

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Utilização de Geradores Termoelétricos em Gliders Oceânicos

Luis Filipe Cordeiro Máximo



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor Fernando Gomes de Almeida

Co-orientador: Professor Doutor João Falcão Carneiro

Porto, Setembro de 2015

Resumo

Atualmente, os *gliders* desempenham um papel importante na oceanografia como plataformas de observação. Estes veículos possuem características únicas e vantagens, em termos de custo e de manutenção, em comparação com os métodos tradicionais.

Sabendo que os *gliders* oceânicos descrevem um perfil de mergulho semelhante a um movimento em dente de serra, um tipo particular de *glider*, chamado *Thermal Glider*, recolhe a energia a partir do gradiente térmico do oceano através de um gerador hidráulico. Este é acionado por uma máquina térmica que utiliza a acentuada variação de volume com a temperatura apresentada por um material de mudança de fase (PCM).

Neste trabalho, foi estudada a possibilidade de recolher energia a partir do gradiente de temperatura do oceano utilizando geradores termoeletricos em vez do gerador hidráulico. Estes geradores termoeletricos convertem energia térmica em energia elétrica e não necessitam de manutenção.

Para testar esta possibilidade, desenvolveu-se um modelo em que são integrados geradores termoeletricos em *gliders* oceânicos. Este modelo consiste numa análise de transferência de calor entre a água do oceano, os geradores termoeletricos e um material armazenador de energia térmica, colocado no interior do *glider*.

O modelo foi simulado tendo em consideração vários materiais para armazenar energia térmica. Para cada um destes materiais, foram variados o volume de material armazenador de energia térmica e o número de geradores termoeletricos, em cada simulação. O objetivo destas simulações foi alcançar uma combinação destes dois parâmetros que permitisse gerar 6 kJ em cada mergulho, sendo esta a energia recolhida por um *Slocum Thermal* convencional.

Os resultados obtidos nas simulações mostram que é possível gerar a quantidade de energia requerida por um *Slocum Thermal* convencional, utilizando geradores termoeletricos em *gliders* oceânicos.

Abstract

In this day and age, gliders have an important role in oceanography as observation platforms. These vehicles have unique characteristics and advantages, in terms of cost and maintenance, in comparison with traditional methods.

Knowing that ocean gliders describe a diving profile similar to a sawtooth pattern, a particular type of glider, called *Thermal Glider*, harvest energy from the ocean's temperature gradient using a hydraulic generator. This generator is actuated by a thermal machine using the pronounced volume variation with temperature given by a *Phase Change Material* (PCM).

This work studied the possibility of harvesting energy from the ocean's temperature gradient using thermoelectric generators instead of a hydraulic generator. These thermoelectric generators convert thermal energy into electric energy and do not need maintenance.

In order to test this possibility, a model was developed where thermoelectric generators are integrated in ocean gliders. This model consists of a heat transfer analysis between ocean water, thermoelectric generators and a thermal store material, placed inside the glider.

The model was simulated considering several thermal store materials. For each thermal store material, were changed the thermal store volume and the number of thermoelectric generators, in each simulation. The aim of these simulations was to achieve a combination of those two parameters, in order to generate 6 kJ each dive, wich is the energy harvested by a conventional *Slocum Thermal*.

Simulation results show that is possible to produce the amount of energy required by a convencional *Slocum Thermal*, using thermoelectric generators in an ocean glider.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer aos meus orientadores Prof. Fernando Gomes de Almeida e Prof. João Falcão Carneiro, pelo acompanhamento, partilha de conhecimento e disponibilidade.

Quero deixar um agradecimento especial ao Miguel Inácio, ao Rodrigo Carvalho e ao Rodrigo Tavares pelo companheirismo, apoio e grande amizade durante o meu percurso na FEUP.

Por último, sendo para mim o mais importante, quero agradecer a toda a minha família. Aos meus avós João, Odília e Zulmira, por sempre terem mostrado orgulho em mim. Aos meus pais Joaquim e Élia, por me terem apoiado em todas as minhas decisões. Finalmente, quero agradecer ao meu irmão João, pelo apoio e preocupação constante, natural de um irmão mais velho.

Luis Máximo

*"It is good to have an end to journey toward
but it is the journey that matters, in the end."*
by Ernest Hemingway

Conteúdo

Resumo	i
Abstract	iii
Abreviaturas	xv
1 Introdução	1
1.1 Gliders	2
1.2 Utilização de geradores termoeletricos em <i>gliders</i>	5
1.3 Estrutura da dissertação	6
2 Módulos Termoeletricos	9
2.1 Introdução Histórica	9
2.2 Módulos Termoeletricos	10
2.2.1 Efeito Seebeck	11
2.2.2 Efeito Peltier	11
2.2.3 Efeito Thomson	12
2.2.4 Aquecimento por efeito Joule	12
2.2.5 Condução Térmica	13
2.3 Modelo de um TEG	13
3 Integração dos TEG num <i>glider</i>	17
3.1 Modelo térmico das alhetas	18
3.2 Modelo de geradores termoeletricos integrados num <i>glider</i>	20
3.3 Propriedades térmicas e elétricas do TEG	26
3.4 Materiais armazenadores de energia térmica	27
4 Simulações e Resultados	31
4.1 Objetivos	31
4.2 Gradiente térmico do oceano e perfil de trajetória do <i>glider</i>	32
4.3 Simulações e apresentação dos resultados	34
4.3.1 Aço inoxidável	34
4.3.2 Água	37
4.3.3 PCM RT10hc	40
4.3.4 PCM RT11hc	43
4.3.5 PCM RT12	46
5 Conclusões	49

Referências	51
Anexo A Geradores Termoelétricos	53
A.1 Nextreme eTEG HV56	54
A.2 Laird Technologies eTEG PG37	56
Anexo B PCM	59
B.1 PCM RT10hc	60
B.2 PCM RT11hc	61
B.3 PCM RT12	62

Lista de Figuras

1.1	Esquema do perfil de movimento dos <i>Slocums</i>	2
1.2	<i>Seaglider</i> da <i>University of Washington</i>	3
1.3	<i>Spray</i> do <i>Scripps Institution of Oceanography</i>	4
1.4	<i>Slocum Battery</i> da <i>Webb Research Corp</i>	4
1.5	<i>Slocum Thermal</i> da <i>Webb Research Corp</i>	5
1.6	Esquema de montagem dos TEGs no <i>glider</i> [4]	6
2.1	Módulo termoeletrico [9]	10
2.2	Efeito de Seebeck [6]	11
2.3	Representação unidimensional do fluxo de calor num TEG [9]	14
2.4	Circuito elétrico equivalente da parte térmica do TEG, em regime permanente, obtido por analogia reo-elétrica [9]	14
2.5	Circuito da parte elétrica de um TEG [9]	15
3.1	Esquema de montagem do sistema em estudo	17
3.2	Alheta de secção retangular	18
3.3	Rendimento de alhetas de secção uniforme [12]	20
3.4	Esquema do modelo térmico equivalente que representa o sistema em estudo, quando o material armazenador de energia está no estado líquido	21
3.5	Esquema do modelo térmico equivalente que representa o sistema em estudo, quando o material armazenador de energia está no estado sólido	21
3.6	Esquema do modelo elétrico do gerador termoeletrico	21
3.7	Esquema da sequência de cálculo das temperaturas e da energia do sistema, quando o material armazenador de energia está no estado líquido	24
3.8	Esquema da sequência de cálculo das temperaturas e da energia do sistema, quando o material armazenador de energia está no estado sólido	25
3.9	Entalpia parcial do PCM RT10hc em função da sua temperatura [19]	29
3.10	Entalpia parcial do PCM RT11hc em função da sua temperatura [19]	29
3.11	Entalpia parcial do PCM RT12 em função da sua temperatura [19]	30
4.1	Variação da temperatura da água do oceano com a profundidade na zona do equador	32
4.2	Perfil do movimento considerado nas simulações	33
4.3	Variação temporal da temperatura do mar em redor do <i>glider</i>	33
4.4	Energia gerada por mergulho para cada volume de aço inoxidável considerado variando o número de TEG	35
4.5	Variação da temperatura do aço inoxidável no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.112 m ³ deste material e 8500 TEG	35
4.6	Variação da potência elétrica produzida no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.112 m ³ de aço inoxidável e 8500 TEG	36

4.7	Energia elétrica acumulada no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.112 m^3 de aço inoxidável e 8500 TEG	36
4.8	Energia gerada por mergulho para cada volume de água, como material armazenador de energia térmica, considerado variando o número de TEG	37
4.9	Variação da temperatura da água, como material armazenador de energia térmica, no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.125 m^3 deste material e 10000 TEG	38
4.10	Variação da potência elétrica produzida no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.125 m^3 de água, como material armazenador de energia térmica, e 10000 TEG	38
4.11	Energia elétrica acumulada no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.125 m^3 de água, como material armazenador de energia térmica, e 10000 TEG	39
4.12	Energia gerada por mergulho para cada volume de PCM RT10hc considerado variando o número de TEG	40
4.13	Variação da temperatura de PCM RT10hc no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.042 m^3 deste material e 5500 TEG	41
4.14	Variação da potência elétrica produzida no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.042 m^3 de PCM RT10hc e 5500 TEG	41
4.15	Energia elétrica acumulada no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.042 m^3 de PCM RT10hc e 5500 TEG	42
4.16	Energia gerada por mergulho para cada volume de PCM RT11hc considerado variando o número de TEG	43
4.17	Variação da temperatura da PCM RT11hc no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.036 m^3 deste material e 5000 TEG	44
4.18	Variação da potência elétrica produzida no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.036 m^3 de PCM RT11hc e 5000 TEG	44
4.19	Energia elétrica acumulada no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.036 m^3 de PCM RT11hc e 5000 TEG	45
4.20	Energia gerada por mergulho para cada volume de PCM RT12 considerado variando o número de TEG	46
4.21	Variação da temperatura de PCM RT12 no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.061 m^3 deste material e 7000 TEG	47
4.22	Variação da potência elétrica produzida no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.061 m^3 de PCM RT12 e 7000 TEG	47
4.23	Energia elétrica acumulada no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.061 m^3 de PCM RT12 e 7000 TEG	48

Lista de Tabelas

2.1	Relações da analogia reo-elétrica	15
3.1	Densidade, capacidade térmica por unidade de massa e por unidade de volume de alguns materiais metálicos [17] [18]	27

Abreviaturas

Abreviaturas

ALACE	<i>Autonomous Lagrangian Circulation Explorer</i>
AUV	<i>Autonomous Underwater Vehicle</i> (Veículo autônomo subaquático)
PCM	<i>Phase Change Material</i> (Material de mudança de fase)
RTG	<i>Radioisotope thermoelectric generator</i> (Gerador termoelétrico de radioisótopos)
TEC	<i>Thermoelectric Cooler</i> (Refrigerador termoelétrico)
TEG	<i>Thermoelectric Generator</i> (Gerador termoelétrico)
TEM	<i>Thermoelectric Module</i> (Módulo termoelétrico)

Capítulo 1

Introdução

Atualmente, existe uma grande tendência para a exploração dos oceanos devido à escassez de conhecimento sobre estes, apesar de aproximadamente 70% da superfície do planeta Terra estar coberta por água [1]. A exploração oceânica, direcionada à exploração dos recursos existentes, à monitorização meteorológica ou a operações de interesse militar ou científico, são áreas de grande interesse para a humanidade e em franco desenvolvimento. Com a inovação e o aumento da utilização de técnicas de acesso remoto a sensores é possível, através de satélites, comunicar cada vez mais dados de, e para, qualquer lugar do planeta em menos tempo.

A exploração oceânica é, tradicionalmente, realizada utilizando instrumentos transportados por navios e mergulhados no oceano ou suspensos por amarrações. No entanto, estas duas soluções são bastante dispendiosas pois exigem grandes investimentos iniciais, custos de manutenção e, no caso dos navios, acrescem ainda os custos de combustível e tripulação. Além dos custos elevados, estas soluções têm uma limitação espacial e temporal longe da desejável. As explorações com navios têm uma duração de, tipicamente, 1 a 2 meses. No caso das amarrações, as explorações têm a duração de 1 a 2 anos mas apenas possibilitam fazer o reconhecimento em profundidade.

Os avanços na navegação e nas comunicações por satélite tornaram possível o aparecimento de novas plataformas de menores dimensões e menos dispendiosas que alteraram o modo como eram observados os oceanos. Assim, como o acesso remoto a sensores via satélite nos levou a dar um grande salto no conhecimento da superfície dos oceanos, estas novas plataformas trouxeram-nos a possibilidade de conhecer o interior dos oceanos com maior resolução espacial e temporal do que até então era possível com as típicas explorações em navios e amarrações. Este aumento da resolução espacial e temporal das explorações é particularmente importante para a solução de problemas como a gestão de recursos costeiros e as previsões de mudança de clima.

Para se conseguir um melhor conhecimento do interior dos oceanos, é necessário que estes estejam a ser constantemente monitorizados pelos meios que temos disponíveis. Para isso temos de ter em conta vários tipos de autonomia desses meios, sendo uma delas a autonomia energética que permite prolongar as missões de exploração.

A constante exposição solar da superfície dos oceanos faz com que estes sejam continuamente aquecidos. Porém, o calor recebido é insuficiente para uniformizar a temperatura das suas águas,

que diminui com a profundidade. Existe, portanto, uma diferença de temperatura entre a superfície e as profundezas dos oceanos que faz destes um enorme reservatório de energia térmica.

1.1 Gliders

Em 1989, Henry Stommel publicou o artigo "The Slocum Mission"([2]) onde introduziu uma visão futurista de um sistema de observação dos oceanos baseado numa frota de AUV (Autonomous Underwater Vehicles) chamados *Slocums* que se moviam verticalmente pelo oceano ao alterarem a sua flutuabilidade, e direcionados horizontalmente ao planar com as suas asas a cerca de 35° com a horizontal. Teriam de permanecer por breves momentos à tona da água para poderem enviar os dados recolhidos no seu mergulho e receber novas instruções. Estes veículos têm movimentos sucessivos ascendentes e descendentes, descrevendo um perfil de movimento sinuoidal dentro de água, como se pode observar na figura 1.1, que lhes permite usufruir do gradiente térmico do oceano. Os *Slocums* têm 4 características principais de funcionamento: propulsão por variação de flutuabilidade, perfil de movimento semelhante a um perfil em dente de serra, missões de longa duração e deslocam-se a velocidades baixas.

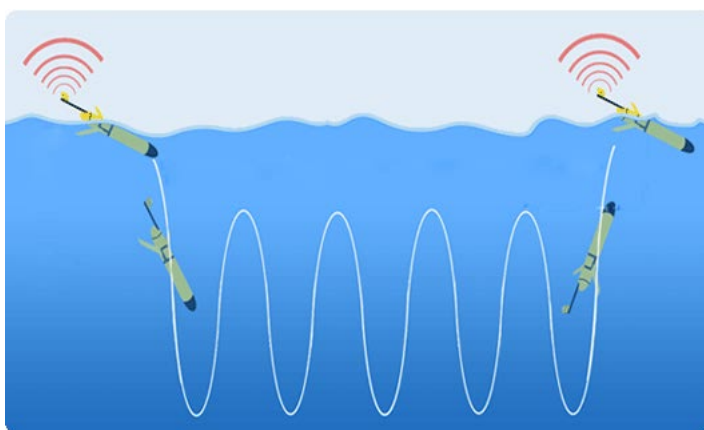


Figura 1.1: Esquema do perfil de movimento dos *Slocums*

Como estes veículos podem ser construídos com um custo equivalente ao de alguns dias de exploração de um navio, podem ser reutilizados, são suficientemente leves para poderem ser transportados por embarcações pequenas, podem operar durante mais de um ano enquanto fazem o reconhecimento de uma vasta distância de milhares de quilómetros, e transmitem novos dados recolhidos em pequenos intervalos de tempo, estes veículos são capazes de observar o interior dos oceanos tendo um custo significativamente inferior às plataformas de investigação convencionais.

Vinte anos após Stommel ter publicado a sua ideia de integrar os *Slocums* na exploração dos oceanos, começaram a aparecer *gliders* elétricos e térmicos. Exemplos destes veículos são o "Seaglider" pela *University of Washington* e o "Spray" pelo *Scripps Institution of Oceanography* que são veículos movidos eletricamente e otimizados para uso nas profundezas dos oceanos onde é fundamental ter uma missão de longa duração. A *Webb Research Corp* optimizou o "Slocum

Battery"para missões em pequenas profundidades e o "*Slocum Thermal*"para missões de longa duração em águas com uma termoclina bem desenvolvida.

O *Seaglider* (figura 1.2) foi idealizado para ser energeticamente eficiente de modo a possibilitar missões com duração de 1 ano e operar nas profundezas dos oceanos. O controlo da fluabilidade do *Seaglider* é realizado por um sistema hidráulico do tipo ALACE (*Autonomous Lagrangian Circulation Explorer*) [3]. O controlo da inclinação do *Seaglider* é realizado pelo movimento de um conjunto de massas no seu interior, permitindo assim alterar a posição do seu centro de massa de modo a inclinar a sua parte frontal para baixo e expor a antena, que se encontra na sua parte traseira, durante as comunicações e navegação [3].

