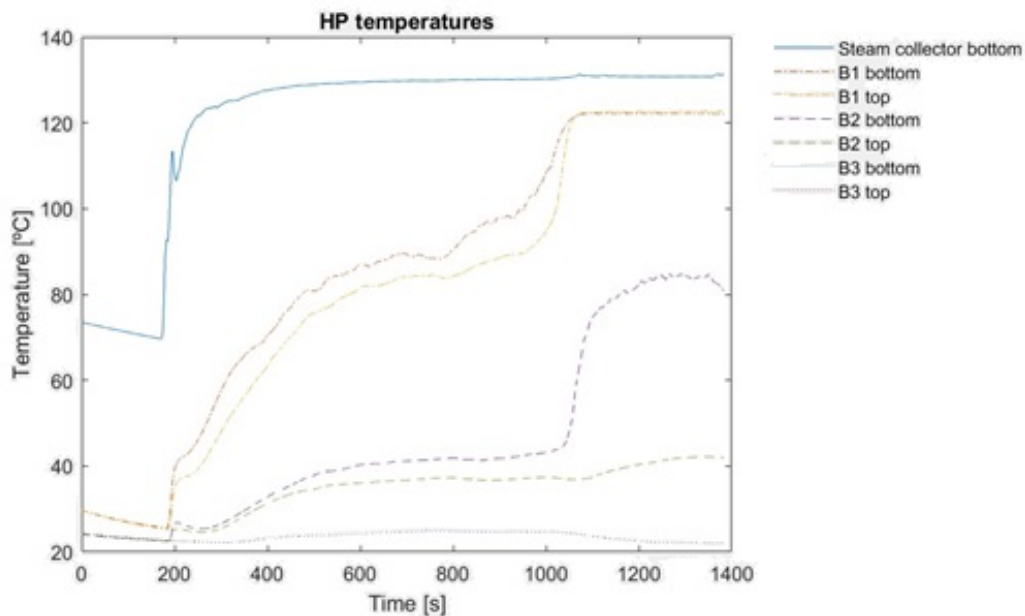


Figura 81 – Temperatura por blocos

O coletor de vapor da parte inferior do sistema (*steam collector bottom*) espelha a temperatura de valor. É possível observar na imagem que a estabilização das temperaturas no bloco 1 provocou a subida da parte inferior do bloco 2, indicando uma subida de vapor para a base no nível 3. O vapor subiu apenas para uma zona do nível 2, não ocupando o nível 3 totalmente.

A distribuição das potências elétricas no sistema, comportaram-se de forma semelhante à distribuição de temperaturas por nível. Assim, analisando o anexo 7, é possível verificar que existiu uma boa estratificação. Curioso analisar no mesmo anexo que, para pressões mais baixas, os TEG centrais

têm tendência a produzir mais, fenômeno também verificado e reportado em testes anteriores com o azoto como GNC.

De seguida expõem-se a contribuição para a potência elétrica por bloco para a potência elétrica máxima.

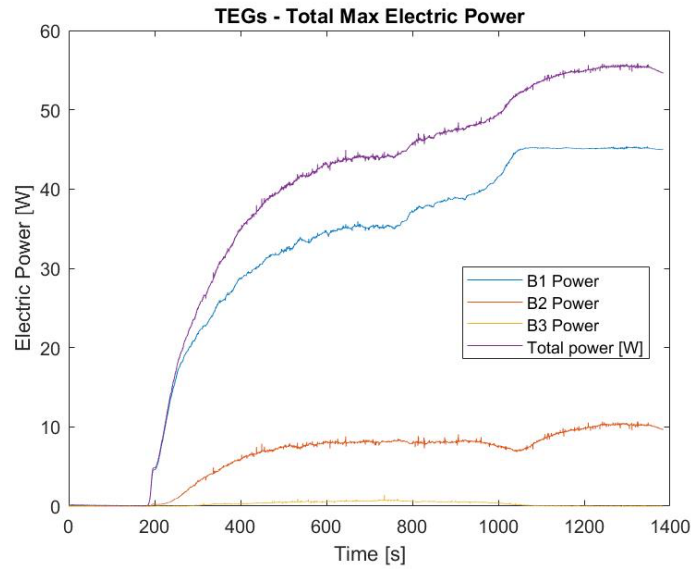
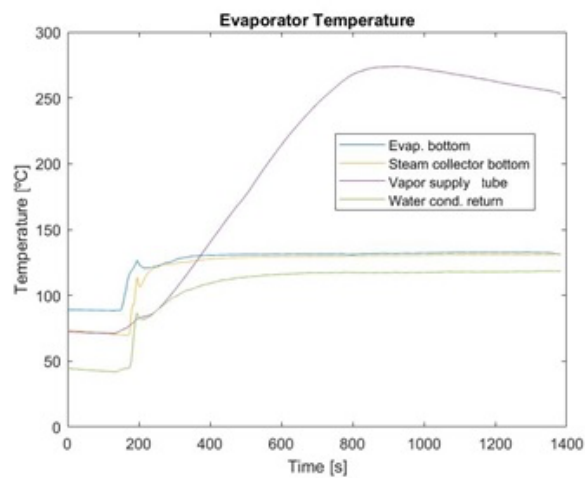


Figura 82 –Contribuição *por blocos*

Como se pode observar pela figura 82 e pelas temperaturas dos blocos (figura 81), verificou-se um aumento de temperatura e produção de potência elétrica dos TEG a partir do segundo 1000, pouco tempo após a redução do regime do motor (800 segundos). Este aumento coincide com a diminuição do sobreaquecimento do Tubo vertical que alimenta o condensador com vapor.

Figura 83 –Temperaturas do evaporador



Analisando as temperaturas do evaporador e temperatura dos blocos, constata-se que a esta pressão, o evaporador teve mais dificuldades em produzir vapor em regimes de motor mais elevados. O coletor de vapor inferior, e a base do evaporador onde se deposita a água, estão à mesma temperatura, correspondente à temperatura de vapor. A escassa produção de vapor, parece ter provocado um aumento de temperatura por fenómenos de condução sobre o tubo vertical que alimenta o condensador. Para além disso, quanto mais baixa é a pressão mais facilmente parece aparecer o fenómeno de *film boiling* e consequentemente, menos potência é absorvida pelo sistema. Faz algum sentido que assim seja, pois, maiores pressões causam maior densidade das bolhas geradas na parede, logo, bolhas mais pequenas, que isolam menos a parede da água líquida.

5.2.5.2 Vácuo

No final do teste anterior, preparando o teste seguinte, na tentativa de criar vácuo no interior do sistema, ou mais propriamente, uma baixa pressão de vapor, retirou-se o hélio pela zona mais alta do sistema, junto à válvula de segurança. A ideia era retirar pressão ao sistema quente e com a presença de vapor, que ao arrefecer condensaria, criando vácuo. Verificou-se a saída inadvertida de alguma água pelo ponto mais alto do sistema, assim como algum vapor. Durante o processo de tentativa de criação de vácuo, a pressão (relativa) manteve-se próxima de 0 bar. Com o motor a trabalhar, depois de aquecido, aquando da produção de vapor, voltou-se a abrir várias vezes o sistema na parte superior para despressurizar o sistema. A pressão mínima atingida foi de -0.4 bar. O regime utilizado foi a 3500 RPM e 2000 RPM com algumas variações durante o teste de TPS.

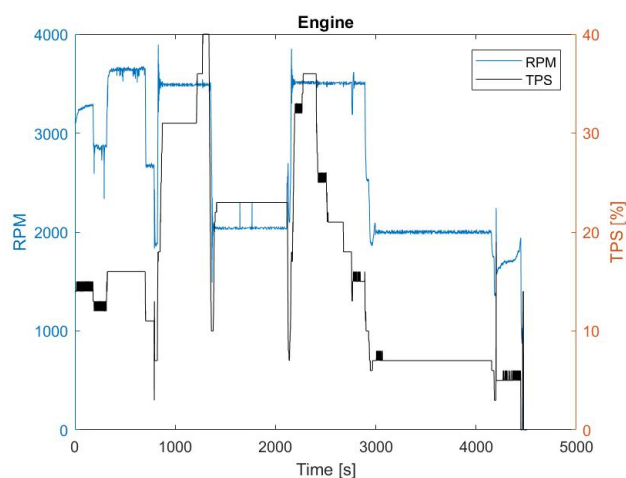


Figura 84 – Ciclo motor

A temperatura de vapor registada foi de 79°C, com uma eficiência termoelétrica dos TEG quase nula. A temperatura da face quente dos TEG, foi muito aproximada entre os TEG de cada bloco (entre 50°C e 70°C). Por esse motivo, tendo em conta a maior produção em baixos regimes por parte dos TEG do bloco 3, a produção do bloco 3 foi muito aproximada à do bloco 1.

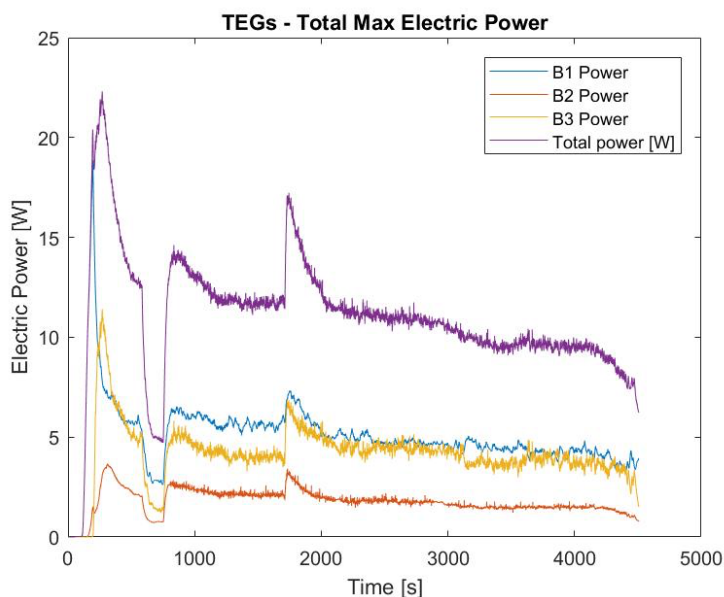


Figura 85 – Blocos e produção elétrica

À semelhança com o teste anterior, o calor absorvido pelo sistema também foi bastante baixo. O vácuo não é uma solução vantajosa para otimizar este sistema, apresentando resultados muito inferiores, comparativamente com sistema capaz de atingir mais pressão. Para além de ser difícil de manter, o vácuo não permite temperaturas elevadas de vapor saturado, impedindo o funcionamento dos TEG de forma otimizada (a 250°C de face quente). Num gerador termoelétrico de controlo de temperatura de saturação (TCTG) deste tipo, só fará sentido utilizar vácuo com água como fluido de trabalho, se a temperatura da face quente ótima de funcionamento do TEG for inferior a 100°C.

5.3 Árgon

O Árgon é um fluido mais denso que o azoto e que o vapor de água, pelo que o funcionamento com o sistema foi invertido (capítulo 3.2.6). Assim, a partir da abertura da válvula V4 e fechando a válvula V5, o vapor desce, permitindo a ativação dos blocos de cima para baixo, sendo o bloco B3 primeiro a ser ativado.

Para garantir a remoção de qualquer eventual fluido no sistema para além do árgon, este foi inserido sob pressão através da válvula V1 (capítulo 3.2.6). Através da garrafa de árgon que foi disponibilizada, pressurizou-se e despressurizou-se sucessivamente o sistema. A despressurização foi feita a partir do ponto mais alto do sistema. Este processo demorado, foi executado várias vezes. Depois deste processo, pressurizou-se o sistema para realizar o primeiro teste. A imagem seguinte, representa uma parte do processo referido.

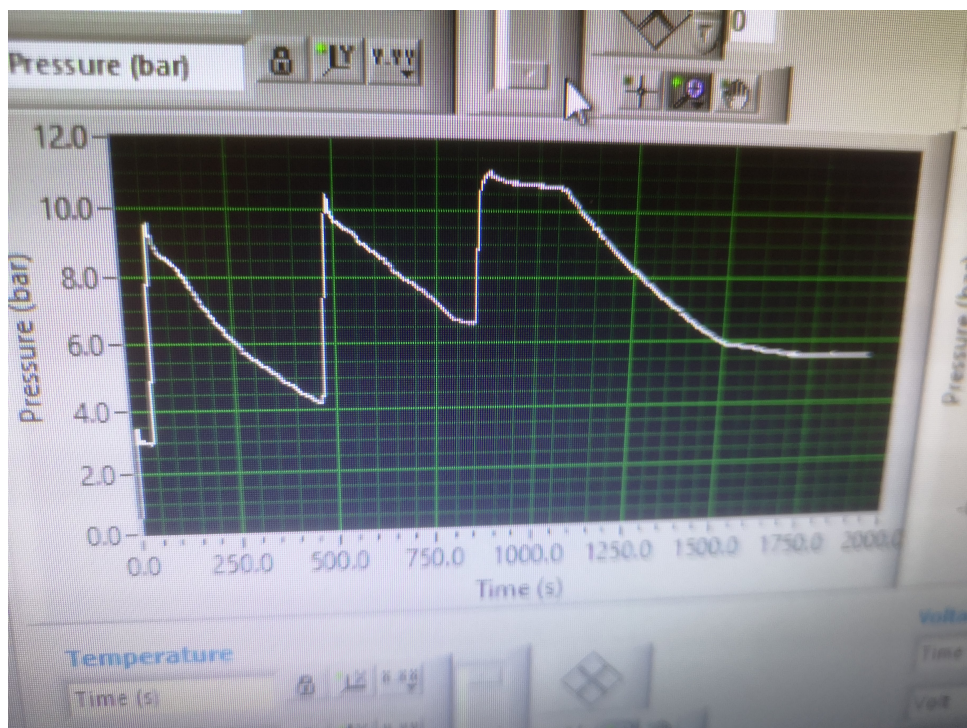


Figura 86 – Remoção de fluidos do interior do sistema

5.3.1 Teste 30 bar

Depois da preparação e pré-aquecimento e com a válvula V2 aberta, o regime do motor foi como indicado na figura 87:

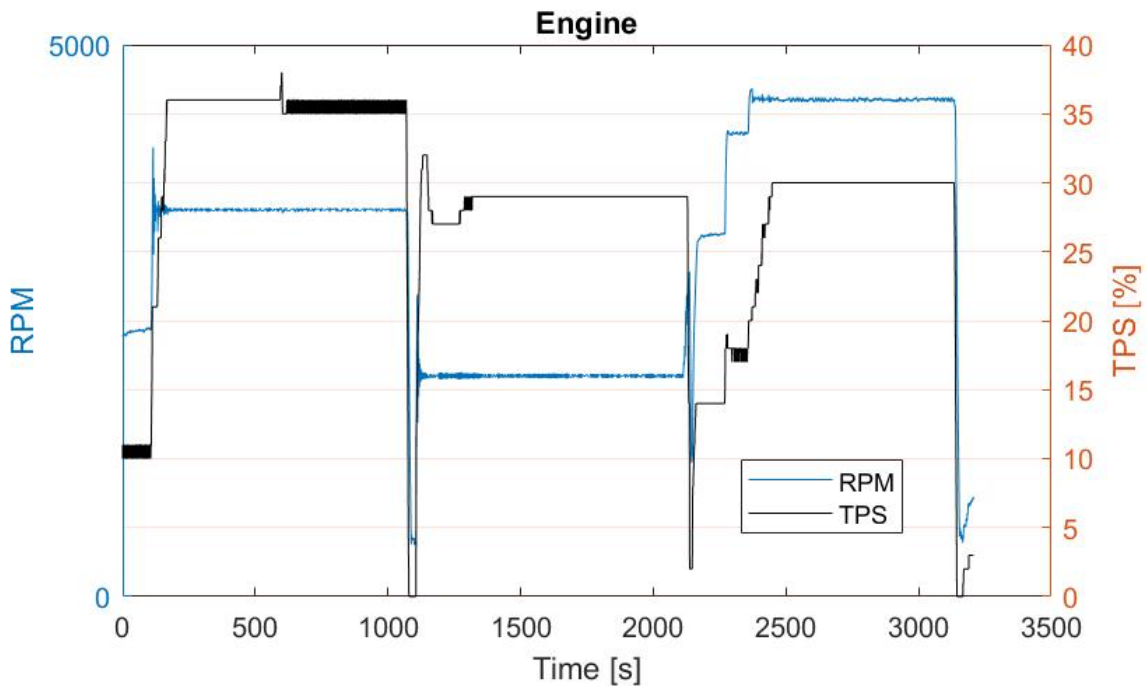


Figura 87 – Regime do motor

O teste iniciou-se ao segundo 120 com aumento de RPM para 3500 e cerca de 35% de TPS. Posteriormente, no segundo 1200, reduziu-se para 2000 RPM e 30% de TPS. Seguidamente, durante alguns segundos (do segundo 2100 ao 2250), reduziu-se a carga no motor, com o intuito de aumentar o regime do motor para as 4000 RPM e 30% TPS. A redução do regime referida efetuada antes do último *setting*, teve que ver com a diminuição do binário sobre o freio para evitar que sobreaquecesse. O teste terminou no segundo 3100.

A pressão no interior do sistema atingiu os 50 bar, ligeiramente acima do teste efetuado com hélio. O termopar, responsável por monitorizar da temperatura de vapor no condensador, foi, antes do início do teste, recolocado no local recíproco ao utilizado nos testes com hélio, ou seja, junto ao bloco 3 (acompanhado com a necessária alteração no Matlab®).

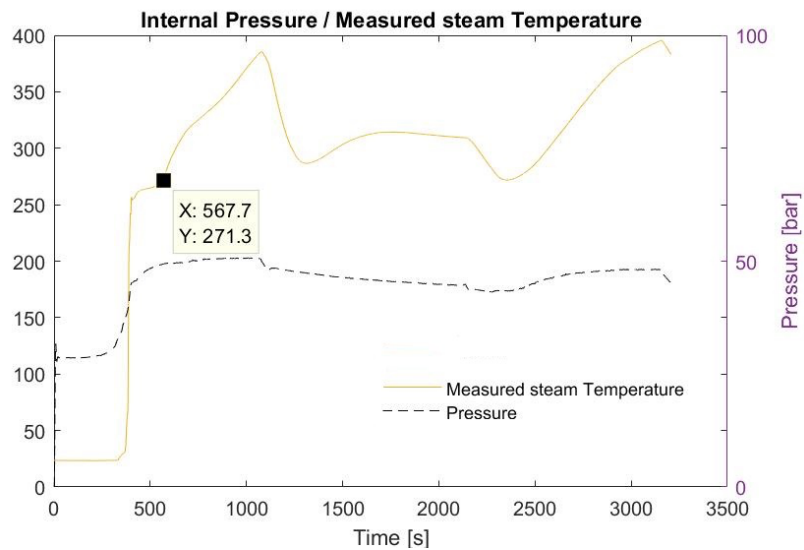


Figura 88 – Pressão e temperatura de vapor registada

Como se pode observar, a temperatura do vapor registada foi, muitas vezes, superior à temperatura de vapor saturado para a pressão de 50 bar (capítulo 3.2.1). Também a temperatura do *buffer*, neste funcionamento responsável por distribuir o vapor pelo condensador (bloco 3), registou uma temperatura bastante superior ao esperado, o que confirma as elevadas temperaturas de vapor atingidas.

