



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

SIMULAÇÃO DE UM ARMAZENAMENTO SÓLIDO DE ALTA TEMPERATURA

Daniel Silveira Lopes

Orientação | Professor Doutor Manuel Collares Pereira

Doutor Luís Guerreiro

Mestrado em Engenharia da Energia Solar

Dissertação

Évora, 2018



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

SIMULAÇÃO DE UM ARMAZENAMENTO SÓLIDO DE ALTA TEMPERATURA

Daniel Silveira Lopes

Orientação | Professor Doutor Manuel Collares Pereira

Doutor Luís Guerreiro

Mestrado em Engenharia da Energia Solar

Dissertação

Évora, 2018

Ao simples, ao puro, ao invisível e a todos os que possibilitaram a realização desta dissertação,

Eu vos dedico este trabalho

Agradecimentos

Aos meus pais pelo esforço e dedicação ao longo destes anos de Universidade, em especial pela paciência nestes anos finais de mestrado e, no fundo por tudo o que me proporcionaram.

Ao meu orientador e coorientador pela disponibilidade prestada.

Aos meus amigos, sejam aos que conheci na Universidade que ficarão para sempre, sejam aos de sempre, por todos os momentos de estudo, diversão e emoção e, no fundo por serem uma segunda família sempre.

À Ana Lúcia Garrido, por todo o apoio e insistência, por todos os momentos partilhados até agora e os que estão por vir...

E por fim a toda a forma de vida que de forma direta ou indireta se cruzou comigo nesta jornada e me sensibilizou e despertou de forma a existir a passagem de mais uma barreira.

Resumo

A dissertação apresentada consiste na modelação de um sistema de armazenamento de energia em betão que utiliza sais fundidos como fluido de transferência de calor. Foi utilizado um método das diferenças finitas para a análise dos diferentes componentes do sistema de armazenamento e de transferência de calor, tendo sido este posteriormente aplicado em MATLAB e validado com casos já estudados. Neste software foi também otimizado um módulo com base nos comportamentos analisados bem como capacidades energéticas e custos do betão para posterior aplicação na Évora Molten Salt Platform.

Palavras chave: Betão, Sais fundidos, Diferenças finitas, Sistema de Armazenamento de Calor, Fluido de Transferência de Calor.

Abstract

High temperature solid storage simulation

This dissertation consists in the modulation of a concrete energy storage system that uses molten salts as a heat transfer fluid. A finite difference method was used to analyze the behavior of the different components of the storage system and heat transfer. This was applied in MATLAB and validated with previous studied models. In this software a model was also optimized based on the behaviors previously studied, but also the effective heat capacity and costs of the concrete to further apply in the Évora Molten Salt Platform.

Keywords: Concrete, Molten Salts, Finite elements, Heat Storage System, Heat Transfer Fluid.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract.....	v
Índice	vii
Lista de Abreviaturas.....	ix
Índice de tabelas	xi
Índice de Figuras	xiii
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Concentração solar.....	3
1.3. Armazenamento a alta temperatura	3
1.3.1. Modelação	8
2. Desenvolvimento de configurações de módulos.....	19
3. Metodologia.....	23
3.1. Método malhas por diferenças finitas	23
3.2. Ciclos	31
4. Estudo de Materiais	33
4.1. Propriedades dos Materiais	33
4.2. Validação	34
4.2.1 Especificações	34
4.2.2. Resultados	35
5. Caso de estudo	43
5.1. Simulações sem perdas para o ambiente.....	43
5.2. Simulações com perdas térmicas para o ambiente.....	50
5.3 Estimativa de custos.....	57
6. Conclusão	63
6.1. Investigação futura.....	65
Referências	67
Anexos.....	72

Lista de Abreviaturas

Símbolo	Descrição	Unidades
A	Área	m^2
Bi	Número de Biot	
c_p	Capacidade térmica	$J/kg.K$
dx	Unidade infinitesimal (de comprimento)	m
D	Diâmetro	m
E	Energia	J
f	Coefficiente de viscosidade	
Fo	Número de Fourier	
h	Coefficiente de transferência de calor do fluido de transferência	$W/m^2.K$
h_E	Coefficiente de transferência de calor modificado	$W/m^2.K$
k	Condutividade térmica	$W/m.K$
L	Comprimento	m
m	Massa	kg
\dot{m}	Caudal volúmico	m^3/s
Nu	Número de Nusselt	
P	Perímetro	m
Pr	Número de Prandtl	
Q	Energia calorífica	J
\dot{Q}	Fluxo de calor	W
Q_m	Caudal mássico	kg/s
r	Raio	m
Re	Número de Reynolds	
S	Área (secção de betão)	m^2
t	tempo	s
T	Temperatura	$^{\circ}C, K$
U	Velocidade média	m/s
v	Velocidade	m/s
V	Volume	m^3
ρ	Densidade	kg/m^3
μ	Viscosidade dinâmica	Pa/s
α	Difusividade térmica	m^2/s

Subscritos

f	fluido
i	interno
o	externo
s	Betão (sólido)
is	isolamento
ht	Alta temperatura

Índice de tabelas

Tabela 1 - Principais características de materiais sólidos de armazenamento de calor sensível (adaptado [21,22,24])	6
Tabela 2 - Propriedades dos materiais desenvolvidos no DLR (Estugarda, Alemanha) (adaptado [23])	6
Tabela 3 - Principais características de materiais líquidos de armazenamento de calor sensível (adaptado [22,34])	8
Tabela 4 - Propriedades termofísicas das diferentes misturas de betão (adaptado [49]).	34
Tabela 5 - Resultados dos casos estudo	39
Tabela 6 – Casos de estudo analisados	46
Tabela 7 - Resultados sem perdas considerando um módulo de $4*2,5*18 \text{ m}^3$	47
Tabela 8 - Resultados sem perdas considerando dois módulos de $2,5*2,5*12 \text{ m}^3$ em paralelo	47
Tabela 9 - Resultados com perdas e velocidade base considerando um módulo com $4*2,5*18 \text{ m}^3$	51
Tabela 10 - Resultados com perdas e o dobro da velocidade base considerando dois módulos com $4*2,5*18 \text{ m}^3$	52
Tabela 11 – Resultados de potência com perdas e o dobro da velocidade base considerando um módulo com $4*2,5*18 \text{ m}^3$	54
Tabela 12 - Resultados com perdas e velocidade quatro vezes o valor base considerando um módulo de $4*2,5*18 \text{ m}^3$	55
Tabela 13 - Resultados de potência com perdas e velocidade quatro vezes o valor base considerando um módulo com $4*2,5*18 \text{ m}^3$	55
Tabela 14 - Resultados com perdas considerando dois módulos com $2,5*2,5*12 \text{ m}^3$ em série.....	56
Tabela 15 - Resultados de potência com perdas e velocidade quatro vezes o valor base considerando dois módulos com $2,5*2,5*12 \text{ m}^3$ em série	56
Tabela 16 - Diferentes misturas de betão estudadas por Emerson et al [52]	58
Tabela 17 - Custos das diferentes configurações de módulos de betão Tipo 41	58

Tabela 18 - Relação entre custos por unidade de energia de diferentes configurações com dois módulos com várias quantidades de tubos e caudais variáveis para uma configuração com dois módulos em série. 59

Tabela 19 - Distância entre tubos e queda do valor de custo por unidade de energia para diferentes configurações 60

Índice de Figuras

Figura 1 – Classificação de sistemas de armazenamento de energia (adaptado [12]).....	4
Figura 2 – Integração de módulos de armazenamento no loop de test de concentradores parabólicos na Plataforma Solar de Almería (adaptado [39])	9
Figura 3 - Modelo físico para a unidade de armazenamento e parâmetros descritivos da geometria (adaptado [39])	10
Figura 4 - Redes de reforço ortogonais (para melhorar a transferência de calor no sistema de armazenamento) analisado com método de elementos finitos (adaptado [40])	10
Figura 5 - Regenerador colmeia e dimensões dos materiais e trajetos de escoamento (adaptado [41])	11
Figura 6 - Módulo de armazenamento de calor sensível (adaptado [42])	11
Figura 7 - Secção do módulo de armazenamento sólido [43]	13
Figura 8 – Módulo de armazenamento de calor cilíndrico [43]	13
Figura 9 - Variação da temperatura para os primeiros quatro ciclos de carga/descarga com variação de velocidade (adaptado [43]).....	14
Figura 10 - Influência do rácio dos diâmetros na energia armazenada e temperatura do fluido à saída do módulo (adaptado [42]).....	15
Figura 11 - Influência do comprimento dos módulos de armazenamento no custo (adaptado [42])	15
Figura 12 - Testes em betão: testes para ciclos térmicos (esquerda) e testes de rigidez (direita) [44].....	16
Figura 13 - Módulo de teste (sem isolamento) [44]	16
Figura 14 - esquema com os sensores de temperatura (linhas) e de vapor (quadrados) [44]	17
Figura 15 - Programa de ciclos acelerados do módulo de teste (adaptado [44]).....	17
Figura 16 - Esquemática da plataforma solar <i>The Masdar Institute solar platform</i> [45]	18
Figura 17 - Sistema de armazenamento da plataforma solar <i>The Masdar Institute solar platform</i> [45].....	18
Figura 18 - Perspetiva isométrica da configuração com um módulo de betão.....	19
Figura 19 - Perspetiva isométrica da configuração com dois módulos de betão.....	19

Figura 20 - Medidas utilizadas para os tubos a inserir nos módulos em Autodesk Inventor.....	20
Figura 21 – Medidas utilizadas na configuração com um módulo de betão	20
Figura 22 - Corte do módulo cilíndrico de armazenamento.....	21
Figura 23 - Corte vertical do módulo de armazenamento cilíndrico (não está à escala)22	
Figura 24 - Função $f(x, y)$ tabelada	23
Figura 25 - Malha no plano Oxy	23
Figura 26 - Esquema de nós simplificado	27
Figura 27 - Esquema de pontos na utilização do segundo método dos nós	28
Figura 28 - Esquema de múltiplos nós no betão com condução unidimensional.....	29
Figura 29 - Desenvolvimento da temperatura do fluido no módulo tipo DLR de betão com uma mistura de alta temperatura para vários ciclos de carga/descarga de 6 horas cada durante 72 horas	36
Figura 30 - Desenvolvimento da temperatura do betão no módulo tipo DLR de betão com uma mistura de alta temperatura em vários ciclos de carga/descarga de 6 horas cada durante 72 horas	36
Figura 31 - temperatura média do fluido no processo de carga	37
Figura 32 - Desenvolvimento das temperaturas médias do fluido e betão no módulo tipo DLR de betão com uma mistura de alta temperatura em vários ciclos de carga/descarga de 6 horas cada durante 72 horas	37
Figura 33 - Balanço energético no betão e no fluido no módulo tipo DLR de betão com uma mistura de alta temperatura em vários ciclos de carga/descarga de 6 horas cada durante 72 horas	38
Figura 34 - Desenvolvimento da temperatura do fluido no módulo tipo DLR de betão com uma mistura de alta temperatura em vários ciclos de carga/descarga com 6 horas cada durante 72 horas	40
Figura 35 - União de pontos da Figura 33.....	40
Figura 36 - Desenvolvimento da temperatura do fluido no módulo estudado pelo DLR em vários ciclos de carga/descarga de 6 horas cada durante 72 horas (adaptado da Figura 15)	41
Figura 37 - União de pontos da Figura 35.....	41
Figura 38 - Corte transversal do módulo incluindo isolamento térmico	45

Figura 39 - Desenvolvimento das temperaturas médias do fluido e do betão com uma mistura de alta temperatura para 72 horas de funcionamento sem perdas térmicas nem propriedades variáveis com 500 tubos e com caudal base	48
Figura 40 - Desenvolvimento das temperaturas médias do fluido e do betão com uma mistura de alta temperatura para 72 horas de funcionamento sem perdas térmicas nem propriedades variáveis com 500 tubos com o dobro do caudal base.....	49
Figura 41 - Variação energética para 72 horas de funcionamento sem perdas térmicas nem propriedades variáveis com 600 tubos para o betão que apresenta uma mistura com fibras	49
Figura 42 - Variação energética para 72 horas de funcionamento sem perdas térmicas nem propriedades variáveis com 600 tubos para o betão que apresenta uma mistura com grafite.....	50
Figura 43 - Desenvolvimento das temperaturas médias do fluido e do betão Tipo 41 para 72 horas de funcionamento com perdas térmicas, sem propriedades variáveis com 400 tubos com o dobro da velocidade base	53
Figura 44 - Variação energética para 72 horas de funcionamento com perdas térmicas, sem propriedades variáveis com 400 tubos e com o dobro da velocidade base para o betão Tipo 41	54
Figura 45 - Desenvolvimento das temperaturas médias do fluido e do betão Tipo 41 para 72 horas de funcionamento com perdas térmicas, sem propriedades variáveis com 333 tubos com 4 vezes o valor da velocidade base. ($2*(2,5*2,5*12)$)	57
Figura 46 - Variação do custo por energia com a variação do número de tubos colocados no módulo	60
Figura 47 - Módulo final com isolamento	64
Figura 48 - Detalhe da ligação dos dois módulos na configuração final.....	64
Figura 49 - Esboço do arranjo dos tubos com chapa metálica e aplicação no módulo .	65

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Dentro da área da Energia solar encontramos várias formas de esta ser explorada, com recurso a várias tecnologias. Uma delas é a captação desta energia através da concentração dos raios solares. Esta é uma tecnologia que já desde há muito tem sido investigada e aplicada devido à simplicidade de recorrer à ótica para concentrar os raios solares. Em 1866, Auguste Mouchout usou a película de uma parabólica para produzir vapor para o primeiro motor solar a vapor. O Professor Giovanni Francia (1911 – 1980) desenhou e construiu a primeira central de energia solar concentrada que iniciou trabalhos em Sant Ilario, perto de Génova, Itália em 1968. Desde então estudos têm sido feitos de modo a melhorar as técnicas de captação solar e consequente aproveitamento.

Esta central em Génova apresenta uma estrutura muito semelhante à usada nos dias de hoje com um recetor central no centro de um campo de concentradores solares. Alguns anos mais tarde (1984) o mundo assistiria à construção da central SEGS I (Solar Energy Generating System) na Califórnia com 14 MW de potência instalada. Esta foi a primeira de 9 centrais termoelétricas com uma potência total instalada de 354 MWe sendo o conjunto de centrais SEGS os maiores produtores de energia solar térmica até 2014, ano em que entrou em funcionamento a central de Ivanpah também na Califórnia, esta com 392 MW de potência instalada [1]. Estas centrais utilizam duas formas de captação da energia solar distintas, sendo que a central SEGS utiliza um sistema de concentradores parabólicos e a central de Ivanpah utiliza helióstatos com torre de captação.

Neste trabalho será abordada a parte de concentração solar associada à produção de energia termoelétrica a alta temperatura, podendo ser descrito sequencialmente pela captação de energia solar por meio de concentradores, armazenamento de energia sob a forma de calor num módulo de betão com especificações próprias e produção de energia elétrica por meio de uma turbina através de vapor obtido pelos processos antecedentes.