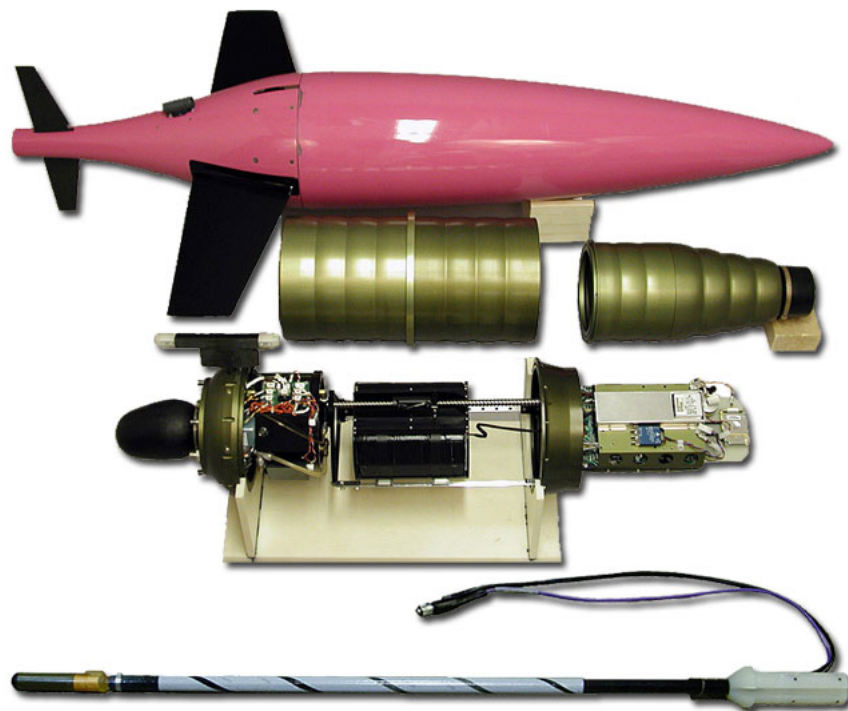


Figura 1.2: *Seaglider* da *University of Washington*

O *Spray* (figura 1.3) está otimizado para uso em missões de longa duração, longo alcance e grandes profundidades, onde é essencial a eficiência energética. O controlo do movimento deste *glider* é feito através da movimentação do centro de gravidade por translação e rotação das baterias internas [3].

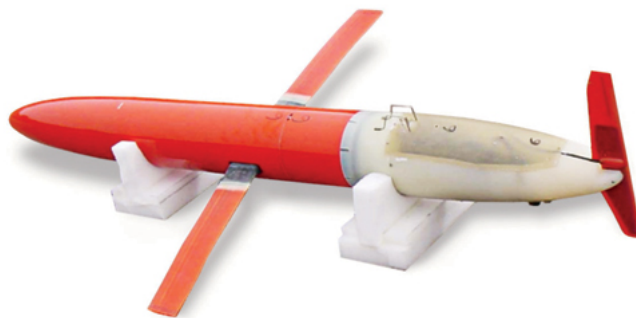


Figura 1.3: *Spray* do *Scripps Institution of Oceanography*

O *Slocum Battery* (figura 1.4) está otimizado para operar em águas costeiras pouco profundas onde a rápida mudança de direção, quer verticalmente, quer horizontalmente, é requerida. Está em equilíbrio de pressões com o exterior e, para alterar rapidamente o seu volume efetivo, absorve ou expelle água por uma entrada no seu nariz [3].



Figura 1.4: *Slocum Battery* da *Webb Research Corp*

O *Slocum Thermal* (figura 1.5) vai de encontro à ideia inicial de Stommel que um *glider* recolhia do gradiente térmico do oceano a energia necessária para a sua propulsão. Enquanto que no caso dos *gliders* movidos a energia elétrica 60 a 85% da energia é utilizada na propulsão, no caso dos AUVs térmicos a propulsão não envolve energia elétrica e assim é possível aumentar a duração da missão em 3 ou 4 vezes a duração de um AUV elétrico. Na sua implementação mais convencional, a propulsão deste tipo de *glider* depende da variação de volume associada à mudança de fase de um material com a variação da temperatura do oceano. A captação de energia é levada a cabo por um PCM (*Phase Change Material*) durante a travessia do oceano. Quando o *glider* se encontra a navegar para as profundezas, a temperatura da água envolvente diminui e com isso o PCM liberta calor e transita da fase líquida para a sólida. Este fenómeno é acompanhado pela redução significativa do seu volume. No sentido inverso, a temperatura da água aumenta, o que faz com que o PCM absorva calor, regresse à fase líquida e, na mudança de fase, expanda na mesma proporção que contraiu. Assim, a partir desta variação volumétrica do PCM, é produzida energia mecânica que pode ser utilizada para a mudança de flutuabilidade do *Slocum Thermal* [3].



Figura 1.5: *Slocum Thermal* da Webb Research Corp

1.2 Utilização de geradores termoeletricos em *gliders*

Os geradores termoeletricos (TEG) convertem energia térmica em energia elétrica. Tendo disponível uma diferença de temperatura, é possível gerar energia elétrica com estes dispositivos.

Sabendo da existência da variação da temperatura dos oceanos com a profundidade e sabendo também que os *gliders* descrevem uma trajetória em dente de serra no interior dos oceanos, é interessante estudar a possibilidade da utilização de TEG nestes veículos.

Em [4], foi realizado um estudo bastante simplificado da introdução de TEG em *gliders*. Nesse estudo, foi apresentado um método que permite aumentar a autonomia energética do *glider* através de um sistema de conversão de energia térmica, proveniente do gradiente de temperatura do oceano, em energia elétrica, que possibilita recarregar as baterias a partir do funcionamento normal do veículo.

O objetivo desse estudo consistia em conseguir produzir 22 kJ de energia por dia. Este valor de energia é a requerida tipicamente por um *thermal glider* [3].

Nesse estudo foi elaborado um modelo de geradores termoeletricos integrados num *glider* como se pode observar na figura 1.6. Este modelo é constituído por uma superfície de TEG que está em contacto direto com a água do oceano e com o material armazenador de energia térmica.

Nesse modelo foi considerado uma trajetória do *glider* entre os 0 e os 500 metros de profundidade do oceano com uma variação linear da temperatura da água entre 25°C na superfície e 5°C na profundidade máxima. O material de armazenamento de energia térmica considerado foi o aço inoxidável, com capacidade térmica específica de 490 J/(kg.K). O gerador termoeletrico escolhido foi o "Nextreme eTEG HV56" (Anexo A.1) com dimensões de 3,1 mm × 3,3 mm × 0,6 mm, condutibilidade térmica de 4,46 W/(m.K), coeficiente de Seebeck de 0,025 V/K e resistência elétrica interna de 11,1 Ω.

Em [4] foi considerado que a transferência de calor entre o mar e o material de armazenamento térmico ocorria apenas através do TEG por condução térmica, sendo que todo o volume envolvente se assume isolado termicamente. Foi, portanto, considerado que a temperatura de uma das faces dos TEG estaria à temperatura da água do oceano e a outra face estaria à temperatura do material armazenador de energia térmica.

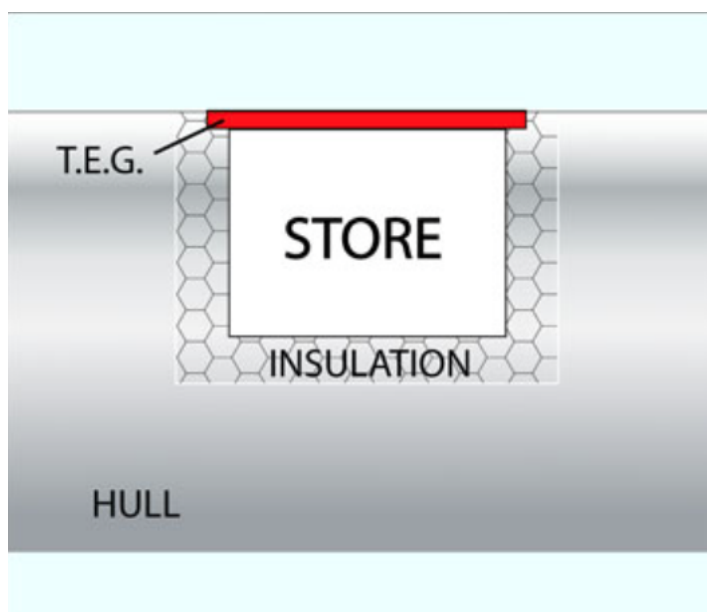


Figura 1.6: Esquema de montagem dos TEGs no *glider* [4]

Os parâmetros considerados nas simulações foram a massa do aço inoxidável (50, 100, 150, 200 e 250 kg), o número de mergulhos por dia do *glider* (valores pares entre 2 e 20 mergulhos por dia), e o número de TEG (25 e 500 TEG).

Os resultados foram apresentados em termos de energia gerada por dia, diferença de temperatura máxima atingida entre as paredes do TEG e variação máxima da temperatura do aço inoxidável, num ciclo de mergulho.

Com os resultados obtidos em [4], chegou-se à conclusão que utilizando 500 TEG e um bloco de aço inoxidável com massa de 100 kg para armazenar energia térmica, era possível gerar a energia requerida por dia por um *thermal glider*, se este completasse 10 mergulhos por dia.

Nesta dissertação, pretende-se partir do estudo realizado em [4], sendo este o único estudo encontrado especificamente sobre a integração de geradores termoeletrônicos em *gliders* oceânicos, e elaborar um modelo mais detalhado do sistema que considere: mais fenômenos de transferência de calor entre a água do oceano e o material de armazenamento de energia térmica, um modelo mais evoluído dos efeitos termoeletrônicos nos TEG, uma variedade de materiais de armazenamento de energia térmica e um perfil de temperatura do oceano mais próximo do real.

1.3 Estrutura da dissertação

Neste capítulo introdutório fez-se um enquadramento do que se irá tratar nesta dissertação, apresentando alguns meios de exploração do oceano e alguns métodos utilizados na recolha de energia para aumentar a autonomia de veículos utilizados nesse tipo de exploração. Foi também referida a função de um gerador termoeletrônico e apresentado um estudo publicado sobre a utilização destes geradores em *gliders*.

No capítulo 2 são introduzidos os módulos termoeletrônicos, iniciando-se com uma introdução histórica sobre a termoeletricidade e, seguidamente, são descritos os efeitos termoeletrônicos. Descreve-se o modo como estes dispositivos são constituídos e é apresentado o modelo de um gerador termoeletrico.

No capítulo 3 é elaborado um modelo de integração de geradores termoeletrônicos num *glider*. Nesse capítulo são determinados todos os parâmetros necessários para as simulações.

No capítulo 4 são apresentados os objetivos das simulações realizadas e os resultados obtidos para os diversos materiais armazenadores de energia térmica considerados.

Finalmente no capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais sobre os resultados obtidos a partir do modelo elaborado nesta dissertação.

Capítulo 2

Módulos Termoelétricos

O efeito termoelétrico é o fenómeno em que uma diferença de temperatura é convertida diretamente em energia elétrica, e vice-versa, sem quaisquer partes móveis ou fluídos de trabalho [5].

A utilização de geradores termoelétricos para conversão de energia térmica proveniente de pequenas diferenças de temperatura, inferiores a 10 °C, em energia elétrica é o tópico principal deste trabalho.

Neste capítulo é feita uma introdução histórica da termoeletricidade e algumas das suas aplicações. É também apresentada a constituição dos módulos termoelétricos e é descrito o seu funcionamento. Finalmente é apresentado o modelo de um gerador termoelétrico.

2.1 Introdução Histórica

A termoeletricidade, desde a sua descoberta no início do século XIX não tem merecido a devida atenção na área de conversão de energia devido às barreiras tecnológicas existentes à sua construção, otimização e utilização. Apenas em meados do século XX surgiram os materiais semicondutores que utilizados como materiais termoelétricos que permitiram o aparecimento de refrigeradores utilizando o efeito de Peltier [6]. A evolução nos materiais semicondutores levou à construção de geradores termoelétricos com eficiência de conversão de energia baixa (5 - 7% [7]) que, por essa razão, apenas são considerados em aplicações específicas onde o baixo rendimento é aceitável tendo em conta os requisitos da aplicação. A termoeletricidade é utilizada em geradores termoelétricos de radioisótopos (RTG) para naves espaciais onde os requisitos da aplicação são fiabilidade e longevidade sem requerer manutenção que se sobrepõem ao baixo rendimento. É também utilizada para medição de temperatura e ainda na indústria automóvel para converter calor dissipado pelo motor em energia elétrica. Em aplicações de refrigeração termoelétrica, é utilizada no arrefecimento em computadores, dispositivos eletrónicos e aplicações médicas [8].

2.2 Módulos Termoelétricos

Os módulos termoelétricos (TEM-*thermoelectric module*) são dispositivos que utilizam a termoeletricidade para arrefecer, no caso dos refrigeradores termoelétricos (TEC-*thermoelectric cooler*), ou para gerar energia elétrica a partir de um gradiente de temperatura, no caso dos geradores termoelétricos (TEG-*thermoelectric generator*).

Os progressos na ciência dos materiais e da nanotecnologia contribuíram para que os materiais termoelétricos e por consequência os conversores termoelétricos ganhassem importância nos processos de geração de energia elétrica.

Como referido na secção anterior, para a geração de energia elétrica através de um gerador termoelétrico, é apenas necessário que haja uma diferença de temperatura entre as duas junções e quanto maior for essa diferença de temperatura maior será a energia produzida. Esta diferença de temperatura pode ser conseguida e aproveitada de várias fontes que dissipem energia sob a forma de calor, como, por exemplo, chaminés de fábricas, habitações privadas, edifícios públicos ou o corpo humano [8].

Quanto à sua construção, os TEC e os TEG são em tudo idênticos e apenas diferem na sua função. Os TEM consistem em pares de materiais semicondutores, do tipo p e do tipo n, ligados termicamente em paralelo para diminuir a resistência térmica e eletricamente em série de modo a aumentar a tensão elétrica em funcionamento [9]. Estes materiais são contidos em forma de sanduíche entre duas placas cerâmicas com o intuito de uniformizar a temperatura de cada lado, formando um módulo termoelétrico, como pode ser visto na figura 2.1.

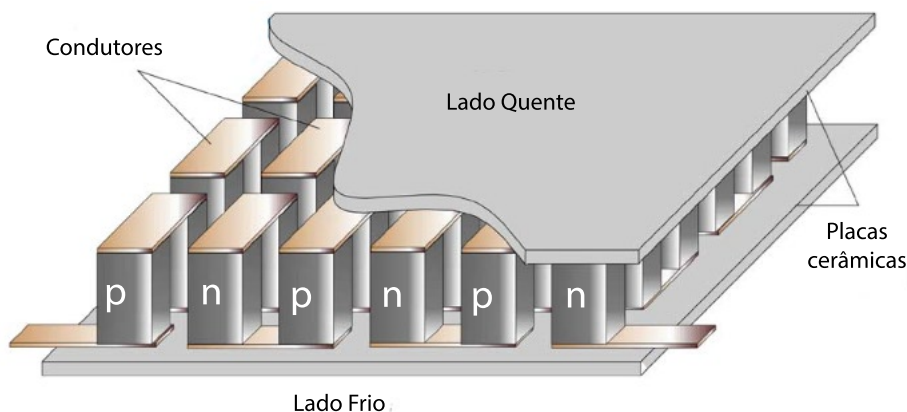


Figura 2.1: Módulo termoelétrico [9]

Este método de conversão de energia tem como princípio de funcionamento cinco principais fenómenos físicos, sendo eles: efeito de Seebeck, efeito de Peltier, efeito de Thomson, efeito de Joule e condução térmica. De seguida são descritos cada um destes fenómenos.

2.2.1 Efeito Seebeck

Em 1821, Thomas Johann Seebeck descobriu que um circuito constituído por dois materiais metálicos diferentes, tendo as duas junções a temperaturas diferentes gera uma força eletromotriz que pode produzir uma corrente elétrica quando em circuito fechado [6]. Atualmente este efeito é conhecido como efeito de Seebeck. A força electromotriz gerada é proporcional à diferença de temperatura entre as duas junções, sendo a constante de proporcionalidade conhecida como coeficiente de Seebeck, S [V/K], depende fortemente dos materiais que constituem o dispositivo termoelétrico e, com menor intensidade, da temperatura.

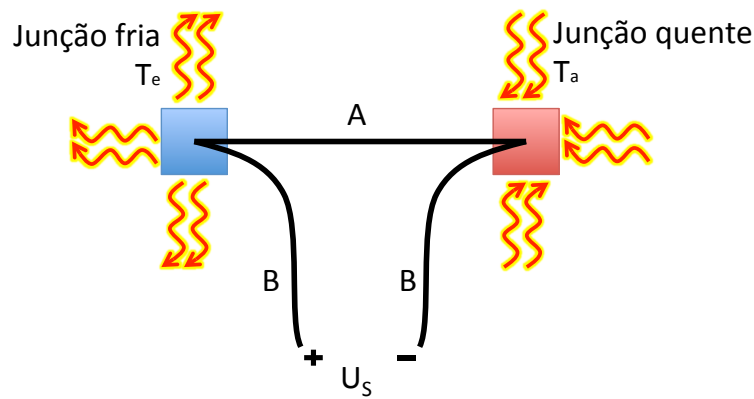


Figura 2.2: Efeito de Seebeck [6]

Como se pode observar na figura 2.2, por efeito de Seebeck num dispositivo termoelétrico, na junção quente é absorvido calor e a sua temperatura absoluta é representada por T_a , [K], enquanto que na junção fria o calor é dissipado e a sua temperatura absoluta é representada por T_e , [K]. Também se pode observar a diferença de potencial, U_S [V], também conhecida como tensão de Seebeck, gerada entre os terminais de um par de materiais condutores diferentes, A e B, em circuito aberto, quando as duas junções são mantidas a temperaturas diferentes. A equação 2.1 representa a relação entre a diferença de temperatura entre as junções quente e fria e a tensão de Seebeck, da qual se obtém o coeficiente de Seebeck [6].

$$U_S = S(T_a - T_e) \quad (2.1)$$

com $S = S_B - S_A$, sendo S_A e S_B os coeficientes de Seebeck nos materiais A e B respetivamente.