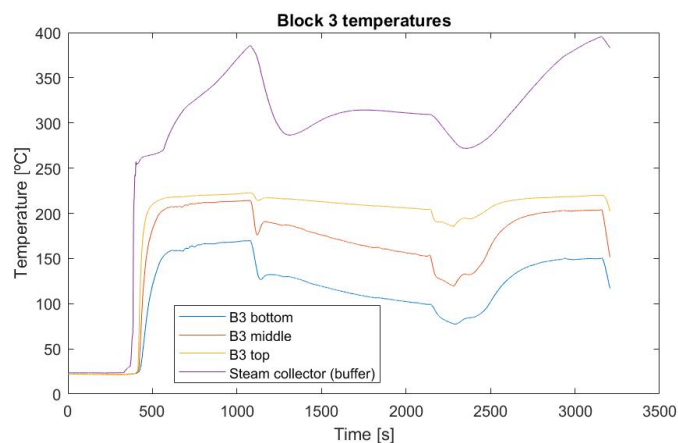


Figura 89 – Temperaturas do buffer e bloco 3

A possibilidade de influência de fenômenos de transferência de calor por condução para a parte superior do condensador (*buffer* e temperatura de vapor registada), está excluída, devido à elevada distância aos gases de escape e à ausência de registo destas temperaturas a níveis mais baixos do condensador. O aparecimento de vapor sobreaquecido poderá ser uma possibilidade. Apesar disso, a temperatura dos blocos (figura 90) e da face quente dos TEG do nível 6 mantiveram-se relativamente estáveis nos 220°C.

Os níveis abaixo registaram temperaturas bastante mais baixas, revelando uma falta de capacidade de o vapor atingir os níveis mais baixos.

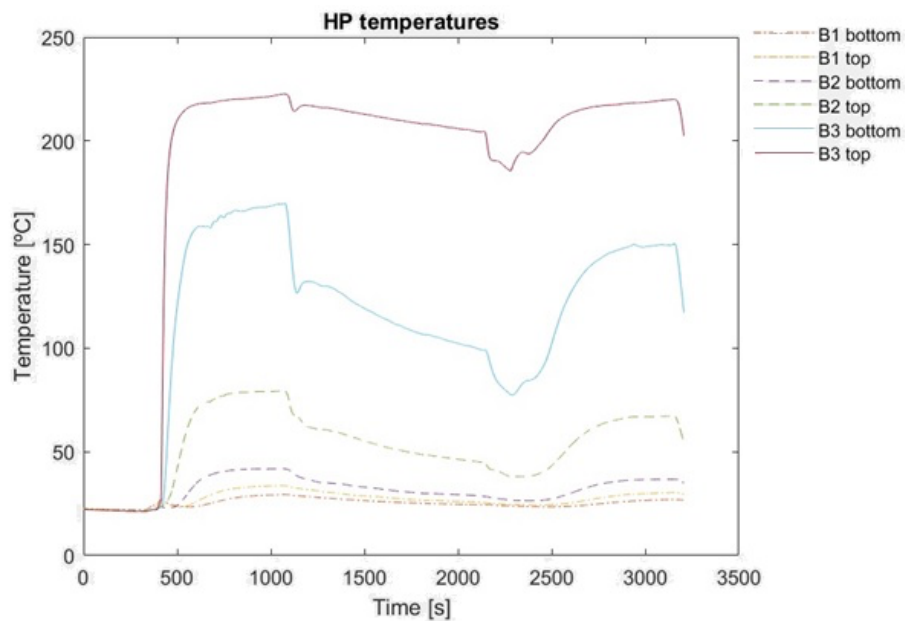


Figura 90 – Temperaturas por bloco

A ausência de volume interno no sistema (por exemplo um vaso de expansão) disponível na parte inferior do condensador, capaz de reter o argon fora da zona de produção do sistema à medida que o vapor é produzido, pode explicar a maior pressão interna atingida pelo sistema (comparando com hélio à mesma pressão inicial) e pode explicar a dificuldade da descida do vapor no condensador.

Analisando as temperaturas no condensador, constatou-se sem surpresa, que a eficiência termoeétrica e a produção de potência elétrica dos TEG foi baixa, tendo o bloco 3 um esmagador contributo para o resultado obtido, com um máximo de potência elétrica de 135 W obtido no primeiro regime 3500 RPM e 35% TPS.

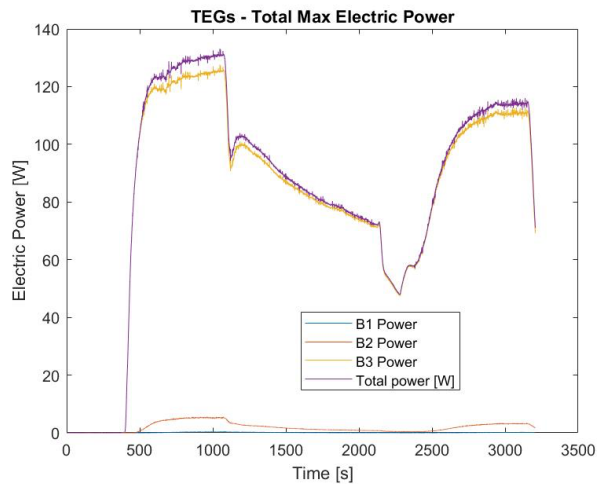


Figura 91 – Potência máxima obtida

Apesar dos resultados obtidos, a estratificação foi boa, como se pode verificar pelo anexo 9. No decorrer de todos os testes, verificou-se a mesma relação: regimes altos de funcionamento do motor, mas principalmente utilização de mais TPS, resultando em maior binário aplicado no freio, provocam maior temperatura de gases de escape e, por isso, maior produção máxima de potência elétrica dos TEG.

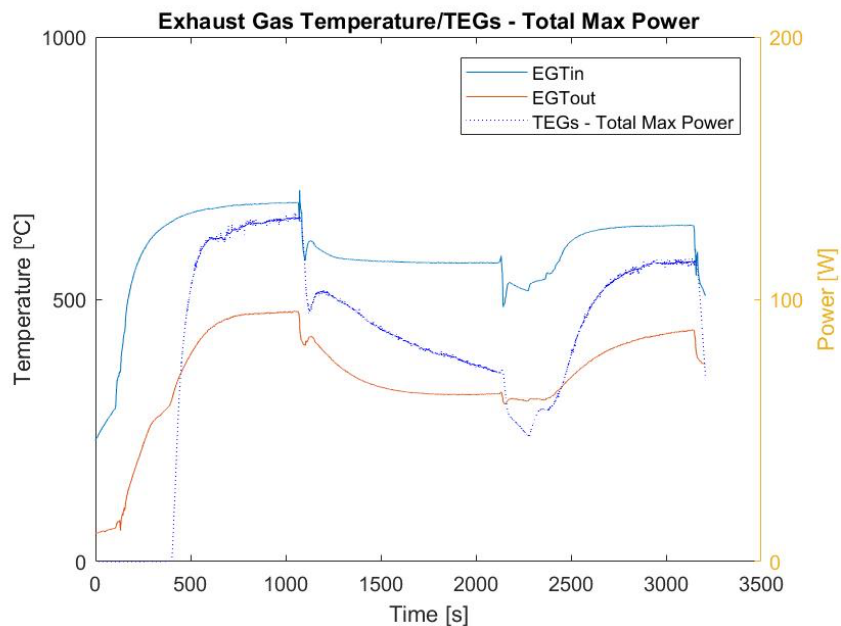


Figura 92 – relação entre temperatura de gases de escape e potência elétrica dos TEG

5.3.2 Teste 20 bar

Com configuração do sistema semelhante ao teste de 30 bar do capítulo anterior, este foi despressurizado pelo seu ponto mais alto, até aos 20 bar.

Depois do pré-aquecimento do motor, o teste iniciou-se aos 225 segundos, para o *setting* de 3500 RPM e TPS de 35%. Do segundo 1200 ao 1400 procedeu-se ao arrefecimento do freio. Seguidamente, colocou-se o TPS a 30% e 2000 RPM. Finalmente, depois de novo arrefecimento do freio, aos 2200 segundos, chegou-se ao regime de 4500 RPM com 38% de TPS.

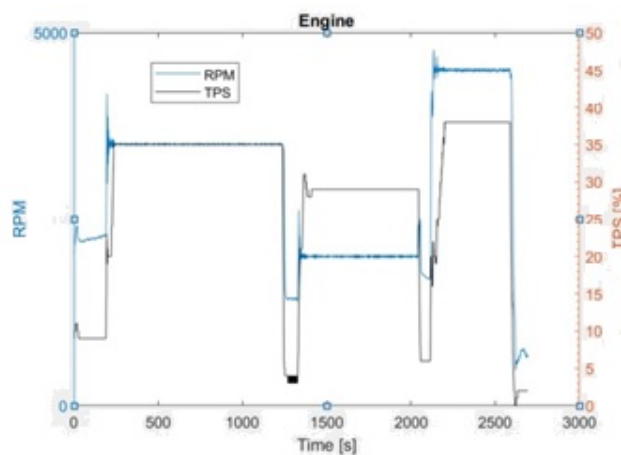


Figura 93 – Ciclo do motor

O comportamento da temperatura de vapor registada foi muito semelhante ao teste do capítulo anterior. Assim, a temperatura de vapor estabilizou por momentos na temperatura de saturação esperada, tendo depois aumentado para valores consideravelmente superiores. A pressão interior registada foi, mais uma vez, superior à registada em relação ao teste com hélio à mesma pressão.

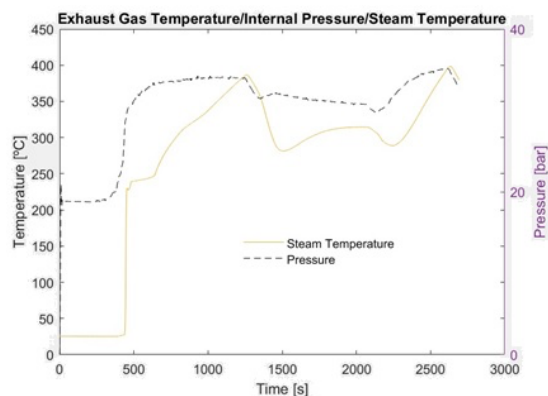


Figura 94 – Pressão e temperatura de saturação 20 bar

A temperatura do *buffer*, mais uma vez, confirma a elevada temperatura de vapor. O comportamento da propagação do vapor pelos níveis, assim como a consequente temperatura por nível, foi idêntica ao teste anterior, sendo apenas ligeiramente mais baixa. O bloco 3 manteve uma temperatura de 200°C.

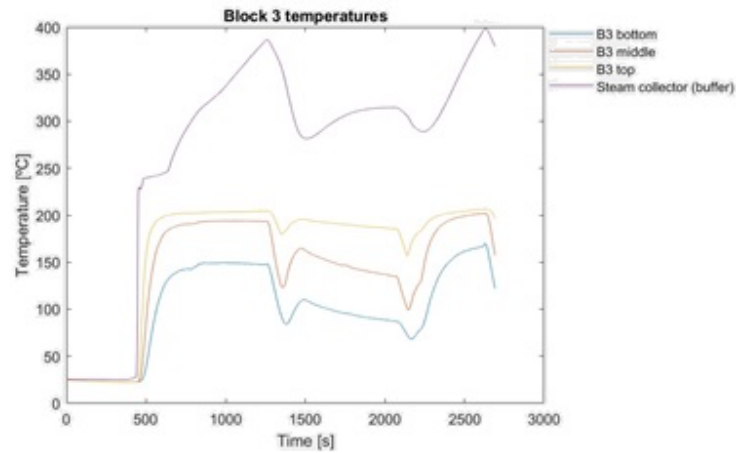


Figura 95 – Temperaturas da zona superior do condensador

Com uma boa estratificação (anexo 10) e com o Bloco 3 a contribuir quase na totalidade para a produção de potência elétrica, chegou-se a quase a 120 W, bastante longe da potência elétrica conseguida pelo hélio.

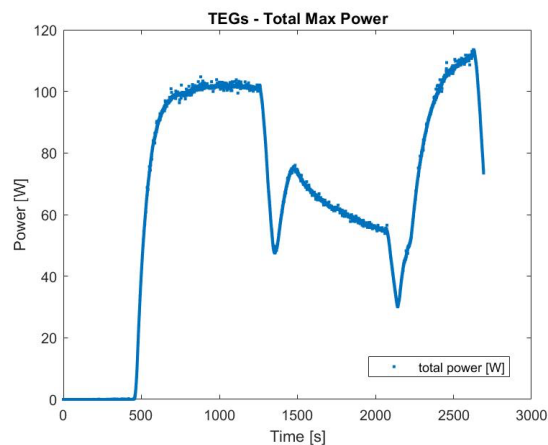


Figura 96 – Potência máxima dos TEG

Verificou-se uma potência máxima a 4500 RPM com 38% de TPS, confirmando que o aumento de TPS e o binário sobre o freio são os fatores mais importantes para a obtenção de potência elétrica. À

mesma rotação, e com menos TPS no teste de árgon a 30 bar, a potência máxima do ciclo não foi atingida.

5.3.3 Teste 10 bar

Com ciclo muito semelhante aos testes executados aos 20 e 30 bar com hélio com válvula V2 aberta, os resultados obtidos foram previsíveis. Inicialmente, procurou-se as 3500 RPM e 35%TPS e aos 1000 segundos, 2000 RPM e 30% de TPS.

A pressão subiu aos 20 bar e o mesmo fenómeno aconteceu de sobreaquecimento da temperatura de vapor registada com confirmação da temperatura elevada do Buffer. Apesar disso, mais uma vez, as temperaturas dos TEG do bloco 3, não atingiram temperaturas expectáveis (não atingindo os 200°C). Houve novamente uma dificuldade de propagação do vapor, tendo o bloco 2 ficado a temperaturas muito baixas (aproximadamente 50°C). A eficiência termoelétrica foi baixa e a potência elétrica máxima gerada ficou bastante abaixo da registada pelo hélio à mesma pressão. A estratificação e produção de cada TEG está apresentada no anexo 11 desta Dissertação.

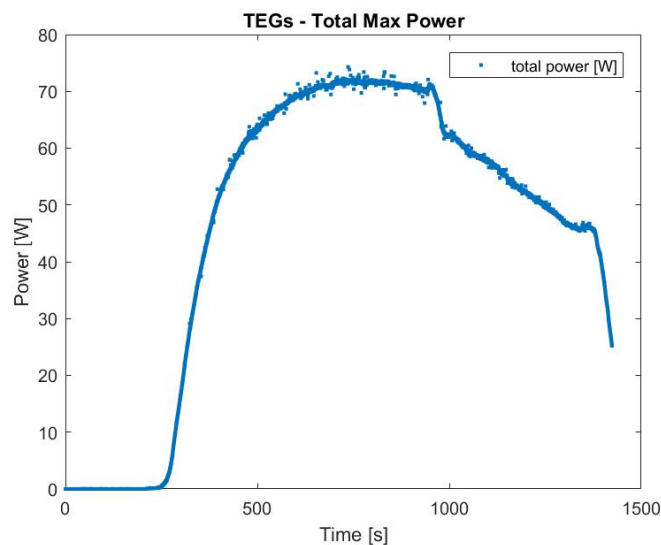


Figura 97 – Potência máxima dos TEG com árgon a 10 bar

Como já foi referido, o fenómeno de aparente sobreaquecimento do vapor, junto com outros fatores, parecem estar a prejudicar o funcionamento do protótipo. De facto, o vapor, para se dirigir para a parte superior do condensador, tem um percurso mais longo e menos isolado termicamente. Para além disso, existe a possibilidade, difícil de confirmar, da existência de vapor na zona à esquerda da

válvula V2 (quando aberta). Assim, nada garante que todo o vapor produzido vá efetivamente para o condensador.

Outro fenómeno que pode estar a prejudicar o funcionamento do sistema, é o facto da condensação de vapor estar a ser efetuada numa parte superior do condensador, e a água resultante estar a escorrer até à base do mesmo. De facto, após produção de vapor, em todos os testes anteriores com árgon, verificou-se o arrefecimento brusco do coletor de vapor inferior (*steam collector bottom*), como se pode verificar pela imagem. Esta temperatura é indicação clara da presença de água na base do condensador. Nos testes efetuados em funcionamento normal (sem inversão de circuito de vapor), este componente do protótipo, encontra-se à temperatura de vapor, se não houver secagem do evaporador.

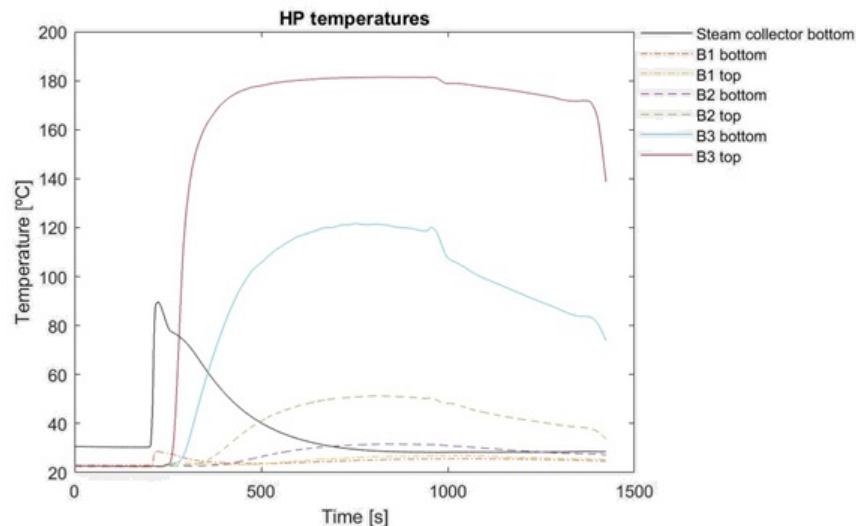


Figura 98 – Temperatura dos blocos e do coletor de vapor inferior

Para além disso, o facto de os TEG do nível superior não beneficiarem de um ótimo funcionamento a regimes mais elevados, não ajudará a produção de potência elétrica.

Outro fator, já abordado anteriormente, tem que ver com a dificuldade da propagação de vapor ao longo dos blocos (do bloco 3 para o bloco 2). A pressão interna durante o funcionamento do sistema ligeiramente mais elevada (comparativamente com outros gases não condensáveis), pode indicar a dificuldade de o vapor “empurrar” o árgon para fora da zona de produção, ou seja, do condensador. O excesso de volume disponível para o vapor e a ausência de um volume dedicado, capaz de acomodar o árgon, não parece ser um fator potenciador do bom funcionamento do sistema.