Este é um processo inovador que envolve altas temperaturas e um fluido de transferência muito específico, sendo este uma mistura de sais, que pela sua composição suporta temperaturas até 600°C, tentando alcançar o melhor rendimento deste sistema em relação a outros já implementados com diferentes formas de armazenamento, temperaturas de

operação e fluidos de transferência. Existem também outros fluidos de transferência de calor como óleo térmico, água, ar, etc.

Podemos então dividir este estudo em áreas específicas: Captação de energia solar através de concentradores, transporte do fluido, armazenamento de energia sob a forma de calor e conversão de energia térmica em elétrica com recurso a uma turbina de vapor a alta temperatura.

Este trabalho baseia-se no transporte do fluido e armazenamento de energia no módulo de betão. Esta é uma área bastante importante pois a área de estudo é a intermédia que faz a ligação entre as duas outras áreas de captação e produção de energia. É nesta fase em que o armazenamento do excedente energético é efetuado, permitindo o seu uso posterior. Esta é uma área ainda aberta em termos de estudos, sendo que existem várias abordagens com diferentes métodos de armazenamento, sendo o campo de investigação vasto e atrativo.

A área do aproveitamento da energia solar tem sido alvo de intensos estudos nos últimos anos, tendo um desenvolvimento exponencial com inúmeras abordagens possíveis. É uma parte essencial que também será abordada neste trabalho, referenciando as mais recentes tecnologias e aquelas que melhor se aplicam ao caso em estudo.

A parte final do ciclo de produção de energia termoelétrica consiste na conversão de energia térmica para elétrica com recurso a um ciclo termodinâmico com turbina de vapor e gerador elétrico (ciclo de Rankine). Existem diversos métodos para a realização desta conversão que têm vindo a ser melhoradas ao longo dos tempos, tendo-se nos últimos anos conseguido atingir eficiências superiores a 40%. A sua aplicação estende-se muito além da área das energias renováveis, sendo que a turbina necessita de vapor a altas temperaturas para conseguir ser implementada, tendo esta tecnologia sido utilizada durante muitos anos apenas com recurso a calor proveniente do processamento de energias fósseis, como por exemplo em centrais térmicas de carvão. Esta será também uma área brevemente abordada, sendo que um estudo detalhado não será abordado, devido à reduzida investigação corrente e a um desenquadramento do tema mais específico das energias renováveis, sendo igualmente uma parte essencial do trabalho.

1.2. Concentração solar

Sistemas energéticos com captação de radiação solar são opções atrativas na redução do consumo de energias fósseis e consequentes emissões de dióxido de carbono, sendo a concentração solar uma das mais atrativas nos últimos anos. Dados de março de 2015 mostram que a capacidade total instalada ao nível do CSP superou os 4,5 GW de potência e que, até ao final de 2015 seriam esperados 10 GW de potência total instalada. Indiscutivelmente o líder de mercado nesta área é a Espanha com uma potência total instalada superior a 2 GW, com mais de 40 centrais em funcionamento [1,2].

Existem diferentes escolhas para a captação de energia solar (concentradores parabólicos, Fresnel linear, helióstatos com torre de captação e discos solares), conversão de energia (ciclo de Rankine através de vapor e orgânico, motores de Stirling, etc.), fluidos de transferência de calor (óleo térmico, sais fundidos, vapor, etc.) e formas de armazenamento (óleo térmico, sais fundidos, cimento, etc.)

Apesar do crescimento dos investimentos nos últimos anos, o campo da concentração solar enfrenta grandes desafios [3]. Os principais são a redução do preço de outras formas de energia renovável como a solar fotovoltaica e eólica principalmente, o que leva a um maior interesse nestas áreas [4-5]. A outra é a revolução do gás que levou a um desenvolvimento das trocas internacionais de gás e a subsequente redução do seu custo, estabelecendo-se assim um mercado global, entrando de uma maneira mais forte no mercado energético. Ao mesmo tempo a redução de custo na produção energética através de concentração solar ainda não foi bem conseguida, sendo que apenas as tecnologias de Fresnel linear e helióstatos com torre de captação conseguem acompanhar esta redução de custos [6-9].

1.3. Armazenamento a alta temperatura

A incorporação de armazenamento a alta temperatura em sistemas de concentração solar tem bastantes benefícios, permitindo uma enorme flexibilidade no planeamento do uso da energia captada, bem como na eficiência dos processos. A energia excedente que é captada em alturas de baixo consumo é usada para carregar o sistema de armazenamento, podendo depois em alturas de alto consumo ser utilizada [10].

Sabemos então que o armazenamento de energia é essencial e como esta parte representa uma boa fatia do custo final dos sistemas de concentração (cerca de 20%), é necessária uma redução de custos para existirem benefícios no preço final da energia [11].

Existem várias formas de armazenamento, através calor sensível, latente ou termoquímico. Este último utiliza reações químicas endotérmicas reversíveis. Já o armazenamento por calor latente baseia-se na mudança de estado do material, sendo a energia térmica armazenada quando esta ocorre.

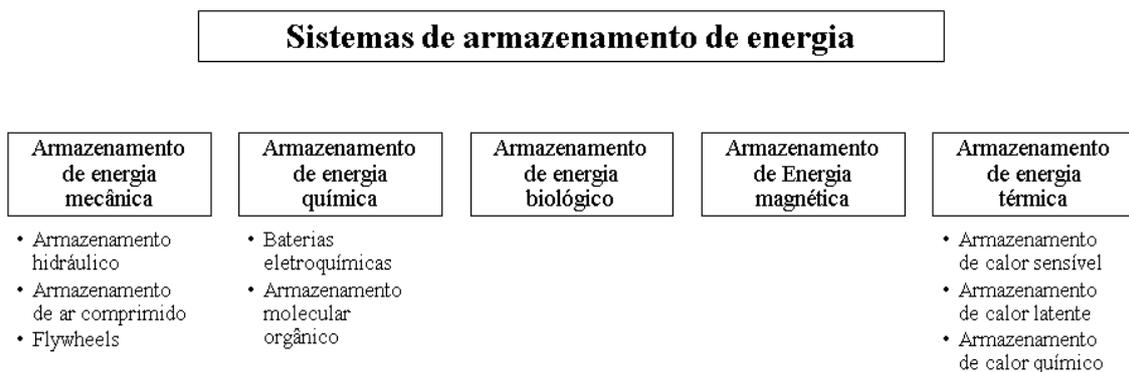


Figura 1 – Classificação de sistemas de armazenamento de energia (adaptado [12])

Nos dias de hoje, em centrais solares térmicas comerciais, a opção de armazenamento que permite maior tempo de operação é o sistema de dois tanques com sais fundidos [13,14], sendo que esta tem a desvantagem de ter grande temperatura de solidificação e um custo de investimento bastante elevado, que pode atingir os 40 USD por kWh_{th} (2010) [15]. A tecnologia de dois tanques para armazenamento foi utilizada na SEGS I, sendo que esta central utiliza óleo térmico como fluido de transferência e consequente armazenamento, uma vez que a sua instalação data de 1984, altura em que o armazenamento sob a forma de sais fundidos ainda estava longe de ser uma realidade. No entanto o sistema de armazenamento foi danificado em 1999 devido a um incêndio num dos tanques. Juntamente com as outras centrais SEGS foram os maiores produtores de energia termoelétrica até 2014 [16].

Suportando a ideia de redução de custos das centrais solares termoelétricas, foi concluído num estudo conduzido *pelo Electric Power Research Institute (EPRI)*, de modo a existir

uma maior adoção de tecnologia solar térmica no mundo, deve existir uma redução no custo dos sistemas de armazenamento [17].

Existem vários materiais para efetuar este armazenamento, podendo ser efetuado em meio líquido (sais fundidos, óleo mineral...) ou em meio sólido (cerâmica, cama de areia, rocha, resíduos; betão, ...) [18], sendo que o betão é um candidato promissor devido ao seu baixo custo e à sua facilidade de obtenção. Tem também uma boa capacidade calorífica, boas propriedades mecânicas e um coeficiente de expansão térmica adequado [19], sendo de fácil aplicação e propício para o caso estudado.

Esta forma de armazenamento sólida através de betão enquadra-se no armazenamento de calor sensível, no qual os materiais não mudam de fase dentro do intervalo operacional de temperaturas no processo. A quantidade de energia térmica armazenada é dada pela equação 1:

$$Q = \rho * c_p * V * \Delta T \quad (1)$$

Onde Q é a quantidade de calor armazenado (J), ρ é a densidade do material de armazenamento (kg/m^3), c_p é o valor médio do calor específico na temperatura de operação do sistema ($J/kg.K$), V é o volume do material de armazenamento (m^3) e ΔT é o intervalo de temperatura de operação (K).

A capacidade para armazenar energia térmica sensível para um determinado material depende maioritariamente no valor de quantidade $\rho * c_p$, a capacidade térmica volúmica. Para um material ser viável numa aplicação de armazenamento de energia térmica, não pode ser muito caro e deve possuir uma capacidade térmica elevada. Outro parâmetro importante no armazenamento térmico sensível é a velocidade a que o calor pode ser libertado ou extraído (condutividade térmica).

No caso de materiais sólidos, betão e cerâmicas são usualmente os mais estudados para este tipo de armazenamento, pois possuem boa condutividade térmica e preços bastante acessíveis [20]. Na Tabela 1 [21,22,24] encontram-se as principais características dos materiais sólidos de armazenamento de calor encontrados na literatura comum. A comparação das características do betão com uma mistura de alta temperatura e cerâmica são apresentadas na Tabela 2 [23].

Tabela 1 - Principais características de materiais sólidos de armazenamento de calor sensível (adaptado [21,22,24])

Meio de armazenamento	ρ (kg/m ³)	k (W/m.K)	c_p médio (kJ/kg.K)	c_p volúmico (kWh _t /m ³)	Custo (€/kg)	Custo (€/kWh _t)
Óleo mineral	1700	1,0	1,30	60	0,13	3,59
Betão reforçado	2200	1,5	0,85	100	0,043	0,85
NaCl (sólido)	2160	7,0	0,85	150	0,13	1,28
Ferro fundido	7200	37,0	0,56	160	0,86	27,4
Aço fundido	7800	40,0	0,60	450	4,28	51,33
Tijolos de sílica	1820	1,5	1,00	150	0,86	5,99
Tijolos de magnésia	3000	5,0	1,15	600	1,71	6,13

Tabela 2- Propriedades dos materiais desenvolvidos no DLR (Estugarda, Alemanha) (adaptado [23])

Material	Cerâmica fundível	Betão com mistura de alta temperatura
ρ (kg/m ³)	3500	2750
c_p a 350°C (J/kg.K)	866	916
k a 350°C (W/m.K)	1,35	1,0
α a 350°C [10 ⁻⁶ /K]	11.8	9,3

Vários estudos têm sido realizados para testar betão como tecnologia para armazenamento de calor. O centro aeroespacial alemão Deutsche Luftfahrt raum (DLR) Zentrum mostrou que o betão é uma boa solução para aplicações de armazenamento térmico devido ao seu baixo custo, sendo que é necessário ter em conta outros fatores como o custo de tubagens, facilidade de manuseamento e estabilidade estrutural. Foram também construídas duas unidades de armazenamento na plataforma solar de Almeria (PSA) em Espanha pelo DLR, a primeira composta por betão a alta temperatura e a segunda por materiais cerâmicos com capacidades de armazenamento de 280 kWh_{th} e 350 kWh_{th} respectivamente [25]. Implementaram também juntamente com Ed. Zublin AG em Estugarda, na Alemanha, um segundo módulo de testes com uma capacidade de armazenamento de 474 kWh_{th}[26,27]. Este continha na sua mistura fibras de polietileno e operava entre 300°C e 400°C e realizou mais de 370 ciclos térmicos (entre maio de 2008 e dezembro de 2010).

Contudo a utilização de betão como forma de armazenamento apresenta ainda alguns desafios como a necessidade de uma grande durabilidade do material devido ao elevado número de ciclos realizados, a redução do custo de um eventual permutador de calor e problemas parciais de carga/descarga. Esforços têm sido feitos de modo a existir um melhoramento do material para evitar a fendilhação provocada pelo desgaste causado no

betão pelo elevado número de ciclos realizados a altas temperaturas e um aumento da condutividade térmica para uma transferência de calor melhorada [28].

Foram também testados vários fluidos para a realização da transferência de calor, como água, ar, óleo e sódio, antes dos sais fundidos serem considerados a melhor opção. Os sais fundidos são, entre outros, usados em centrais de torre pois são líquidos à pressão atmosférica, fornecem um meio custo-eficiente para armazenar energia térmica, a sua temperatura de operação é compatível com as turbinas a vapor de alta pressão, são não-inflamáveis e não tóxicos. Adicionalmente estes sais são utilizados na indústria química e metalúrgica como fluido de transporte de calor, existindo já uma experiência no uso destes fora do campo de aplicações solares [29,30].

Nesta área são mais utilizados o *Solar Salt* e um sal com o nome comercial de *HitecXL*. O *Solar salt* é um sal binário composto por 60% de NaNO_3 e 40% KNO_3 . O sal funde a 221°C e é mantido sob o estado líquido a 288°C num tanque de armazenamento frio isolado. O sal *HitecXL* é um sal ternário que é composto por 48% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, 7% NaNO_3 e 45% KNO_3 [31], cujo comportamento foi analisado na plataforma solar de Almeria e na central Themis. O sal foi desenvolvido como uma melhoria a partir do seu precedente *Hitec* (uma mistura de 40% NaNO_2 , 7% NaNO_3 , e 53% KNO_3 , com um ponto de fusão de 142°C [21,31]).

O laboratório Italiano *ENEA* provou a viabilidade de usar sais fundidos em centrais de concentradores parabólicos com misturas de sais que solidificam a 220°C [20]. O *Sandia National Laboratory* tem estado a desenvolver novas misturas de sais com temperaturas de solidificação abaixo de 100°C [20].

Experiências conduzidas por Kearny et al. [32,33], em que avaliaram a possível utilização de sais fundidos como fluido de transferência de calor, concluíram que existem desvantagens relevantes em relação às outras tecnologias, como por exemplo temperaturas de solidificação elevadas e o facto de existir uma temperatura à saída do módulo de armazenamento muito mais elevada que a temperatura do módulo, o que resulta a perdas mais significativas de calor, requerendo materiais de isolamento e tubulação mais caros.

A Tabela 3 [22,34] apresenta as características dos diferentes materiais utilizados no armazenamento de calor sensível.

Tabela 3 - Principais características de materiais líquidos de armazenamento de calor sensível (adaptado [22,34])

Meio de armazenamento	ρ (kg/m ³)	k (W/m.K)	c_p médio (kJ/kg.K)	c_p volúmico (kWh _t /m ³)	Custo(€/kg) [22]	Custo(€/kWh _t) [22]
HITEC Solar Salt [20]	770	-	-	-	-	-
Óleo mineral	900	0.12	2.6	55	0.24	3.38
Óleo sintético	900	0.11	2.3	57	2.41	34.64
Óleo de silicone	1825	0.10	2.1	52	4.03	64.44
Sais de nitrato	1870	0.57	1.5	152	0.81	9.67
Sais de nitrato	2100	0.52	1.6	250	0.40	2.98
Sais de carbonato	850	2.0	1.8	430	1.93	8.86
Sódio líquido	530	71.0	1.3	80	1.61	16.92

As principais características desejadas dos sais fundidos, para serem usados em armazenamento são grande densidade, baixa pressão de vapor, um valor de calor específico moderado e baixa reatividade química, sendo que apenas um número limitado de sais cumpre estes requisitos. Uma das grandes desvantagens destes é o custo elevado [35,36].