2.2.2 Efeito Peltier

Em 1834, Jean Charles Athanes Peltier descobriu o efeito contrário ao efeito de Seebeck, ou seja, que num circuito constituído por dois materiais metálicos diferentes, quando atravessado por uma corrente elétrica, uma junção emite e a outra absorve calor dependendo do sentido da corrente [6]. A este fenómeno chama-se efeito Peltier. Por este efeito é possível converter energia elétrica num gradiente de temperatura, ou seja, em energia térmica.

No TEM haverá uma junção quente a absorver calor, lado a , e uma junção fria a dissipar calor, lado e . O coeficiente de Peltier relaciona o efeito de arrefecimento quando é atravessada corrente do material semiconductor de tipo n para o de tipo p, e o aquecimento quando a corrente passa no sentido oposto. Ao alterar o sentido da corrente, a junção antes aquecida passa a ser a junção arrefecida e a junção antes arrefecida, passa a ser a junção aquecida. As equações 2.2 e 2.3 descrevem a potência calorífica absorvida, q_{Pa} [W], e dissipada, q_{Pe} [W], pelo TEM por efeito de Peltier, respetivamente, onde Π_a [V] é o coeficiente de Peltier do lado a , Π_e [V] é o coeficiente de Peltier do lado e e I [A] a intensidade da corrente [9].

No presente caso e dada a natureza essencialmente amagnética dos materiais usados, pode considerar-se que $\Pi_a = ST_a$ e $\Pi_e = ST_e$

$$q_{Pa} = \Pi_a I \quad (2.2)$$

$$q_{Pe} = \Pi_e I \quad (2.3)$$

2.2.3 Efeito Thomson

Em 1854, duas décadas após a descoberta do efeito Peltier, William Thomson descobriu que quando existe uma diferença de temperatura entre dois pontos de um material condutor quando por ele passa corrente, há absorção ou emissão de calor ao longo desse material, dependendo do sentido da corrente e do material [10]. A este fenómeno chama-se efeito Thomson. Geralmente, o coeficiente de Seebeck não depende unicamente do material mas é também função da temperatura. De acordo com a definição do coeficiente de Thomson, τ [V], descrito na equação 2.4 ([10]), quando S é independente da temperatura $\tau = 0$ e o efeito de Thomson não influencia o funcionamento do dispositivo termoelétrico.

$$\tau = T \frac{dS}{dT} \quad (2.4)$$

A potência, q_{Thomson} [W], gerada por este efeito é descrita pela equação 2.5 onde I [A] é a intensidade da corrente elétrica [10].

$$q_{\text{Thomson}} = \tau I \quad (2.5)$$

No presente caso, o valor do coeficiente de Seebeck do TEG não é influenciado de forma significativa pela variação da temperatura. Assim sendo, este efeito foi desprezado.

2.2.4 Aquecimento por efeito Joule

O aquecimento por efeito Joule é um processo físico de dissipação de calor nos elementos resistivos. A potência calorífica transferida por este efeito, q_j [W], é descrita pela equação 2.6,

onde I [A] é a intensidade de corrente que passa no circuito elétrico onde está integrado o TEM e R_m [Ω] é a resistência elétrica interna do TEM [9].

$$q_j = I^2 R_m \quad (2.6)$$

O calor dissipado por efeito Joule no TEM pode ser considerado igualmente repartido pelas duas faces do TEM independentemente do gradiente de temperatura [9].

2.2.5 Condução Térmica

A condução térmica num TEM é um processo de Fourier caracterizado pela condutibilidade térmica do TEM, k [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$], e o sentido do fluxo de calor é sempre da face do TEM com temperatura superior para a face com temperatura inferior. A equação 2.7 descreve a potência calorífica transferida no TEM por condução térmica, q_{cd} [W], onde x [m] é a distância ao longo da espessura do TEM, L [m] é a espessura do TEM, A [m^2] é a área do TEM e ΔT [K] é a diferença de temperatura entre o lado quente e o lado frio [9].

$$q_{cd} = k A \frac{\partial T}{\partial x} \approx k \frac{A}{L} \Delta T = \frac{\Delta T}{R_{cd \text{ TEM}}} \quad (2.7)$$

2.3 Modelo de um TEG

Conhecendo os efeitos que ocorrem num gerador termoelétrico e as equações que os descrevem, é então possível descrever a transferência de calor e a conversão de energia térmica em energia elétrica e criar um modelo de um TEG.

Fazendo uma análise da transferência de calor em regime permanente num TEG, este sistema pode ser representado como sendo um sistema de transferência de calor unidimensional representado na figura 2.3 por um TEG, uma fonte quente e uma fonte fria, onde se podem observar os efeitos termoelétricos anteriormente referidos.

A potência calorífica proveniente da fonte quente é definida por q_a , o arrefecimento da fonte quente e aquecimento da fonte fria por efeito de Peltier que ocorrem nas junções são definidos por q_{pa} e q_{pe} , respetivamente, e é assumido que estes fluxos de calor estão concentrados nas interfaces. O aquecimento por efeito de Joule é assumido como sendo uniformemente gerado em todo o volume do TEG, ou seja, o calor gerado por este efeito é considerado igualmente repartido pelas duas faces do TEG. O calor transferido para a fonte fria é definido por q_e .

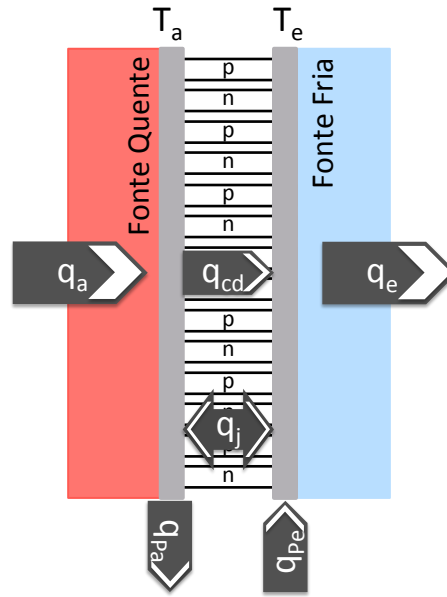


Figura 2.3: Representação unidimensional do fluxo de calor num TEG [9]

Uma aproximação possível para a resolução de problemas de transferência de calor é aplicar a analogia reo-elétrica de modo a obter um circuito elétrico equivalente ao sistema térmico - figura 2.4. Esta aproximação foi realizada com base no esquema apresentado na figura 2.3, de modo a simplificar o modelo térmico do TEG.

A figura 2.4 representa um circuito equivalente, obtido por analogia reo-elétrica, da transferência de calor que ocorre no TEG em regime permanente, quando $T_a > T_e$.

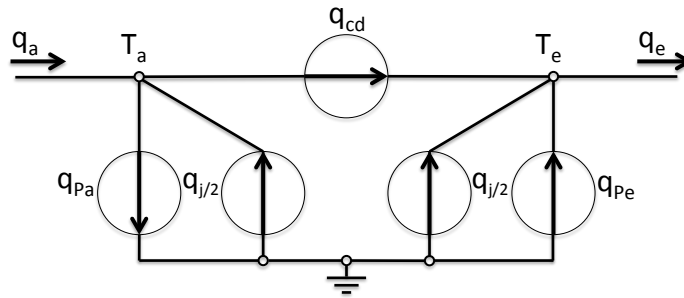


Figura 2.4: Circuito elétrico equivalente da parte térmica do TEG, em regime permanente, obtido por analogia reo-elétrica [9]

Na tabela 2.1 está representada a relação entre os parâmetros físicos do sistema térmico e os parâmetros correspondentes do circuito elétrico equivalente.

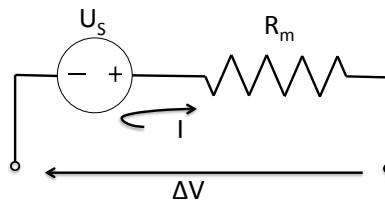
Tabela 2.1: Relações da analogia reo-elétrica

Grandezas térmicas	Unidades	Grandezas elétricas análogas	Unidades
Fluxo de calor, q	W	Corrente, I	A
Temperatura, T	K	Tensão, V	V
Resistência térmica, R_t	K.W ⁻¹	Resistência, R	Ω
Capacidade térmica, C	J.K ⁻¹	Capacidade elétrica, C	F

Partindo da análise da figura 2.4, fazendo o balanço energético no TEG aplicando a primeira lei da termodinâmica, consegue-se chegar às expressões 2.8 e 2.9 que representam o equilíbrio energético nos dois lados, a e e , do TEG, respetivamente.

$$q_a + \frac{q_j}{2} = q_{Pa} + q_{cd} \quad (2.8)$$

$$q_e = \frac{q_j}{2} + q_{Pe} + q_{cd} \quad (2.9)$$

**Figura 2.5:** Circuito da parte elétrica de um TEG [9]

A figura 2.5 representa a parte elétrica de um TEG, onde aparecem a tensão de Seebeck e a sua resistência elétrica interna. A diferença de potencial obtida nos terminais do TEG, ΔV , é função da corrente, da resistência e da tensão de Seebeck. Essa diferença de potencial é calculada pela expressão 2.10.

$$\Delta V = U_s - I R_m \quad (2.10)$$

Tendo as equações 2.8, 2.9 e 2.10, é possível criar um modelo de um gerador termoelétrico, desde que se conheçam as características do TEG, a resistência da carga ligada ao TEG e as temperaturas T_a e T_e .

Capítulo 3

Integração dos TEG num *glider*

Este trabalho tem como objetivo estudar a viabilidade da utilização de geradores termoelétricos em *gliders*, de modo a aproveitar a variação de temperatura do oceano com a profundidade. Assim, pretende-se verificar quais as condições necessárias para que esta solução consiga gerar energia elétrica suficiente para poder sustentar as necessidades do *glider*. O sistema a ser estudado neste trabalho é representado esquematicamente na figura 3.1.

Na figura 3.1 é perceptível que a água do oceano vai estar em contacto com o exterior do *glider* e com alhetas que foram colocadas como prolongamento da face exterior do mesmo. Considerou-se também uma parede exterior de alumínio onde é colada uma das faces de cada TEG, sendo que a outra face é colada a uma caixa de alumínio que irá reter o material para armazenamento de energia térmica. Esta caixa de alumínio apenas é utilizada quando o material armazenador de energia térmica não está no estado sólido. É também visível na figura a assunção de que apenas existe troca de calor através destes elementos, pelo que a parte envolvente está isolada termicamente.

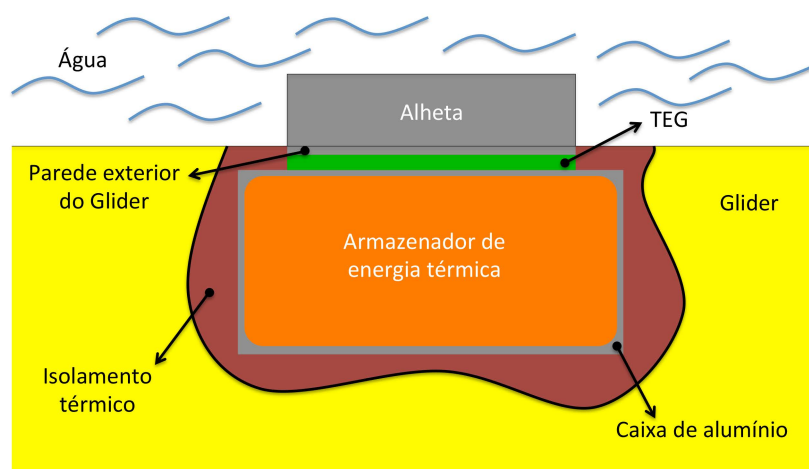


Figura 3.1: Esquema de montagem do sistema em estudo

3.1 Modelo térmico das alhetas

As alhetas foram colocadas no exterior do *glider* para promover a transferência de calor com a água do oceano. As alhetas são do mesmo material que a fuselagem do *glider*, ou seja, alumínio 6061-T6 [11]. Considerou-se que os TEG estariam dispostos em filas de 100 unidades e estaria uma alheta retangular (figura 3.2) colocada por cima de cada uma dessas filas, ou seja, haverá $n/100$ alhetas, sendo n o número de TEG utilizados. Para o desenvolvimento do modelo térmico das alhetas, optou-se por utilizar alhetas retangulares com dimensão máxima desejável de modo a conseguir maximizar o fluxo de calor entre a água e o *glider*. Assim sendo, segundo [12], 98% do valor máximo de calor transferível numa alheta é obtido para $L = 2.3/m$, onde L [m] é a altura da alheta e m [m⁻¹] é um parâmetro definido pela relação 3.1 para uma alheta retangular. Esta altura é considerada a altura de alheta máxima desejável.

Na figura 3.2 está representada uma alheta de secção retangular em que L é a sua altura, w o seu comprimento e t a sua espessura.

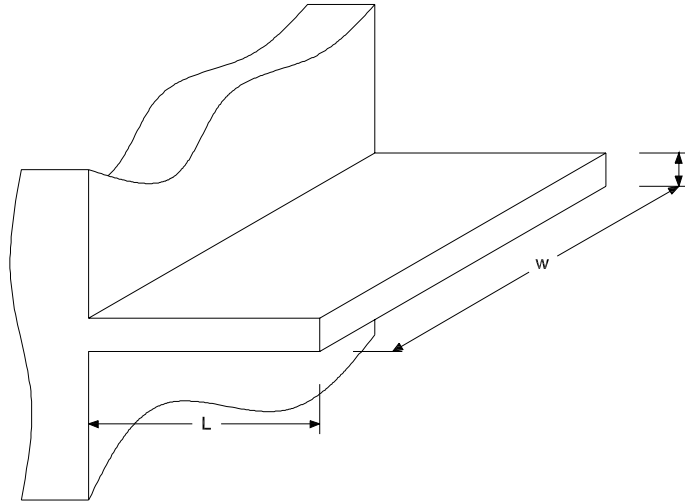


Figura 3.2: Alheta de secção retangular

Para o cálculo da altura máxima da alheta, L_{max} , precisamos de saber o valor de m que se obtém segundo a equação 3.1, onde h é o coeficiente de convecção da água do oceano que toma o valor típico de $260 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ [1], P e A_c são o perímetro e a área da base da alheta, respetivamente, e k é o coeficiente de condução do alumínio que toma o valor de $167 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ [13].

$$m^2 = \frac{h \cdot P}{k \cdot A_c} \quad (3.1)$$

Para o modelo deste estudo, foram considerados os geradores termoelétricos do tipo *thin-film* eTEG PG37 da *Laird Technologies* (Anexo A.2) de dimensões $3.1 \times 3.3 \times 0.6$ [mm³] [14]. Optou-se por considerar a disposição dos TEG de modo a que a alheta tivesse 3.3 mm de espessura e 100×3.1 mm de comprimento. Sabendo as dimensões da base da alheta, calculam-se os valores de P [m] e A_c [m²].

$$\begin{aligned}
 P &= 2 \times 3.3 \times 10^{-3} + 2 \times 3.1 \times 10^{-3} \times 100 \\
 &= 0.6266 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_c &= 3.3 \times 10^{-3} \times 3.1 \times 10^{-3} \times 100 \\
 &= 0.001023 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

Tendo os valores de h , k , P e A_c chega-se, através da equação 3.1, ao valor de $m = 30.88 \text{ m}^{-1}$. Obtido o valor de m , calcula-se então o valor máximo desejável da altura da alheta.

$$L_{\max} \leq \frac{2.3}{m} = 0.0745 \text{ m} \quad (3.2)$$

Após saber as dimensões da alheta que vai ser utilizada no sistema em estudo, é então possível calcular a sua resistência térmica pela equação 3.3, onde $A_{alheta} [\text{m}^2]$ é a área total da alheta, dada pela equação 3.4, e η_{alheta} é o rendimento da alheta, obtido a seguir. O valor da altura corrigida da alheta, $L_c [\text{m}]$, necessário para o cálculo da A_{alheta} , é obtido pela equação 3.5.

$$R_{alheta} = \frac{1}{h \cdot A_{alheta} \cdot \eta_{alheta}} \quad (3.3)$$

$$A_{alheta} = 2 \cdot w \cdot L_c \quad (3.4)$$

$$L_c = L + \frac{t}{2} \quad (3.5)$$

O rendimento de uma alheta retangular é obtido através do gráfico representado na figura 3.3, onde η_{alheta} é função de $L_c^{3/2} (h / (k \cdot A_p))^{1/2}$ [12]. O valor de A_p para uma alheta retangular é obtido pela equação 3.6 [12]. Deste modo, tem-se $L_c^{3/2} (h / (k \cdot A_p))^{1/2} = 1.600$ e, pelo gráfico da figura 3.3, $\eta_{alheta} \approx 0.45$.

$$A_p = L_c t \quad (3.6)$$

Já obtidos os valores de $A_{alheta} = 0.0472 \text{ m}^2$ e $\eta_{alheta} = 0.45$, chegamos ao valor da resistência térmica de uma alheta, $R_{alheta} = 0.1811 \text{ K/W}$. Como vão ser utilizadas $n/100$ alhetas organizadas em paralelo, a resistência térmica equivalente das alhetas em paralelo é calculada pelo inverso da soma do inverso da resistência térmica de cada alheta, como na descrito na equação 3.7.