5.3.4 V2 fechada

Os dois seguintes testes presentes neste subcapítulo foram feitos com a válvula V2 fechada, diminuindo o volume interno no sistema, potenciando assim, o aumento de pressão interna durante o funcionamento, para além de diminuir o volume disponível para o vapor gerado.

5.3.4.1 Teste a 10 bar com válvula V2 fechada

O ciclo de motor efetuado está presente na figura 99:

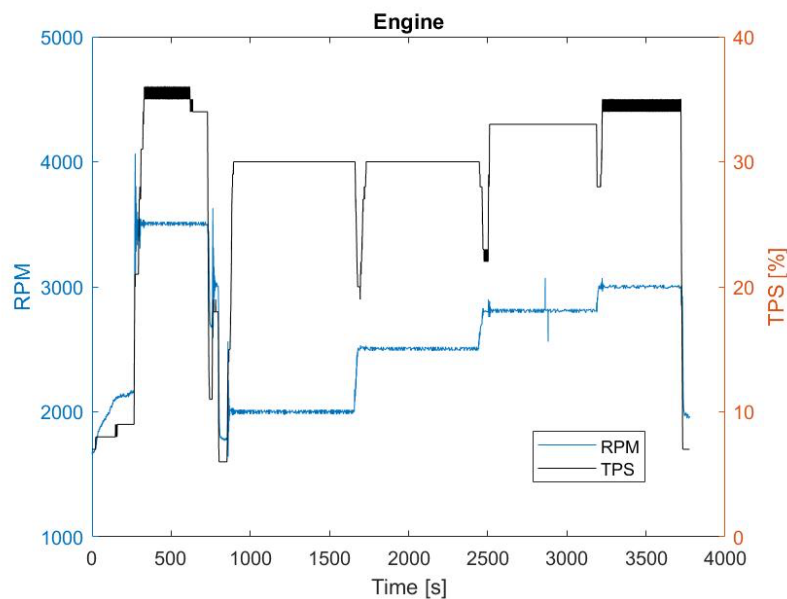


Figura 99 – Ciclo do motor com 10 bar e V2 fechada

Após aquecimento do motor, o teste foi iniciado com a tentativa de atingir o primeiro *setting* de potência de 3500 RPM e 35% de TPS. Aos 700 segundos, devido ao aumento muito acentuado da pressão no interior do sistema, a válvula de segurança abriu expulsando algum vapor (mais de 60 bar). Por esse motivo, reduziu-se para 2000 RPM e 30% de TPS no segundo 850. De seguida, foi-se aumentando o regime do motor progressivamente, na tentativa de atingir a pressão máxima. No segundo 1700 aumentou-se para as 2500 RPM mantendo TPS. Aos 1900 segundo aconteceu uma surpreendente descida de pressão interna sem que existisse qualquer mudança de regime de motor (explicado de seguida). No segundo 2500, após estabilização da pressão, voltou-se a aumentar para 2800 RPM e 33% de TPS. Finalmente, aos 3200 segundos, aumentou-se o TPS para os 35% e 3000 RPM, e a pressão estabilizou muito próxima dos 60 bar. De seguida, podemos observar a variação da pressão descrita, em função do tempo e a temperatura do vapor registada.

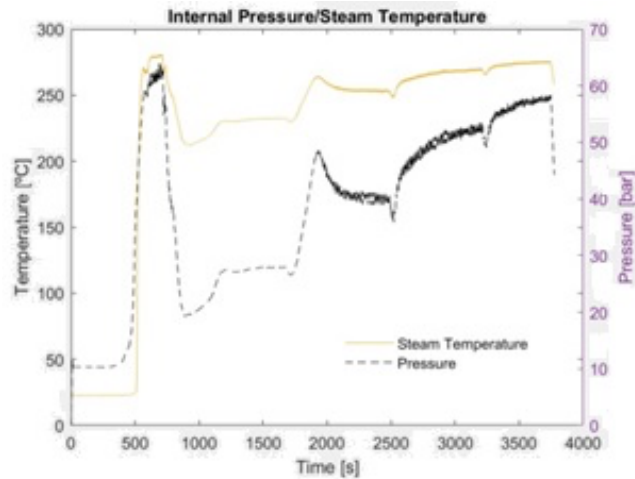


Figura 100 – Pressão e temperatura de vapor

Como se pode verificar na imagem, o fenómeno de sobreaquecimento de vapor não se verificou nos testes com esta configuração do sistema. Também a temperatura do *buffer* confirma o referido. Na verdade, para cada aumento de pressão, é possível denotar um aumento de temperatura de vapor, próxima da temperatura de saturação esperada para as diferentes pressões. Apesar disso, as temperaturas das faces quentes dos TEG e do bloco 3, estiveram mais baixas do que era de esperar.

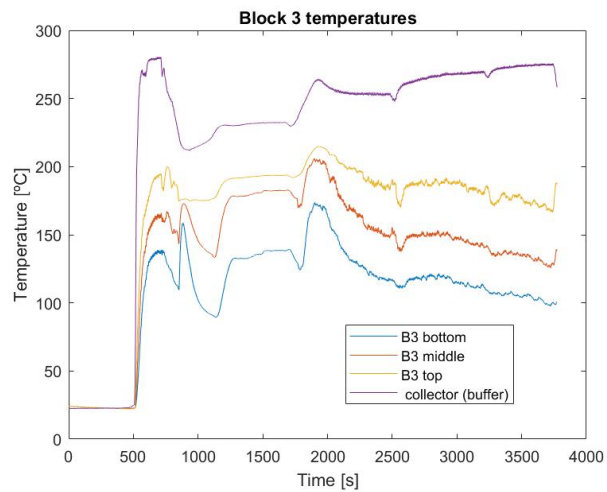


Figura 101 – Temperaturas de bloco 3 e coletor de vapor superior (*buffer*)

A temperatura do bloco 2 foi a mais alta registada comparativamente com os testes anteriores com árgon, atingindo os 115°C de máximo.

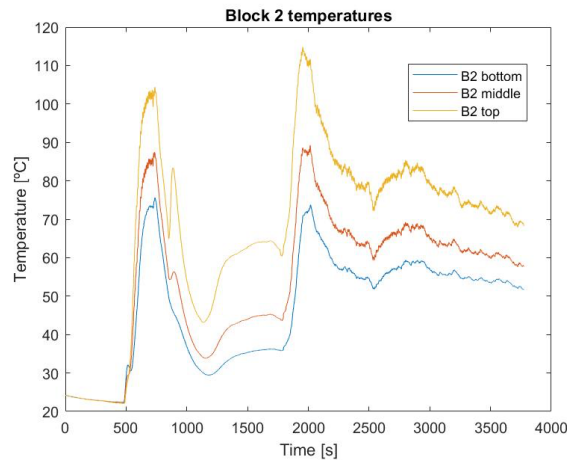


Figura 102 – Propagação do vapor

Tendo em conta o comportamento da pressão e do regime de motor, é possível concluir que a propagação do vapor ao longo do condensador, é mais efetiva para aumentos bruscos de pressão. Os dois picos máximo de temperatura atingidos no bloco 2 correspondem exatamente ao aumento repentino de pressão. A propagação do vapor torna-se mais difícil após estabilização de pressão, mesmo em regimes de motor e pressões mais elevados. As temperaturas do bloco 1 mantiveram-se abaixo dos 70°C, com o mesmo comportamento.

A produção de vapor é fundamental para o aumento de pressão. É por isso necessário o condensador e o evaporador funcionarem de forma coordenada e equivalente para que o fluido de trabalho condensado e evaporado permita sempre a existência de água disponível para formar vapor no evaporador.

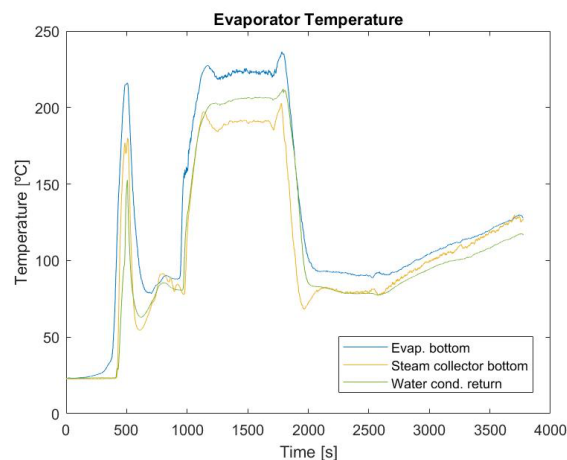


Figura 103 – Temperatura no evaporador

Analisando as duas figuras anteriores, é possível verificar que a menor propagação de vapor no bloco 2, coincide com a menor disponibilidade de água disponível no evaporador. Entre o segundo 1000 e 2000, a base do evaporador, onde está armazenada a água, atingiu os 230°C. Não tendo havido necessariamente a secagem do evaporador (tendo em conta a temperatura de saturação do vapor a essa pressão e a proximidade do mesmo em relação aos gases de escape com fenómenos de condução envolvidos), houve nesse período uma clara falta de disponibilidade de fluido de trabalho no estado líquido. Não havendo vapor a ser produzido, ele não pode ser propagado, prejudicando a temperatura dos blocos e por isso, o funcionamento ótimo do sistema. A diminuição de pressão ao segundo 1900, mantendo o mesmo *setting* do motor, corresponde à condensação súbita do fluido de trabalho (diminuição da temperatura da base do evaporador), diminuindo o vapor no sistema e aumentando a água disponível no evaporador. A partir do segundo referido, o sistema teve novamente a capacidade de produzir mais vapor, aumentando a propagação do mesmo resultando numa temperatura das faces quentes dos TEG superior, aumentando potência elétrica produzida.

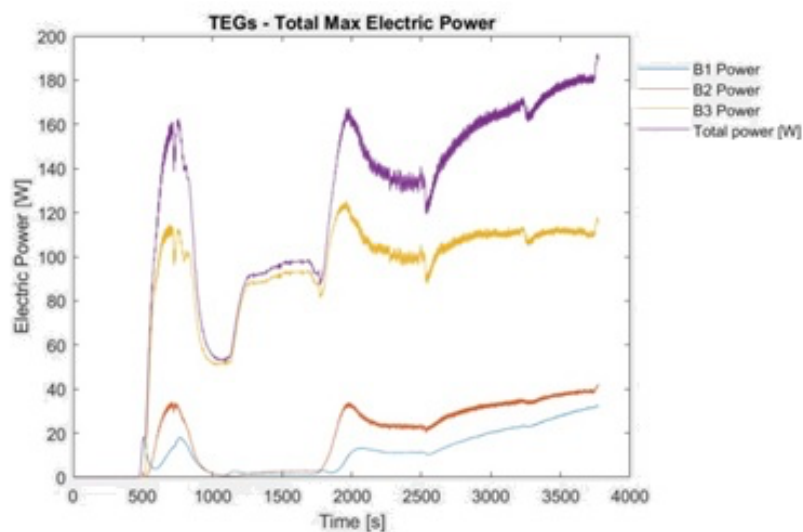


Figura 104 – Potência elétrica máxima

Mais uma vez se verifica que a regimes mais elevados de motor existe uma maior produção de potência elétrica, tendo esta atingido 185W de máximo com tendência de estabilização. Todos os blocos foram ativados, apesar da maior contribuição dos blocos superiores, (ver anexo 12). Apesar disso, a potência elétrica máxima conseguida fica aquém da registada pelo hélio a 8 bar na mesma configuração, não obstante do teste não ter sido feito no mesmo regime de motor por limitação de pressão interna máxima.

5.3.4.2 Teste a 8 bar com válvula V2 fechada

Devido à impossibilidade de testar o sistema nos *settings* de motor desejados, devido ao acionamento da válvula de segurança, procedeu-se à despressurização do sistema para 8 bar.

Depois de aquecimento do motor, iniciou-se o ciclo aos 200 segundos, com 3000RPM e 35% de TPS. No segundo 2400, aumentou-se para 3500 RPM mantendo o mesmo TPS e o binário aplicado ao freio. A válvula de segurança foi novamente ativada, tendo a pressão ultrapassado os 60 bar. No segundo 2700 terminou-se o teste. A pressão no primeiro regime testado, atingiu 58 bar e a temperatura de vapor registada, corresponde à temperatura de saturação esperada. Os gráficos da figura 105 apresentam algum ruído indesejado.

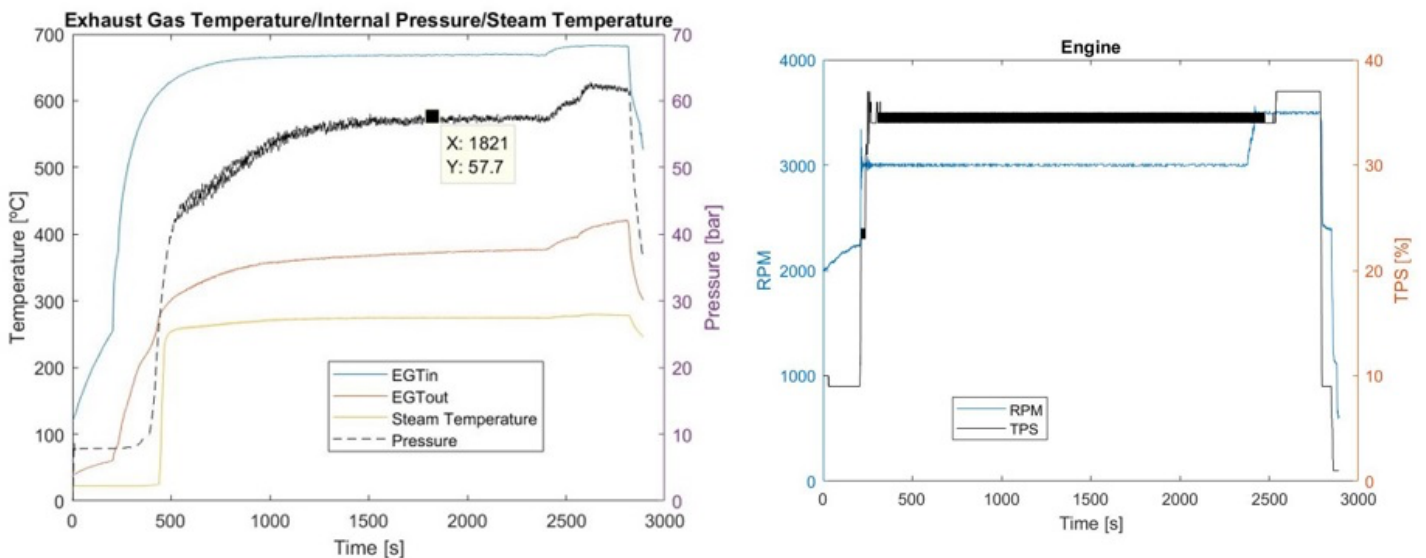


Figura 105 – Pressão e temperaturas de vapor e gases (esquerda) e ciclo utilizado (direita)

Perto do segundo 400, o aumento da produção de vapor (aumento da temperatura das zonas molhadas do evaporador) provocou um aumento de pressão e um aumento de temperatura nos blocos.

Após a inicial produção de vapor, rapidamente condensado, verificou-se brusca redução de temperatura. A partir do segundo 600, pode verifica-se um contínuo aumento da temperatura do evaporador e uma diminuição gradual da temperatura do bloco 3 (segundo 1300), revelando progressiva diminuição de fluido de trabalho no estado líquido na base do evaporador disponível (temperatura da base de 120 °C no segundo 1300).

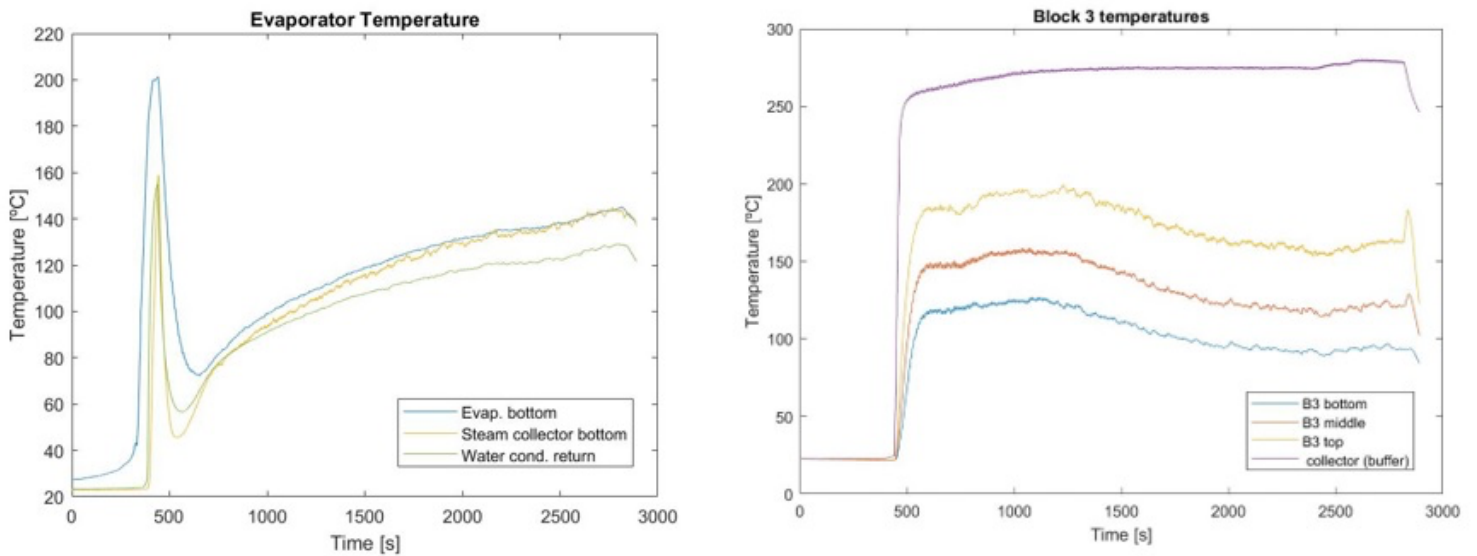


Figura 106 – Temperatura do evaporador e do bloco 3

Os blocos 2 e 1 atingiram um máximo de temperaturas 90 e 60°C respetivamente, com comportamentos idênticos aos anteriormente reportados. A eficiência termoelétrica rondou os 3,7% devido às temperaturas das faces quentes dos níveis superiores.

A alteração do circuito do vapor neste sistema com árgon, leva a uma elevada distância e volume disponível para o vapor, até chegar à zona produtiva entre o evaporador e o bloco 3, limitando a boa prestação do evaporador. Por outro lado, também o “trabalho” do condensador fica limitado, uma vez que muito do vapor disponível não se encontra no condensador. Esta conjugação de fatores, dificulta o funcionamento ótimo da interface evaporador/condensador.