Uma das alternativas às tecnologias de armazenamento já referidas é o armazenamento líquido por estratificação num só depósito que se designa por *thermocline*. O nome deriva de um gradiente térmico que se encontra entre o fluido a alta temperatura e o fluido a baixa temperatura que estão em contacto no tanque. Esta tecnologia apresenta um custo mais reduzido devido à utilização de apenas um tanque, o que requer menos material. O custo pode chegar a ser 33% inferior ao sistema de dois tanques. É ainda possível no armazenamento líquido de energia que é realizado através de tanques, existindo a incorporação de materiais sólidos (rochas, escórias, etc) nos depósitos, que absorvem a energia térmica do fluido, o que contribui para a redução do custo deste tipo de tecnologia, pois a maior parte do tanque (50%-75%) é ocupado com este material significativamente mais barato [37]. O laboratório *Sandia* testou um protótipo inovador de armazenamento *thermocline* com sais fundidos e um depósito de rocha e areia de quartzito [38], sendo que até agora os principais projetos utilizam óleo térmico. Contudo existem algumas desvantagens, principalmente a degradação do efeito de *thermocline* após vários ciclos de carga descarga, originando um maior desgaste nos componentes que o sistema de dois tanques.

1.3.1. Modelação

Laing et al. [23] apresentaram uma ferramenta numérica para simulação da performance transiente de sistemas de armazenamento. O meio da simulação é “StorageTech-

Thermo”, onde o armazenamento é descrito por modelos físicos, permitindo também a simulação dinâmica do sistema (Figura 2). Comparando com dados experimentais estes apresentam resultados bastante satisfatórios para durante o processo de carga e alguns desvios no processo de descarga para temperaturas mais baixas.

Tamme et al. [39] implementaram uma ferramenta de simulação para análise da performance transiente em sistemas de armazenamento de calor transiente em meio sólido. Nos resultados é apresentada a influência de vários parâmetros que descrevem o sistema de armazenamento. É referido que enquanto os efeitos das propriedades dos materiais de armazenamento são limitados, a geometria seleccionada do sistema de armazenamento é muito importante e mais facilmente manuseável, podendo existir inúmeras soluções com diversas geometrias a serem testadas. Neste trabalho é explicado o modelo usado por Laing et al. [23].

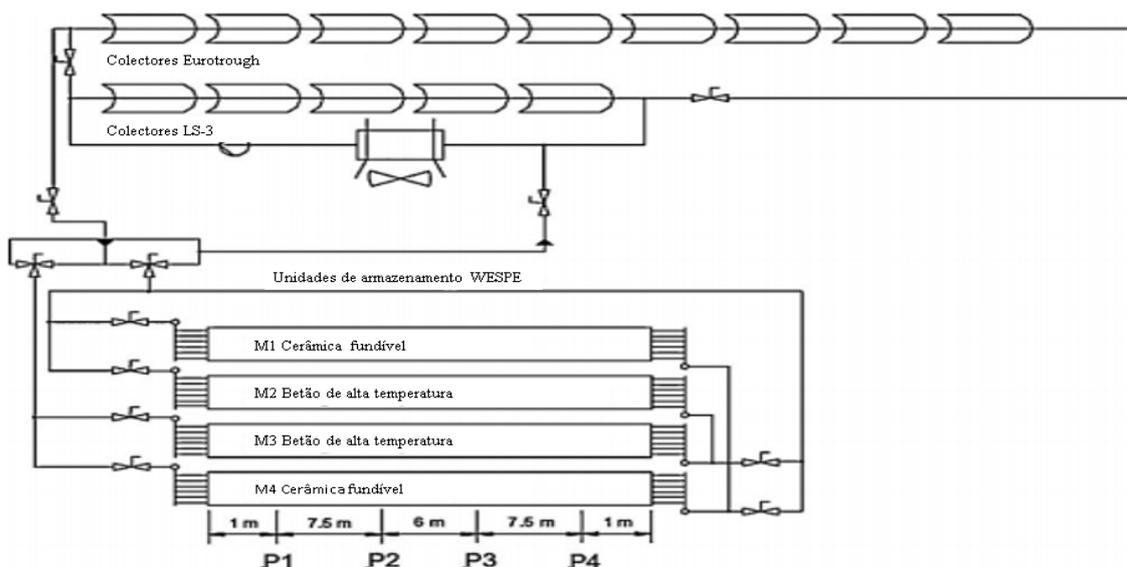


Figura 2 – Integração de módulos de armazenamento no loop de teste de concentradores parabólicos na Plataforma Solar de Almería (adaptado [39])

O tubo e o material de armazenamento estão discretizados na direção axial e o material de armazenamento está discretizado na direção radial (Figura 3) [39]. Estes apresentam uma análise sensitiva utilizando um elemento de armazenamento diferencial.

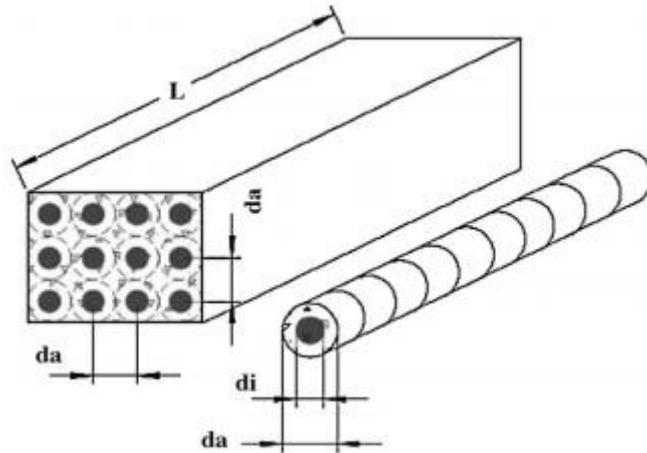


Figura 3 - Modelo físico para a unidade de armazenamento e parâmetros descritivos da geometria (adaptado [39])

Laing et al. [40] apresentaram uma análise através de um método de elementos finitos para um segmento de tubo de armazenamento com betão (sem plano radial fixo e com plano axial fixo) com o mesmo espaçamento entre tubos (Figura 4) [40]. Análises com método de elementos finitos foram feitas no topo da configuração básica para planos axiais, redes reforçadas ortogonais e para planos radiais, todos com o mesmo espaçamento entre tubos.

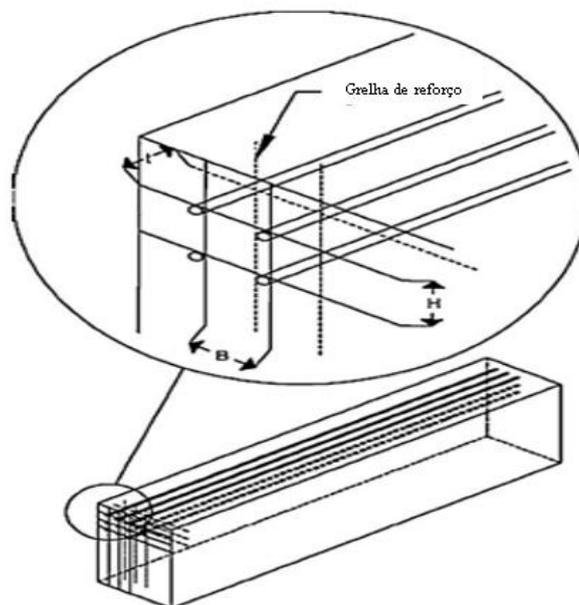


Figura 4 - Redes de reforço ortogonais (para melhorar a transferência de calor no sistema de armazenamento) analisado com método de elementos finitos (adaptado [40])

Rafidi e Blasiak [41] desenvolveram um modelo de simulação bidimensional para determinar numericamente a distribuição de temperaturas do material de armazenamento

e de gases fluentes bem como parâmetros térmicos e de escoamento num regenerador em forma de colmeia de materiais compostos (Figura 5) [41]. Os autores apresentaram dados experimentais para validar o modelo.

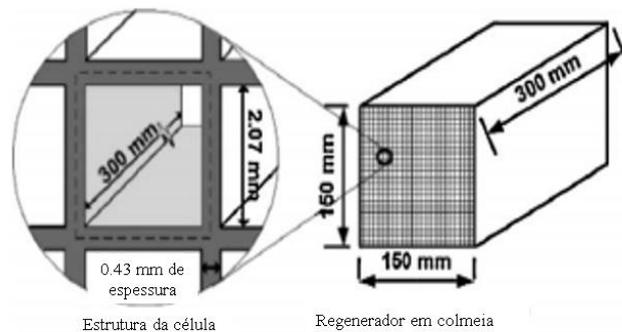


Figura 5 - Regenerador colmeia e dimensões dos materiais e trajetos de escoamento (adaptado [41])

Jian et al. [42] utilizaram um método simples para o estudo das transferências de calor num módulo de betão com óleo térmico como fluido de transferência de calor (Figura 6).

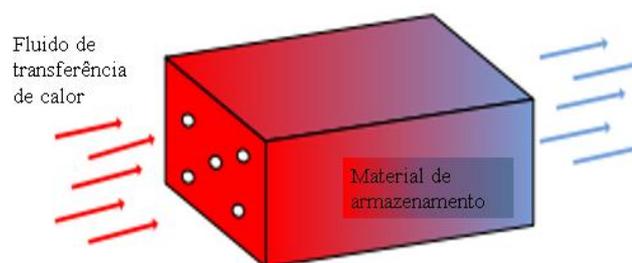


Figura 6 - Módulo de armazenamento de calor sensível (adaptado [42])

Foi usado um arranjo triangular dos tubos incorporados no módulo de modo a obter uma melhor distribuição de temperaturas (Figura 7). A análise do módulo é feita dividindo este em pequenas unidades de armazenamento hexagonais, que foram simplificadas para cilindros com a mesma área com uma equação de relação:

$$d_0^2 = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot D^2 / \pi \quad (2)$$

Este modelo é baseado nas seguintes suposições:

1. O escoamento do fluido de transferência de calor é uniformemente distribuído em cada tubo do módulo, podendo o comportamento deste ser estudado a partir da análise de um cilindro de armazenamento.
2. Na direção axial é a convecção que domina o escoamento do fluido, podendo ser desprezada a condução.
3. O gradiente de temperatura na direção axial no material sólido é muito baixo, comparado com o gradiente na direção radial, podendo também ser desprezado.
4. O método das diferenças finitas é aplicável à condução térmica na direção radial; então, $\frac{dT_s}{dr} = 0$. O modelo 2-D transiente para a unidade de armazenamento pode ser simplificado para um modelo 1-D.
5. Como o tubo é bastante fino e a condutividade térmica é bastante grande, a resistência térmica do tubo pode ser desprezada.
6. Não há perdas térmicas da unidade de armazenamento para o ambiente durante a carga e descarga.

Assumindo que o caudal, \dot{m} , nos tubos é constante e que a transferência de calor por convecção ocorre na parte interior do tubo, os balanços de energia térmica para o fluido e para o sólido no volume de controlo diferencial, dz , mostrado na Figura 8 são:

$$\frac{dT_f}{dt} + v \cdot \frac{dT_f}{dz} = \frac{h \cdot P}{\rho_f \cdot S_f \cdot c_{p,f}} \cdot (T_s - T_f) \quad (3)$$

$$\frac{dT_s}{dt} = - \frac{h \cdot P}{\rho_s \cdot S_s \cdot c_{p,s}} \cdot (T_s - T_f) \quad (4)$$

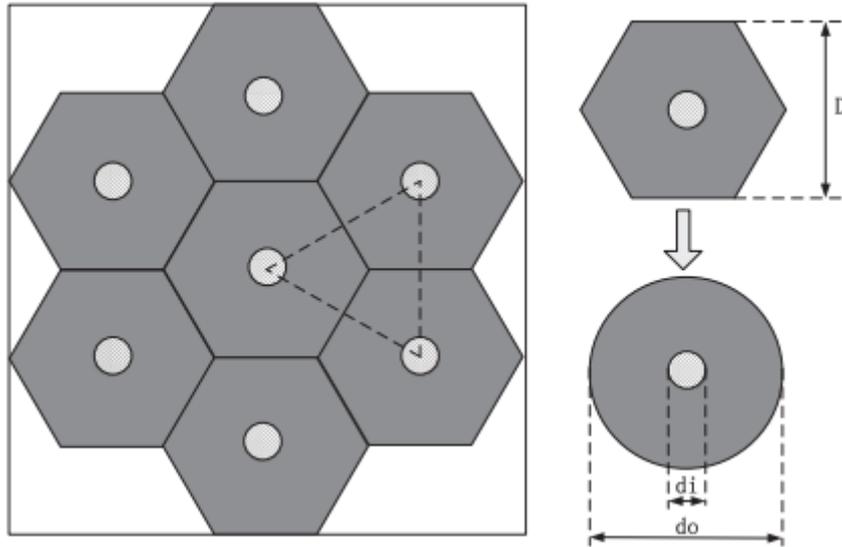


Figura 7 - Secção do módulo de armazenamento sólido [43]

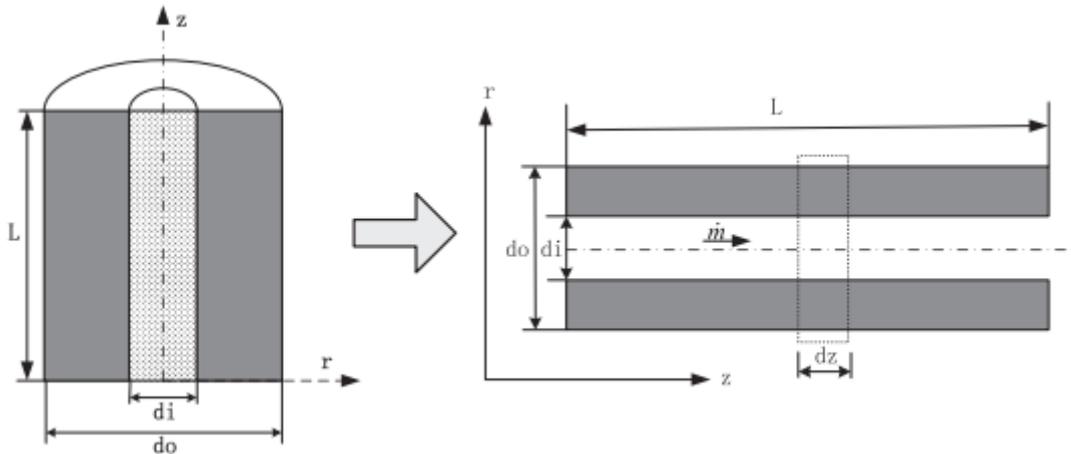


Figura 8 – Módulo de armazenamento de calor cilíndrico [43]

Onde U é a velocidade média na unidade de armazenamento cilíndrica ($v = \frac{\dot{m}}{\rho_f \cdot S_f}$), h é o coeficiente de transferência de calor no tubo, P é o perímetro da superfície de transferência de calor ($P = \pi \cdot d_i$), e S_f é a área da secção transversal ($S_f = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4}$), S_s é a área da parte cortada de material sólido na unidade de armazenamento ($S_s = (d_o^2 - d_i^2) \cdot \frac{\pi}{4}$), c_f e c_s são os calores específicos do fluido e do material sólido [42].