$$R_{n/100 \text{ alhetas}} = \frac{1}{\frac{n}{100} \cdot \frac{1}{R_{alheta}}} = \frac{100}{n} \cdot R_{alheta} \quad (3.7)$$

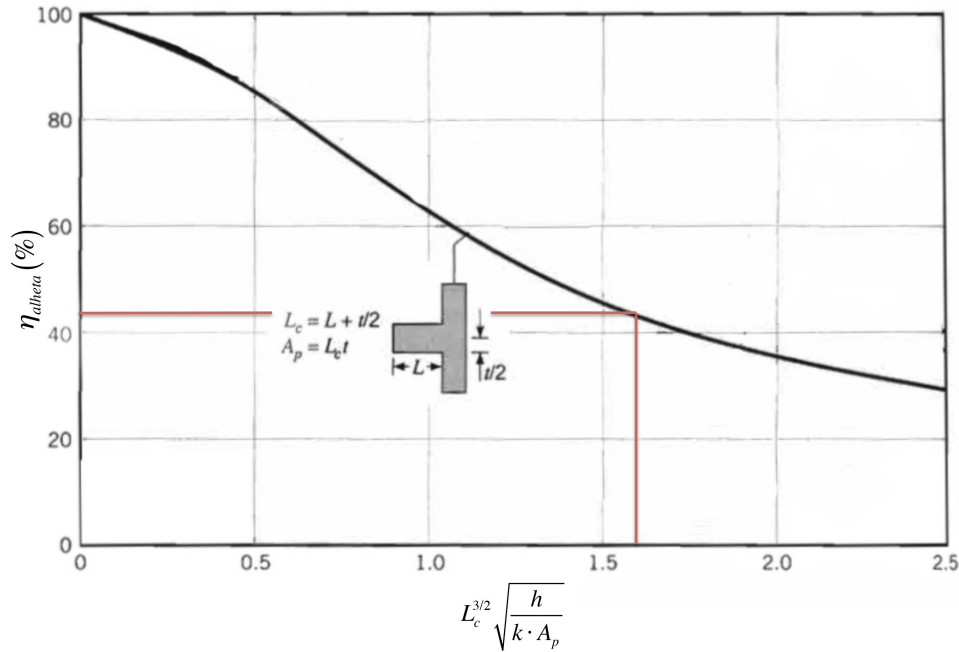


Figura 3.3: Rendimento de alhetas de secção uniforme [12]

3.2 Modelo de geradores termoelétricos integrados num *glider*

A partir do esquema representado na figura 3.1 é possível desenhar um modelo de geradores termoelétricos integrados num *glider*. Para a construção deste modelo, teve de se adicionar ao modelo do gerador termoelétrico, apresentado na secção 2.3, os restantes efeitos de transferência de calor que ocorrem durante o movimento de um *glider*. Na figura 3.4 pode-se observar que foram acrescentadas a resistência térmica das alhetas, da parede de alumínio exterior (que pode corresponder à fuselagem do *glider* e está em contacto com as alhetas e os TEG) e da caixa de alumínio que confina o material de armazenamento de energia térmica, que está em contacto com a face interior do TEG e o material. A caixa de alumínio apenas foi considerada para materiais de armazenamento de energia que se encontram no estado líquido para as condições impostas nas simulações. Para o caso do material estar no estado sólido, os TEG podem nele ser colados diretamente e assim a caixa de alumínio não é necessária. Para este caso o modelo está representado na figura 3.5. Ainda se acrescentaram elementos capacitivos, representativos das 3 capacidades térmicas das duas superfícies de alumínio (para o caso do material de armazenamento se encontrar no estado sólido existe apenas uma superfície de alumínio) e do material de armazenamento de energia.

A solicitação do modelo é feita através da temperatura da água do oceano, modelada como uma fonte de temperatura e representada do lado esquerdo das figuras 3.4 e 3.5.

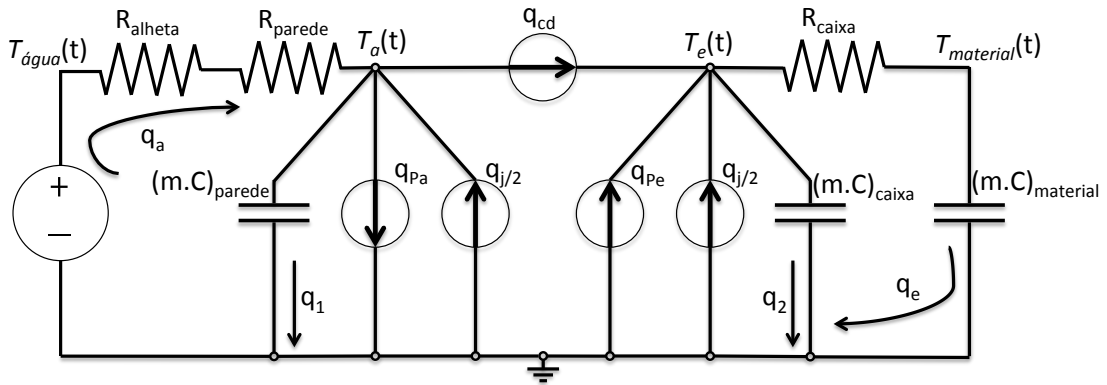


Figura 3.4: Esquema do modelo térmico equivalente que representa o sistema em estudo, quando o material armazenador de energia está no estado líquido

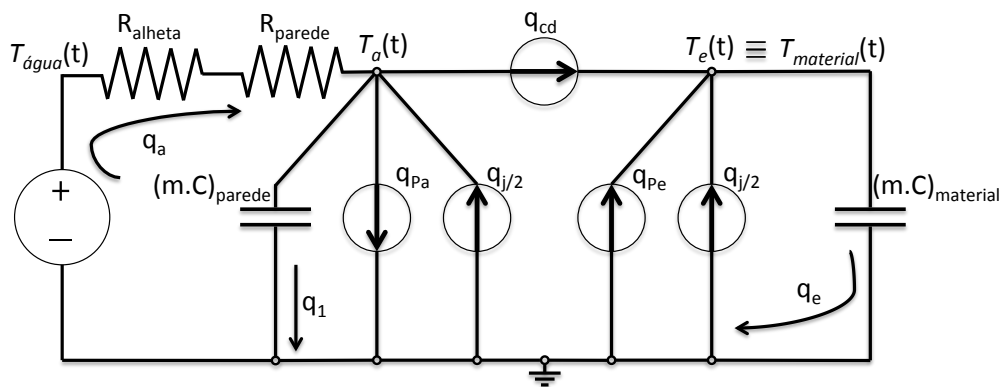


Figura 3.5: Esquema do modelo térmico equivalente que representa o sistema em estudo, quando o material armazenador de energia está no estado sólido

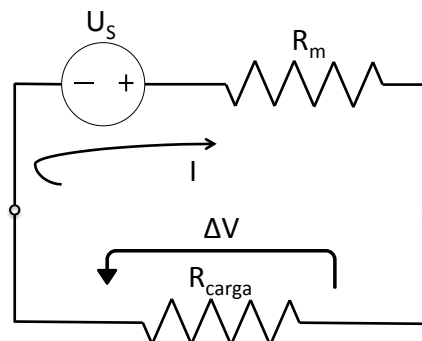


Figura 3.6: Esquema do modelo elétrico do gerador termoeletrico

Na figura 3.6 está representado o modelo elétrico de um TEG, $n = 1$, acoplado a uma carga. Considera-se que a resistência da carga, R_{carga} , é idêntica à resistência elétrica do TEG, R_m , por forma a maximizar a potência transferida, isto é, $R_{carga} = R_m$ [15].

Observando os esquemas dos modelos térmicos, nas figuras 3.4 e 3.5, e elétrico, na figura 3.6, conseguem-se obter as equações 3.8 a 3.23 que descrevem o sistema para o caso do material armazenador de energia ser líquido. No caso desse material ser sólido, não se aplicam as equações 3.14, 3.15 e 3.17, $T_e \equiv T_{material}$ e q_e passa a ser obtido pela expressão 3.24.

$$q_a = \frac{T_{\text{água}} - T_a}{R_{\text{alheta}} + R_{\text{parede}}} \quad (3.8)$$

$$q_1 = q_a + \frac{q_j}{2} - q_{Pa} - q_{cd} \quad (3.9)$$

$$q_{Pa} = n S I T_a \quad (3.10)$$

$$\frac{q_j}{2} = \frac{n R_m I^2}{2} \quad (3.11)$$

$$q_{cd} = \frac{T_a - T_e}{R_{cd \text{ TEG}}} \quad (3.12)$$

$$q_{Pe} = n S I T_e \quad (3.13)$$

$$q_2 = q_{cd} + q_{Pe} + \frac{q_j}{2} - q_e \quad (3.14)$$

$$q_e = \frac{T_e - T_{material}}{R_{caixa}} \quad (3.15)$$

$$\dot{T}_a = \frac{q_1}{(m \cdot C)_{\text{alumínio}}} \quad (3.16)$$

$$\dot{T}_e = \frac{q_2}{(m \cdot C)_{\text{alumínio}}} \quad (3.17)$$

$$\dot{T}_{material} = \frac{q_e}{(m \cdot C)_{material}} \quad (3.18)$$

$$U_S = S (T_a - T_e) \quad (3.19)$$

$$I = \frac{n U_S}{2 n R_m} = \frac{U_S}{2 R_m} \quad (3.20)$$

$$\Delta V = I n R_{\text{carga}} = \frac{n U_S}{2} \quad (3.21)$$

$$P_{\text{elétrica}} = I \Delta V = \frac{n}{R_m} \left(\frac{U_S}{2} \right)^2 \quad (3.22)$$

$$E = \int P_{\text{elétrica}} dt \quad (3.23)$$

$$q_e = q_{\text{cd}} + q_{\text{Pe}} + \frac{q_j}{2} \quad (3.24)$$

Na figura 3.7 está representado um esquema que apresenta a sequência de cálculos executados para obter os valores das temperaturas T_a , T_e , T_{material} , de I , ΔV , $P_{\text{elétrica}}$ e E , para o caso do material armazenador de energia estar no estado líquido. Na figura 3.8 está também representado um esquema que apresenta a sequência de cálculos executados para obter os valores das temperaturas T_a , T_e , de I , ΔV , $P_{\text{elétrica}}$ e E , mas neste caso quando o material de armazenamento de energia está no estado sólido.

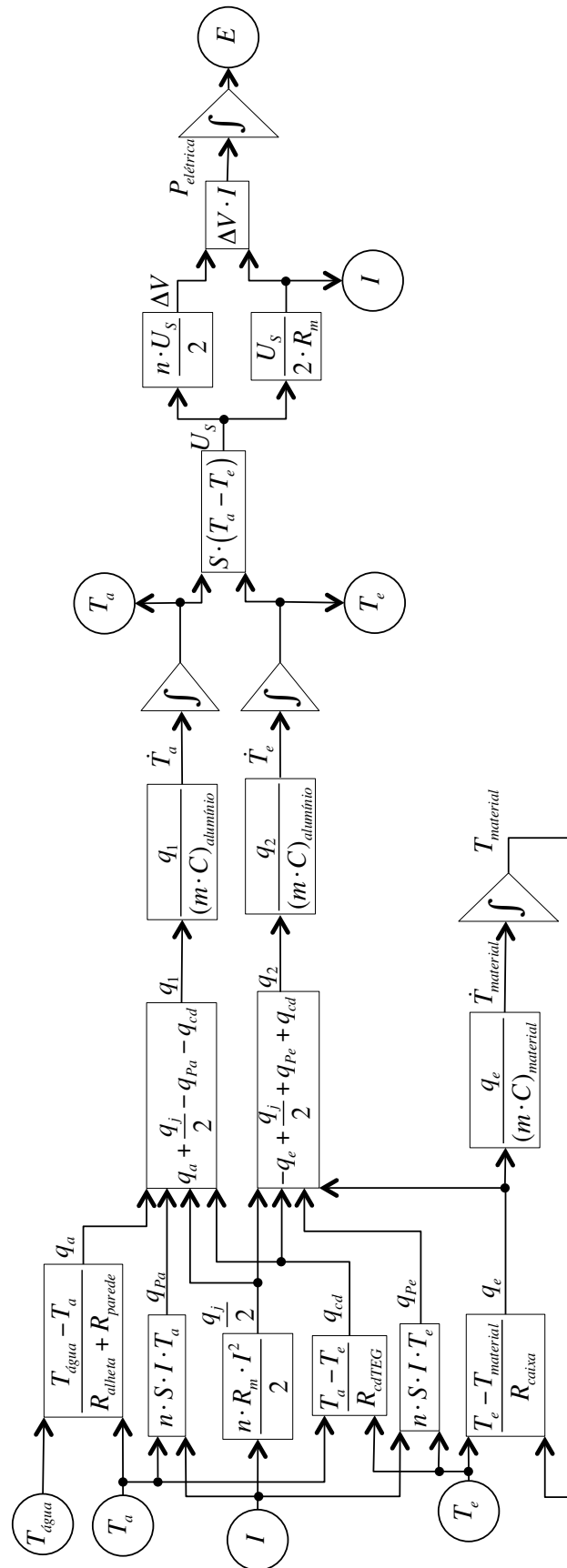


Figura 3.7: Esquema da sequência de cálculo das temperaturas e da energia do sistema, quando o material armazenador de energia está no estado líquido

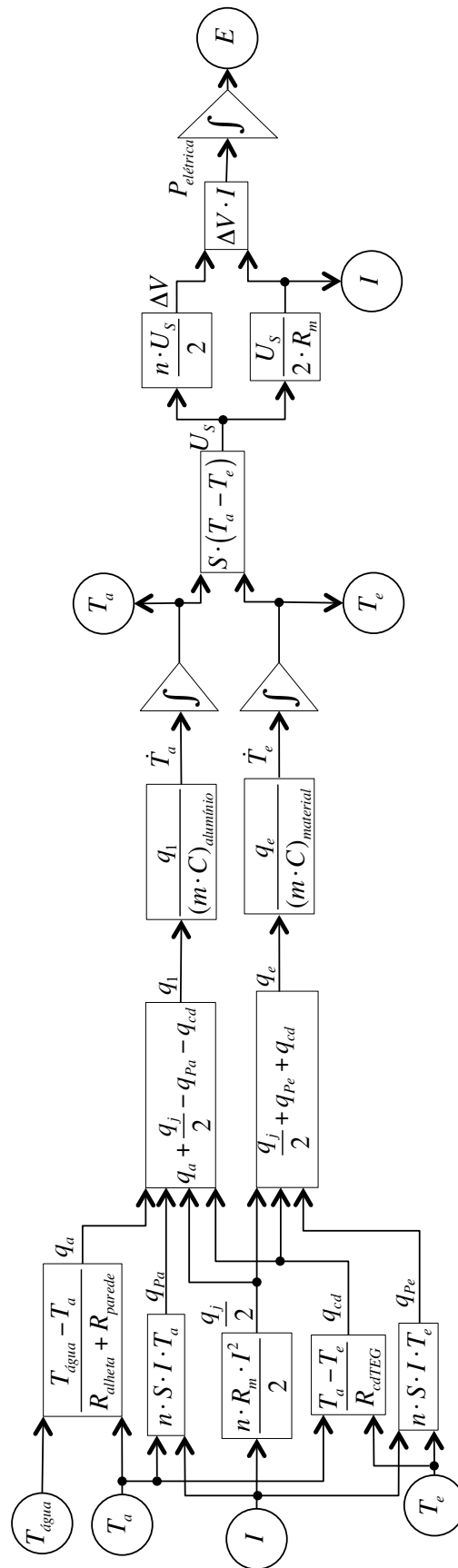


Figura 3.8: Esquema da sequência de cálculo das temperaturas e da energia do sistema, quando o material armazenador de energia está no estado sólido

3.3 Propriedades térmicas e elétricas do TEG

Para o modelo dinâmico do sistema em estudo, é necessário saber as propriedades térmicas e elétricas do TEG. Para isso, foi escolhido o gerador termoelétrico do tipo *thin-film* eTEG PG37 da *Laird Technologies* [14]. A folha de características do fabricante (Anexo A.2) apresenta as seguintes características de 1 TEG:

- Área, $A_{TEG} = 3.1 \times 3.3 \times 10^{-6} \text{ [m}^2\text{]}$
- Espessura, $e_{TEG} = 0.6 \times 10^{-3} \text{ [m]}$
- Resistência térmica, $R_{cd \text{ TEG}} = 13.1 \text{ [K/W]}$
- Para uma diferença de temperatura das faces do TEG $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ e $R_{carga} = R_m$ em circuito fechado:
 - Potência, $P_m = 1.5 \times 10^{-3} \text{ [W]}$
 - Tensão, $V_m = 0.13 \text{ [V]}$
 - Intensidade de corrente, $I_m = 12 \times 10^{-3} \text{ [A]}$

A partir destes dados, fornecidos pelo fabricante, é possível calcular a condutibilidade térmica $k_{TEG} \text{ [W/(m K)]}$ (equação 3.25), coeficiente de Seebeck $S \text{ [V/K]}$ (equação 3.26) e resistência elétrica interna $R_m \text{ [\Omega]}$ (equação 3.27) [16].

$$k_{TEG} = \frac{e_{TEG}}{R_{cd \text{ TEG}} A_{TEG}} = 4.48 \text{ [W/(m K)]} \quad (3.25)$$

$$S = \frac{2 V_m}{\Delta T} = 0.026 \text{ [V/K]} \quad (3.26)$$

$$R_m = R_{carga} = \frac{V_m^2}{P_m} = 11.3 \text{ [\Omega]} \quad (3.27)$$

Os valores das resistências térmicas de condução dos TEG e dos componentes de alumínio são calculados através da equação 3.28, onde $R_{cd} \text{ [K/W]}$ é a resistência térmica de condução, $e \text{ [m]}$ é a espessura de material através do qual há condução térmica, $k \text{ [W/(m K)]}$ é a condutibilidade térmica do material e $A \text{ [m}^2\text{]}$ é a área do material onde haverá condução.

$$R_{cd} = \frac{e}{k \cdot A} \quad (3.28)$$

A área de condução será igual à área abrangida pelos n TEG, ou seja, $A = n \times A_{TEG}$. A condutibilidade térmica do alumínio tanto para a parede do *glider*, k_{parede} , como para a caixa, k_{caixa} , é a mesma e é 167 [W/(m K)] . A condutibilidade térmica dos TEG, k_{TEG} , é 4.48 [W/(m K)] . Para a espessura do alumínio, tanto para a parede como para a caixa de alumínio, considerou-se que seria 3 mm e a espessura do TEG é de 0.6 mm .