Relativamente à produção de energia elétrica, atingiu-se um máximo de 200 W com um razoável contributo dos níveis inferiores com uma boa estratificação (anexo 13).

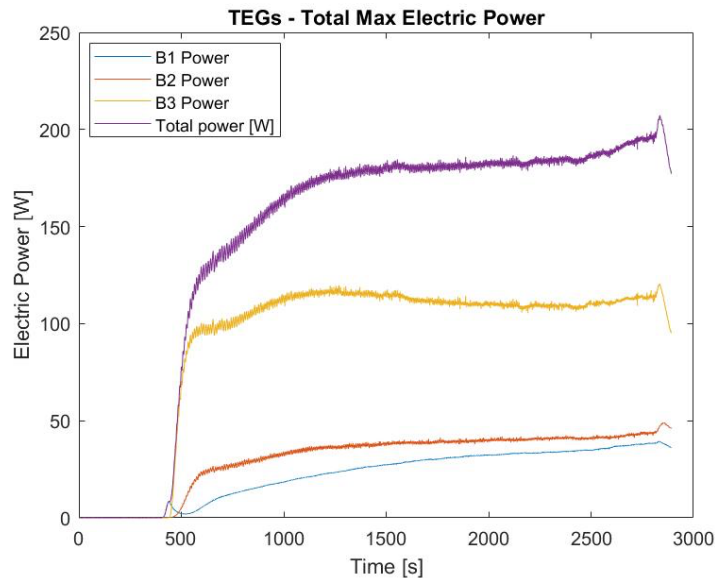


Figura 107 – Potência elétrica máxima gerada

A dificuldade de propagação do vapor já referida, o excesso de volume disponível para o vapor antes de atingir o condensador, a ausência de um volume dedicado para a saída do argon da zona de produção e finalmente, a utilização de modelos de TEG no bloco 3 menos otimizados para altos regimes, parecem estar a afetar o sistema neste tipo de funcionamento. Apesar disso, tendo em conta que o do regime do motor não foi o pretendido, a potência elétrica não ficou muito longe da obtida no hélio apresentando, para o sistema com volume interno reduzido (V2 fechada), uma estratificação bastante melhor. Para além disso, devido às pressões internas de funcionamento mais elevada, foi possível obter uma temperatura de vapor mais altas e por isso, temperaturas da face quente (nos primeiros blocos) mais próximas do funcionamento ótimo dos TEG. A eficiência termoelétrica dos TEG foi por isso superior, mantendo-se sempre próxima dos 3,8%.

5.3.5 Pressão atmosférica

Aproximadamente a pressão inicial atmosférica (1,5 bar), o teste foi executado inicialmente com volume diminuído (V2 fechada) e de seguida abriu-se a válvula permitindo utilizar todo o volume interno do sistema.

A variação de regime de motor (RPM e TPS) assim como, alterações de pressão interna e temperatura do vapor associada, são apresentadas na seguinte figura 108:

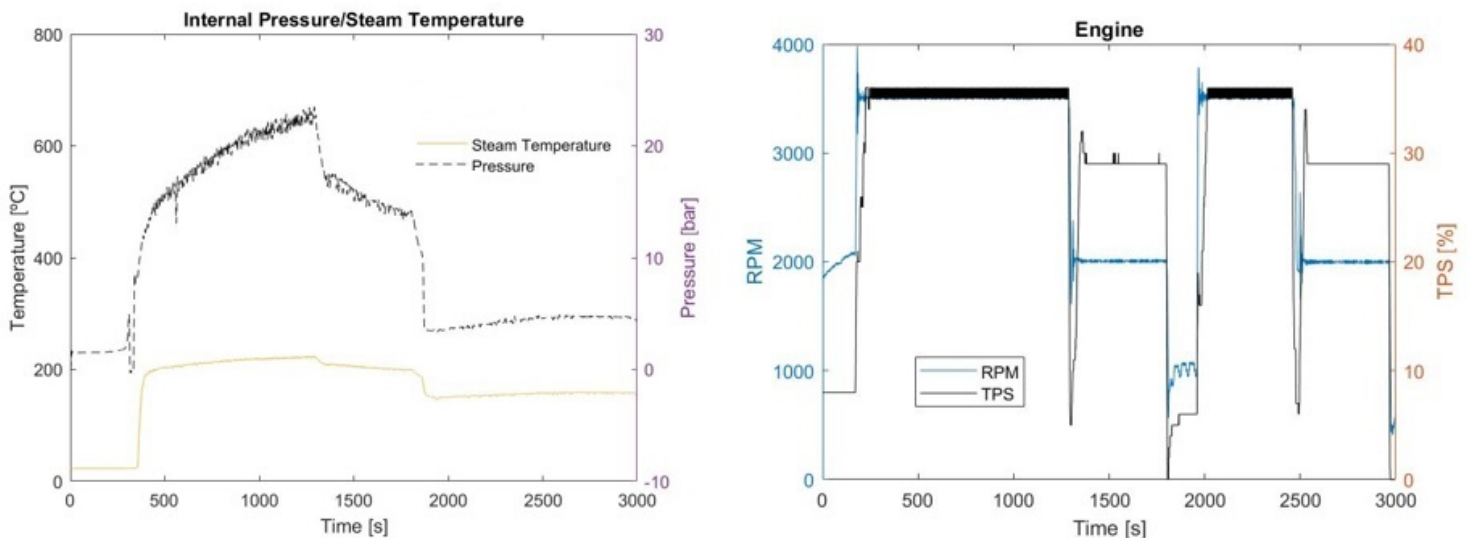


Figura 108 – pressão e temperatura de vapor (esquerda) regime do motor (direita)

A válvula V2 foi aberta no segundo 2000, antes do novo aumento de regime do motor, depois da diminuição e estabilização de pressão interna. A eficiência máxima verificada foi de 2,7%, correspondente ao ponto de pressão máxima atingida com válvula V2 fechada, graças a uma temperatura de saturação mais próxima da de funcionamento ótimo dos TEG. A temperatura dos blocos máxima foi no ponto referido, sendo de 170°C no bloco 3, 110°C no bloco 2 e 80°C, havendo uma boa estratificação. Tendo em conta a maior proximidade destas temperaturas em relação à temperatura de saturação do vapor a estas pressões, comparativamente às verificadas em testes anteriores, percebe-se que para menores pressões internas no sistema, se verifica maior facilidade de progressão do vapor. As temperaturas na base do evaporador indicam que houve sempre disponibilidade de fluido de trabalho presente.

Relativamente à potência elétrica produzida, apresenta-se de seguida a contribuição dada por cada um dos blocos:

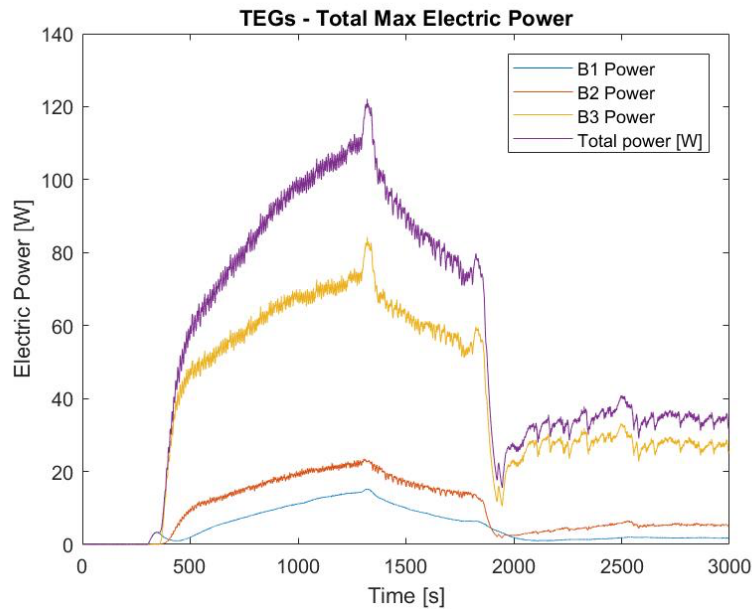


Figura 109 – Produção de potência elétrica máxima

A partir do momento que a válvula foi aberta, devido a uma temperatura de vapor mais baixa e por conseguinte, temperatura dos blocos mais baixa, a produção elétrica baixou bastante, assim como a eficiência dos TEG. A diminuição de regime de motor com a válvula fechada, provocou também uma diminuição da produção elétrica. Fica a ideia que com uma melhor estabilização da pressão interna do sistema, a potência máxima poderia ter ultrapassado a obtida. Apesar disso, pressões iniciais altas potenciam o aumento da temperatura de vapor e um funcionamento ótimo do sistema, pelo que esta pressão inicial não será a ideal.

6 REFLEXÃO FINAL

6.1 Conclusões

Esta Dissertação procurou melhorar um protótipo do laboratório de motores da UMinho, no âmbito do projeto *Exhaust2Energy*, através da realização de testes experimentais. Pretendeu-se otimizar a potência gerada e a eficiência do sistema, através da obtenção de temperaturas de saturação mais próximas das temperaturas de funcionamento ótimas dos TEG e da melhor separação entre GNC e vapor (boa estratificação). Foram realizados testes com azoto, hélio e árgon em diferentes configurações de funcionamento do protótipo e diferentes pressões iniciais. Utilizaram-se várias pressões iniciais, variando de 30 bar até pressão atmosférica, em configuração de volume interno total e também com volume interno diminuído, potenciando a subida de pressão durante funcionamento. Procurou-se testar para cada um dos gases não condensáveis, pressões iniciais, condições de volume interno e regimes de motor idênticos.

A comparação efetuada entre a utilização de hélio em configuração normal (com movimento ascendente do fluido de trabalho) e árgon em configuração invertida (com movimento descendente de fluido de trabalho), mostraram melhores resultados na estratificação entre fluido de trabalho e GNC, relativamente à utilização de azoto. A pressão de funcionamento provou ser um fator de elevada relevância ao longo dos testes. Pressões de funcionamento elevadas, provocadas por pressões iniciais elevadas em configuração de volume interno total, ou por pressões médias iniciais em configuração de diminuição de volume interno, obtiveram melhores resultados na potência elétrica máxima e eficiência. Esta última configuração mostrou também ser benéfica no que toca a absorção de calor do escape. O fenómeno de *film boiling* que causa a queda da absorção de calor devido a excesso de temperatura nas paredes parece ser menos pronunciado conforme se aumenta a pressão do sistema.

Tendo os TEG utilizados, uma eficiência máxima de 5% a 250°C, mostrou-se fundamental fazer chegar a essas temperaturas as faces quentes dos TEG. Pressões de funcionamento elevadas, permitiram temperaturas de saturação do vapor elevadas. Regimes de motor elevados, com cargas térmicas elevadas, potenciaram a produção de vapor, aumentando a pressão de funcionamento. No entanto, o permutador de calor de escape mostrou possuir uma eficácia bastante inferior à esperada, ou seja, à simulada numericamente. O motivo mais provável é a formação de uma película de vapor junto às paredes que as isola do líquido em ebulição (*film boiling*) devido a um excessivo fluxo de calor.

A utilização de Hélio provou ser mais eficaz que o azoto na boa estratificação entre fluidos ao longo de todos os testes. Com diminuição de volume interno do sistema, aconteceu, no entanto, um fenómeno de fraca estratificação tendo a parte superior do condensador, apresentado sinais de acumulação de vapor, com o *buffer* a registar temperaturas superiores aos blocos. Várias possibilidades de explicação foram sugeridas. A possibilidade da saída de hélio da zona de condensador, por propagação de vapor (estratificado por temperaturas) e conseqüente condensação do mesmo provocando um escorrimento de fluido de trabalho até à base do protótipo, parece ser a mais viável. Este fenómeno prejudicou o funcionamento ótimo com hélio na configuração de volume diminuído. Destaque para o teste realizado com Hélio a 30 bar de pressão inicial em configuração normal com volume interno total, atingindo-se quase 50 bar de pressão de funcionamento, com temperaturas das faces quentes dos primeiros TEG de 240°C, permitindo chegar a uma eficiência de 3% e potência elétrica máxima gerada muito próxima dos 250 W, com boa estratificação e sem o contributo de todos os níveis. Também com Hélio, desta vez em configuração com volume diminuído a 8 bar de pressão inicial, atingindo 50 bar de pressão de funcionamento, se conseguiu obter um valor muito próximo dos 250 W, com contribuição de todos os níveis, mas com temperaturas das faces quentes consideravelmente inferiores e por isso uma eficiência termoelétrica a variar entre 1,4 e 2%.

O árgon apresentou os melhores resultados no que à estratificação diz respeito, quando o sistema foi configurado para que o vapor entrasse no topo do condensador, demonstrando, no entanto, maior dificuldade de propagação do vapor ao longo dos diferentes níveis do condensador, afetando por isso o funcionamento ótimo do sistema. O facto de o protótipo não ter sido desenvolvido para o funcionamento em configuração invertida, nomeadamente, o excesso de volume disponível para o vapor entre o evaporador e condensador, a ausência de um volume dedicado para a saída de GNC da zona de produção de potência elétrica e a utilização de modelos de TEG nos níveis superiores menos otimizados para regimes de funcionamento elevados, parece prejudicar esta configuração. Devido ao facto de o volume disponível para o vapor ser mais elevado, antes de chegar ao condensador, verificou-se aumentos de pressão superiores que os verificados em configuração normal. Observou-se durante os testes com volume total do sistema, fenómenos de sobreaquecimento de vapor na zona superior do protótipo, sem relevante aumento da temperatura da face quente dos TEG, tendo os resultados nesta configuração ficado bastante longe do esperado. A configuração invertida com diminuição do volume interno e pressões internas iniciais inferiores a 8 bar, mostrou ser a configuração ideal para a utilização de árgon, anulando o fenómeno referido e permitindo melhor propagação do vapor. Os testes realizados com Árgon em configuração com volume diminuído a 8 bar e a 1,5 bar, foram assim, os que obtiveram melhores

resultados. Com 8 bar de pressão inicial ultrapassou-se a pressão de ativação de válvula de segurança, pelo que o regime de motor utilizado foi menor que nos testes com outros fluidos não condensáveis, com pressões de funcionamento ligeiramente inferiores a 60 bar. Apesar disso, atingiu-se uma eficiência de 3,7%, mas fraco contributo dos níveis mais distantes, chegando-se a valores muito próximos de 200W. O teste realizado a 1,5 bar de pressão inicial e posterior subida para 25 bar, apresentou também bons resultados, permitindo nesta configuração atingir eficiências de 2,7% e 120 W de potência elétrica máxima.

Apesar das limitações apontadas do evaporador, conseguiu-se validar o conceito de gerador de vapor com controlo de temperatura. Foi possível manter a pressão e temperatura de saturação dentro de intervalos relativamente controlados. No entanto, o uso de volumes mais compactos com maior variação de pressão demonstrou ter potencial para uma maior produção elétrica. A implementação de um sistema baseado neste conceito parece ter potencial para um veículo caso se consiga desenvolver um evaporador que tenha menos limitações no que toca à absorção de calor do escape.

6.2 Reflexões finais sugestões e trabalhos futuros

Alguns problemas durante a elaboração dos testes foram identificados e prejudicaram o melhor funcionamento do protótipo em análise nesta Dissertação. Em primeiro lugar, o equipamento utilizado, nomeadamente o freio do motor, foi sempre uma limitação durante todo o decorrer dos testes. O protótipo testado, tem um funcionamento ótimo a elevadas cargas térmicas que implicam regimes de motor elevados, tendo o freio, muitas vezes, limitado a obtenção de melhores resultados. A utilização de um freio capaz de aguentar maior carga, a melhoria da eficácia do permutador de escape, ou a utilização de um motor com um combustível que permita menor temperatura de gases de escape, mas maior caudal, nomeadamente o gasóleo, poderá ser uma forma de obter melhores resultados em trabalhos futuros, pois o fluxo a partir do qual se começa a dar o fenómeno de *film boiling* será mais difícil de ocorrer.

O protótipo foi projetado para funcionar em configuração normal, com fluxo de fluido de trabalho ascendente, sendo que nessa configuração, não apresentou nenhum problema particular. No entanto, durante o decorrer dos testes, o condensador de excesso nunca foi ativado e as temperaturas da base do evaporador, mostraram algumas vezes pouca presença de fluido de trabalho na fase líquida. Já em configuração com inversão de sentido do fluxo de fluido de trabalho, com argon, notou-se claramente alguma indisponibilidade de água no evaporador, o que limitou a chegada de vapor ao condensador onde estão localizados os TEG. Este facto deveu-se ao já referido demasiado volume disponível para o vapor antes de chegar ao condensador, demorando mais tempo a condensar, prejudicando a “relação” entre a interface evaporador/condensador e por outro lado, a chegada do vapor à zona de produção, nesta configuração de funcionamento em particular.

Apesar de não ter obtido os melhores resultados, o argon apresenta um bom potencial, sendo o fluido de trabalho que apresentou melhor estratificação, tendo também uma propensão para fugas inferior. Sugere-se por isso, futuras alterações do protótipo para a obtenção de melhores resultados.

Um depósito de fluido de trabalho com um volume superior no evaporador, poderá melhorar o funcionamento do mesmo, uma vez que permitirá obter maior disponibilidade para a formação de vapor, mesmo em elevadas cargas térmicas. Outra possibilidade é permitir o retorno dos condensados, pela

mesma zona do evaporador por onde sobem para refrescar o sistema e evitar zonas mortas em termos de transferência de calor.

Como já foi referido, uma diminuição de volume disponível para o vapor até ao topo do condensador, mediante a utilização de um tubo devidamente isolado e mais curto, a existência de uma zona com volume dedicado à saída do argón que permita melhor propagação e contacto do vapor com as faces quentes dos TEG poderão ser também soluções a considerar.

A utilização de TEG otimizados para regimes mais elevados no topo do condensador, em detrimento dos utilizados nos testes realizados com argón, poderão ser também ferramentas que permitam obter melhorias em relação aos resultados obtidos. O facto de o fluido de trabalho depois de condensado, fluir por gravidade, escorrendo pelo condensador até ao evaporador, pode também estar a prejudicar a obtenção de temperaturas elevadas nas faces quentes dos TEG dos níveis mais baixos.