O coeficiente de transferência de calor efetivo para uma unidade de armazenamento cilíndrico é [43]:

$$\frac{1}{h_E} = \frac{1}{h} + \frac{1}{k_s} \cdot \frac{4 \cdot a \cdot b^4 \cdot \ln \frac{b}{a} - 3 \cdot a \cdot b^4 + 4 \cdot a^3 \cdot b^2 - a^5}{4 \cdot (b^2 - a^2)^2} \quad (5)$$

Onde $a (= \frac{d_i}{2})$ e $b (= \frac{d_o}{2})$ são os raios interiores e exteriores da unidade de armazenamento cilíndrica.

Para um fluido de transferência de calor que é óleo térmico *therminol VP-1*, Jian et al. [43] obtiveram os seguintes resultados utilizando este modelo com variação da velocidade do fluido apresentados na Figura 9.

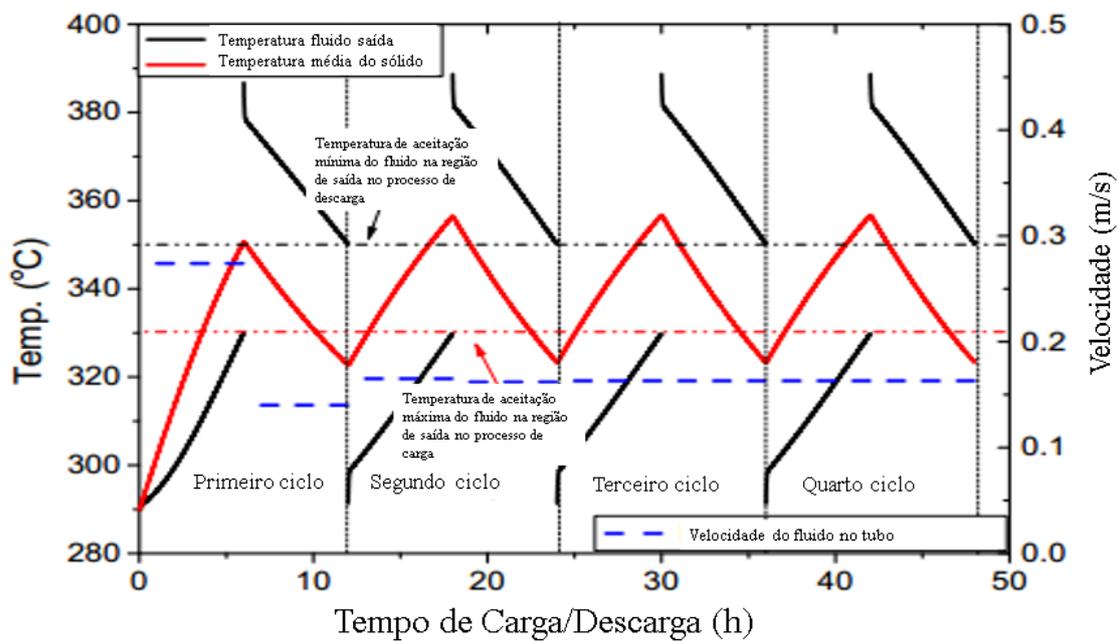


Figura 9 - Variação da temperatura para os primeiros quatro ciclos de carga/descarga com variação de velocidade (adaptado [43])

Noutro trabalho semelhante, Jian et al. [42] aprofundaram a investigação anterior realizada, ao comparar diferentes parâmetros do sistema de armazenamento com resultados da temperatura do módulo, custos do sistema, entre outros, que podem ser observados nas Figuras 10 e 11.

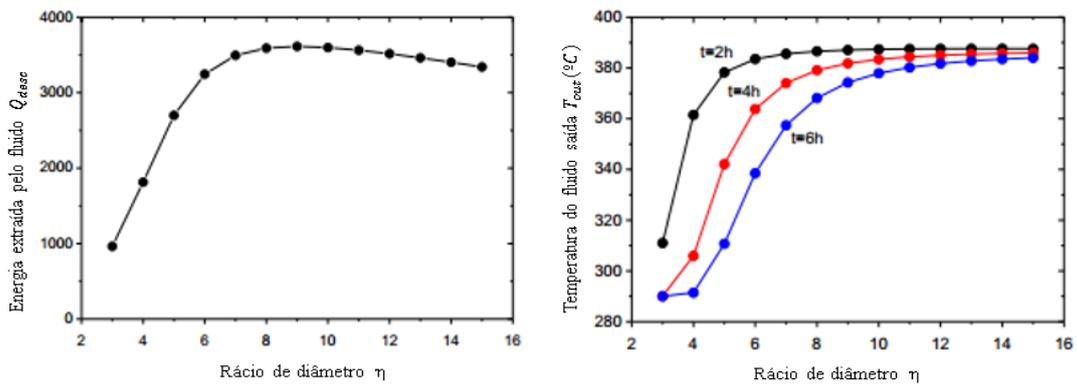


Figura 10 - Influência do rácio dos diâmetros na energia armazenada e temperatura do fluido à saída do módulo (adaptado [42])

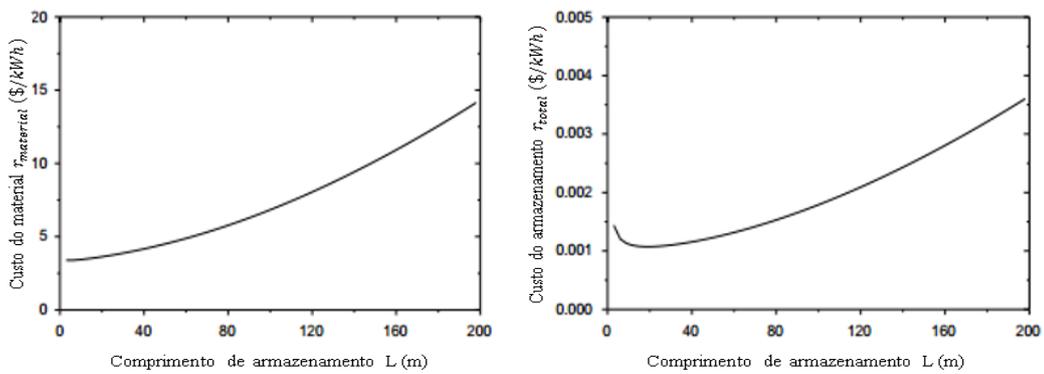


Figura 11 - Influência do comprimento dos módulos de armazenamento no custo (adaptado [42])

Também no laboratório do DLR são realizados vários testes neste tipo de tecnologia, quer a nível de materiais, quer a nível de desempenho. A Figura 12 mostra o exemplo de testes de resistência térmicos e mecânicos a amostras de betão, estando demonstrado o módulo de teste finalizado sem isolamento na Figura 13 [44].



Figura 12 - Testes em betão: testes para ciclos térmicos (esquerda) e testes de rigidez (direita) [44]



Figura 13 - Módulo de teste (sem isolamento) [44]

Neste caso específico Laing et al. [44] realizaram testes com sensores de temperatura instalados no módulo apresentado na Figura 14 e de pressão através da libertação de vapor deste, não sendo este um dimensionamento, mas sim o estudo de um caso protótipo real. O fluido de transferência de calor utilizado foi um óleo térmico não especificado.

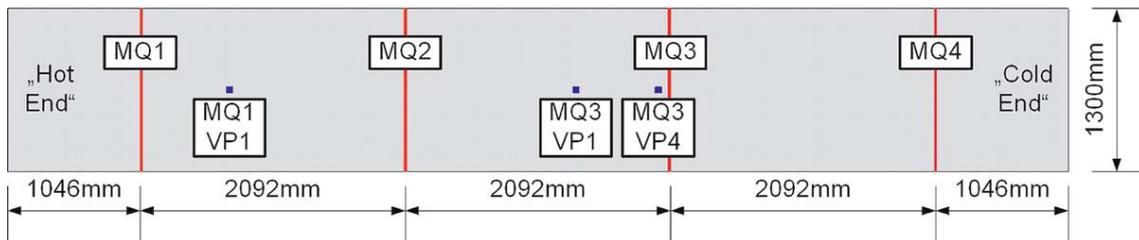


Figura 14 - esquema com os sensores de temperatura (linhas) e de vapor (quadrados) [44]

Em que obtiveram os seguintes resultados de ciclos acelerados apresentados na Figura 15:

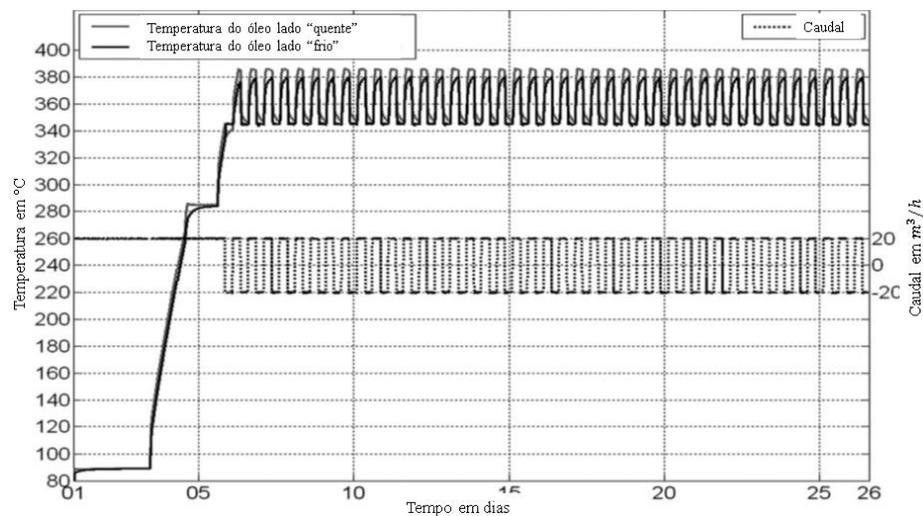


Figura 15 - Programa de ciclos acelerados do módulo de teste (adaptado [44])

Mais recentemente, o instituto *Masdar* construiu uma plataforma em Abu Dhabi designada *The Masdar Institute solar platform* em que testaram uma nova tecnologia em que existe concentração solar dividida em duas fases como pode ser observado na Figura 16. Os helióstatos planos concentram a radiação para numa torre que, por sua vez vai concentrar novamente a radiação através de um concentrador com tecnologia Fresnel no sentido descendente, num ponto focal ainda mais pequeno, desencadeando temperaturas muito elevadas, com o objetivo de aumentar a eficiência [45].

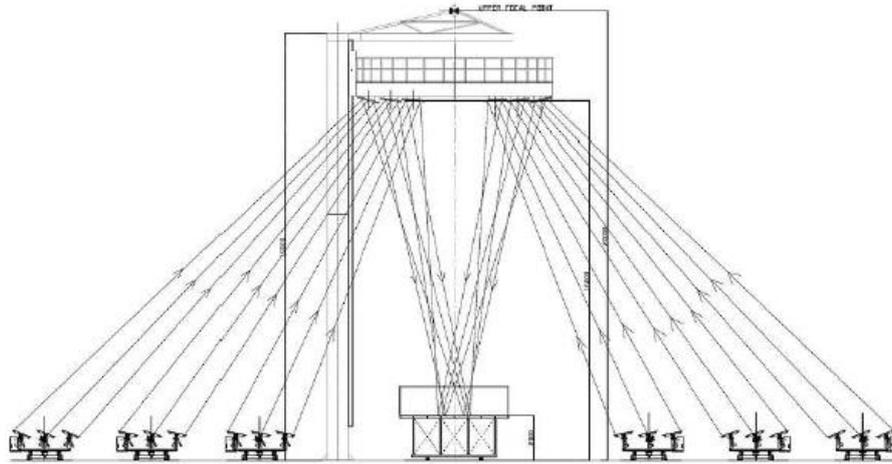


Figura 16 - Esquemática da plataforma solar *The Masdar Institute solar platform* [45]

Neste projeto, com a colaboração com o projeto NEST, construiu-se também um sistema de armazenamento de energia de betão, com características interessantes para o nosso estudo. Este teve como objetivo testar um protótipo com 1 MWh_{th} para condições reais de radiação solar apresentado na Figura 17.



Figura 17 - Sistema de armazenamento da plataforma solar *The Masdar Institute solar platform* [45]

2. Desenvolvimento de configurações de módulos.

Para os casos estudados foram feitas duas configurações com módulos de betão em Autodesk Inventor, possuindo estas as seguintes medidas: um só módulo com $4*2,5*18 m^3(A*L*C)$ e dois módulos idênticos com $2,5*2,5*12 m^3(A*L*C)$ cada. As figuras 18 e 19 ilustram estes módulos com as devidas medidas.

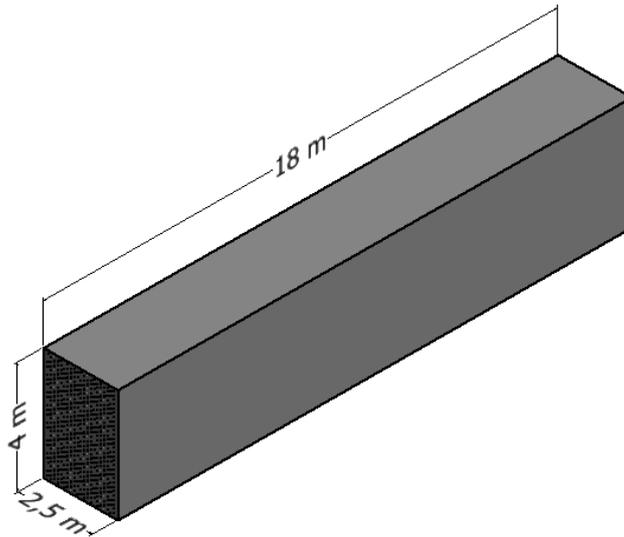


Figura 18 - Perspetiva isométrica da configuração com um módulo de betão

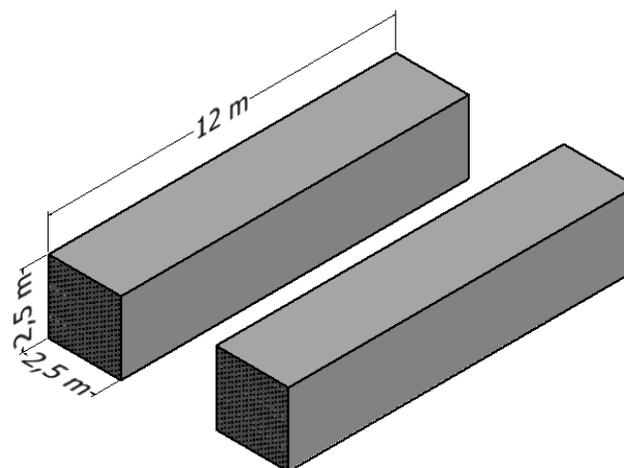


Figura 19 - Perspetiva isométrica da configuração com dois módulos de betão

Em seguida foram realizados furos de 18 mm de diâmetro no módulo onde vão ser inseridos os tubos metálicos para transporte do fluido também estes com 18 m de comprimento para a primeira configuração e 12 m para a segunda. Contudo em aplicações reais estes tubos teriam alguns centímetros extra, que servem para a distribuição da quantidade total de fluido de transferência de calor nos vários tubos que vão ser

incorporados no módulo de betão. Este fluido provém de um tubo de maiores dimensões que faz a sua condução desde o campo de concentradores até ao módulo. Esta situação pode ser observada num caso estudado pelo DLR na Figura 13. Estes tubos têm uma espessura de 3 mm e um diâmetro interior de 15 mm e estão representados na Figura 20.