Tendo os valores de e , k e A para os componentes de alumínio e para o TEG, consegue-se calcular as suas resistências térmicas de condução, obtendo-se:

$$\bullet R_{parede} = R_{caixa} = \frac{3 \times 10^{-3}}{167 \times n \times A_{TEG}} \text{ [K/W]}$$

$$\bullet R_{cd \text{ TEG}} = \frac{0.6 \times 10^{-3}}{4.48 \times n \times A_{TEG}} \text{ [K/W]}$$

3.4 Materiais armazenadores de energia térmica

Para a escolha do material para armazenar energia térmica a colocar no interior do *glider*, de modo a garantir a diferença de temperatura nas paredes do TEG, teve-se em conta a relação capacidade térmica-volume de vários materiais. Visto que a principal restrição para a utilização do material é o volume interior do *glider*, ao comparar os materiais através desta relação, consegue-se ter uma noção dos materiais que necessitam, para o mesmo volume de material, trocar mais energia com o exterior para variar a sua temperatura. A tabela 3.1 apresenta para os materiais metálicos com maior capacidade térmica por unidade de volume os valores de densidade, capacidade térmica por unidade de massa e capacidade térmica por unidade de volume.

Tabela 3.1: Densidade, capacidade térmica por unidade de massa e por unidade de volume de alguns materiais metálicos [17] [18]

Material	Densidade $\frac{kg}{m^3}$	Capacidade térmica por unidade de massa $\frac{kJ}{kg \cdot K}$	Capacidade térmica por unidade de volume $\frac{kJ}{m^3 \cdot K}$
Aço inoxidável	8000	0.49	3920
Níquel	8908	0.44	3919.5
Cobalto	8746	0.42	3673.3
Ferro fundido	7800	0.46	3588
Manganês	7440	0.48	3571.2
Ferro	7850	0.45	3532.5

Conclui-se então que o aço inoxidável, com capacidade térmica de $0.490 \text{ kJ}/(kg \cdot K)$ e densidade $8000 \text{ kg}/m^3$, é o material metálico com o maior valor de capacidade térmica por unidade de volume.

Sabendo que o *glider* irá executar missões em água salgada, que tem capacidade térmica de $3.900 \text{ kJ}/(kg \cdot K)$ e densidade de $1000 \text{ kg}/m^3$, esta também vai ser considerada nas simulações como material armazenador de energia térmica. A água salgada tem uma relação capacidade térmica-volume de $3900 \text{ kJ}/(m^3 \cdot K)$, ou seja, um valor idêntico ao valor obtido para o aço inoxidável. Assim sendo, os resultados obtidos para o aço inoxidável e para a água salgada deverão ser próximos. A grande vantagem da utilização de água salgada, para este caso em particular, é ter fácil e livre acesso a esta e quando o *glider* é retirado do oceano, pode ser devolvida ao ambiente sem o prejudicar, facilitando o transporte do veículo fora de água.

Sabendo que a solução implementada num *thermal glider* inclui um gerador hidráulico que utiliza um material de mudança de fase na conversão de energia térmica em energia mecânica, este tipo de materiais foram também considerados como armazenadores de energia térmica. A decisão da utilização destes materiais no sistema desenvolvido neste trabalho é interessante porque durante a mudança de fase de um material é necessária mais energia por unidade de massa para variar a sua temperatura, devido à entalpia de transição de fase. Pretendendo-se garantir a máxima diferença de temperatura nas paredes dos TEG, é necessário que a temperatura do material varie o mínimo possível durante os seus ciclos de mergulho. Assim sendo, para a escolha dos PCMs a considerar nas simulações, tem de se considerar os que tenham como temperatura de transição de fase uma temperatura próxima da média do oceano durante um mergulho completo (descida e subida). Nas simulações realizadas, como explicado no próximo capítulo, considerou-se que o *glider* irá realizar as suas missões na zona do equador, onde a temperatura média da água do oceano durante os mergulhos será próxima dos 15 °C. Optou-se por utilizar os PCM RT10hc, RT11hc e RT12 do fabricante *Rubitherm*.

Nas figuras 3.9 a 3.11, fornecidas pelo fabricante na folha de características dos materiais (Anexo B) [19], é possível observar a energia por unidade de massa, $E/m_{material}$ [kJ/kg], necessária para variar a temperatura do PCM de 1 °C, quer para o seu aquecimento, quer para o seu arrefecimento. Pela análise destes gráficos é facilmente perceptível que o PCM RT10hc transita de fase em torno de 10 °C, o RT11hc em torno de 11 °C e o RT12 em torno de 12 °C. Todos os PCM referidos apresentam uma densidade de 770 kg/m³ quando se encontram no seu estado líquido e 880 kg/m³ no seu estado sólido. Como estes materiais mudam de fase durante os ciclos de mergulho do *glider*, o seu volume também varia durante essa transição de fase. Neste estudo, apenas nos interessa variação da temperatura do material e não é considerada a influência da variação do seu volume. É então considerado que, nas simulações, o volume ocupado pelo PCM é sempre o seu volume máximo, ou seja, quando este se encontra no estado líquido.

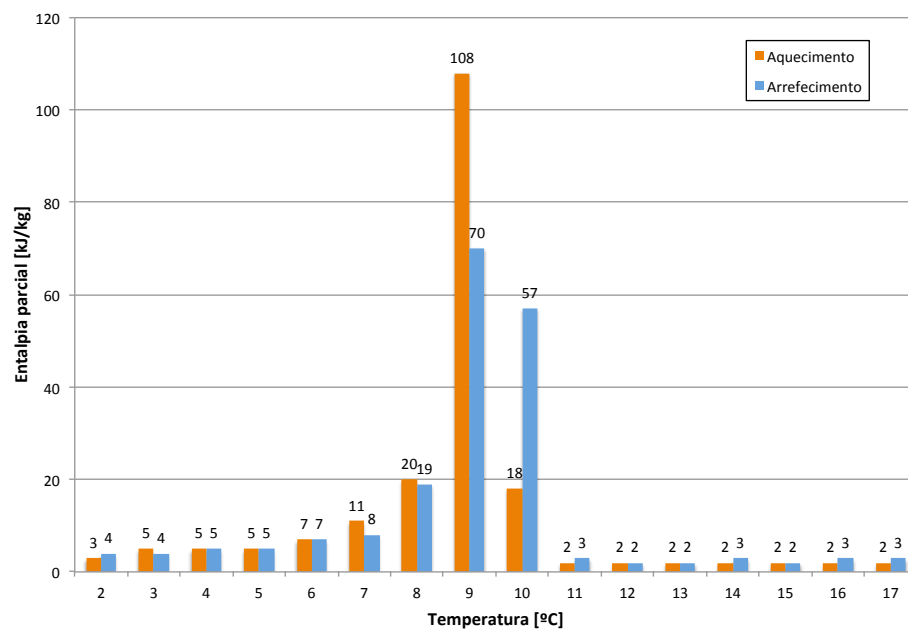


Figura 3.9: Entalpia parcial do PCM RT10hc em função da sua temperatura [19]

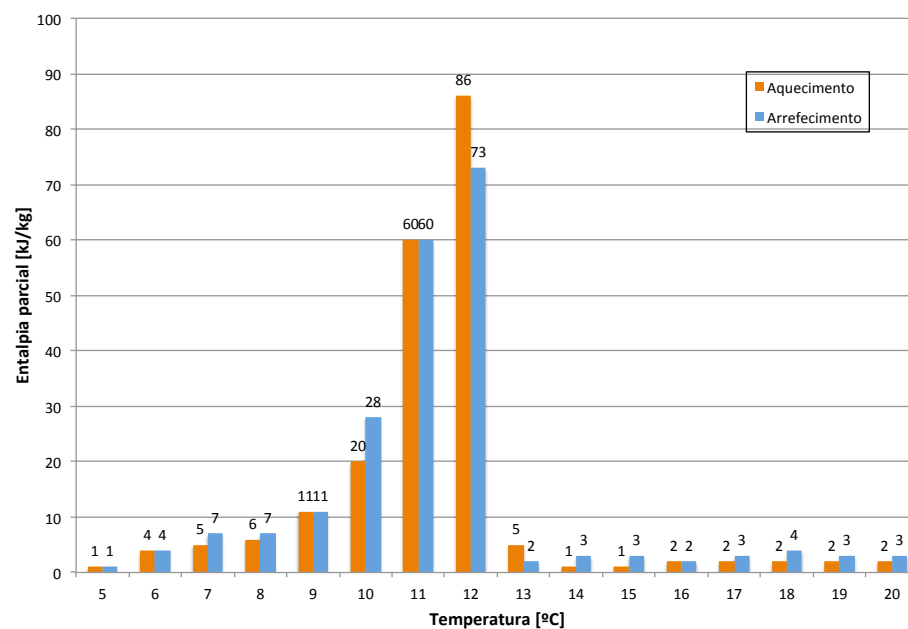


Figura 3.10: Entalpia parcial do PCM RT11hc em função da sua temperatura [19]

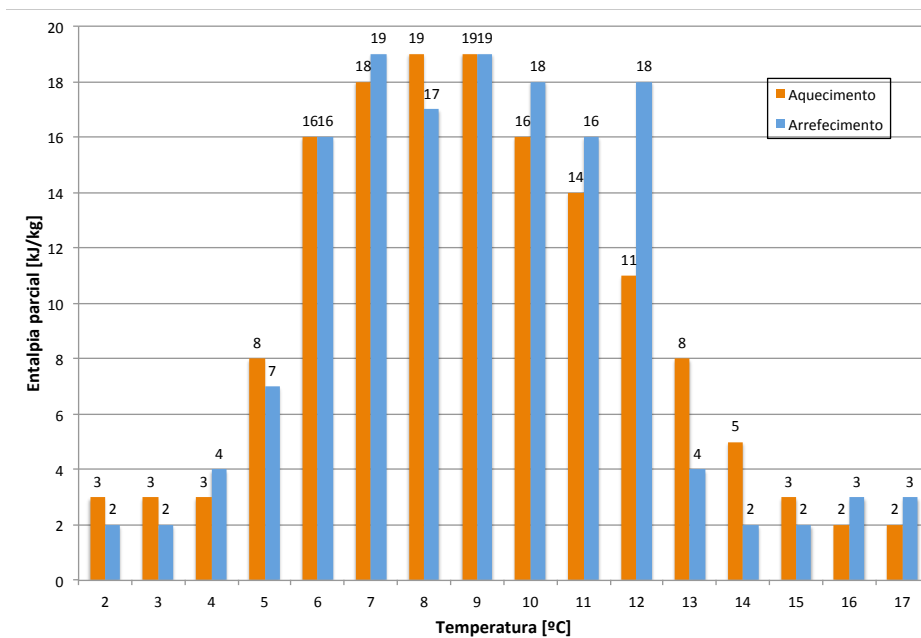


Figura 3.11: Entalpia parcial do PCM RT12 em função da sua temperatura [19]

Capítulo 4

Simulações e Resultados

Tipicamente, um *thermal glider* executa 6 mergulhos completos por dia (descida e subida) [20] e consome 6kJ de energia em cada um [3]. Nas simulações realizadas com o modelo desenvolvido neste trabalho pretende-se assim verificar quais os valores dos parâmetros que conduzem a valores de energia recolhida por mergulho desta ordem de grandeza. Para isso, na simulação foram variados o volume do material armazenador de energia térmica e o número de geradores termoelétricos utilizados.

Neste capítulo são descritos os parâmetros utilizados nas simulações realizadas e apresentados os resultados obtidos em cada simulação.

4.1 Objetivos

Nesta parte do trabalho será feito um estudo do comportamento do gerador termoelétrico acionado pelo gradiente térmico do oceano através de uma simulação em *MATLAB Simulink*. Esta será uma simulação do modelo dinâmico que descreve a transferência de calor entre a água do oceano em contacto com o exterior do *glider* e o material utilizado como acumulador de energia térmica colocado no interior do mesmo. Para que seja possível desenvolver este modelo, ser-nos-á então necessário conhecer os parâmetros da solicitação a considerar na simulação, nomeadamente o perfil do movimento do *glider* e o perfil da evolução da temperatura do oceano com a profundidade.

O modelo térmico e elétrico do sistema foi obtido no capítulo anterior através de uma analogia reo-elétrica, a partir da qual foram deduzidas as equações que descrevem a evolução das temperaturas do sistema em função da evolução da temperatura da água do oceano em contacto com o exterior do *glider*. A partir deste modelo térmico, é possível saber as temperaturas das duas faces do TEG e assim obter a energia elétrica produzida pelo mesmo.

Serão feitas simulações para os diferentes materiais de armazenamento de energia térmica e serão considerados diferentes quantidades de TEG utilizados até atingir a energia pretendida em cada mergulho.

4.2 Gradiente térmico do oceano e perfil de trajetória do *glider*

A solicitação no modelo desenvolvido neste trabalho é a variação da temperatura da água do oceano com a profundidade. Para isso, é necessário conhecer o perfil da evolução da temperatura da água em função da profundidade e saber também a trajetória que o *glider* descreve, de modo a conseguir saber a temperatura da água do oceano que está em contacto com o exterior do mesmo.

Para o modelo dinâmico foi assumido que o *glider* em estudo realizará missões em zonas próximas do equador, com mergulhos entre a superfície do oceano e 1200 metros de profundidade. O perfil de evolução da temperatura $T_{\text{água}}$ [°C] com a profundidade z [m] é descrito pelo sistema de equações 4.1 [1] e representado na figura 4.1.

$$T_{\text{água}} = \begin{cases} 26 & ^\circ\text{C} & z \geq -20 & m \\ 26 + 0,115 \cdot (z + 20) & ^\circ\text{C} & -20 \geq z \geq -150 & m \\ 26 + 0,008 \cdot (z + 150) & ^\circ\text{C} & -150 \geq z \geq -1000 & m \\ 4,2 & ^\circ\text{C} & z \leq -1000 & m \end{cases} \Rightarrow \quad (4.1)$$

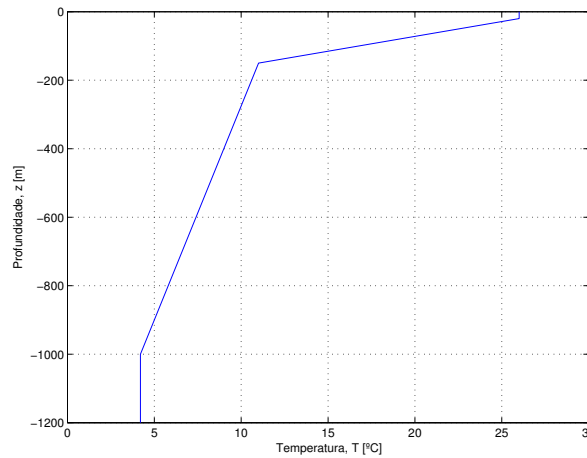


Figura 4.1: Variação da temperatura da água do oceano com a profundidade na zona do equador

Considerou-se que o perfil da trajetória do *glider* seria sempre uma onda sinusoidal entre a superfície do oceano e a profundidade máxima (1200 m), por ser uma boa aproximação ao movimento em dente de serra executado pelos *gliders* oceânicos convencionais. Note-se, ainda, que é necessário que se atinja a superfície para que seja possível transmitir dados via satélite, visto que, para esse efeito, a antena não poderá estar submersa.

Para relacionar a profundidade z [m] com a função $\sin(\omega t)$, que varia entre $[-1, 1]$, sendo t [s] o tempo decorrido na simulação, e o *glider* se encontra à profundidade máxima no instante inicial, utiliza-se a equação 4.4. O perfil de movimento do *glider* considerado nas simulações está

representado na figura 4.2.

$$\text{Período} = \frac{24 \text{ h/dia}}{6 \text{ mergulhos/dia}} \times 3600 \text{ s/h} = 14400 \text{ [s/mergulho]} \quad (4.2)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{\text{Período}} = \frac{2\pi}{14400} \text{ [rad/s]} \quad (4.3)$$

$$z = 600 \cdot \sin(\omega t - \pi/2) - 600 \text{ [m]} \quad (4.4)$$

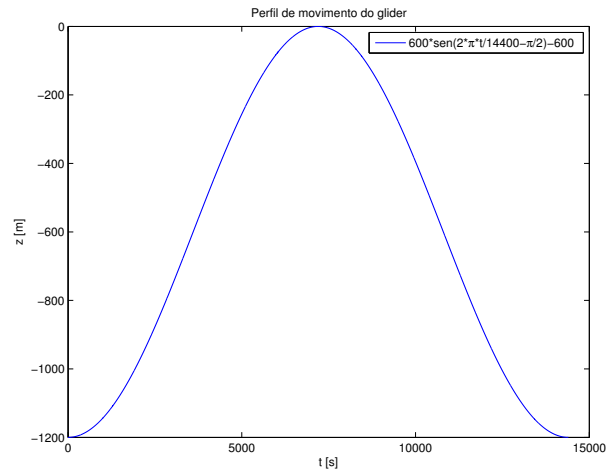


Figura 4.2: Perfil do movimento considerado nas simulações

Na figura 4.3 está representada a variação temporal da temperatura do mar em redor do *glider* durante um mergulho completo.