Alguns Fenómenos merecem um estudo mais aprofundado, como o sobreaquecimento do vapor registado no topo do condensador, nomeadamente nos testes realizados com argón a pressões iniciais mais elevadas, com volume total em utilização. Também o sobreaquecimento de algumas zonas do evaporador, merece uma análise mais profunda, resultando em eficácias inferiores a 50%. De facto, como já foi referido, o evaporador mostrou ser um ponto fraco no sistema, absorvendo muito menos calor do que seria de esperar. A falta de água em estado líquido ou o aparentemente efeito de *Leidenfrost* parecem estar a prejudicar o seu funcionamento. Outros fenómenos relacionados com a imprevisibilidade da interação entre diferentes fluidos a diferentes temperaturas, com mudanças de fase envolvidas e muitas vezes a pressões e temperaturas de saturação variáveis, num protótipo com geometria mais ou menos complexa, merecem também um estudo futuro mais aprofundado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Report, "Supporting the Fitness Check of the EU Ambient Air Quality Directives Appendix E : Detailed Evidence for Effectiveness," no. September, pp. 1–61, 2019.
- [2] E. U. Co, F. O. R. New, and P. Cars, "FACT SHEET 01 EUROPEAN UNION CO 2 STANDARDS FOR NEW PASSENGER CARS AND VANS Regulatory design elements : New vehicle CO 2 target levels," vol. 2050, no. JUNE, pp. 89–91, 2021.
- [3] European Commission, "(Text with EEA relevance) 21.6.2017," vol. 2016, no. 68, pp. 48–119, 2018.
- [4] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*. N. York: McGraw-Hill. 1988.
- [5] J. Martins, "Motores de Combustão Interna," no. January 2005, 2015.
- [6] D. F. Dominković, I. Bačeković, A. S. Pedersen, and G. Krajačić, "The future of transportation in sustainable energy systems: Opportunities and barriers in a clean energy transition," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. July 2017, pp. 1823–1838, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.06.117.
- [7] J. Yang and F. R. Stabler, "Automotive applications of thermoelectric materials," *J. Electron. Mater.*, vol. 38, no. 7, pp. 1245–1251, 2009, doi: 10.1007/s11664-009-0680-z.
- [8] M. P. Tietge U, Sonsoles D, Zifei Y, "From laboratory to road international: A comparison of official and real-world fuel consumption and CO2 values for passenger cars in Europe, the United States, China, and Japan," *ICCT White Pap.*, no. November, p. 69, 2017, [Online]. Available: www.theicct.org.
- [9] B. Niu, X. Yu, and Z. Shen, "Structure Adjustment of Automobile Supply Chain Facing Low-carbon Emission Standard," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 171, no. February, p. 105629, 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105629.
- [10] J. Fairbanks, "Vehicular Applications of Thermoelectrics," 2008.
- [11] L. M. Goncalves, J. Martins, J. Antunes, R. Rocha, and F. P. Brito, "Heat-pipe assisted thermoelectric generators for exhaust gas applications," *ASME Int. Mech. Eng. Congr. Expo. Proc.*, vol. 5, no. PARTS A AND B, pp. 1387–1396, 2010, doi: 10.1115/IMECE2010-40926.
- [12] J. Vazquez, M. a Sanz-Bobi, R. Palacios, and A. Arenas, "State of the art of thermoelectric generators based on heat recovered from the exhaust gases of automobiles," *7th Eur. Work. Thermoelectr.*, vol. 17, 2002.
- [13] T. Y. K. and S. H. LEE, "Combustion and Emission Characteristics of Wood Pyrolysis Oil-Butanol Blended Fuels in a Di Diesel Engine," *Int. J. ...*, vol. 13, no. 2, pp. 293–300, 2012, doi: 10.1007/s12239.
- [14] J. Martins, L. M. Goncalves, J. Antunes, and F. P. Brito, "Thermoelectric exhaust energy recovery with temperature control through heat pipes," *SAE 2011 World Congr. Exhib.*, pp. 1–19, 2011, doi: 10.4271/2011-01-0315.
- [15] F. P. Brito, J. Martins, E. Hançer, N. Antunes, and L. M. Gonçalves, "Thermoelectric Exhaust Heat Recovery with Heat Pipe-Based Thermal Control," *J. Electron. Mater.*, vol. 44, no. 6, pp. 1984–1997, 2015, doi: 10.1007/s11664-015-3638-3.
- [16] F. P. Brito, J. Martins, L. M. Goncalves, and R. Sousa, "Temperature controlled exhaust heat thermoelectric generation," *SAE Tech. Pap.*, no. May, 2012, doi: 10.4271/2012-01-1214.
- [17] E. De Engenharia, "Rui Manuel Abreu Sousa Gerador Termoelétrico para Escape do Automóvel com Controlo de Temperatura Rui Manuel Abreu Sousa Gerador Termoelétrico para Escape do Automóvel com Controlo de Temperatura," 2011.
- [18] F. P. Brito *et al.*, "Efficiency improvement of vehicles using temperature controlled exhaust thermoelectric generators," *Energy Convers. Manag.*, vol. 203, no. August 2019, p. 112255,

- 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2019.112255.
- [19] L. Gonçalves, "Microsistema Termoelétrico Baseado em Teluretos de Bismuto e Antimônio," *Vasa*, 2008, [Online]. Available: <http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>.
- [20] A. B. Neild, "Portable thermoelectric generators," *SAE Tech. Pap.*, 1963, doi: 10.4271/630019.
- [21] K. M. SAQR, "Design and Simulation of an Exhaust Based Thermoelectric Generator (Teg) for Waste Heat Recovery in Passenger Vehicle," *Univ. Teknol. Malaysia*, pp. 5–44, 2008.
- [22] U. Birkholz, "Conversion of Waste Exhaust Heat in Automobile using FeSi₂ thermoelements," *Proc. 7th Int. Conf. Thermoelectr. Energy Convers.*, vol. 107, pp. 124–128, 1988.
- [23] J. Fairbanks, "Thermoelectric Applications in Vehicles Status 2008," *6th Eur. Conf. Thermoelectr.*, pp. 1–7, 2008.
- [24] J. C. Bass, N. B. Elsner, and F. A. Leavitt, "Performance of the 1 kW thermoelectric generator for diesel engines," pp. 295–298, 2008, doi: 10.1063/1.46818.
- [25] J. C. BASS, R. J. CAMPANA, and N. B. ELSNER, "Thermoelectric Generator for Diesel Trucks," *Proc. Tenth Int. Conf. Thermoelectr.*, 1991.
- [26] K. Ikoma, M. Munekiyo, K. Furuya, M. Kobayashi, T. Izumi, and K. Shinohara, "Thermoelectric module and generator for gasoline engine vehicles," in *Seventeenth International Conference on Thermoelectrics. Proceedings ICT98 (Cat. No.98TH8365)*, 1998, pp. 464–467, doi: 10.1109/ICT.1998.740419.
- [27] E. F. Thacher, B. T. Helenbrook, M. A. Karri, and C. J. Richter, "Testing of an automobile exhaust thermoelectric generator in a light truck," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.*, vol. 221, no. 1, pp. 95–107, 2007, doi: 10.1243/09544070JAUTO51.
- [28] A. Kushch, M. Karri, B. Helenbrook, and C. Rickter, "The Effects of an Exhaust Thermoelectric Generator of a GM Sierra Pickup Truck," *DEER Conf.*, 2004.
- [29] J. LaGrandeur, "Automotive Waste Heat Conversion to Electric Power using Skutterudites, TAGS, PbTe and Bi₂Te₃ Discussion Outline Discussion Outline Background program information and system architecture System modeling (bumper to bumper vehicle model inclusive of ther," pp. 1–27, 2006.
- [30] J. Lagrandeur and D. T. Crane, "Vehicle Fuel Economy Improvement through Thermoelectric Waste Heat Recovery," *North*, 2005.
- [31] M. A. Zoui, S. Bentouba, J. G. Stocholm, and M. Bourouis, "A review on thermoelectric generators: Progress and applications," *Energies*, vol. 13, no. 14, 2020, doi: 10.3390/en13143606.
- [32] H. Böttner, *Overview of Thermoelectrics in Germany*. 2009.
- [33] E. De Engenharia, "Universidade do Minho João Paulo Dourado Oliveira Development of a Thermoelectric Generator for the Exhaust of a Vehicle," 2015.
- [34] D. T. E. G. Solution and B. F. Vehicle, "GMZ Energy Announces 1 , 000 Watt High-Temperature Thermoelectric Generator for U . S . Military," pp. 0–2.
- [35] F. P. Brito *et al.*, "Analysis of a Temperature-Controlled Exhaust Thermoelectric Generator During a Driving Cycle," *J. Electron. Mater.*, vol. 45, no. 3, pp. 1846–1870, 2016, doi: 10.1007/s11664-015-4258-7.
- [36] T. P. Hogan *et al.*, "Nanostructured thermoelectric materials and high-efficiency power-generation modules," *J. Electron. Mater.*, vol. 36, no. 7, pp. 704–710, 2007, doi: 10.1007/s11664-007-0174-9.
- [37] G. L. Bennett *et al.*, "Mission of daring: The general-purpose heat source radioisotope thermoelectric generator," *Collect. Tech. Pap. - 4th Int. Energy Convers. Eng. Conf.*, vol. 1, no. June, pp. 720–742, 2006, doi: 10.2514/6.2006-4096.
- [38] H. I. Works, "Radioisotope Thermoelectric Generators (RTGs) | Cassini," *Nasa*, 2018, [Online]. Available: <https://solarsystem.nasa.gov/missions/cassini/radioisotope-thermoelectric->

- generator/.
- [39] D. M. Rowe and Gao Min, "Evaluation of thermoelectric modules for power generation," *J. Power Sources*, vol. 73, no. 2, pp. 193–198, 1998.
 - [40] M. F. Silva, J. F. Ribeiro, J. P. Carmo, L. M. Goncalves, and J. H. Correia, "Thin-films for Thermoelectric Applications," no. 1.
 - [41] R. Ahiska and H. Mamur, "A review: Thermoelectric generators in renewable energy," *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 4, no. 1, pp. 128–136, 2014, doi: 10.20508/ijrer.25996.
 - [42] R. Venkatasubramanian *et al.*, "Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit," *Nature*, vol. 413, pp. 597–602, 2001.
 - [43] D. Reay and P. Kew, *Heat Pipes Theory, Design and Applications*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006.
 - [44] R. M. Stallman and R. M. Stallman, "The Free Encyclopedia Project," pp. 1–24, 2007, [Online]. Available: <http://www.gnu.org/encyclopedia/encyclopedia.html>.
 - [45] J. W. KENNETH and D. W. RICHARDS, "Termodinamica." 6 ed. Madrid, McGraw-Hill, 2001.
 - [46] J. Carneiro, "Mecanismos de Transferência de Calor," 2015.
 - [47] Y. A. Çengel, J. M. Cimbala, and R. H. Turner, *Fundamentals of fluid-thermal sciences*, vol. 2, no. 27. 2017.
 - [48] T. . Seebeck, "Metalle und erze durch temperatur-differenz," *Ostwald's Klassiker Von Exakten Wissenschaften*, no. 70, 1823, [Online]. Available: <https://ia802608.us.archive.org/0/items/magnetischepolar00seebuoft/magnetischepolar00seebuoft.pdf>.
 - [49] K. P. Pipe, R. J. Ram, and A. Shakouri, "Bias-dependent Peltier coefficient and internal cooling in bipolar devices," *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 66, no. 12, pp. 1253161–12531611, 2002, doi: 10.1103/PhysRevB.66.125316.
 - [50] S. B. Riffat and X. Ma, "Thermoelectrics: A review of present and potential applications," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, no. 8, pp. 913–935, 2003, doi: 10.1016/S1359-4311(03)00012-7.
 - [51] W. Thomson, "4. On a Mechanical Theory of Thermo-Electric Currents.," *Proc. R. Soc. Edinburgh*, vol. 3, no. March 2015, pp. 91–98, 1857, doi: 10.1017/s0370164600027310.
 - [52] D. Enescu, "Thermoelectric Energy Harvesting: Basic Principles and Applications," *Green Energy Adv.*, pp. 1–34, 2019, doi: 10.5772/intechopen.83495.
 - [53] E. Bash, *Handbook of thermoelectrics*, vol. 1. 2015.
 - [54] F. P. Brito *et al.*, "Analysis and design of a silicide-tetrahedrite thermoelectric generator concept suitable for large-scale industrial waste heat recovery," *Energies*, vol. 14, no. 18, 2021, doi: 10.3390/en14185655.
 - [55] F. P. Brito *et al.*, "Analysis of thermoelectric generator incorporating n-magnesium silicide and p-tetrahedrite materials," *Energy Convers. Manag.*, vol. 236, no. March, p. 114003, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114003.
 - [56] The Engineering Toolbox, "Water - Saturation pressure," *Eng. Toolbox*, pp. 1–11, 2004, [Online]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/water-vapor-saturation-pressure-d_599.html.

ANEXO 1 – INSTRUÇÕES PARA MANIPULAÇÃO DE FICHEIROS E TRATAMENTOS DE DADOS

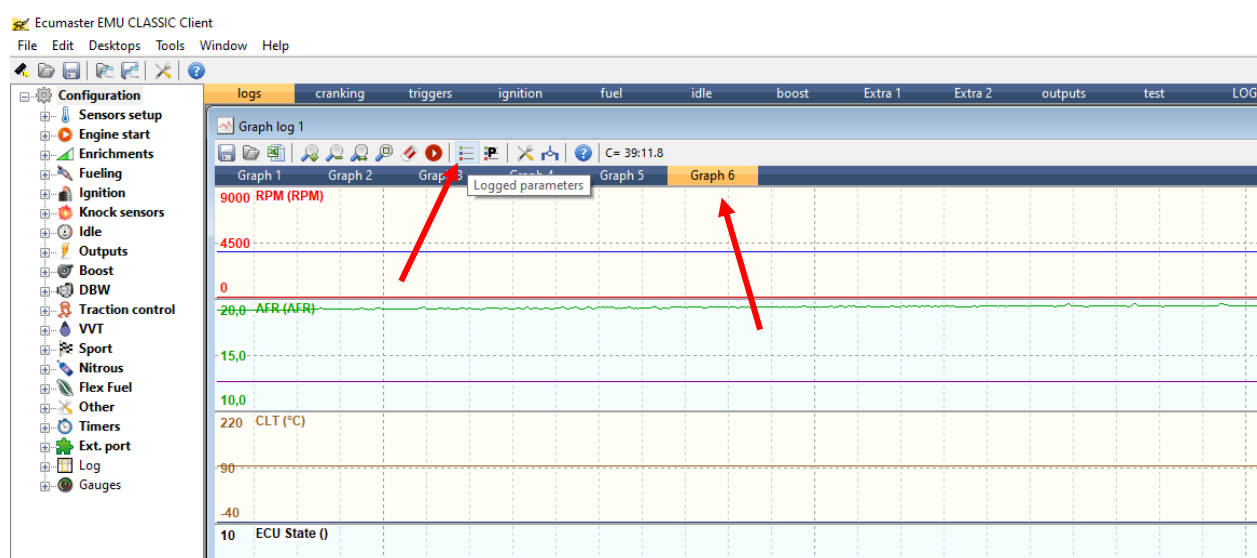
Tome-se como exemplo os ficheiros gerados após o ensaio 19.

Do *software* de controlo da centralina do motor (**Ecumaster EMU**) resulta um ficheiro onde estão gravados todos os dados do motor durante o teste: **emu_19.emulog**

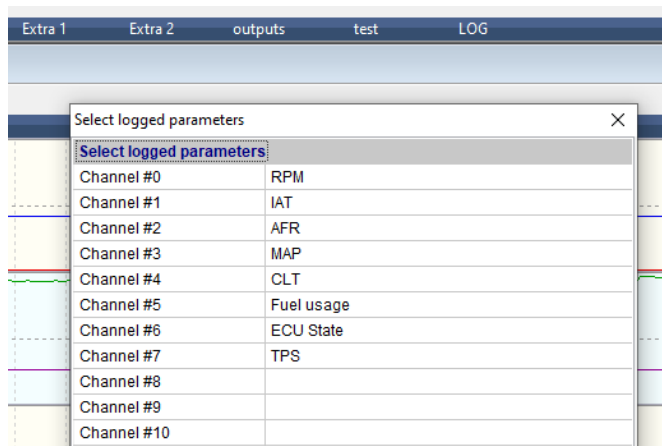
Do *software* de controlo do sistema de aquisição de dados (**LabView**) resulta um ficheiro onde estão gravados os dados de todos os sensores instalados no protótipo vertical do gerador termoelétrico: **ensaio_19.txt**

Passo 1 – Extração de dados relativos ao funcionamento do motor

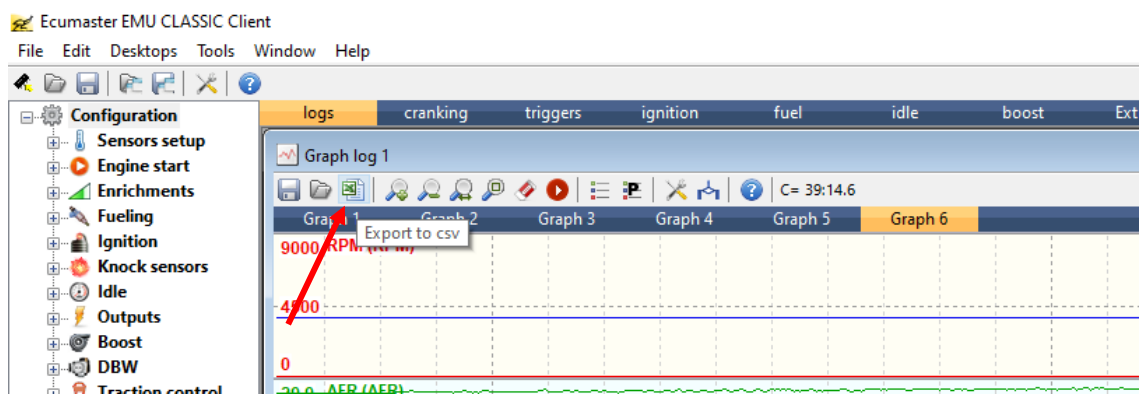
- Com o *software* **Ecumaster MEU**, abrir o ficheiro “**emu_19.emulog**”
- Clicar no separador “**Graph 6**”, e em seguida no botão “**Logged parameters**”



- Na janela “**Select logged parameters**”, verificar que os parâmetros são os mesmos se encontram na mesma ordem que o apresentado na figura abaixo:

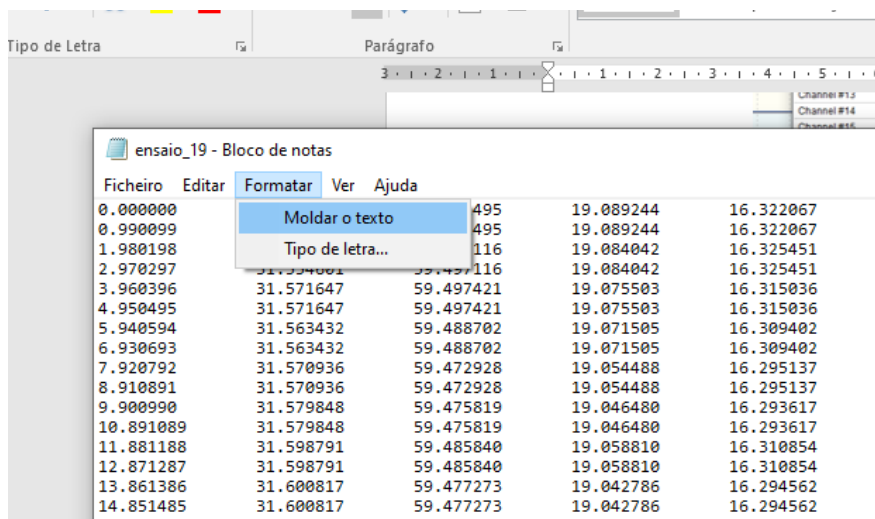


- Confirmada a ordem dos parâmetros, clicar no botão “Export to CSV”, e guardar com o nome **emu_19.csv**



Passo 2 – Correção do *array*TIME no ficheiro de dados do motor

- Abrir o ficheiro **ensaio_19.txt**, clicar no separador “**Formatar**” e confirmar que o item “**Moldar o texto**” **NÃO** está selecionado.