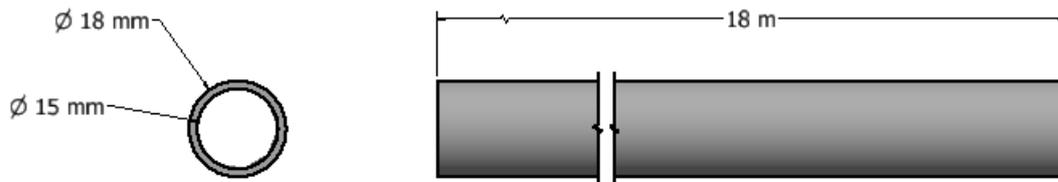


Figura 20 - Medidas utilizadas para os tubos a inserir nos módulos em Autodesk Inventor

Para finalizar, estes tubos foram colocados nos respetivos módulos com as medidas respetivas. Os tubos distribuem-se segundo uma geometria semelhante à apresentada na Figura 21:

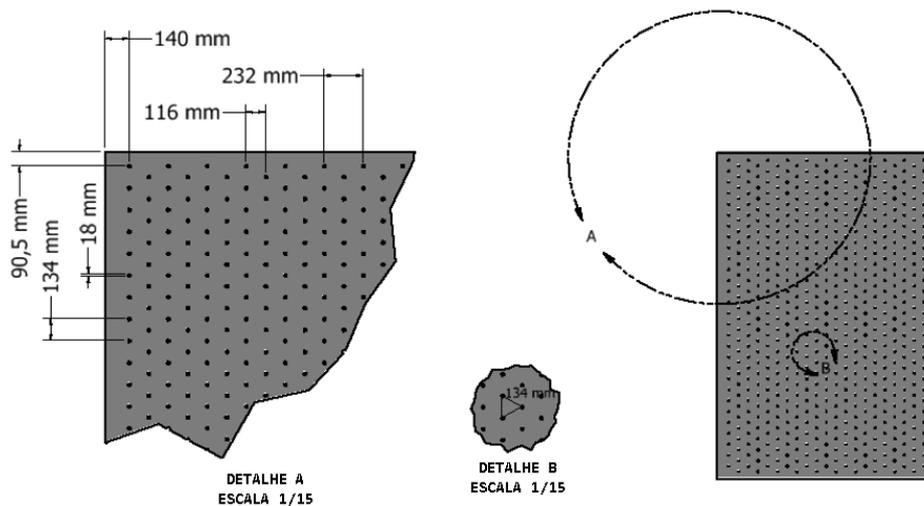


Figura 21 – Medidas utilizadas na configuração com um módulo de betão

Para realizar a análise térmica, o módulo foi dividido em vários módulos de armazenamento cilíndricos mais pequenos. É atribuída uma massa específica de betão para cada tubo, dividindo a área da face frontal do módulo de betão pelo número de tubos que este possui, fazendo o cálculo para descobrir a área da geometria de betão e,

consequentemente a massa atribuída a este. Esta análise realizada é feita individualmente, assumindo que todos os tubos e massa de betão associada a estes se comportam de forma semelhante. Os tubos metálicos não foram incorporados na análise térmica devido ao impacto mínimo que estes têm na variação de temperatura e aos obstáculos que iriam trazer ao método de análise realizado. O modelo para este método é baseado nas seguintes simplificações que por si não traduzem a realidade, mas cuja aproximação se considera adequada:

- O módulo de armazenamento cilíndrico tem o mesmo comportamento térmico que o módulo de betão.
- A condução de calor no fluido na direção axial é desprezável.
- O fluido de transferência de calor está em contacto diretamente com o betão, sendo a espessura do tubo considerada nula.

A geometria resultante com corte parcial pode ser observada na Figura 22:

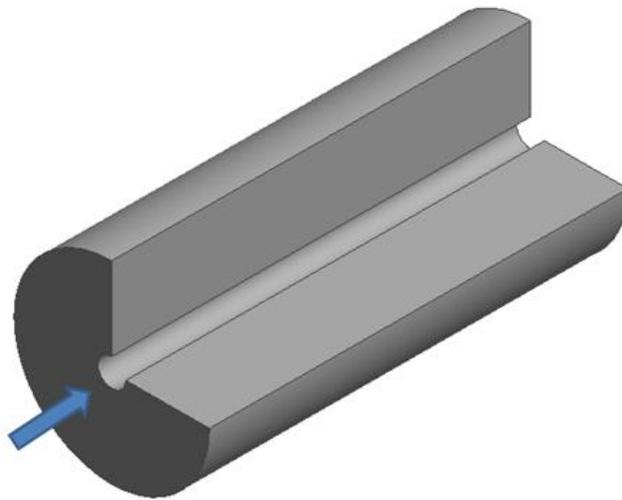


Figura 22 - Corte do módulo cilíndrico de armazenamento

Com um corte completo e com as dimensões (não estão à escala) da Figura 23:

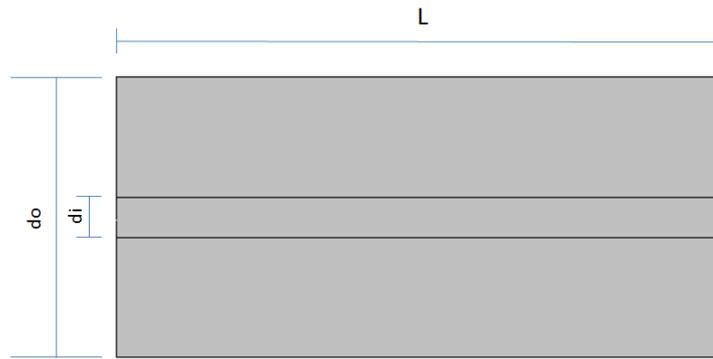


Figura 23 - Corte vertical do módulo de armazenamento cilíndrico (não está à escala)

Vai ser aplicado um método de diferenças finitas que será explicado mais detalhadamente no capítulo 3, em que uma “rede” de nós (pontos localizados no módulo igualmente espaçados entre si para aplicação do método de diferenças finitas) vai ser implementada no nosso módulo de armazenamento cilíndrico para efetuar o estudo térmico e energético no módulo de armazenamento cilíndrico.

3. Metodologia

3.1. Método malhas por diferenças finitas

A função contínua $f(x_1, x_2) = f(x, y)$ em valores conhecidos num conjunto discreto de pontos (i, j, k, l, etc.) como se representa na Figura 24. A determinação das derivadas da função $f(x, y)$ nos pontos (i, j, k, ...) pode fazer-se recorrendo ao chamado método das diferenças finitas[46].

ponto	coord.x	coord.y	f(x,y)
...
i-1	x_{i-1}	y_{i-1}	f_{i-1}
j-1	x_{j-1}	y_{j-1}	f_{j-1}
...
i	x_i	y_i	f_i
j	x_j	y_j	f_j
...

Figura 24 - Função f (x, y) tabelada

Considere-se que os pontos (i, j, k, ...) no plano Oxy, para os quais se conhece o valor f (x, y), de acordo com a Figura 24, têm coordenadas tais que:

$$x_i - x_{i-1} = x_k - x_{k-1} = \dots = \Delta x \text{ e } y_i - y_j = y_k - y_j = \dots = \Delta y \quad (6)$$

A consideração de intervalos Δx e $\Delta y = \text{constante}$, segundo os eixos dos xx e dos yy, facilita a sistematização e aplicação do método das diferenças finitas, contudo, não é condição necessária para efeitos de utilização do referido método. A consideração de $\Delta x \neq \Delta y$ pode tornar-se necessária.

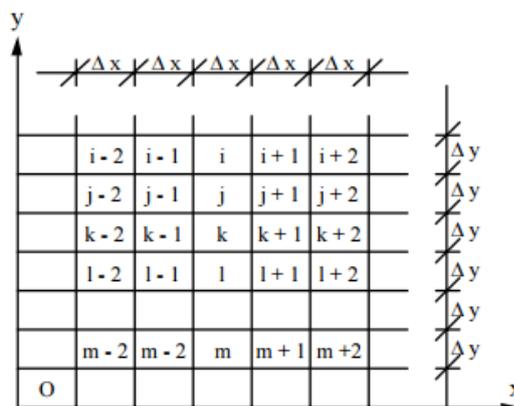


Figura 25 - Malha no plano Oxy

A definição da derivada de uma função $f(x,y)$ em ordem a x , de acordo com a definição de derivada parcial, num ponto, é:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta f}{\Delta x} \quad (7)$$

Se se considerar um intervalo Δx suficientemente pequeno, pode considerar-se que:

$$\frac{\partial f}{\partial x} \cong \frac{\Delta f}{\Delta x} \quad (8)$$

Considerando válida esta aproximação, para a função tabelada na Figura 24 e a distribuição dos pontos no plano Oxy representada na Figura 25, a derivada da função $f(x,y)$ em ordem a x no ponto k , pode determinar-se de forma:

- Progressiva
- Central
- Regressiva

Primeira derivada:

- Progressiva

$$\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_k \cong \frac{f_{k+1} - f_k}{\Delta x} \quad (9)$$

- Central

$$\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_k \cong \frac{f_{k+1} - f_{k-1}}{2\Delta x} \quad (10)$$

- Regressiva

$$\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_k \cong \frac{f_k - f_{k-1}}{\Delta x} \quad (11)$$

Destas três hipóteses possíveis para a determinação do valor aproximado da 1ª derivada em ordem a x da função $f(x, y)$ no ponto k , a chamada diferença central (10), conduz, em geral, a uma melhor aproximação. A determinação das derivadas parciais de 2ª ordem, pode ser feita de modo análogo, isto é:

Segunda derivada:

- Progressiva

$$\left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\right)_k \cong \frac{f_{k+2} - 2 \cdot f_{k+1} + f_k}{\Delta x^2} \quad (12)$$

$$\left(\frac{\partial^2 f}{\partial y^2}\right)_k \cong \frac{f_{m-2} \cdot f_l + f_k}{\Delta x^2} \quad (13)$$

- Central

$$\left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\right)_k = \frac{f_{k+1} - 2 \cdot f_k + f_{k-1}}{\Delta x^2} \quad (14)$$

$$\left(\frac{\partial^2 f}{\partial y^2}\right)_k \cong \frac{f_{j-2} \cdot f_k + f_l}{\Delta x^2} \quad (15)$$

- Regressiva

$$\left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\right)_k \cong \frac{f_k - 2 \cdot f_{k-1} + f_{k-2}}{\Delta x^2} \quad (16)$$

$$\left(\frac{\partial^2 f}{\partial y^2}\right)_k \cong \frac{f_k - 2 \cdot f_j + f_i}{\Delta x^2} \quad (17)$$

Como foi referido no capítulo anterior, foi adotada uma distribuição triangular dos tubos, em que é atribuída uma massa de betão semelhante a cada tubo, dando origem a um módulo de armazenamento cilíndrico que vai facilitar a análise térmica.

Os detalhes desta geometria encontram-se descritos no capítulo anterior. A massa de betão atribuída a cada tubo foi calculada através da área total da secção frontal do módulo dividida pelo número de tubos neste incorporados. Os tubos não são incorporados na simulação como foi já referido no capítulo 2.

A componente de betão do cilindro encontra-se a uma temperatura específica e o seu interior é percorrido pela mistura de sais fundidos a alta temperatura. O objetivo é observar a evolução da temperatura do betão e do fluido ao longo do comprimento do cilindro durante um determinado intervalo de tempo. A esquematização do método de estudo aplicado no módulo do cilindro de armazenamento estudado pode ser representada esquematicamente pelas Figuras 7 e 8 do primeiro capítulo.

Por uma questão de concordâncias, dz foi substituído por dx para a discretização das seguintes equações. Assumindo que o caudal (\dot{m}) é constante ao longo do comprimento do tubo, o balanço de energia térmica para o fluido no volume de controlo diferencial dx , é [43]:

$$h_E \cdot P \cdot dx \cdot (T_s - T_f) + \dot{m} \cdot c_{p,f} \cdot T_{f,x} = \dot{m} \cdot c_{p,f} \cdot T_{f,x+dx} + \rho_f \cdot S_f \cdot dx \cdot c_{p,f} \cdot \frac{\partial T_f}{\partial t} \quad (18)$$

Onde h_E é o coeficiente de transferência de calor corrigido no tubo, P é o perímetro da superfície de transferência de calor ($P = \pi \cdot d_i$), e S_f é a área da secção percorrida pelo fluido dentro do módulo do cilindro de armazenamento ($S_f = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4}$).

O coeficiente global de transferência de calor h_E permite uma correção do coeficiente de transferência de calor normal para o caso que se está a estudar, fazendo um ajuste com a relação entre os raios do tubo e do betão, bem como a condutividade do sólido, que neste caso é o betão. Esta é apresentada no Capítulo I como equação 5.

Foram estudados dois tipos de fluido de transferência de calor, óleo térmico (Therminol VP-1) e sais fundidos (Solar Salt), tendo estes diferentes propriedades. Para o caso dos sais fundidos, todos os casos estudados apresentam escoamento laminar, e no caso do óleo térmico o escoamento é sempre turbulento. Para o estudo do escoamento do fluido foram utilizadas duas correlações para o número de Nusselt. A primeira, para o caso do escoamento laminar, foi usada uma equação que utiliza uma relação entre viscosidades com temperatura do fluido normal e temperatura do fluido junto à parede do betão, apresentada por Sieder-Tate[47]. Esta equação é válida para $Re \cdot Pr \cdot \left(\frac{D}{L}\right) > 10$.

$$Nu = 1,86 \cdot Re^{\frac{1}{3}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{2 \cdot ri}{L}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\mu_f}{\mu_{f,w}}\right)^{0.14} \quad (19)$$

Em que ri é o raio interno do tubo, L é o comprimento do tubo, μ_f é a viscosidade do fluido e $\mu_{f,w}$ é a viscosidade do fluido junto ao tubo.