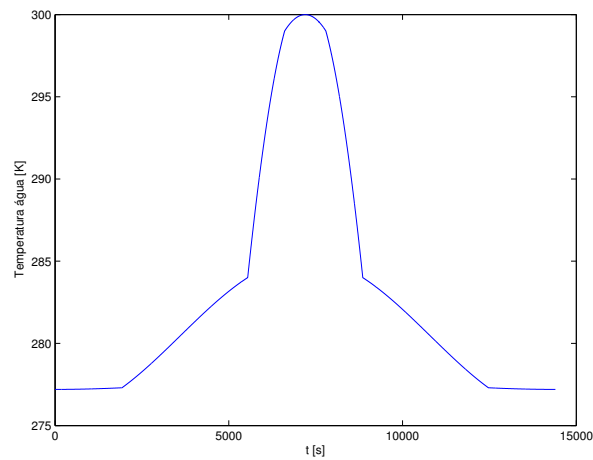


Figura 4.3: Variação temporal da temperatura do mar em redor do *glider*

4.3 Simulações e apresentação dos resultados

Como referido na introdução deste capítulo, tipicamente, um *thermal glider* executa 6 mergulhos completos por dia (descida e subida) [20] e consome 6kJ de energia em cada um [3]. Sendo o principal objetivo dos resultados das simulações atingir esse valor de energia por mergulho, foram feitas várias simulações em que se variaram os valores de volume dos materiais de armazenamento de energia térmica e do número de TEG de modo a obter uma relação entre estes dois parâmetros para que se atinja o valor desejado de energia elétrica produzida.

A variação do valor do volume do material armazenador de energia térmica influencia a energia que é necessário transferir para que este varie a sua temperatura. Quanto maior o volume, maior será a massa e, assim sendo, mais energia será necessária para conseguir variar a temperatura do material.

A variação do número de TEG influencia a resistência elétrica da carga externa, as áreas de transferência de calor, assim como o número de alhetas.

São apresentados os resultados para cada um dos materiais armazenadores de energia térmica: os valores de volume desse mesmo material, o número de TEG utilizados e a energia elétrica acumulada para cada simulação. São ainda apresentados os perfis de evolução de temperatura do material armazenador de energia térmica, variação de potência elétrica gerada e energia elétrica acumulada, por mergulho, para uma combinação de volume de material e número de TEG que tenha atingido os 6kJ requeridos por mergulho nas simulações.

Todos os valores apresentados nos gráficos foram obtidos durante o terceiro ciclo de mergulho do *glider*, para que se consiga garantir o regime permanente da evolução de temperatura do material armazenador de energia térmica. Assim sendo, nas figuras que mostram a evolução de temperatura dos materiais utilizados como armazenadores de energia térmica, nos instantes iniciais, o valor da temperatura do material armazenador de energia é decrescente porque, sendo a temperatura da água inferior à do material, o material está a ser arrefecido. Pela mesma razão, nas figuras que mostram a potência gerada, no instante inicial, devido à diferença de temperatura entre a água do oceano e o material armazenador de energia térmica, o valor de potência gerada não é nulo.

4.3.1 Aço inoxidável

Nas simulações onde foi considerado aço inoxidável como material armazenador de energia térmica, foi utilizado o modelo para materiais armazenadores de energia no estado sólido.

Na figura 4.4 estão representados os resultados obtidos nas simulações realizadas considerando aço inoxidável como material armazenador de energia térmica para valores de volume deste material de 0.110, 0.111, 0.112, 0.113, 0.114 e 0.115 m³, e para 6000, 8000, 8500, 9000, 9500, 10000, 10500, 11000, 11500 e 15000 TEG.

Analisando estes resultados, o objetivo de produzir 6 kJ por mergulho é alcançado com 0.112 m³ (112 litros) de aço inoxidável e a quantidade de TEG compreendida entre 8500 e 10500 TEG.

Isto equivale a ter 896 kg de aço inoxidável, uma área de TEG de 0.0870 a 0.1074 m² e 85 a 105 alhetas.

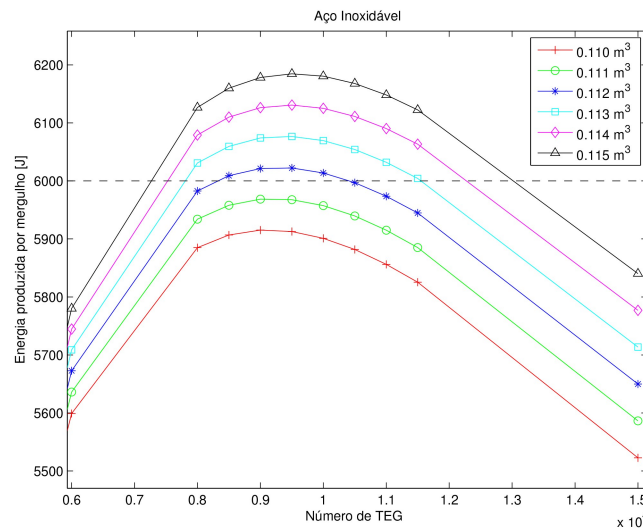


Figura 4.4: Energia gerada por mergulho para cada volume de aço inoxidável considerado variando o número de TEG

Nas figuras 4.5 a 4.7 estão representadas as evoluções temporais da temperatura do material armazenador de energia térmica, da potência elétrica produzida e da energia elétrica acumulada, respetivamente, no decorrer de um mergulho completo, quando considerado um volume de 0.112 m³ de aço inoxidável e 8500 TEG.

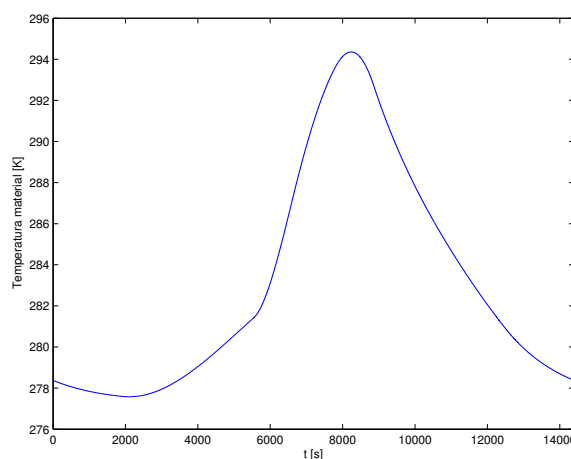


Figura 4.5: Variação da temperatura do aço inoxidável no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.112 m³ deste material e 8500 TEG

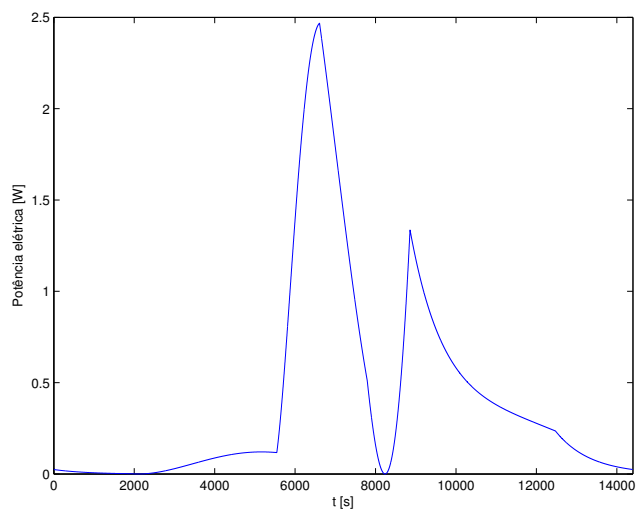


Figura 4.6: Variação da potência elétrica produzida no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.112 m^3 de aço inoxidável e 8500 TEG

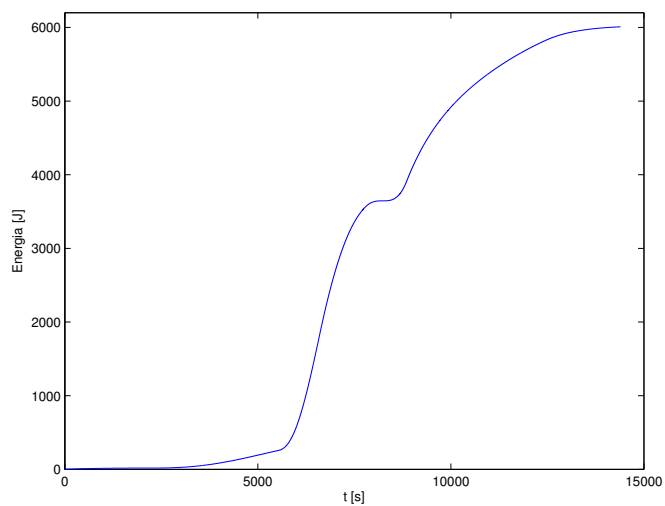


Figura 4.7: Energia elétrica acumulada no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.112 m^3 de aço inoxidável e 8500 TEG

4.3.2 Água

Nas simulações onde foi considerada água como material armazenador de energia térmica, foi utilizado o modelo para materiais armazenadores de energia no estado líquido.

Na figura 4.8 estão representados os resultados das simulações realizadas para água como material armazenador de energia térmica para valores de volume deste material de 0.120, 0.1225 e 0.125 m³, e para 8000, 9000, 10000, 11000, 12000, 13000, 14000 e 15000 TEG.

Analisando estes resultados, o objetivo de produzir 6 kJ por mergulho é alcançado com 0.125 m³ (125 litros) de água, como material armazenador de energia térmica, e a quantidade de TEG compreendida entre 10000 e 13000 TEG. Isto é o equivalente a ter 125 kg de água, como material armazenador de energia térmica, uma área de TEG de 0.1023 a 0.1330 m² e 100 a 130 alhetas.

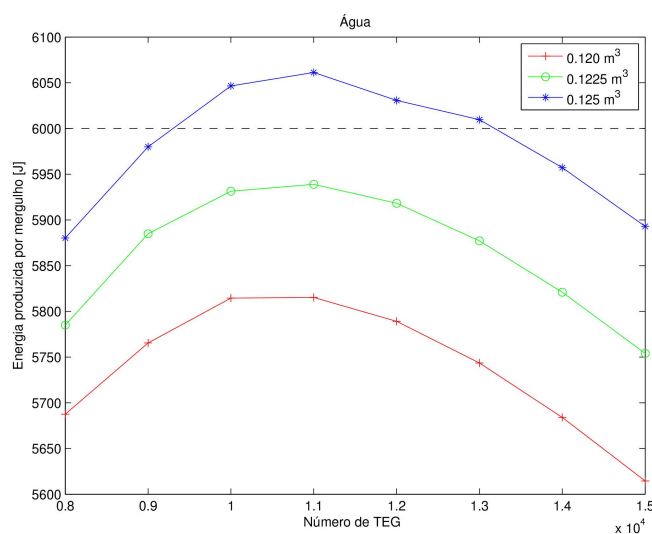


Figura 4.8: Energia gerada por mergulho para cada volume de água, como material armazenador de energia térmica, considerado variando o número de TEG

Nas figuras 4.9 a 4.11 estão representadas as evoluções temporais da temperatura do material armazenador de energia térmica, da potência elétrica gerada e da energia elétrica acumulada, respectivamente, no decorrer de um mergulho completo, quando considerado um volume de 0.125 m³ de água, como material armazenador de energia térmica, e 10000 TEG.

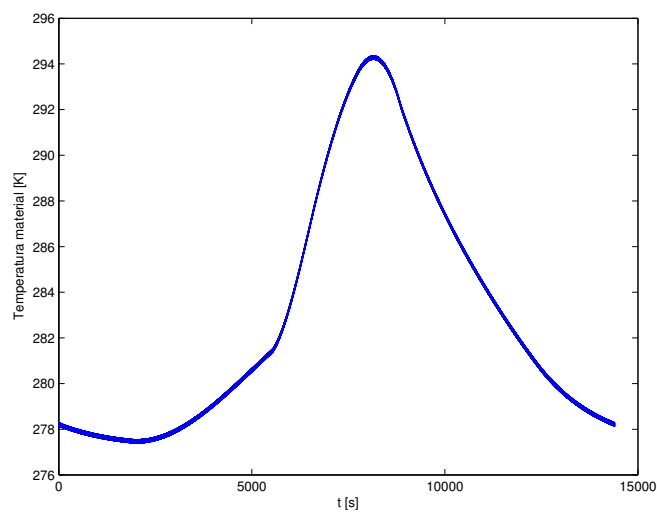


Figura 4.9: Variação da temperatura da água, como material armazenador de energia térmica, no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.125 m^3 deste material e 10000 TEG

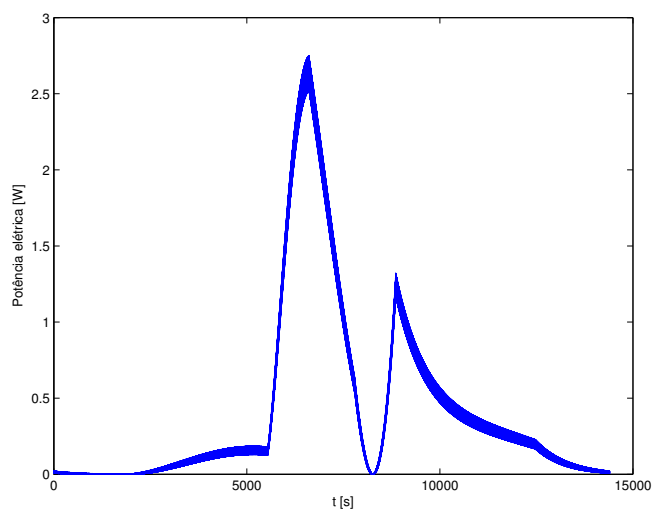


Figura 4.10: Variação da potência elétrica produzida no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.125 m^3 de água, como material armazenador de energia térmica, e 10000 TEG

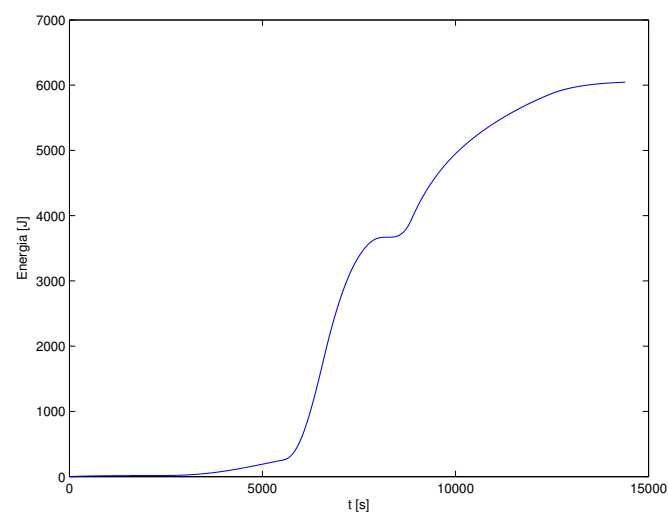


Figura 4.11: Energia elétrica acumulada no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.125 m^3 de água, como material armazenador de energia térmica, e 10000 TEG

4.3.3 PCM RT10hc

Nas simulações onde foi considerado o PCM RT10hc como material armazenador de energia térmica, foi utilizado o modelo para materiais armazenadores de energia no estado líquido.

Na figura 4.12 estão representados os resultados das simulações realizadas para o PCM RT10hc como material armazenador de energia térmica para valores de volume deste material de 0.040, 0.041, 0.042, 0.043, 0.044 e 0.045 m³, e para 5000, 5500, 6000, 6500, 7000 e 7500 TEG.

Analisando estes resultados, o objetivo de produzir 6 kJ por mergulho é alcançado com 0.042 m³ (42 litros) de PCM e a quantidade de TEGs compreendida entre 5500 e 7000 TEG. Isto equivale a ter 32 kg de PCM RT10HC, uma área de TEG de 0.0563 a 0.0716 m² e 55 a 70 alhetas.

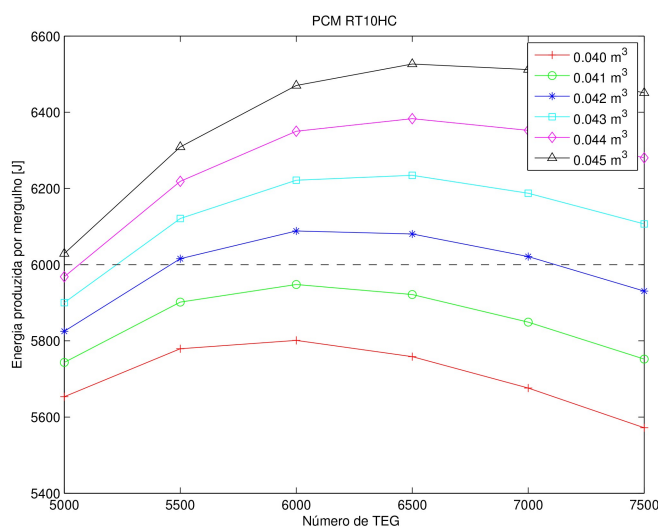


Figura 4.12: Energia gerada por mergulho para cada volume de PCM RT10hc considerado variando o número de TEG

Nas figuras 4.13 a 4.15 estão representadas as evoluções temporais da temperatura do material armazenador de energia térmica, da potência elétrica produzida e da energia elétrica gerada, respectivamente, no decorrer de um mergulho completo, quando considerado um volume de 0.042 m³ de água e 5500 TEG.