- Tomar nota do número que consta da última linha da primeira coluna. (Aqui a primeira coluna é o *array* “Time”, ou seja, o contador do tempo que o ensaio dura. O valor da última linha corresponde à duração máxima, em segundos, do ensaio. Neste exemplo, **≈1537.624 segundos**.

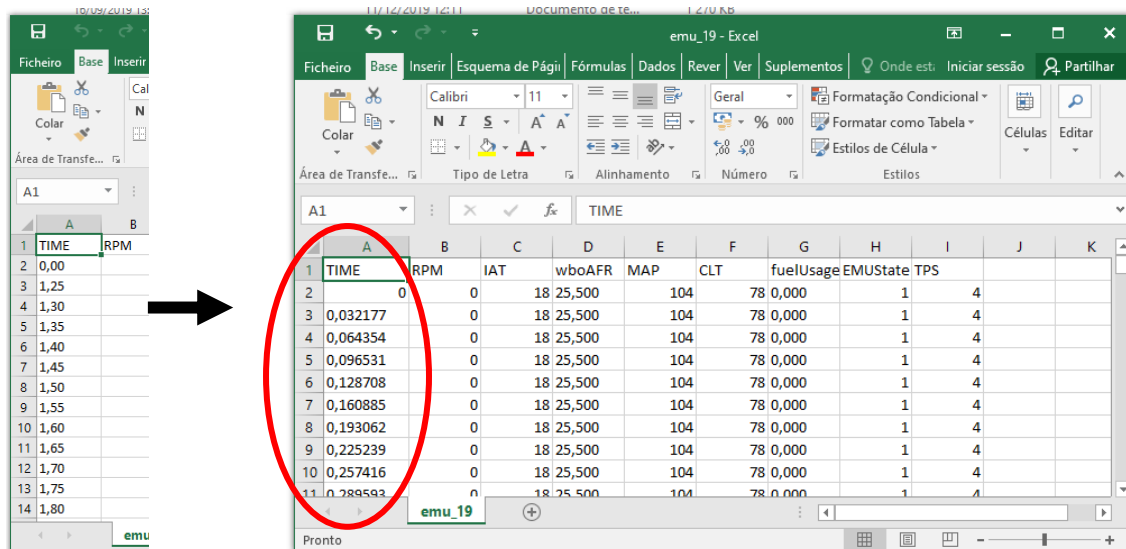
Ficheiro	Editar	Formatar	Ver	Ajuda
1525.742574	125.453571	319.893406	138.302998	102.599564
1526.732673	125.478850	320.081669	136.809966	101.787064
1527.722772	125.478850	320.081669	136.809966	101.787064
1528.712871	125.474975	320.270230	135.458067	100.951762
1529.702970	125.474975	320.270230	135.458067	100.951762
1530.693069	125.489659	320.459285	134.333402	100.135873
1531.683168	125.489659	320.459285	134.333402	100.135873
1532.673267	125.483411	320.639031	133.259428	99.296202
1533.663366	125.483411	320.639031	133.259428	99.296202
1534.653465	125.494711	320.820071	132.379079	98.484690
1535.643564	125.494711	320.820071	132.379079	98.484690
1536.633663	125.478448	320.998497	131.579193	97.659119
1537.623762	125.478448	320.998497	131.579193	97.659119

- Abrir o ficheiro **emu_19.csv** e verificar quantas linhas de dados estão inscritas. Neste exemplo, serão **47786 linhas**. A este número deverá subtrair-se uma linha (corresponde à linha de cabeçalho, pelo que o número a considerar será **47785**).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
47781	1537,3848	0	28 20,200	104	95 0,000	1	2				
47782	1537,4170	0	28 20,000	104	95 0,000	1	2				
47783	1537,4492	0	28 20,200	104	95 0,000	1	2				
47784	1537,4814	0	28 20,000	104	95 0,000	1	2				
47785	1537,5135	0	28 20,100	104	95 0,000	1	2				
47786	1537,5457	0	28 20,100	104	95 0,000	1	2				
47787											
47788											
47789											
47790											
47791											

- Dividir 1537.624 segundos por 47785 linhas, o que resulta em **0.032177 segundos por linha** (para este exemplo). Este é o valor de incremento que deverá substituir o valor que originalmente está inscrito na coluna **TIME**. **Atenção, neste ficheiro o separador decimal é a vírgula (,) e não o ponto (.)**.

Obs: Isto acontece porque existe um "bug" no software da centralina que, ao exportar os dados para o ficheiro .csv , escreve de forma errónea os valores na coluna **TIME**, o que faz com que o ensaio registado pela centralina se apresente mais longo do que foi na realidade. Daí a necessidade desta correção.

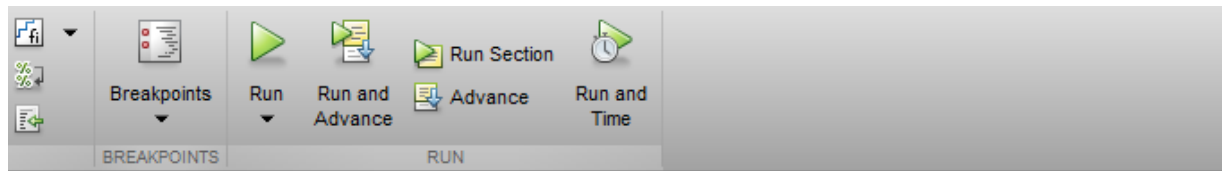


Passo 3 – Processamento de dados em Matlab

- Abrir o ficheiro de código do Matlab. O programa funciona com 5 ficheiro distintos (ver figura abaixo):
 - Dois ficheiros onde vai ler os dados (**file1** e **file2**);
 - Um ficheiro onde serão guardados todos os gráficos gerados, que será gerado após o processamento (**filegraphics**);
 - Um ficheiro onde será guardado o excel com dados dos TEGs (**fileTEG**);
 - Um ficheiro que é o *template*, previamente formatado, onde serão escritos os dados do ficheiro anterior (**fileTEG_template**).

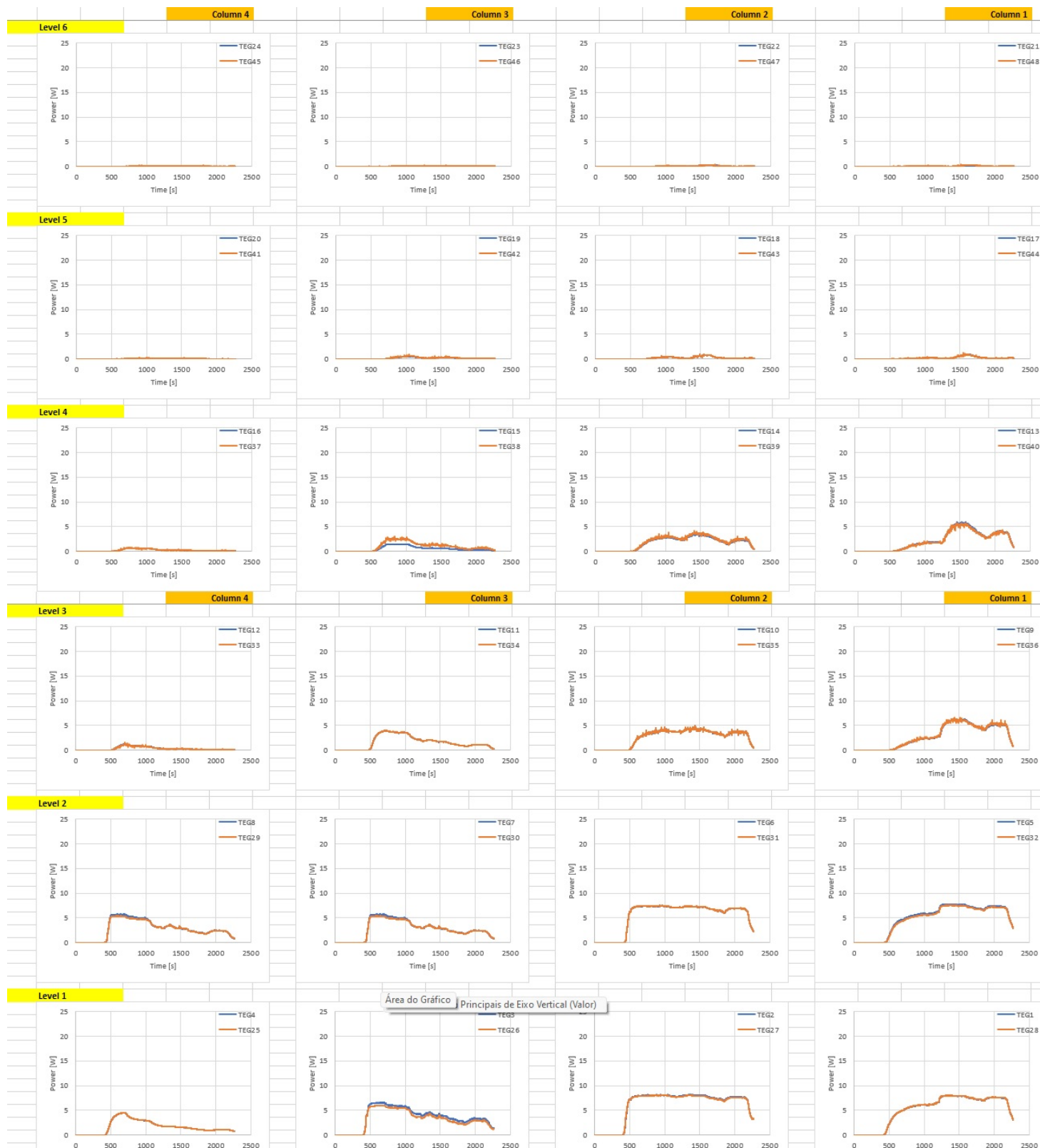
Para cada um destes ficheiros, é necessário escrever no programa o seu diretório conforme a figura abaixo. Sugere-se a criação de uma pasta específica para o efeito (no exemplo da figura abaixo foi tudo colocado no ambiente de trabalho) e depois só terá que ser alterada a última parte do diretório dos ficheiros que serão lidos (**file1** e **file2**) e escritos (**filegraphics** e **fileTEG**), já que o *template* (**fileTEG_template**) só deverá ser definido uma vez.

- Definidos estes diretórios, executar o programa (botão RUN) e aguardar alguns minutos pela conclusão do processamento dos dados.
- Após um primeiro processamento deverão ser avaliados os gráficos gerados de forma a verificar qual o intervalo de tempo que será considerado como *Steady State*. Após isso, colocar o valor mínimo e o valor máximo do intervalo (em segundos) e processar novamente. Os novos ficheiros gerados substituirão os que foram gerados no primeiro processamento (desde que não se alterem os diretórios).

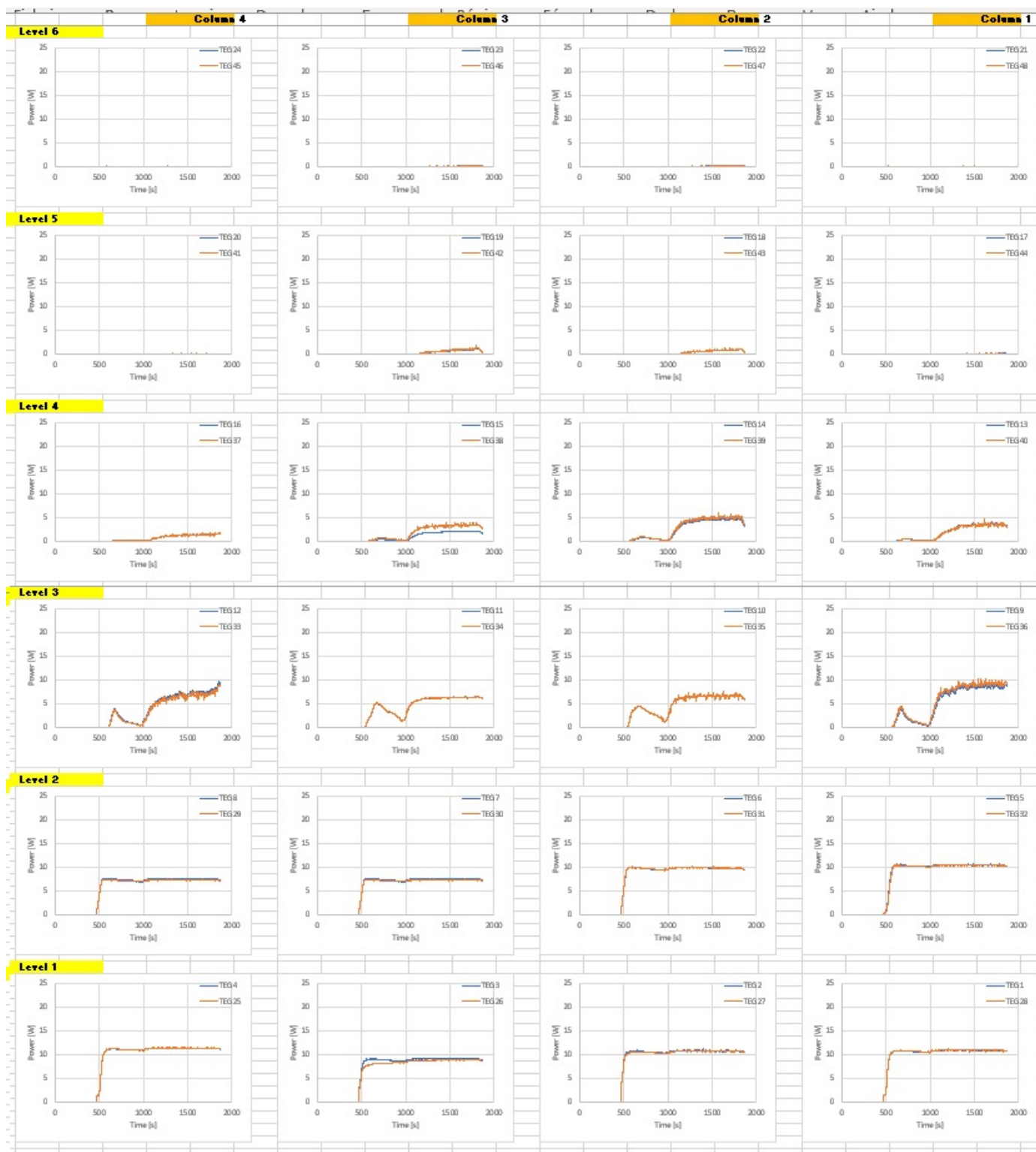


```
Editor - D:\Nuno Pacheco\Testes_Protótipo\Process_data_teste18_proc.m*
Process_data_teste18_proc.m* x +
1 %Diretório dos ficheiros a carregar:
2 - file1='C:\Users\User\Desktop\ensaio_19.txt';
3 - file2='C:\Users\User\Desktop\emu_19.csv';
4 %Diretório do ficheiro onde serão guardados os gráficos gerados:
5 - filegraphics='C:\Users\User\Desktop\Gráficos_19_proc.fig';
6 %Diretório do ficheiro onde será guardado o excel com dados dos TEGs:
7 - fileTEG='C:\Users\User\Desktop\TEGdata_19_proc.xlsx';
8 %Diretório do template (excel com dados dos TEGs):
9 - fileTEG_template='D:\Nuno Pacheco\Testes_Protótipo\TEGdata_temp.xlsx';
10
11 %Constantes e Condições de ensaio:
12 - total_water_flow=17.893; % [l/min] - Total water flow.
13 - n_plates=12; % Number of cooling plates of the system.
14 - cp_water=4.178; % [kJ/kg.K] - Specific heat of water (25°C).
15 - cp_exhaust_gas=1.099; % [kJ/kg.K] - Specific heat of air (800 K)
16 - ro_water=997.048; % [kg/m^3] - Density of liquid water (25°C).
17 - ro_fuel=750; % [g/l] - Density of fuel (petrol).
18 - R_air=0.28706; % [kJ/kg.K] - Individual gas constant for air.
19
20 %Intervalo de tempo considerado como "Steady State" (em segundos):
21 - seconds_min=1050;
22 - seconds_max=1290;
23
24 %Instruções para carga do ficheiro 1 (Aquisição de dados):
25 %% Import data from text file.
26 & Script for importing data from the following text file:
```