Para o caso do escoamento turbulento foi utilizada a seguinte equação para o número de Nusselt:

$$Nu = \frac{\frac{f}{8} \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot (Pr^{\frac{1}{3}} - 1)} \quad (20)$$

Em que f é o fator de fricção de Darcy e é calculado através da seguinte equação:

$$f = (0,79 \cdot \log(Re) - 1,64)^{-2} \quad (21)$$

Em seguida utilizaram-se as seguintes equações para o cálculo do número de Reynolds e de Prandlt:

$$Re = \frac{\rho_f \cdot v \cdot D_i}{\mu_f} \quad (22)$$

Em que D_i é o diâmetro interno do tubo e v a velocidade do fluido.

$$Pr = \frac{c_{p,f} \cdot \mu_f}{k_f} \quad (23)$$

Em que k_f é a condutividade do fluido. Com todos os parâmetros calculados, podemos agora descobrir o coeficiente de transferência de calor através da seguinte equação:

$$h = \frac{Nu \cdot k_s}{D} \quad (24)$$

Foram utilizados inicialmente dois métodos para o balanço de calor no betão. O primeiro é mais simplificado em que não se considera o desenvolvimento radial da temperatura no betão, ou seja assume-se a superfície radial como um todo, considerando-se apenas o desenvolvimento longitudinal da temperatura, que depende apenas da interação com o fluido no volume de controlo. O fluxo de calor é assumido como unidimensional radialmente e uniforme para todo o módulo de armazenamento cilíndrico, podendo este esquema ser reduzido para realizar uma análise 2-D em que o fluido transfere calor uniformemente na direção radial e vai perdendo calor na direção longitudinal. A Figura 26 representa este esquema:

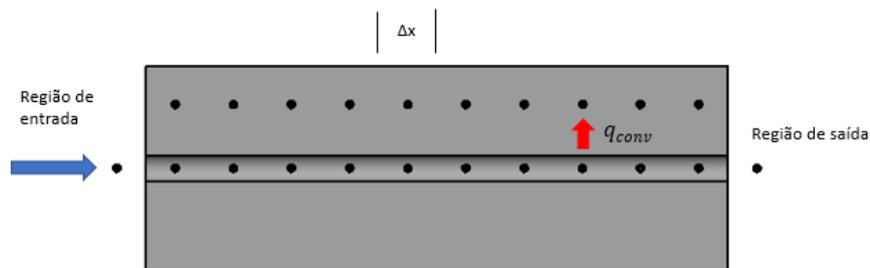


Figura 26 - Esquema de nós simplificado

No primeiro método, a temperatura do betão ao longo do tempo varia através da seguinte equação:

$$h \cdot P \cdot dx \cdot (T_s - T_f) = -\rho_s \cdot S_s \cdot dx \cdot c_{p,s} \cdot \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad (25)$$

Em que as propriedades do betão ρ_s, S_s e c_s são calculadas da mesma maneira que o fluido. Desenvolvendo a equação para o instante t a partir de $t - 1$, considerado que a temperatura no betão varia ao longo do tempo com a transferência de calor do fluido no volume de controlo dx :

$$T_s^t = T_s^{t-1} - \frac{h.P.dx.(T_s^{t-1} - T_f^{t-1})}{\rho_s.S_s.dx.c_{p,s}} . dt \quad (26)$$

Tentou-se também a utilização de um segundo método que considera o desenvolvimento radial da temperatura ao longo do módulo de armazenamento cilíndrico, mas como é complicada a utilização deste método no estudo de um grande módulo com grandes variáveis e isolamento, decidiu não se incorporar neste estudo os escassos resultados obtidos, tendo sido a maior parte das simulações realizadas com o primeiro método. Um exemplo de resultados da simulação através deste método encontra-se no Anexo 1. As Figuras 27 e 28 representam o esquema inicial testado com este método para as simulações, que foi também importante no desenvolvimento do trabalho:

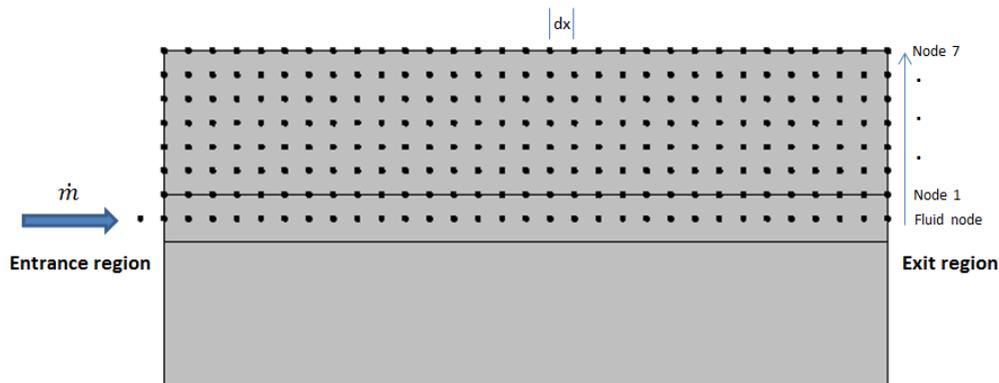


Figura 27 - Esquema de pontos na utilização do segundo método dos nós

O esquema mais detalhado da transferência de calor demonstrada pelo segundo método encontra-se na Figura 28:

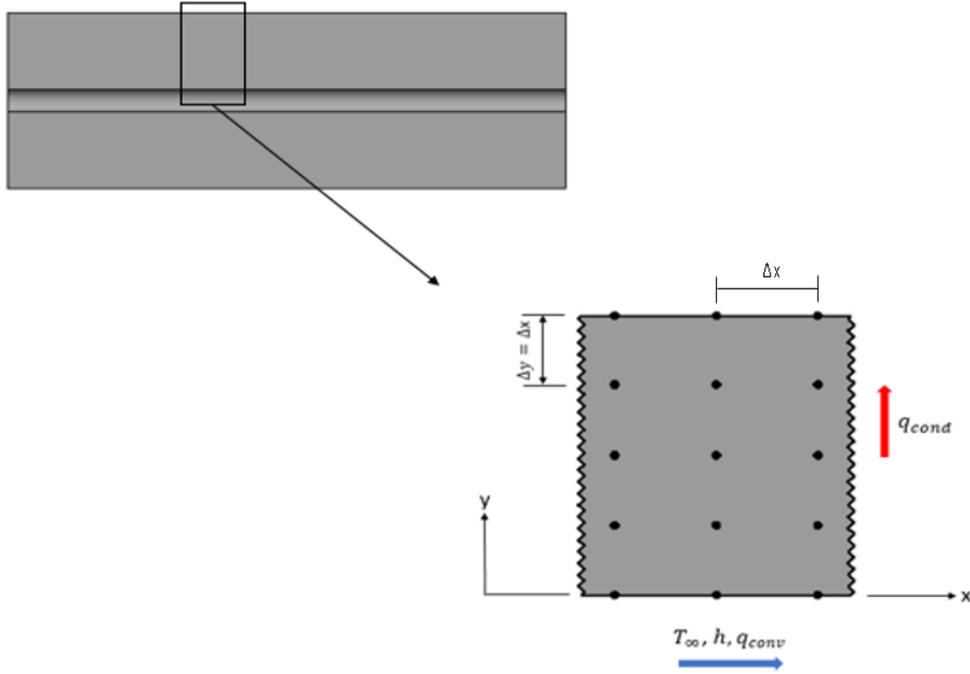


Figura 28 - Esquema de múltiplos nós no betão com condução unidimensional

Foram desenvolvidas as equações de calor para o betão no caso de um sistema bi-dimensional, sobre condições transientes com propriedades constantes e sem geração de calor interno. A forma apropriada para a equação de calor é [46]:

$$\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (27)$$

A partir da equação, m e n podem ser usados para designar as localizações x e y dos nós. Para a discretização em função do tempo pode ser usada uma aproximação de diferenças finitas à derivada:

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T_{m,n}^t - T_{m,n}^{t-1}}{\Delta t} \quad (28)$$

Substituindo na equação 29 e desenvolvendo-a:

$$\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{T_{m,n}^t - T_{m,n}^{t-1}}{\Delta t} = \frac{T_{m+1,n}^{t-1} + T_{m-1,n}^{t-1} - 2T_{m,n}^{t-1}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{m,n+1}^{t-1} + T_{m,n-1}^{t-1} - 2T_{m,n}^{t-1}}{(\Delta y)^2} \quad (29)$$

Resolvendo para o instante t e assumindo que $\Delta x = \Delta y$:

$$T_{m,n}^t = Fo \cdot (T_{m+1,n}^{t-1} + T_{m-1,n}^{t-1} + T_{m,n+1}^{t-1} + T_{m,n-1}^{t-1}) + (1 - 4 \cdot Fo) \cdot T_{m,n}^{t-1} \quad (30)$$

Onde Fo é uma forma de diferença finita do número de Fourier:

$$Fo = \frac{\alpha_s \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} \quad (31)$$

Em que α_s é a difusividade do betão. Para um sistema com um fluido de transferência de calor, temos por base a interpretação da equação de energia para o cálculo da energia armazenada:

$$E_{in} + E_g = E_{st} \quad (32)$$

Assumindo que todo o calor o nó imediatamente a seguir ao fluido, segue-se a equação para este mesmo nó:

$$h \cdot A \cdot (T_\infty - T_0^{t-1}) + \frac{k_s \cdot A}{\Delta x} \cdot (T_1^{t-1} - T_0^{t-1}) = \rho_s \cdot c_{p,s} \cdot A \cdot \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{T_0^t - T_0^{t-1}}{\Delta t} \quad (33)$$

Resolvendo para t :

$$T_0^t = T_0^{t-1} + \frac{2 \cdot h \cdot \Delta t}{\rho_s \cdot c_{p,s} \cdot \Delta x} \cdot (T_\infty - T_0^{t-1}) + \frac{2 \cdot \alpha_s \cdot \Delta t}{\Delta x^2} \cdot (T_1^{t-1} - T_0^{t-1}) \quad (34)$$

Sabendo que $\left(2 \cdot h \cdot \frac{\Delta t}{\rho_s} \cdot c_{p,s} \cdot \Delta x\right) = 2 \cdot \left(h \cdot \frac{\Delta x}{k_s}\right) \left(\alpha_s \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2}\right) = 2 \cdot Bi \cdot Fo$, substituindo na equação 35, obtém-se a equação 36:

$$T_0^t = 2 \cdot Fo \cdot (T_1^{t-1} + Bi \cdot T_\infty) + (1 - 2 \cdot Fo - 2 \cdot Bi \cdot Fo) \cdot T_0^{t-1} \quad (35)$$

Resolvendo a equação inicial de energia sem geração de calor e assumindo um modelo 2-D, temos uma equação para os pontos interiores do betão:

$$T_{m,n}^t = Fo \cdot (T_{m-1,n}^{t-1} + T_{m+1,n}^{t-1} + T_{m,n-1}^{t-1} + Bi T_\infty) + (1 - 2 \cdot Fo - 2 \cdot Bi \cdot Fo) \cdot T_{m,n}^{t-1} \quad (36)$$

A fórmula do número de Biot é:

$$Bi = \frac{h \cdot \Delta x}{k_s} \quad (37)$$

O desenvolvimento a partir da equação 28 foi apenas utilizado numa versão inicial do modelo, em que alguns dos gráficos se encontram no anexo 1, tendo-se no final escolhido a abordagem por outro método, sendo este, no entanto, relevante para o trabalho.

3.2. Ciclos

A partir do cálculo das temperaturas médias do betão e do desenvolvimento das temperaturas do fluido ao longo do tubo, procedeu-se ao cálculo da energia armazenada sob a forma de calor no betão no processo de carga e da energia extraída pelo fluido no processo de descarga através de duas equações. Para o cálculo de energia no betão, é aplicada a equação de calor para a massa de betão equivalente ao módulo de armazenamento cilíndrico, onde a capacidade térmica mássica do betão $c_{p,s}$ é constante. São calculadas as temperaturas médias do betão para todos os tempos de simulação, realizando-se o cálculo através da diferença de temperatura em todos os intervalos de tempo, através da equação:

$$Q_s = m_s \cdot c_{p,s} \cdot \Delta T_s \quad (38)$$

Para o fluido, é necessário aplicar a equação de calor adaptada à quantidade de fluido que passa pelo tubo e a energia transferida ou absorvida por este nesse percurso. Para isso utilizou-se o caudal e fez-se o cálculo para todos os nós considerados do fluido em cada intervalo de tempo, sendo posteriormente realizada uma soma dos valores em cada ponto.

$$\dot{Q}_f = \dot{V}_f \cdot \rho_f \cdot c_{p,f} \cdot \Delta T_f \quad (39)$$

Para as simulações realizadas no subcapítulo 5.2. que utilizam perdas de calor no módulo de betão, foram utilizadas as respectivas equações para as resistências dos meios isolantes do módulo. Foi utilizada a equação para resistência de condução para o isolamento e o betão:

$$R = \frac{L}{k \cdot A} \quad (40)$$

Em que a partir desta podemos calcular a quantidade de energia perdida pelo calor no módulo com as diferenças de temperatura entre este e os meios externos:

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{R} \quad (41)$$

4. Estudo de Materiais

4.1. Propriedades dos Materiais

Para a obtenção de resultados foi utilizado o método de nós para a transferência de calor mais simplificado, em que avaliamos a transferência de calor do fluido para o módulo unidimensionalmente. Esta é realizada uniformemente para o módulo como um todo ao longo do comprimento, com apenas um nó radial.

Foram analisados vários tipos de betão como material de armazenamento e óleo térmico *Therminol VP-1* e o *Solar Salt* como fluidos de transferência de calor. As propriedades termofísicas destes podem ser encontrados nas equações 42-48 e na Tabela 4.

As equações para obtenção das propriedades termofísicas do fluido são dependentes de temperatura e estão apresentadas nas seguintes equações. A condutividade do *Solar Salt* não depende da temperatura e é considerado o valor de referência dado de 0,45 W/m.K [48,49].

Densidade:

Solar salt:

$$2263,628 - 0,636 \cdot T \quad (42)$$

Therminol VP-1:

$$-0,90797 \cdot T + 0,00078116 \cdot T^2 - 2,367 \times 10^{-6} \cdot T^3 + 1083,25 \quad (43)$$

Viscosidade:

Solar salt:

$$0,07549 - 2,77 \times 10^{-4} \cdot (T - 273) + 3,49 \times 10^{-7} \cdot (T - 273)^2 - 1,474 \times 10^{-10} \cdot (T - 273)^3 \quad (44)$$

Therminol VP-1:

$$\frac{544,149}{e^{T+114,43}} - 2,59578 \times (\rho \times 10^{-6}) \quad (45)$$

Condutividade:

Therminol VP-1:

$$-8,19477 \times 10^{-5} \cdot T - 1,92257 \times 10^{-7} \cdot T^2 + 2,5034 \times 10^{-11} \cdot T^3 - 7,2974 \times 10^{-15} \cdot T^4 + 0,137743 \quad (46)$$

Capacidade térmica:

Solar salt:

$$1396,044 + 0,172 \cdot T \quad (47)$$

Therminol VP-1:

$$0,002414.T + 5,9591 * 10^{-6}.T^2 - 2,9879 * 10^{-8}.T^3 + 4,4172 * 10^{-11}.T^4 + 1498 \quad (48)$$

As propriedades do betão encontram-se na Tabela 4:

Tabela 4 - Propriedades termofísicas das diferentes misturas de betão.