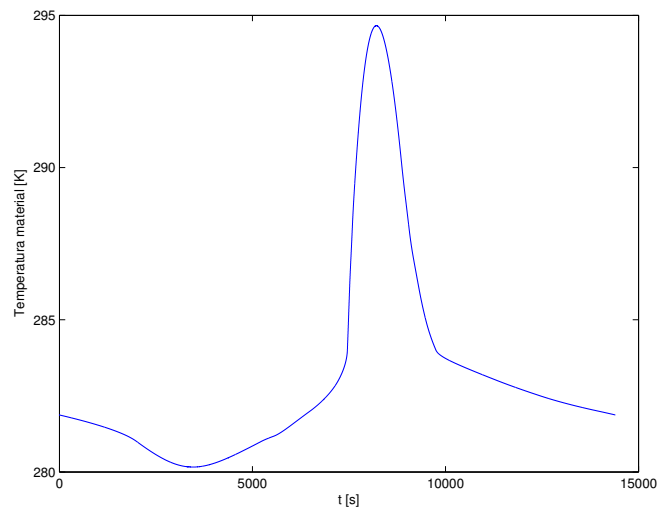


Figura 4.13: Variação da temperatura de PCM RT10hc no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.042 m^3 deste material e 5500 TEG

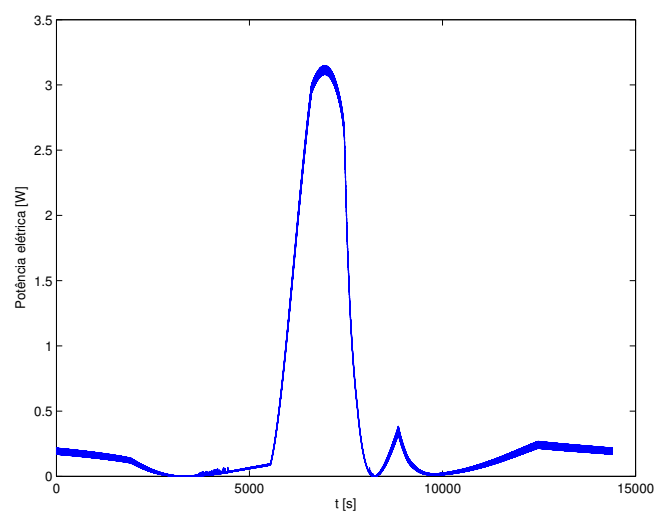


Figura 4.14: Variação da potência elétrica produzida no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.042 m^3 de PCM RT10hc e 5500 TEG

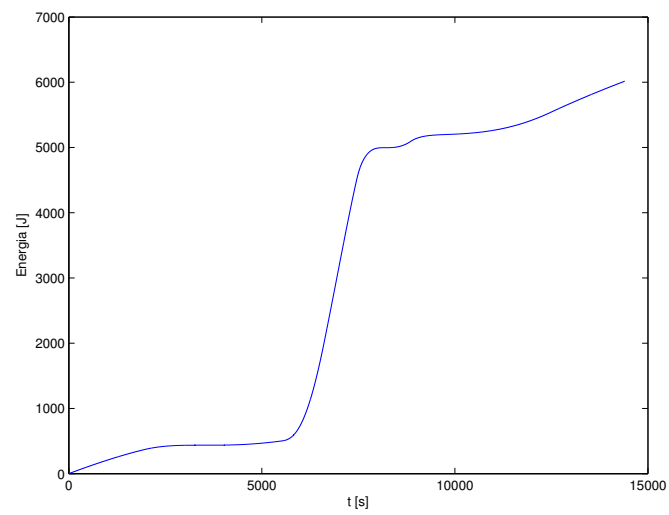


Figura 4.15: Energia elétrica acumulada no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.042 m^3 de PCM RT10hc e 5500 TEG

4.3.4 PCM RT11hc

Nas simulações onde foi considerado o PCM RT11hc como material armazenador de energia térmica, foi utilizado o modelo para materiais armazenadores de energia no estado líquido.

Na figura 4.16 estão representados os resultados das simulações realizadas para o PCM RT11hc como material armazenador de energia térmica para valores de volume de este material de 0.035, 0.036 e 0.037 m³, e para 4000, 4500, 5000, 5500, 6000, 6500, 7000, 7500 e 8000 TEG.

Analisando estes resultados, o objetivo de produzir 6 kJ por mergulho é alcançado com 0.036 m³ (36 litros) de PCM RT11hc e a quantidade de TEG compreendida entre 5000 e 7000 TEG. Isto equivale a ter 27.7 kg de PCM RT11hc, uma área de TEG de 0.0512 a 0.0716 m² e 50 a 70 alhetas.

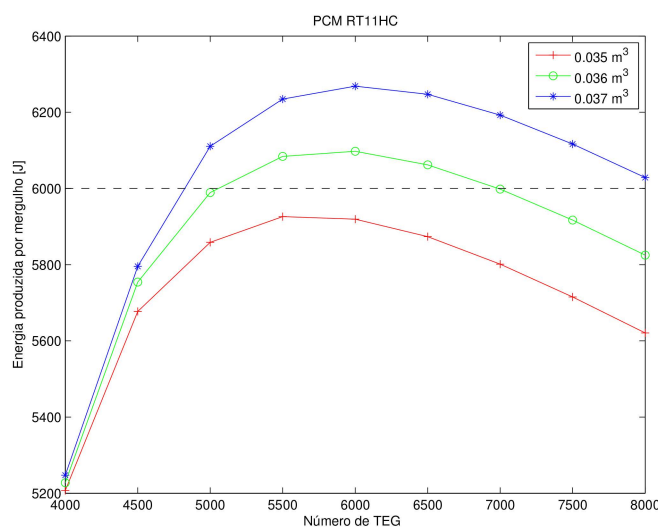


Figura 4.16: Energia gerada por mergulho para cada volume de PCM RT11hc considerado variando o número de TEG

Nas figuras 4.17 a 4.19 estão representadas as evoluções temporais da temperatura do material armazenador de energia térmica, da potência elétrica produzida e da energia elétrica gerada, respectivamente, no decorrer de um mergulho completo, quando considerado um volume de 0.036 m³ de água e 5000 TEG.

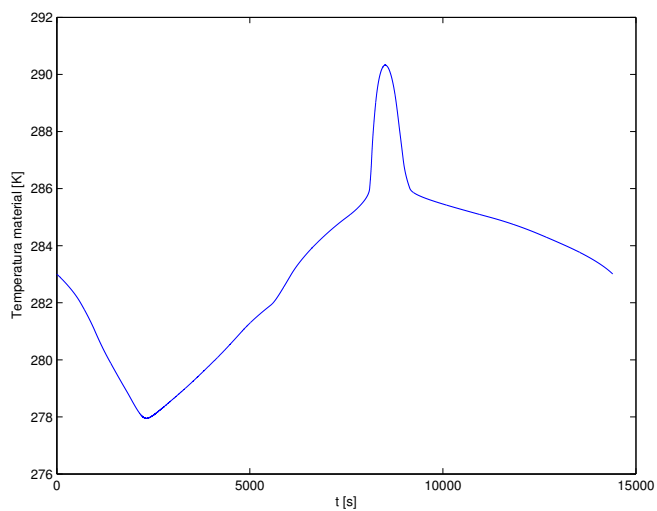


Figura 4.17: Variação da temperatura da PCM RT11hc no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.036 m^3 deste material e 5000 TEG

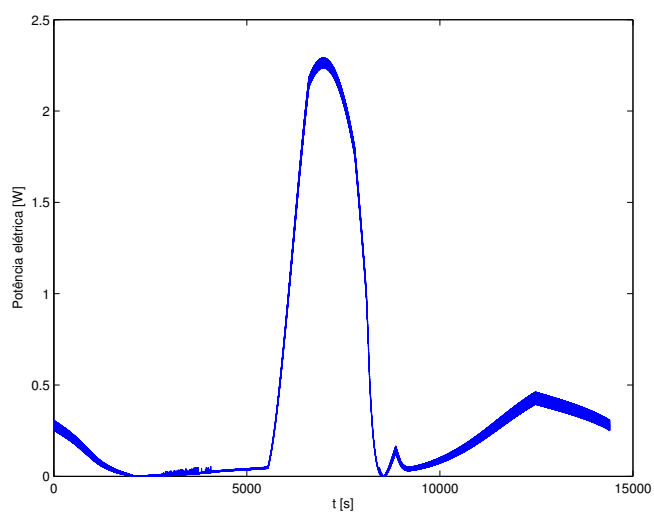


Figura 4.18: Variação da potência elétrica produzida no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.036 m^3 de PCM RT11hc e 5000 TEG

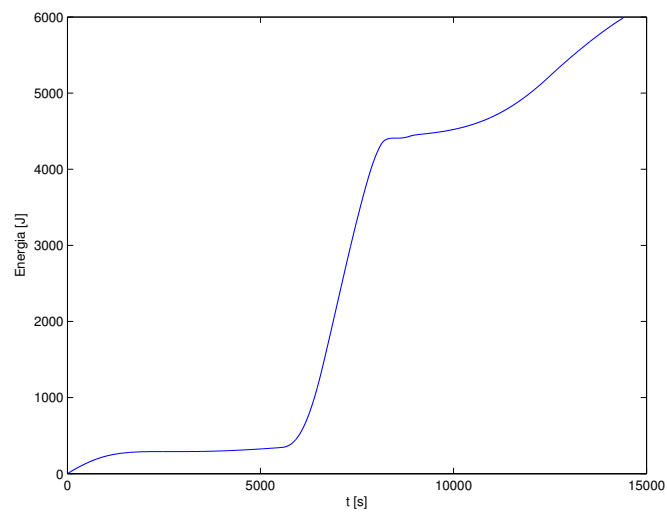


Figura 4.19: Energia elétrica acumulada no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.036 m^3 de PCM RT11hc e 5000 TEG

4.3.5 PCM RT12

Nas simulações onde foi considerado o PCM RT12 como material armazenador de energia térmica, foi utilizado o modelo para materiais armazenadores de energia no estado líquido.

Na figura 4.20 estão representados os resultados das simulações realizadas para o PCM RT12 como material armazenador de energia térmica para valores de volume deste material de 0.060, 0.061, 0.062 e 0.063 m³, e para 5000, 5500, 6000, 6500, 7000, 7500 e 8000 TEG.

Analisando estes resultados, o objetivo de produzir 6 kJ por mergulho é alcançado com 0.061 m³ (61 litros) de PCM e 7000 TEG. Isto equivale a ter 47 kg de PCM RT12, uma área de TEG de 0.0716 m² e 70 alhetas.

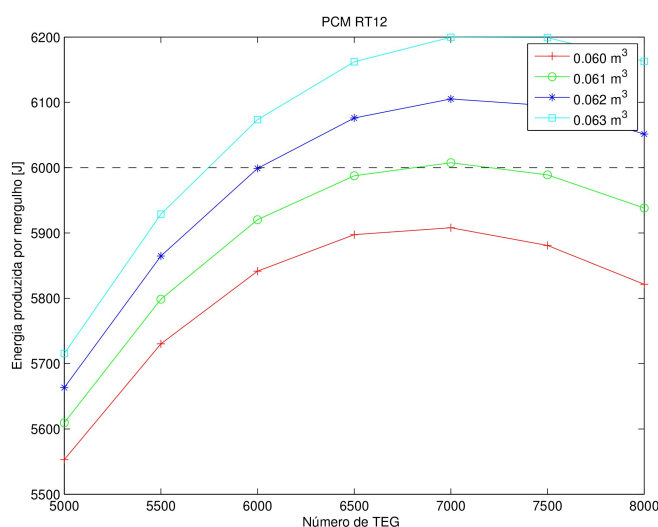


Figura 4.20: Energia gerada por mergulho para cada volume de PCM RT12 considerado variando o número de TEG

Nas figuras 4.21 a 4.23 estão representadas as evoluções temporais da temperatura do material armazenador de energia térmica, da potência elétrica produzida e da energia elétrica gerada, respectivamente, no decorrer de um mergulho completo, quando considerado um volume de 0.061 m³ de água e 7000 TEG.

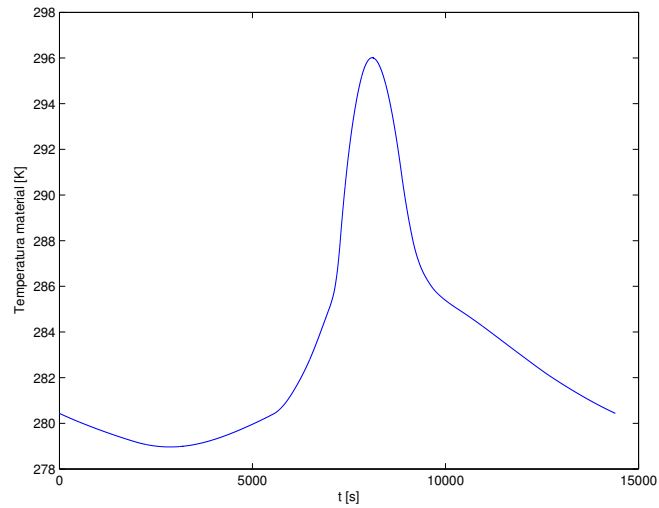


Figura 4.21: Variação da temperatura de PCM RT12 no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.061 m^3 deste material e 7000 TEG

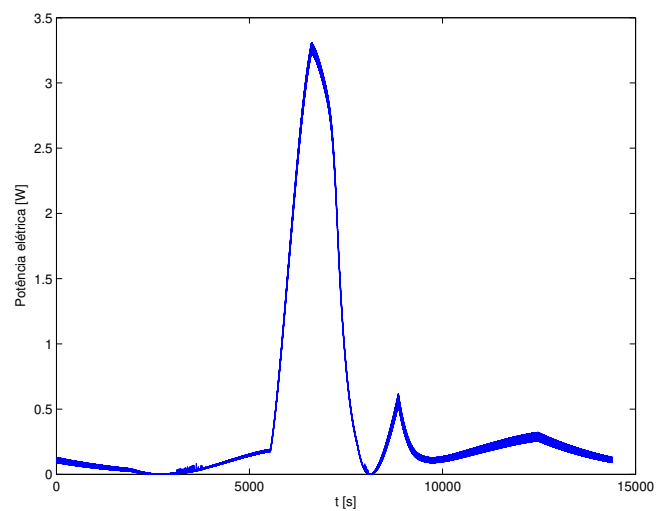


Figura 4.22: Variação da potência elétrica produzida no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.061 m^3 de PCM RT12 e 7000 TEG

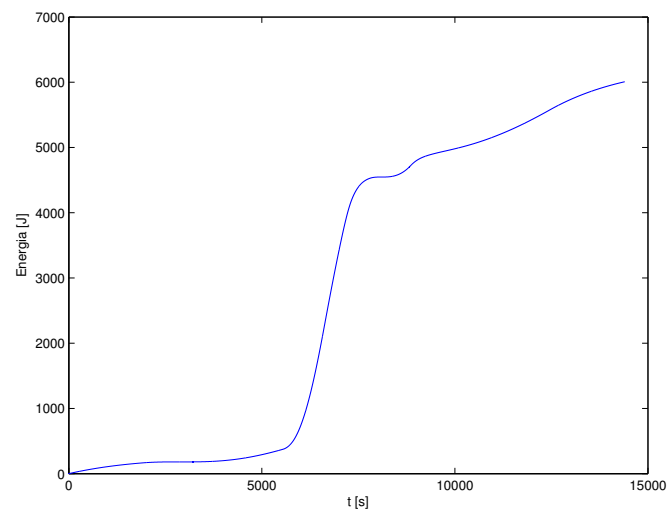


Figura 4.23: Energia elétrica acumulada no decorrer de um mergulho completo quando considerado um volume de 0.061 m^3 de PCM RT12 e 7000 TEG

Capítulo 5

Conclusões

O principal objetivo deste trabalho foi determinar a viabilidade da utilização de geradores termoeletricos em *gliders* de modo a gerar energia elétrica suficiente para sustentar as suas necessidades em cada mergulho.

Analisando os resultados obtidos nas simulações para os diferentes materiais armazenadores de energia térmica, conclui-se que, para a mesma variação de temperatura da água do oceano, a utilização de PCM permite atingir o valor de energia por mergulho pretendida com um menor volume e menor massa de material devido à sua elevada entalpia de transição de fase.

Olhando apenas para os resultados obtidos utilizando os PCM, o PCM RT11hc foi o que apresentou melhores resultados, ao conseguir atingir os pretendidos 6 kJ por mergulho necessitando de 36 litros de volume quando está no estado líquido, que correspondem a uma massa de 28 kg, e 5000 TEG, que ocupam uma área total de 0.0512 m².

Tendo em conta que o preço de cada TEG considerado nas simulações é de aproximadamente 40 €, apenas em TEG, seria um investimento por *glider* de 200 000 €. Este valor representa um grande investimento inicial que, a longo prazo, pode tornar-se vantajoso e rentável, visto que os geradores termoeletricos não necessitam de manutenção e para o caso em que se comprove o aumento de autonomia do *glider*.