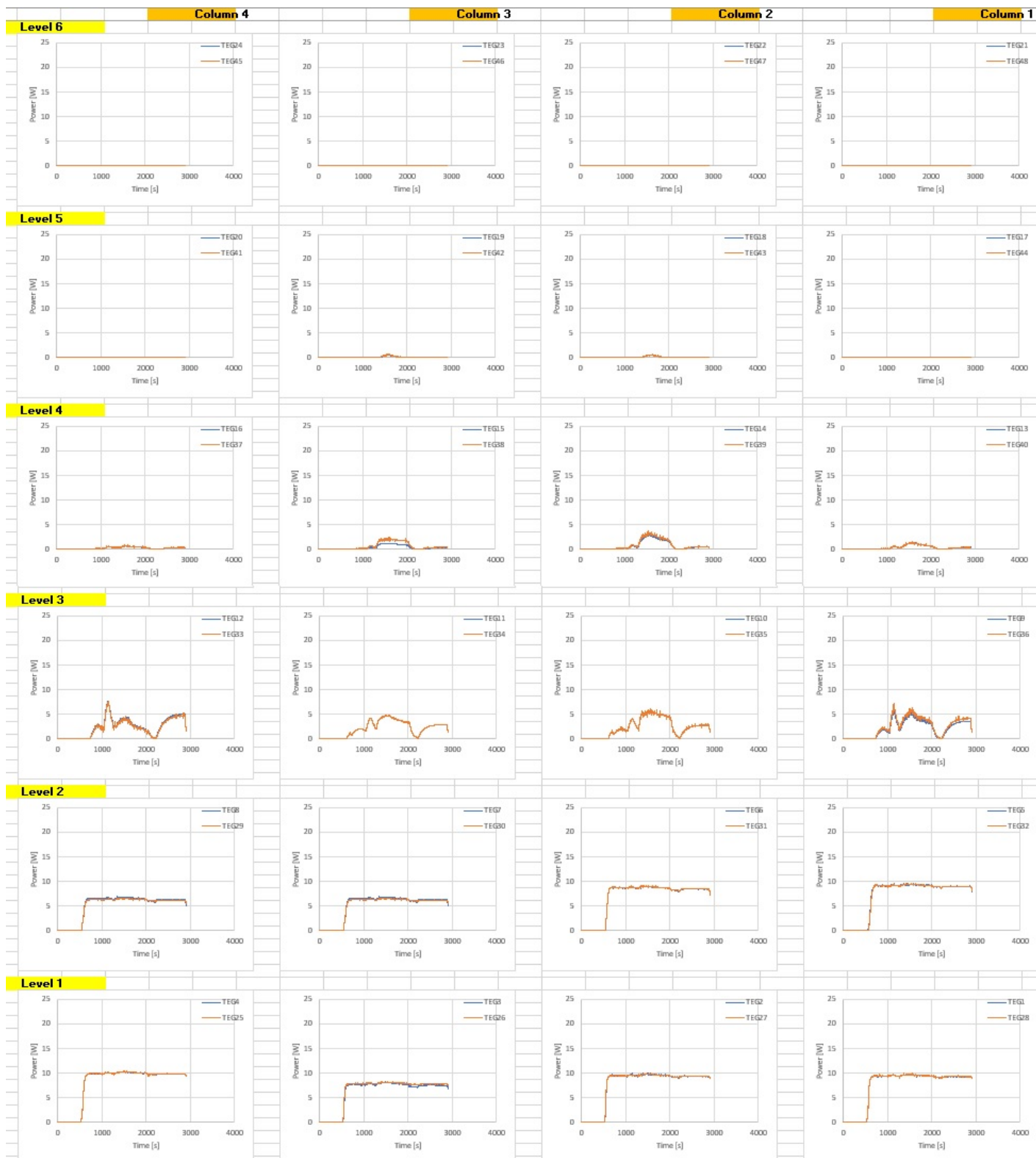
ANEXO 2 – TESTE AZOTO 14 BAR – POTÊNCIA ELÉTRICA POR NÍVEL



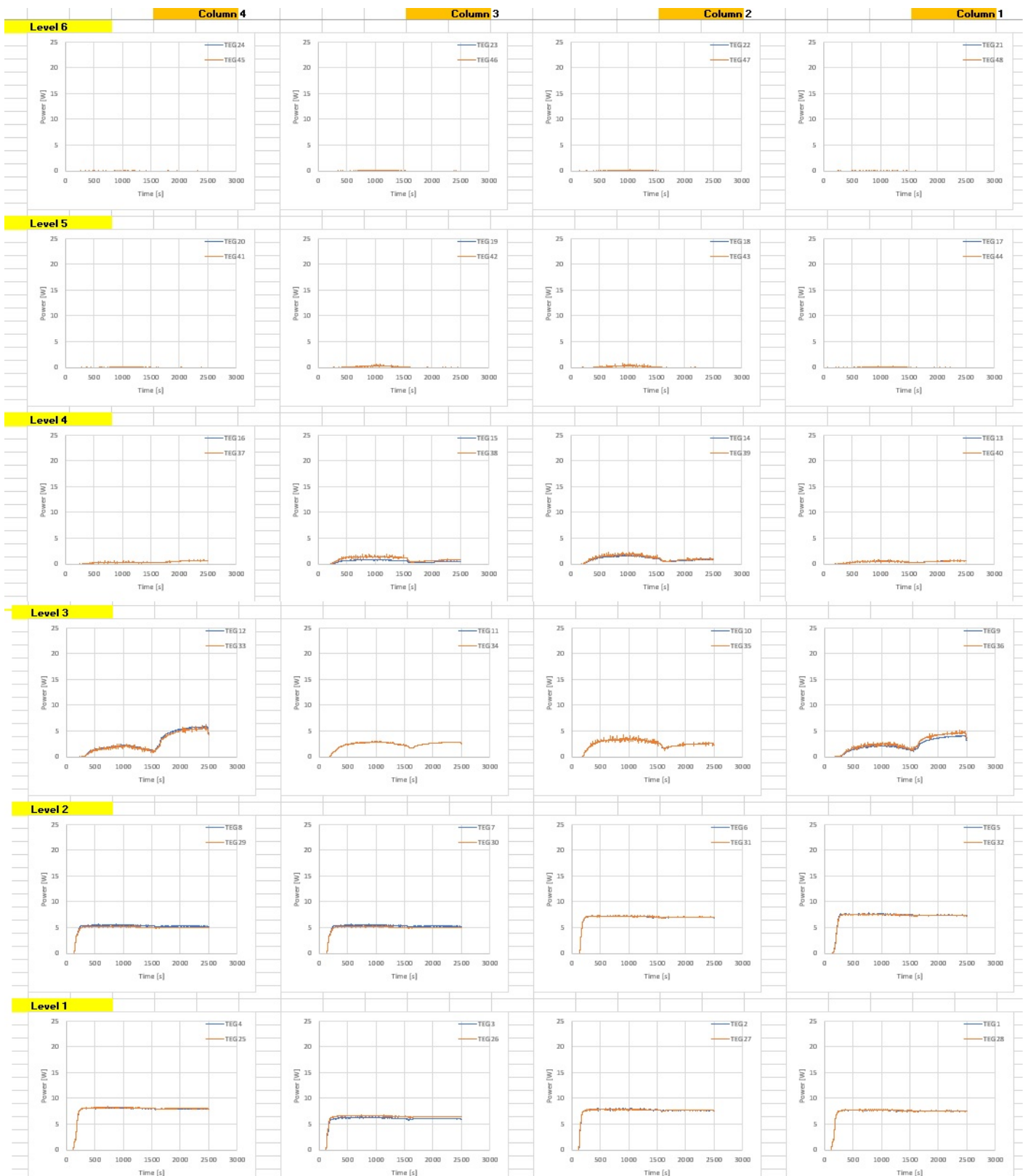
ANEXO 3– TESTE HÉLIO 30 BAR – POTÊNCIA ELÉTRICA POR NÍVEL



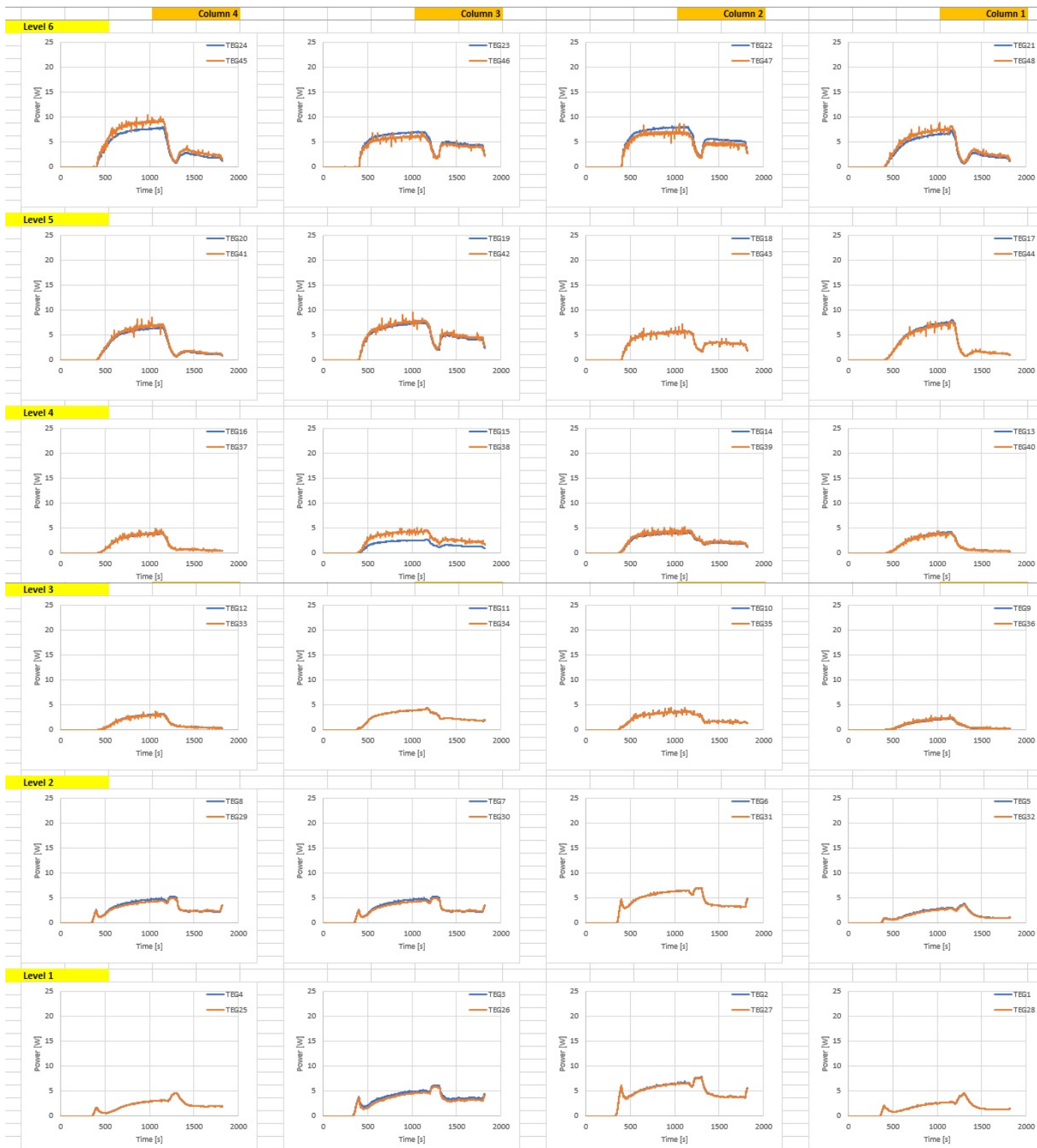
ANEXO 4– TESTE HÉLIO 20 BAR – POTÊNCIA ELÉTRICA POR NÍVEL



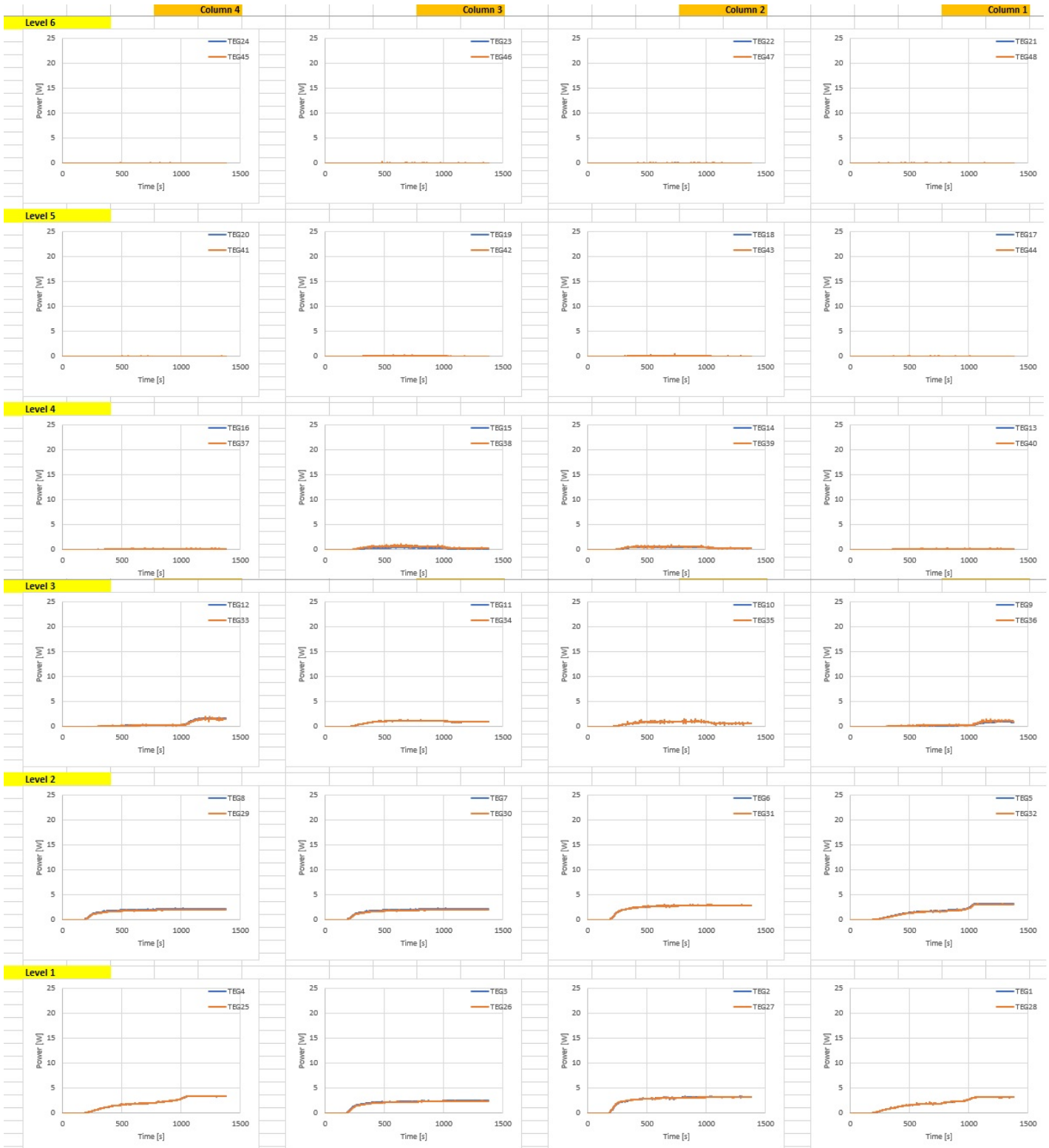
ANEXO 5– TESTE HÉLIO 11 BAR – POTÊNCIA ELÉTRICA POR NÍVEL



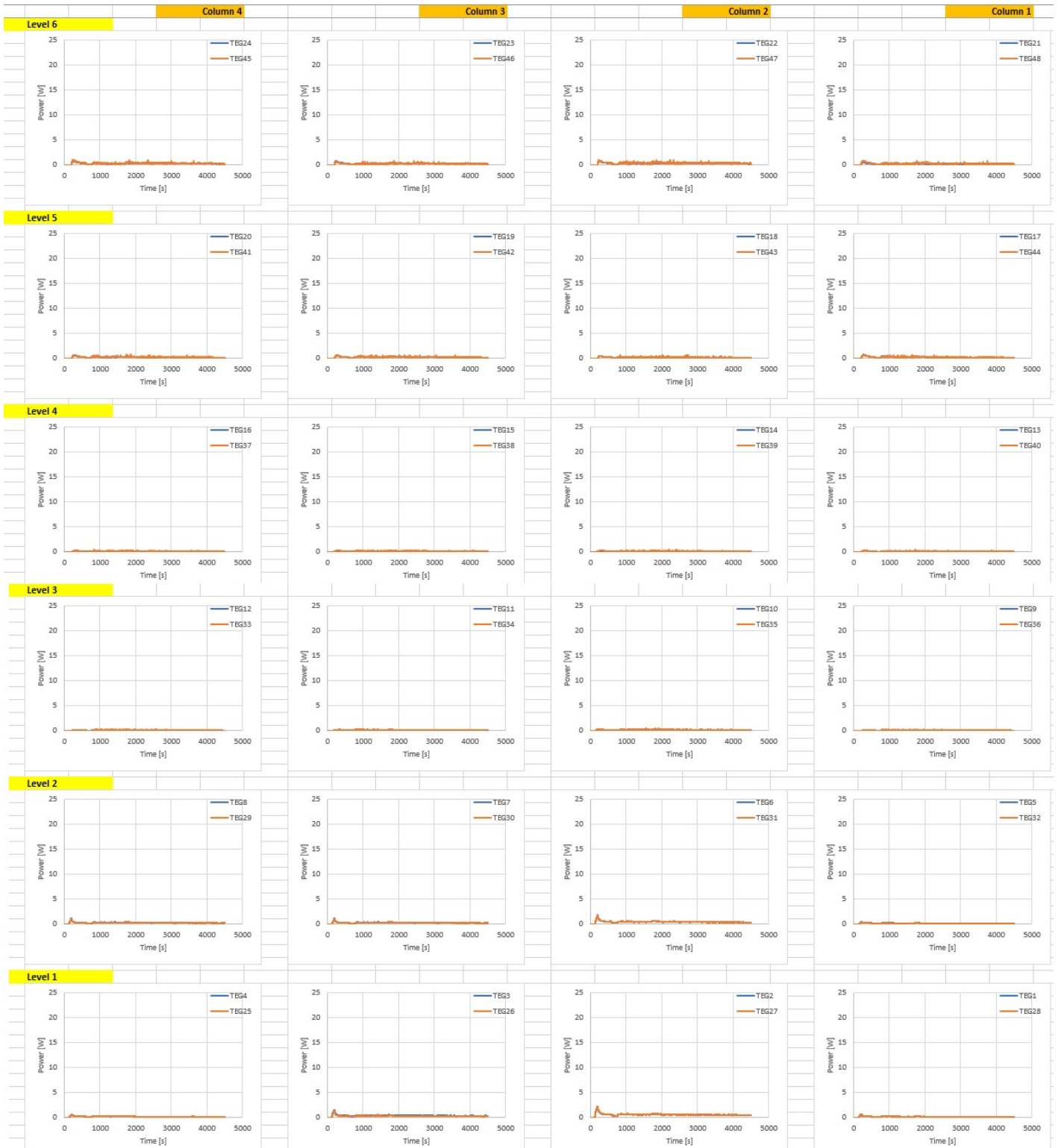
ANEXO 6– TESTE HÉLIO 8 BAR COM V2 FECHADA – POTÊNCIA ELÉTRICA POR NÍVEL



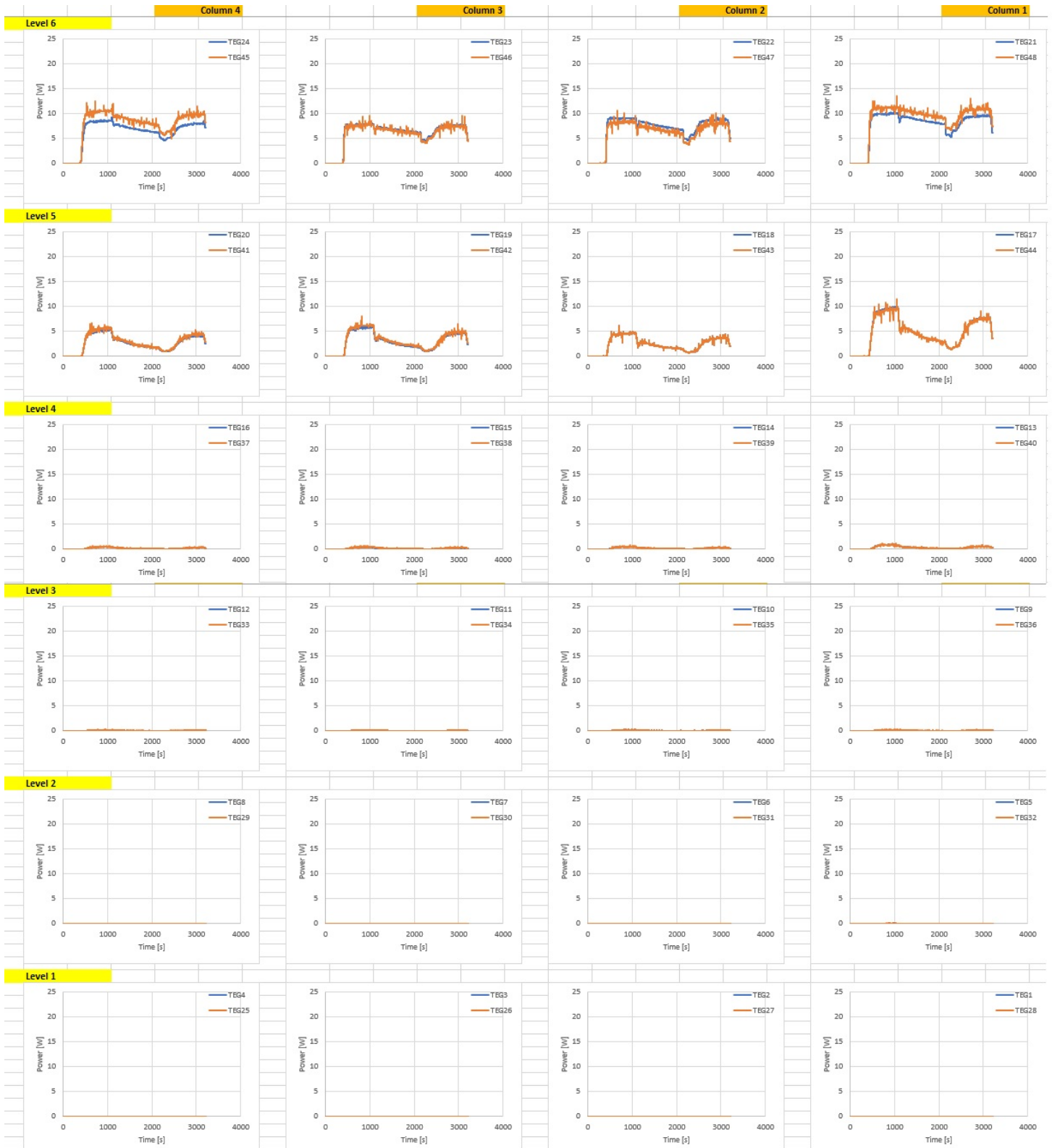
ANEXO 7 – TESTE HÉLIO 0.8 BAR – POTÊNCIA ELÉTRICA POR NÍVEL