Material	$\rho(kg/m^3)$	$c_p(J/kg.K)$	$k(W/m.K)$
Betão para alta temperatura [25]	2750	916	1,00
Betão com fibras [50]	2440	630	1,16
Betão com quartzo [40]	2250	1100	1,30
Betão com grafite [51]	2680	950	2,43
Betão tipo 41 (teste) [55]	2305	1002	3,18

4.2. Validação

Para validar o nosso modelo realizou-se uma comparação com um módulo real já estudado pelo DLR [44], tendo sido pioneiro na área e também a base de muitos outros estudos devido aos resultados bastante satisfatórios obtidos, tendo o artigo para este caso sido já referenciado anteriormente. Para o estudo assume-se a configuração utilizada pelo DLR e que o módulo se comporta de acordo com o módulo de armazenamento cilíndrico, ou seja, que todos os tubos são semelhantes e que transferem energia da mesma maneira para o betão.

4.2.1 Especificações

A configuração consiste num módulo de betão com $1,7*1,3*8,6 m^3$ e com 132 tubos metálicos no seu interior. Estes tubos têm um comprimento de 9 m e um diâmetro exterior de 18 mm. Apresentam uma distribuição triangular como já foi descrito no capítulo 2. Foi elaborado um módulo igual ao referido, em que se adotou a mesma configuração e, posteriormente, se tentou descobrir, a partir de estudos já realizados no DLR, qual o tipo de mistura de betão utilizada ou pelo menos tentar conseguir chegar a uma cujos resultados térmicos se aproximassem dos apresentados neste estudo específico do DLR, uma vez que a mistura não é especificada no artigo do estudo. Utilizou-se também um fluido de transferência de calor e isolamento semelhantes, sabendo apenas que se tratam de óleo térmico e lã mineral, não existindo novamente um fluido de transferência de calor ou material de isolamento específico referido. Também foram utilizadas condições de fronteira semelhantes.

Como nem o fluido de transferência de calor nem as características da mistura de betão são especificadas, teve de se optar por usar o óleo térmico mais comum para nestes casos

(*Therminol VP-1*) bem como misturas de betão já abordadas pelo DLR noutros estudos, como por exemplo a mistura de betão de alta temperatura e outra com fibras. Foi utilizada uma lã de rocha comercial como material de isolamento. Foram simulados ciclos de carga/descarga de 6h cada, tal como especificado no artigo do módulo de teste do DLR, com o objetivo de analisar se as variações de temperatura e de energia acumulada e extraída no módulo obtidas no estudo apresentado são semelhantes. O caudal assume-se o mesmo que aquele que é apresentado no artigo do DLR ($20 \text{ m}^3/\text{h}$).

Deve-se referenciar que existem várias diferenças nos estudos que podem ser significativas na oscilação de resultados como por exemplo o facto de não se saber exatamente a posição dos dispositivos de medição de temperatura no caso do DLR, exceto que se encontram no início e no fim do módulo. Também não se sabe se as misturas de betão e fluido de transferência de calor, bem como o isolamento têm características semelhantes e a espessura dos tubos também não é especificada. Os resultados do estudo realizado pelo DLR são medições num módulo real enquanto que o modelo deste estudo é uma simulação, sendo impossível replicar todos os fatores ambientais, tais como o desgaste do material que não foram incorporados neste estudo, implicando isto variações nos resultados finais.

Quanto ao isolamento, é referido no estudo do DLR o uso de lã mineral como meio de isolamento do módulo por cima e dos lados. É apresentado por estes um valor para perdas térmicas de 10 kW no módulo, e será este o valor utilizado para o estudo dos nossos casos. Serão simulados casos com propriedades do fluido variáveis com a temperatura e outros em que isto não acontece para observar as diferenças de comportamentos nestes.

4.2.2. Resultados

Em seguida apresentam-se várias figuras com alguns dos resultados obtidos com o código Matlab apresentado para situações semelhantes às apresentadas pelo artigo do DLR, seguindo-se a discussão da validação do modelo apresentado, através da obtenção de valores com diferentes códigos simulados em Matlab (Anexo 6).

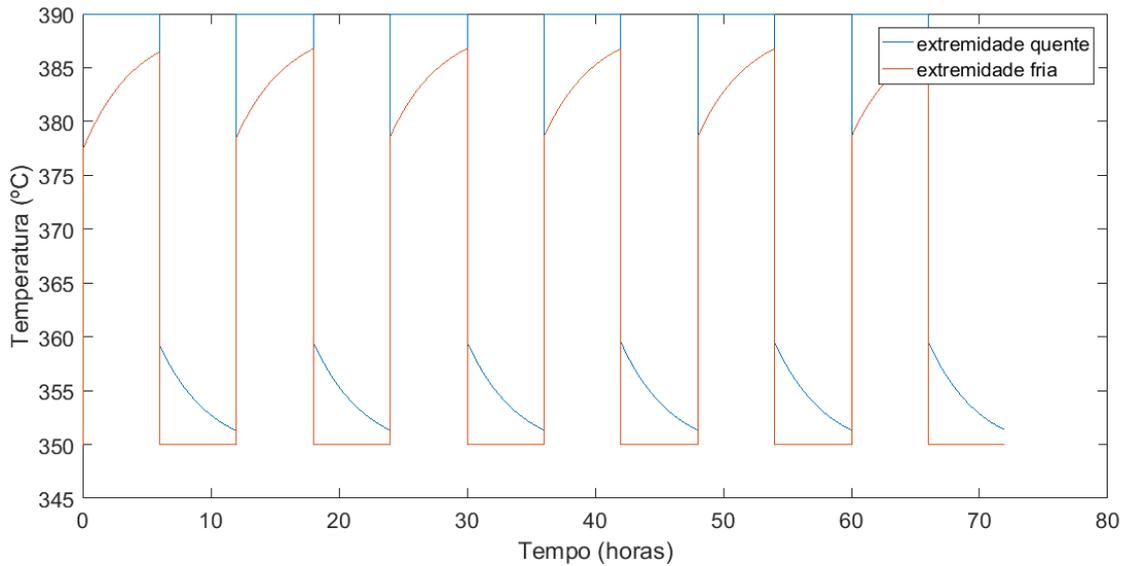


Figura 29 - Desenvolvimento da temperatura do fluido no módulo tipo DLR de betão com uma mistura de alta temperatura para vários ciclos de carga/descarga de 6 horas cada durante 72 horas

Na Figura 29 é possível observar a evolução da temperatura do fluido de transferência de calor ao longo dos ciclos para o código apresentado. O fluido entra a 390°C na extremidade “quente” do módulo no processo de carga e a 350°C na extremidade “fria” no processo de descarga. É esta a Figura que se quer comparar com os resultados do módulo apresentados no artigo do DLR, pois é este caso que é apresentado onde são medidas as temperaturas no início e no fim do módulo.

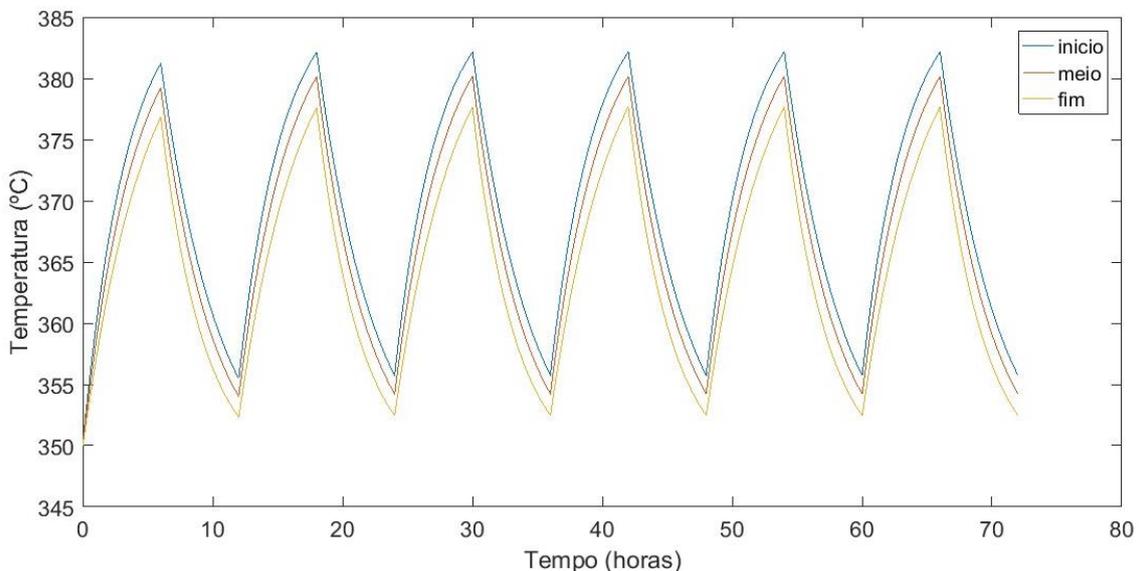


Figura 30 - Desenvolvimento da temperatura do betão no módulo tipo DLR de betão com uma mistura de alta temperatura em vários ciclos de carga/descarga de 6 horas cada durante 72 horas

Na Figura 30 é apresentada a temperatura no betão para vários ciclos de carga e descarga, seguindo o desenvolvimento da temperatura do fluido para o código apresentado. Uma

diferença maior entre a temperatura no início e no fim do módulo observa-se à medida que nos aproximamos do fim de um ciclo de carga ou de descarga, indicando uma maior resistência à transferência de energia sob a forma de calor no final do módulo, devido à diminuição da temperatura do fluido ao longo do tubo, como pode ser observado na Figura 31.

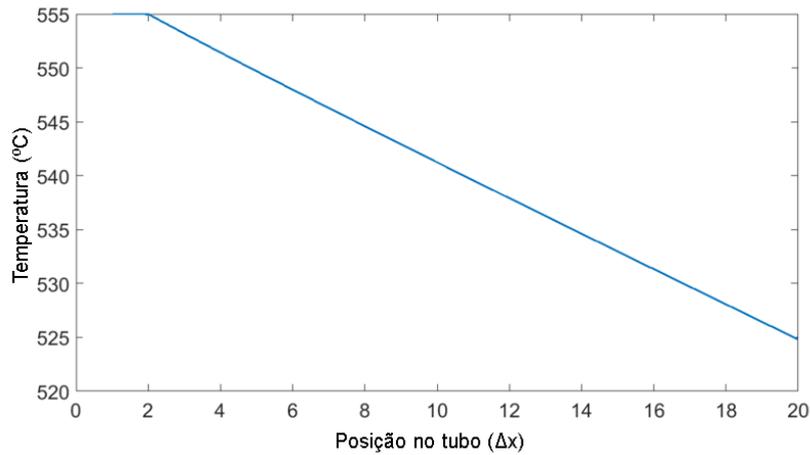


Figura 31- temperatura média do fluido no processo de carga

Na Figura 32 podemos observar as temperaturas médias do fluido e do betão, podendo comparar os comportamentos destas temperaturas, verificando que existe um padrão nos resultados obtidos e que a temperatura do betão aumenta uniformemente.

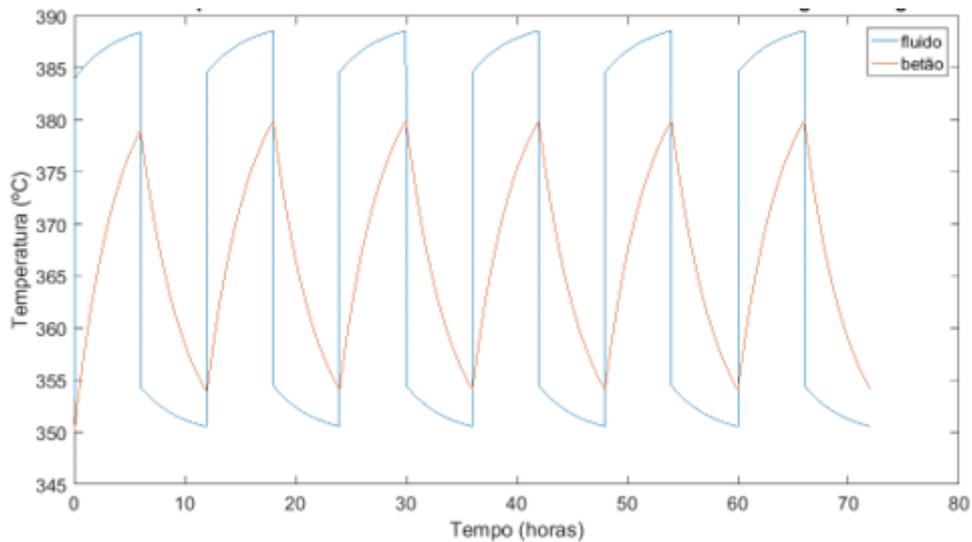


Figura 32 - Desenvolvimento das temperaturas médias do fluido e betão no módulo tipo DLR de betão com uma mistura de alta temperatura em vários ciclos de carga/descarga de 6 horas cada durante 72 horas

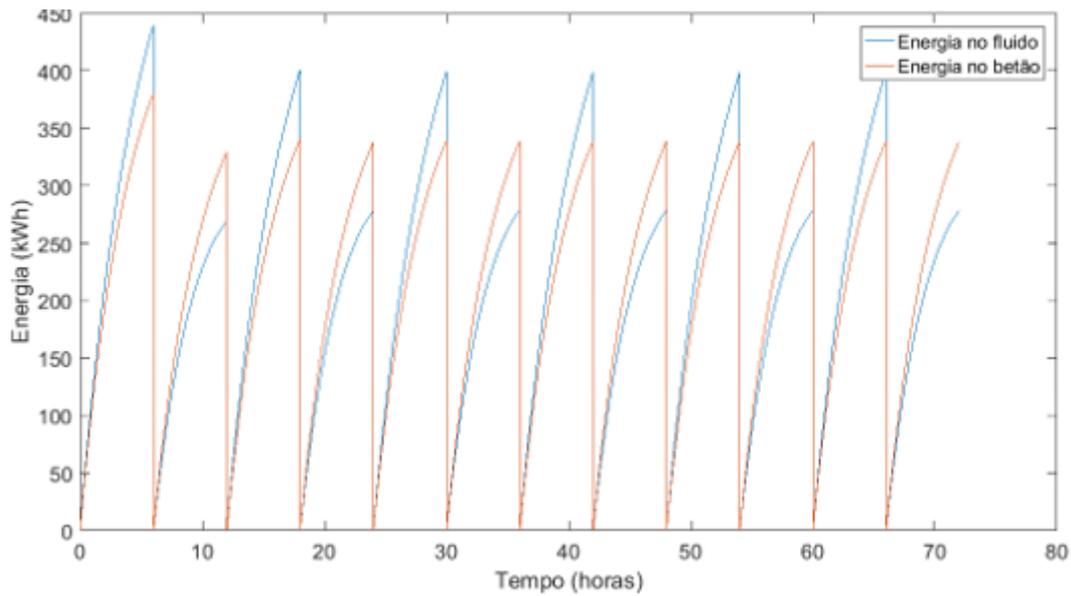


Figura 33 - Balanço energético no betão e no fluido no módulo tipo DLR de betão com uma mistura de alta temperatura em vários ciclos de carga/descarga de 6 horas cada durante 72 horas

Por último, com as matrizes das temperaturas todas calculadas em software MATLAB, procede-se ao cálculo da energia armazenada no betão no processo de descarga e a energia retirada pelo fluido de transferência de calor no processo de descarga. Podem-se então calcular as perdas de energia para o ambiente através das diferenças nas curvas do betão e do fluido (Figura 33). Este é um processo importante para a validação pois podemos comparar os resultados apresentados pelo estudo do DLR em termos de energia transferida e retirada bem como se as perdas estão de acordo com o que é apresentado por estes e se estão de acordo com o que é simulado.