Para concluir, considerando as dimensões de um *Slocum Thermal*, que tem 1.5 m de comprimento e 0.21 m de diâmetro [3], e considerando o *glider* com forma de um cilindro, o seu volume interior seria 52 litros e a área lateral exterior 0.990 m². Assim, conclui-se que para poder implementar esta solução utilizando o PCM RT11hc, este ocuparia aproximadamente 70% do volume interior do *glider*, pelo que restaria pouco espaço para instrumentação e baterias, e os TEG ocupariam cerca de 5% da sua área lateral. Uma solução alternativa, seria colocar o PCM em tubos no exterior do *glider*, à semelhança do que é feito no *Slocum Thermal*.

Referências

- [1] Qiaoling Kong and Jie Ma e Dongying Xia. Numerical and experimental study of the phase change process for underwater glider propelled by ocean thermal energy. *Renewable Energy*, 35(4):771 – 779, 2010.
- [2] Henry Stommel. The slocum mission. *Oceanography*, 2(1):22–25, 1989.
- [3] *Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles*, chapter 3 - Autonomous Buoyancy-Driven Underwater Gliders. Taylor and Francis, 2003.
- [4] Knox A. Siviter J. e Montecucco A. Buckle, J.R. Autonomous underwater vehicle thermoelectric power generation. *Journal of Electronic Materials*, 42(7):2214–2220, 2013.
- [5] Saffa B Riffat and Xiaoli Ma. Thermoelectrics: a review of present and potential applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(8):913–935, 2003.
- [6] H.J. Goldsmid. *Introduction to Thermoelectricity*. Springer Series in Materials Science. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [7] Wei-Hsin Chen, Chen-Yeh Liao, and Chen-I Hung. A numerical study on the performance of miniature thermoelectric cooler affected by thomson effect. *Applied Energy*, 89(1):464 – 473, 2012. Special issue on Thermal Energy Management in the Process Industries.
- [8] J Paulo and PD Gaspar. Review and future trend of energy harvesting methods for portable medical devices. In *Proceedings of the world congress on engineering*, volume 2, pages 168–196, 2010.
- [9] Simon Lineykin and Shmuel Ben-Yaakov. Modeling and analysis of thermoelectric modules. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 43(2):505–512, 2007.
- [10] HoSung Lee. The thomson effect and the ideal equation on thermoelectric coolers. *Energy*, 56:61–69, 2013.
- [11] Paul Simonetti. Slocum glider: Design and 1991 field trials. Technical report, Webb Research Corp., 1992.
- [12] Frank P. Incropera. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [13] Asm aerospace specification metals, inc. <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA6061t6>. acedido a 2015-05-03.
- [14] Laird Technologies. *eTEG Series PG37,72,F2,0203,GG Thin Film Energy Harvester*.

- [15] G. Jeffrey Snyder Lauryn L. Baranowski and Eric S. Toberer. The misconception of maximum power and power factor in thermoelectrics. *Journal of Applied Physics*, 115(126102), 2014.
- [16] Huan-Liang Tsai and Jium-Ming Lin. Model building and simulation of thermoelectric module using matlab/simulink. *Journal of Electronic Materials*, 39(9):2105–2111, 2010.
- [17] The engineering toolbox: Metals and alloys - densities. http://www.engineeringtoolbox.com/metal-alloys-densities-d_50.html. acedido a 2015-05-01.
- [18] The engineering toolbox: Metals - specific heats. http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-metals-d_152.html. acedido a 2015-05-01.
- [19] Rubitherm phase change material. <http://www.rubitherm.de/english/index.htm>. acedido a 2015-05-01.
- [20] D. Jones, C. e Webb. Slocum glider extending the endurance. http://auvac.org/uploads/configuration_spec_sheets/Slocum%20Endurance%202009.pdf. acedido a 2015-05-15.

Anexo A

Geradores Termoelétricos

Neste anexo, estão apresentadas as folhas de características fornecidas pelos fabricantes dos TEG, Nextreme e Laird Technologies, referenciados neste trabalho.

- A.1 - Nextreme eTEG HV56
- A.2 - Laird Technologies eTEG PG37

A.1 Nextreme eTEG HV56

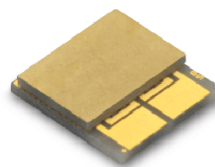


eTEG™ HV56 Power Generator Data Sheet

Description

The eTEG HV56 thermoelectric power generator can convert waste heat from thermal sources into usable electricity as an energy source. The HV56 is capable of producing 1.5mW of output power and an open circuit voltage of 0.25V at a 10K ΔT . At 50K ΔT , the HV56 can produce 36.5mW of power and an open circuit voltage of 1.25V. Modules can be configured electrically in series to produce higher voltage and power outputs.

eTEG HV56



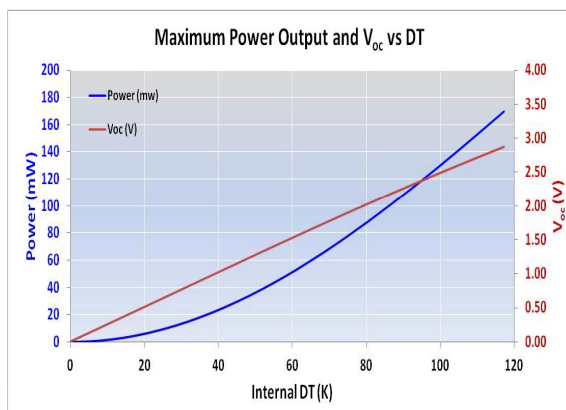
eTEG HV56 Data Sheet
Thermoelectric Power Generator

Part Number Options

Part Number	Description
NGA-1004850-0304A-W	With Soldered Wires
NGA-1004850-0304A-A	Au Wire Bondable Pads

Features

- High power output
- Small 3.1mm X 3.3mm footprint
- Extremely thin 0.6mm profile
- Au surfaces on top and bottom headers
- RoHS compliant



Typical Performance Specifications

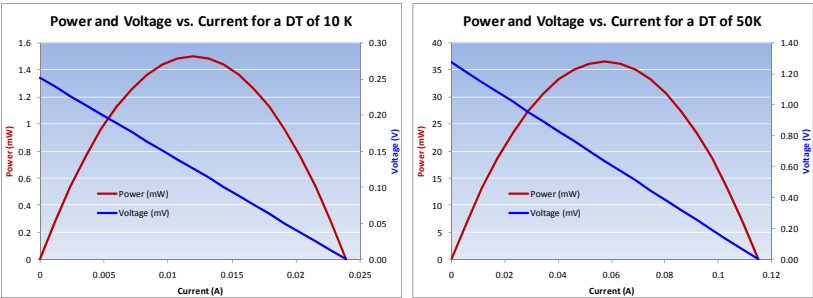
Parameter	Units	ΔT		
		10K	50K	100K
P_{out}	mW	1.5	36	130
V_{out}	volts	0.13	0.6	1.25
I_{out}	mA	12	60	105
V_{oc}	volts	0.26	1.2	2.5
I_{sc}	mA	24	115	210

*Performance maximized with matched electrical load

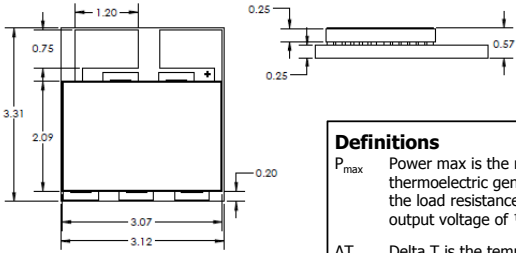
eTEG™ HV56 Power Generator Data Sheet

Operating Range			
Hot Side Temperature	T_{hot}	25-200°C	298-473K
Cold Side Temperature	T_{cold}	0-50°C	273-323K
Delta T	ΔT	10-200°C	10-200K
Maximum Mean Temperature	$T_{m,max}$	150°C	423K
Thermal Parameters			
Thermal Resistance	R	13.1 K/W	
Thermal Conductance	K	0.076 W/K	

Representative Power and Voltage vs. Current Curves



Product Dimensions (mm)



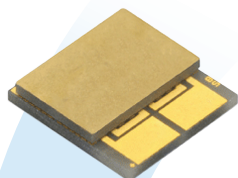
Definitions

- P_{max} Power max is the maximum amount of power created from the thermoelectric generator's Seebeck effect. This point occurs when the load resistance matches the device resistance resulting in an output voltage of $\frac{1}{2} V_{oc}$, where V_{oc} is the open circuit voltage.
- ΔT Delta T is the temperature difference across the thermoelectric generator.

A.2 Laird Technologies eTEG PG37



Innovative Technology
for a Connected World



eTEG Series PG37,72,F2,0203,GG Thin Film Energy Harvester

The eTEG Series is a micro thermoelectric power generator that harvests waste heat and converts it to usable output DC power. Due to its size, output power generation and heat conversion to power ratio this device is suitable for use in applications to power wireless sensors and wireless sensor networks.

One eTEG PG37 can produce 130 milliWatts of output power and 2.5 volts in an open circuit at a temperature differential of 100°C all within a 10.3 mm² footprint. This unit is assembled with thin film semiconductor material, thermally conductive aluminum nitride ceramics and gold plated wire bondable pads. The eTEG Series is designed for low power output applications with tight geometric space constraints. Custom designs are available to accommodate metallization, pretin solder and ceramic patterns, however MOQ applies.

FEATURES

- Micro Footprint
- High Output Power Density
- High Waste Heat Conversion Ratio
- Reliable Solid State Operation
- RoHS Compliant

APPLICATIONS

- Wireless Sensors
- LED Lighting
- Battery Charging

PERFORMANCE SPECIFICATIONS	ΔT		
	10°C	50°C	100°C
Power Output (mW)	1.5	36	130
Voltage Output (V)	0.13	0.6	1.25
Current Output (mA)	12	60	105
Voltage Open Circuit (V)	0.26	1.2	2.5
Current, Short Circuit (mA)	24	115	210

THERMAL PARAMETERS	
Thermal Resistance	13.1 K/W
Thermal Conductance	0.076 W/K

PACKAGE ASSEMBLY CONDITIONS	
Max Time Exposure > 290°C	60 sec
Peak Assembly Temperature	325°C

TEMPERATURE CONDITIONS	
Max Operating Temperature	150°C

Performance maximized with matched electrical load

global solutions: local support

Americas: +1 888.246.9050

Europe: +46.31.420530

Asia: +86.755.2714.1166

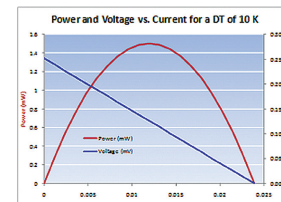
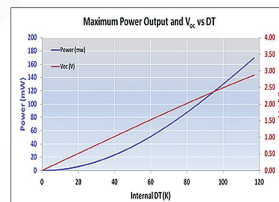
clv.customerpos@lairdtech.com

www.lairdtech.com

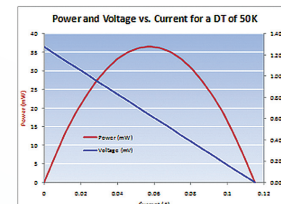
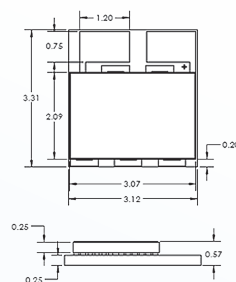


eTEG Series PG37,72,F2,0203,GG Thin Film Energy Harvester

PERFORMANCE CURVES



ISOMETRIC DRAWING



Standard

Au metallization on exterior ceramic substrate surfaces

Au wire bondable pads on hot side ceramic for lead attachment

Optional

Bare solder wires, 2.0 inches in length

DEFINITIONS

P_{max} The maximum amount of power created from the thermoelectric generator's Seebeck effect. This point occurs when the load resistance matches the device resistance resulting in an output voltage of ½ Voc, where Voc is the open circuit voltage.

ΔT Delta T is the temperature difference across the thermoelectric generator.

Anexo B

PCM

Neste anexo, estão apresentadas as folhas de características fornecidas pelo fabricante dos PCM, Rubitherm, considerados neste trabalho.

- B.1 - PCM RT10hc
- B.2 - PCM RT11hc
- B.3 - PCM RT12

B.1 PCM RT10hc

Data sheet



RT10HC



RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

Properties:

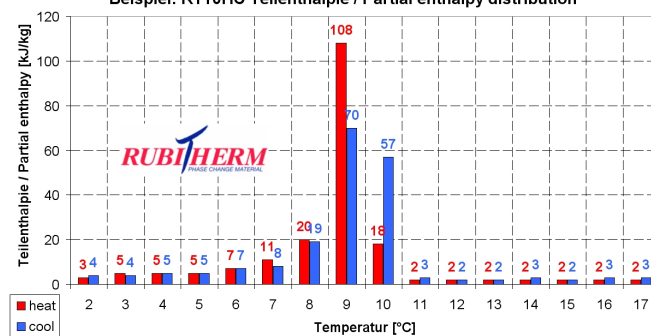
- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -4 °C and 100 °C

The most important data:

Melting area	Typical Values	
	9-10	[°C]
	main peak: 9	
Congealing area	10-9	[°C]
	main peak: 10	
Heat storage capacity ± 7,5%	195	[kJ/kg]*
Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 2 °C to 17°C.	54	[Wh/kg]*
Specific heat capacity	2	[kJ/kg·K]
Density solid	0,88	[kg/l]
at 0 °C		
Density liquid	0,77	[kg/l]
at 20 °C		
Heat conductivity (both phases)	0,2	[W/(m·K)]
Volume expansion	12,5	[%]
Flash point (PCM)	132	[°C]
Max. operation temperature	50	[°C]



Beispiel: RT10HC Teilenthalpie / Partial enthalpy distribution



*Measured with 3-layer-calorimeter.

Rubitherm Technologies GmbH
Sperenberger Str. 5a
D-12277 Berlin
Tel: +49 30 720004-62
Fax: +49 30 720004-99
E-Mail: info@rubitherm.com
Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version: 23.07.2013

B.2 PCM RT11hc

Data sheet



RT11HC



RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

Properties:

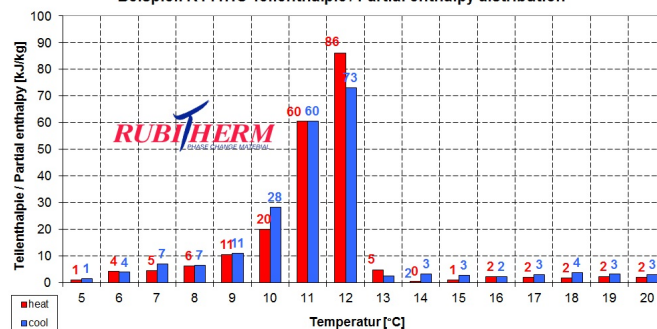
- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -4 °C and 100 °C

The most important data:

Melting area	10-12	[°C]
	main peak: 12	
Congeeing area	12-10	[°C]
	main peak: 12	
Heat storage capacity ± 7,5%	190	[kJ/kg]*
Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 5 °C to 20°C.	52	[Wh/kg]*
Specific heat capacity	2	[kJ/kg·K]
Density solid at 0 °C	0,88	[kg/l]
Density liquid at 20 °C	0,77	[kg/l]
Heat conductivity (both phases)	0,2	[W/(m·K)]
Volume expansion	12,5	[%]
Flash point (PCM)	130	[°C]
Max. operation temperature	50	[°C]



Beispiel: RT11HC Teilenthalpie / Partial enthalpy distribution



Rubitherm Technologies GmbH
Sperenberger Str. 5a
D-12277 Berlin
Tel: +49 30 720004-62
Fax: +49 30 720004-99
E-Mail: info@rubitherm.com
Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version: 13.08.2013

*Measured with 3-layer-calorimeter.

B.3 PCM RT12

Data sheet



RT12



RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature. The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

We look forward to discussing your particular questions, needs and interests with you.

Properties:

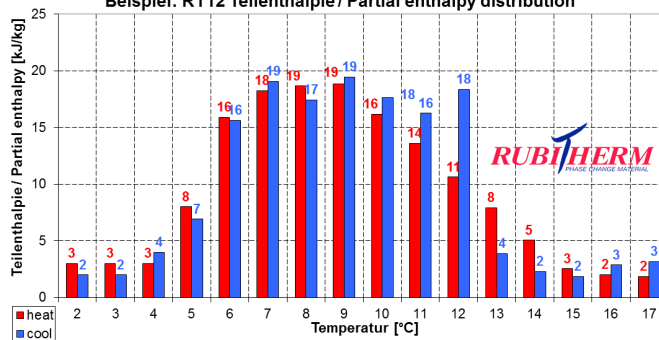
- high thermal energy storage capacity
- heat storage and release take place at relatively constant temperatures
- no supercooling effect, chemically inert
- long life product, with stable performance through the phase change cycles
- melting temperature range between -4 °C and 100 °C

The most important data:

Melting area	Typical Values	
	7-13	[°C]
	main peak: 9	
Congeeing area	13-6	[°C]
	main peak: 12	
Heat storage capacity ± 7,5%	150	[kJ/kg]*
Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 2 °C to 17°C.	42	[Wh/kg]*
Specific heat capacity	2	[kJ/kg·K]
Density solid	0,88	[kg/l]
at -15°C		
Density liquid	0,77	[kg/l]
at 15 °C		
Heat conductivity (both phases)	0,2	[W/(m·K)]
Volume expansion	12,5	[%]
Flash point (PCM)	125	[°C]
Max. operation temperature	55	[°C]



Beispiel: RT12 Teilenthalpie / Partial enthalpy distribution



*Measured with 3-layer-calorimeter.

Rubitherm Technologies GmbH
Sperenberger Str. 5a
D-12277 Berlin
Tel: +49 30 720004-62
Fax: +49 30 720004-99
E-Mail: info@rubitherm.com
Internet: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice. Version:

13.11.2013