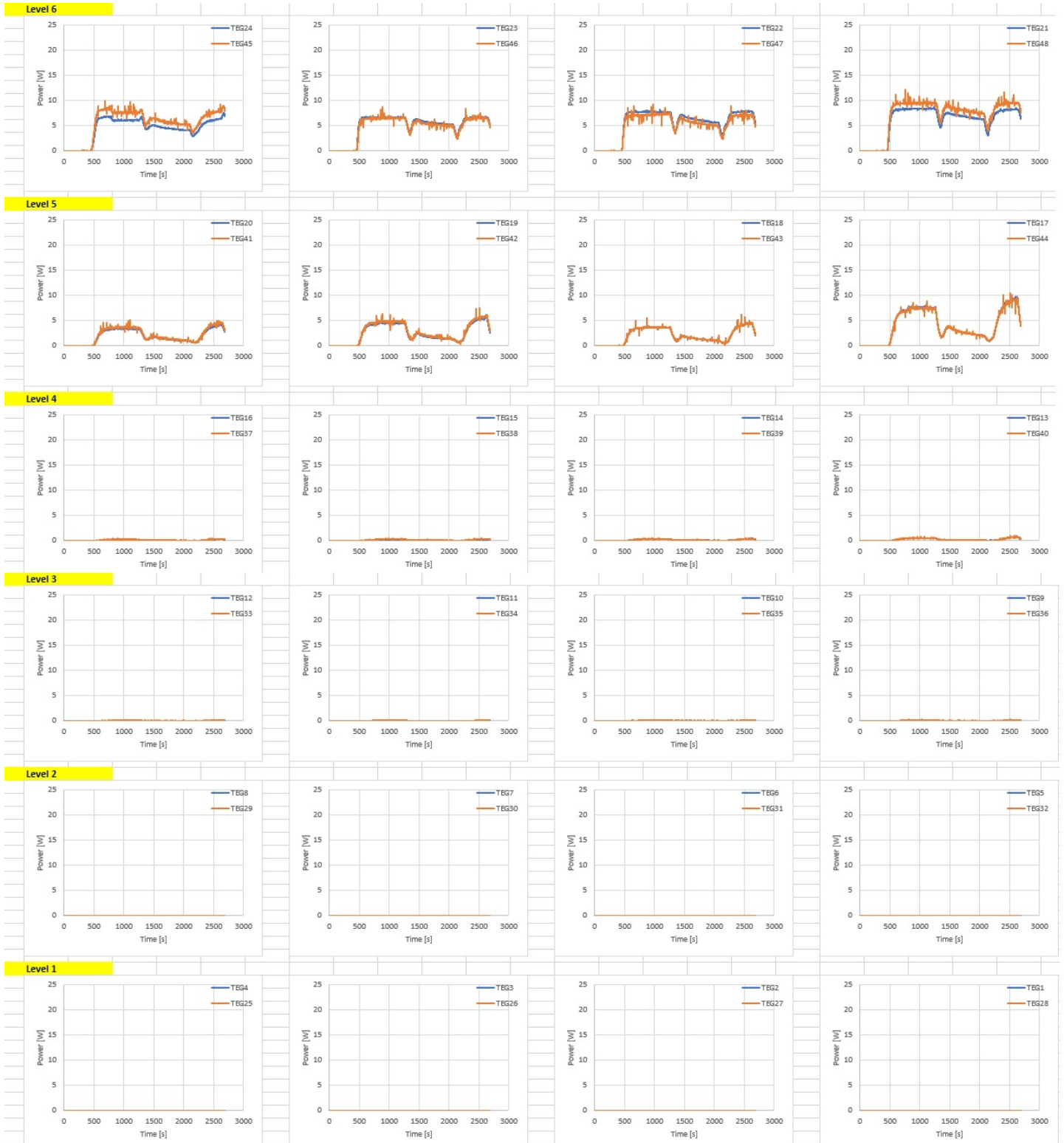
ANEXO 8 – TESTE HÉLIO VÁCUO – POTÊNCIA ELÉTRICA POR NÍVEL



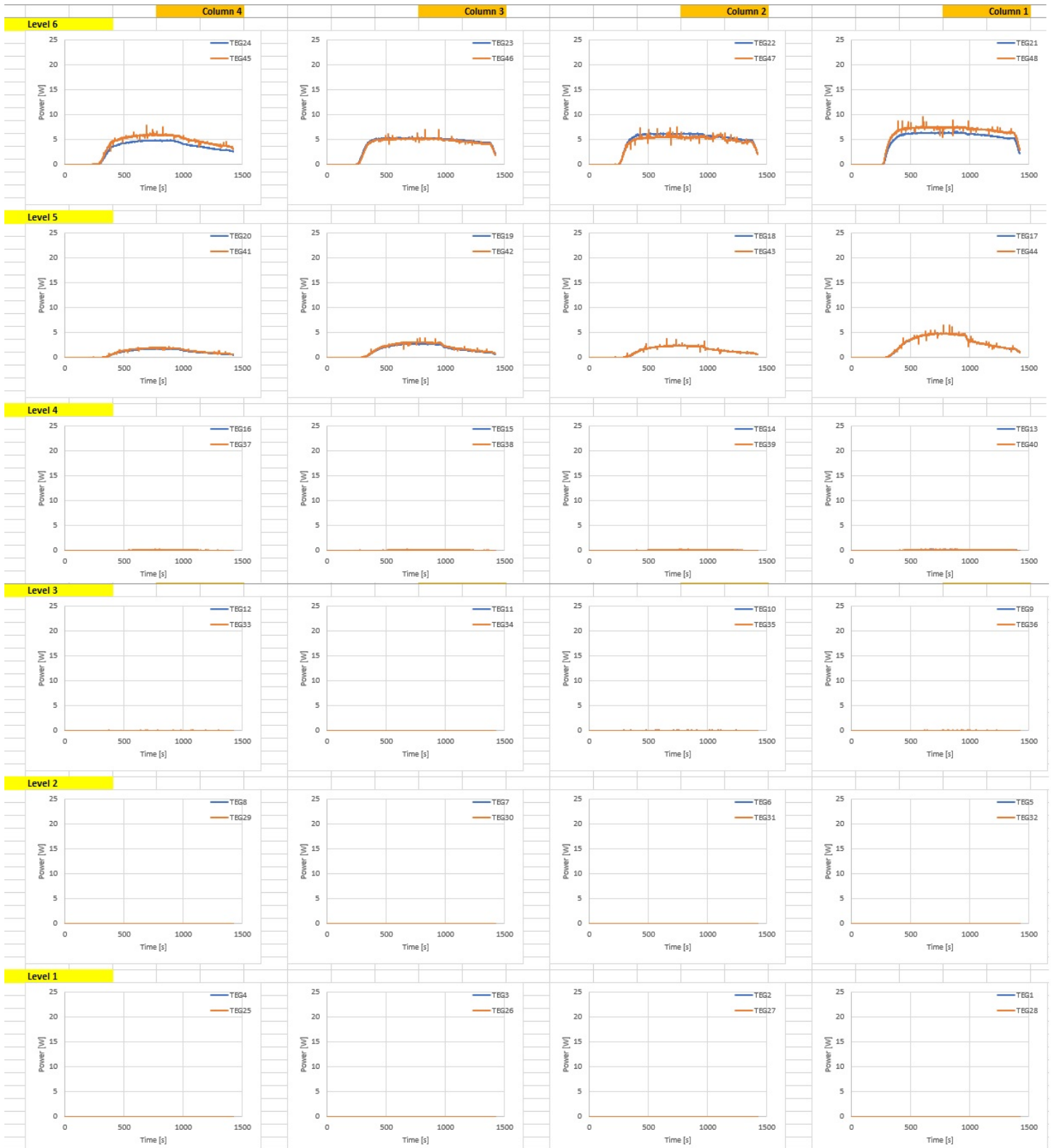
ANEXO 9 – TESTE ÁRGON 30 BAR – POTÊNCIA ELÉTRICA POR NÍVEL



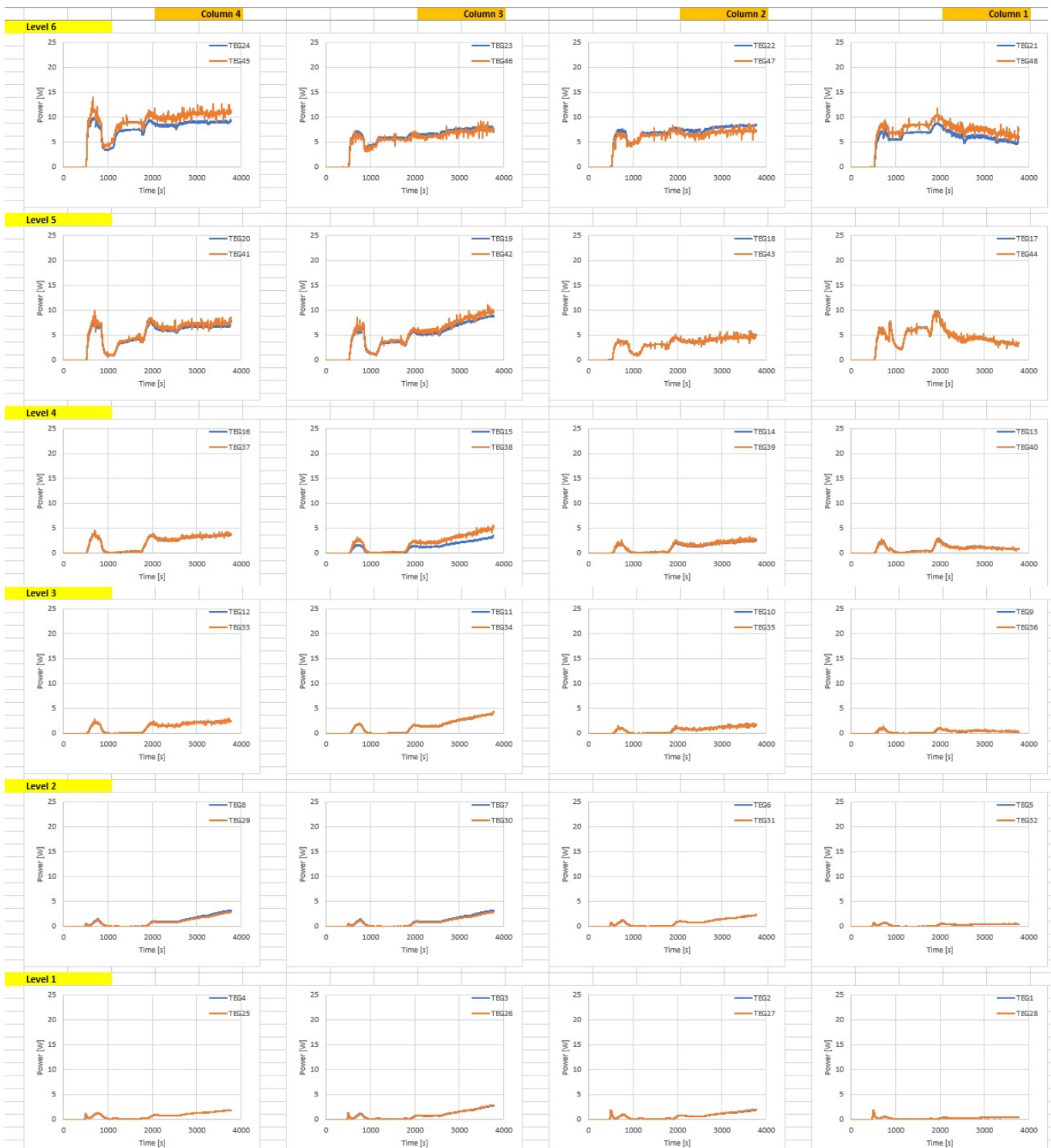
ANEXO 10– TESTE ÁRGON 20 BAR– POTÊNCIA ELÉTRICA POR NÍVEL



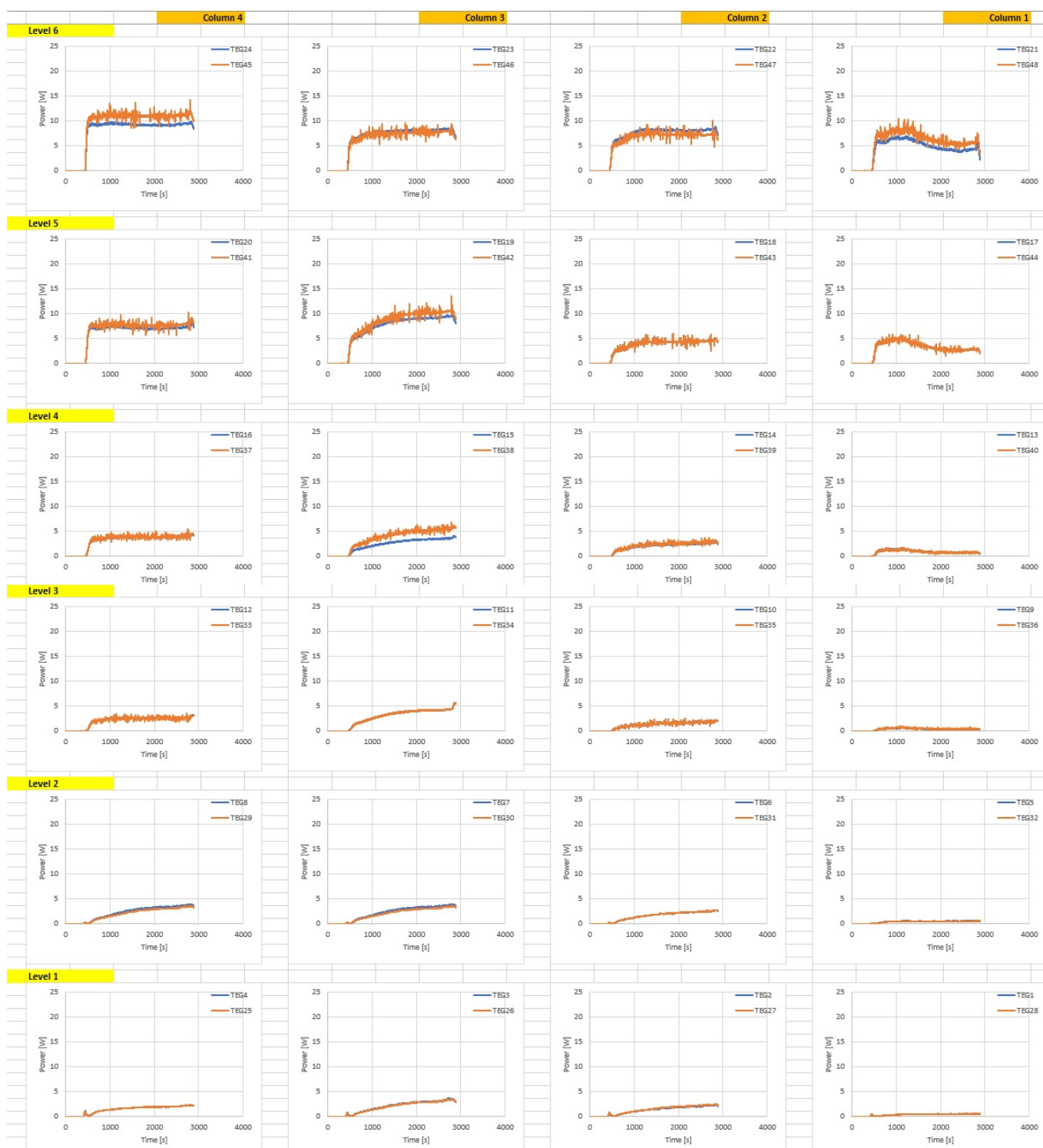
ANEXO 11– TESTE ÁRGON 10 BAR– POTÊNCIA ELÉTRICA POR NÍVEL



ANEXO 12– TESTE ÁRGON 10 BAR COM V2 FECHADA– POTÊNCIA ELÉTRICA POR NÍVEL



ANEXO 13– TESTE ÁRGON 8 BAR COM V2 FECHADA– POTÊNCIA ELÉTRICA POR NÍVEL



ANEXO 14– TESTE ÁRGON PRESSÃO ATMOSFÉRICA– POTÊNCIA ELÉTRICA POR NÍVEL