Feito isto para todos os casos estudo, apresenta-se a Tabela 5 com todos os resultados relevantes para a validação.

Tabela 5 - Resultados dos casos estudo

betão	props. var.	ΔT médio betão	Energia armazenada no betão (kWh)	Energia retirada pelo fluido (kWh)	capacidade de armazenamento efetiva (kWh/m ³ .K)	capacidade de armazenamento calculada (kWh/m ³ .K)
DLR		24	354	236	0,66	0,64
HT	Sim	26,8	356	286	0,7	0,7
HT	Não	25,6	341	269	0,7	0,7
Fibras	Sim	36,4	291	291	0,43	0,43
Fibras	Não	35,6	285	226	0,43	0,43
Quartzo	Sim	31,1	401	338	0,69	0,69
Quartzo	Não	29,5	384	318	0,69	0,69
Grafite	Sim	37,2	493	435	0,71	0,71
Grafite	Não	35,8	474	414	0,71	0,71

Pela análise da Tabela 5 podemos observar que o betão com uma mistura de alta temperatura é o que apresenta valores mais próximos daqueles apresentados pela mistura do estudo realizado pelo DLR, em que a diferença de temperatura média no betão é a mais próxima das quatro misturas de betão apresentadas. A energia transferida no ciclo de carga do fluido de transferência de calor para o betão é também muito semelhante para esta mistura de betão, sendo quase coincidente no caso onde usamos uma simulação com as propriedades do fluido a variar com a temperatura. Quanto à energia retirada pelo fluido no processo de descarga, a mistura de betão testada que apresenta valores mais próximos é a mistura com fibras. No entanto esta mistura seria pouco adequada devido à elevada diferença de temperaturas e baixa quantidade de energia transferida no processo de carga. O seguinte valor mais próximo é novamente o betão com uma mistura de alta temperatura. Observa-se também que o betão com uma mistura de grafite apresenta uma diferença de temperatura de quase 40°C que é o valor de diferença de temperatura de um ciclo normal apresentado no artigo do DLR. Esta mistura de betão apresenta uma elevada condutividade térmica que permite a transferência rápida de energia levando a uma maior eficiência do processo de carga/descarga.

Em seguida apresenta-se a Figura 34 com os resultados para comparação com os resultados obtidos para o módulo de teste do DLR das temperaturas no início e no fim do módulo para o fluido de transferência de calor. Esta figura foi adaptada para uma união de pontos para melhor comparação na Figura 35. A figura apresentada é para um caso de betão com uma mistura de alta temperatura pois é o betão que tem valores que mais se

aproximam dos valores apresentados no estudo realizado pelo DLR e o fluido de transferência de calor é o óleo térmico *Therminol VP-1* como já foi referido.

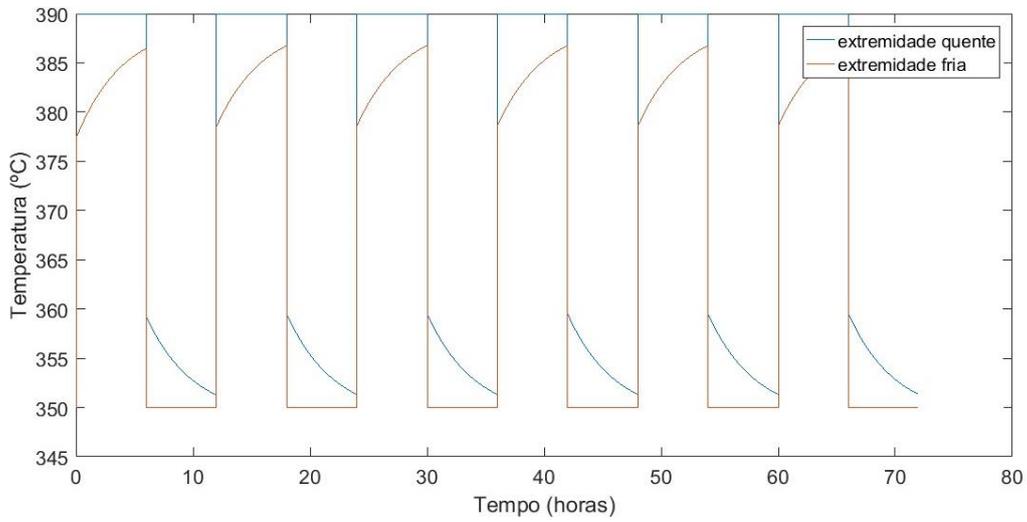


Figura 34 - Desenvolvimento da temperatura do fluido no módulo tipo DLR de betão com uma mistura de alta temperatura em vários ciclos de carga/descarga com 6 horas cada durante 72 horas

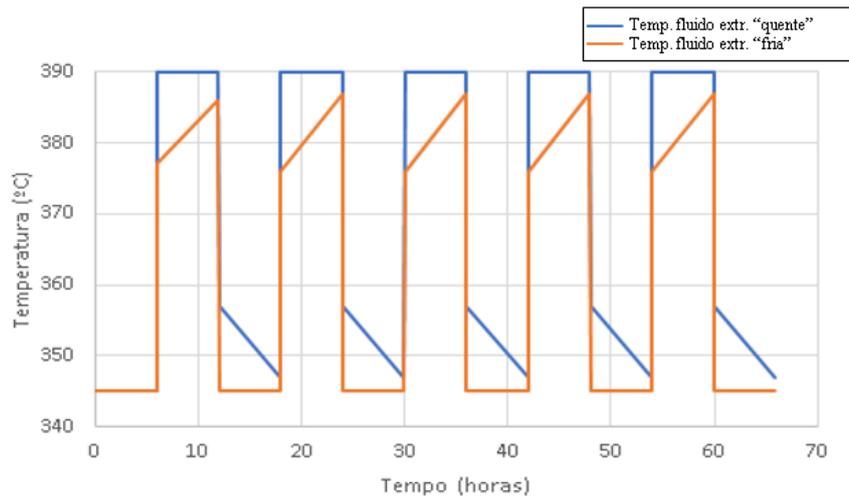


Figura 35 - União de pontos da Figura 33

Foi também comparado a Figura 15 dos ciclos acelerados do DLR, fazendo a adaptação desta na Figura 36 e a união de pontos na Figura 37.

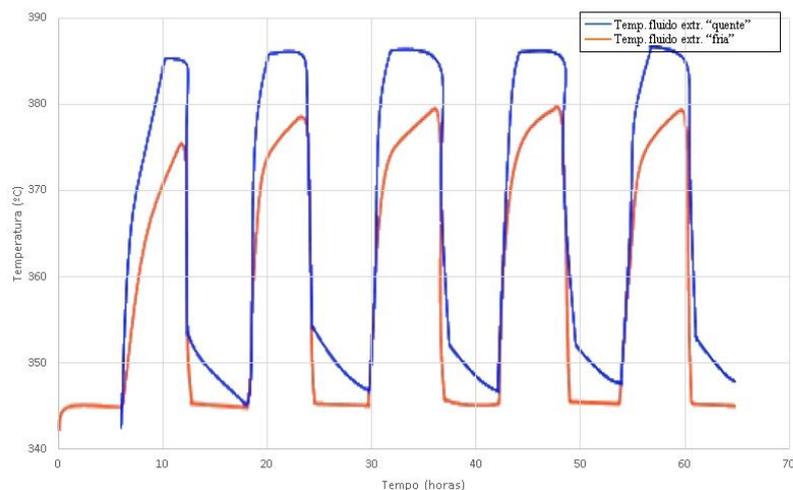


Figura 36 - Desenvolvimento da temperatura do fluido no módulo estudado pelo DLR em vários ciclos de carga/descarga de 6 horas cada durante 72 horas (adaptado da Figura 15)

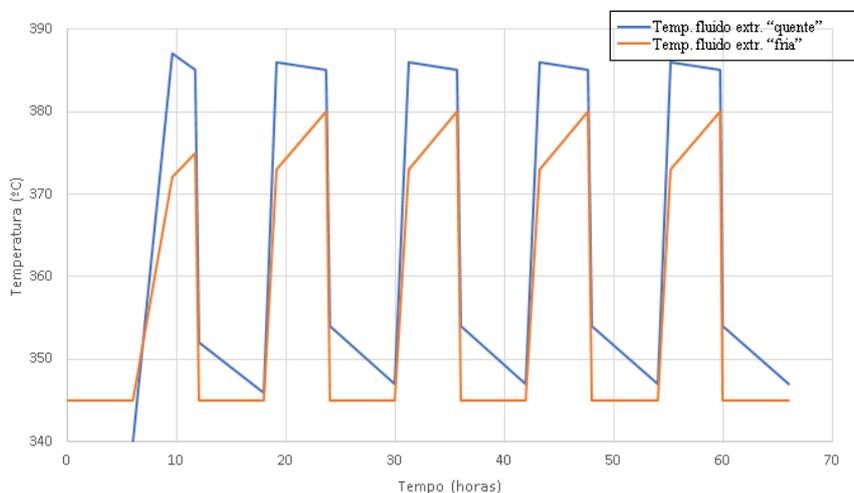


Figura 37 - União de pontos da Figura 35

Através da análise dos resultados e da observação das Figuras 35 e 37 nota-se uma clara semelhança entre valores para o caso do betão com uma mistura de alta temperatura. Quanto às figuras, apesar de ligeiras diferenças nas curvas as semelhanças são evidentes, tendo em consideração que o estudo do DLR é uma medição de um caso real enquanto que o modelo deste estudo é uma simulação e não se sabe detalhadamente todos os fatores do caso do DLR.

Com a análise acima enunciada, considera-se o modelo 2-D desenvolvido como validado com um valor de erro inferior a 1%, podendo-se prosseguir com o estudo objetivo de um caso real a implementar com este método.

5. Caso de estudo

5.1. Simulações sem perdas para o ambiente

Como aplicação prática do modelo desenvolvido, foi realizado um estudo aplicado a um caso específico de um módulo de betão com características especiais a construir na central de demonstração Evora Molten Salt Platform (EMSP) em Évora.

Fez-se um estudo das condições de fronteira de temperaturas à saída do campo de coletores e de aceitação da turbina, bem como todas as outras restrições para elaborar uma configuração teste para a nossa simulação.

A central EMSP situa-se nos arredores de Évora (Anexo 2), a cerca de 10 km da cidade, na localidade de Valverde na Herdade da Mitra (38° 32' N, -8° 01' O) pertença da Universidade de Évora. Este é um espaço propício para a instalação deste tipo de centrais, devido à disponibilidade de irradiação solar e o facto de ser um espaço descampado. O espaço disponível para a construção do módulo de armazenamento encontra-se no extremo sudeste da EMSP, englobando uma área de 40x40m (Anexo 3). O caso estudo tem como objetivo a integração de um sistema de armazenamento de energia teste na central. Esta possuirá um campo de coletores solares com duas tecnologias a implementar, Fresnel linear e concentradores cilíndrico-parabólicos, já dispondo de um sistema de armazenamento de sais fundidos com dois tanques, não se encontrando ainda em funcionamento. Este estudo tem como objetivo verificar o comportamento do módulo de armazenamento nas condições que nos são impostas na central e ver onde e como seria possível implementar um protótipo à escala real nesta mesma central.

O fluido de transferência de calor serão sais fundidos, sendo que a mistura mais utilizada é denominada *Solar Salt* (aproximadamente 60% NaNo₃ e 40% KNO₃). O sal é bombeado para o campo de concentradores a uma temperatura “fria” de 390°C e saem deste a uma temperatura “quente” entre 550-600°C. Existe, portanto, variação do caudal em função da radiação solar disponível. Considerando que as perdas nas tubagens são mínimas ou inexistentes, pode-se assumir que para fins da simulação a efetuar, este entra à temperatura de 555°C no módulo de armazenamento de betão. No capítulo 4 encontram-se as correlações utilizadas para as propriedades do *Solar Salt*.

Considera-se que o módulo de betão está carregado quando se atinge uma temperatura de 550°C na região de saída do módulo sendo a temperatura máxima que o fluido vai poder

atingir no processo de descarga de modo a estar dentro do intervalo de temperaturas de aceitação da turbina. Este intervalo considerou-se entre 390-550°C.

Para os valores de escoamento, foi assumido o valor base utilizado no capítulo 4 para a validação de $20 \text{ m}^3/\text{h}$. Este valor foi, no entanto, dividido pelo número de tubos de modo a obter o caudal para um único tubo de $4,21 * 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ e a consequente velocidade num único tubo de 0,1245 m/s. Este valor é depois novamente multiplicado pelo número de tubos de cada módulo e convertido para horas por questão de comodidade ao se utilizarem valores com poucas casas decimais, resultando no valor do caudal que percorre cada módulo, em m^3/h .

Foram testados dois tipos de configurações, uma que consiste em apenas um módulo com $4*2,5*18 \text{ m}^3(\text{A*L*C})$ e outra com dois módulos de $2,5*2,5*12 \text{ m}^3 (\text{A*L*C})$. O objetivo é avaliar qual das duas configurações permite obter uma maior eficiência no processo de armazenamento de energia.

Várias simulações foram efetuadas para estas configurações, em que se variam o número de tubos nos módulos, tipos de betão, caudal, isolamento, sendo que as propriedades do fluido podem ou não variar consoante a variação da temperatura.

O método de simulação utilizado foi o mesmo daquele utilizado no capítulo 4, em que uma massa específica de betão é atribuída a um tubo, consoante as diferentes configurações apresentadas.

O isolamento é calculado depois de se assumir que todos os tubos (com uma massa específica associada) se comportam igualmente, gerando um módulo de armazenamento com isolamento de 40 cm de lã de rocha, tal como no estudo realizado pelo DLR, com perdas associadas pelas faces do módulo. Procedeu-se a validação das perdas térmicas apresentadas no capítulo 4 através da comparação pelo estudo do módulo de teste do DLR [25], utilizando as dimensões e características aproximadas do material de isolamento apresentado (lã mineral). Pelo cálculo aproximado das perdas de calor pelas paredes do módulo DLR [25] chegou-se à conclusão que existiria uma fundação de apoio de betão com valores entre os 40 e 50 centímetros de profundidade subterrada no solo, que para o nosso caso foi assumida com 50 centímetros por uma questão de ajuste. A Figura 38 é um corte transversal do módulo com isolamento apresenta de uma maneira simples este esquema.

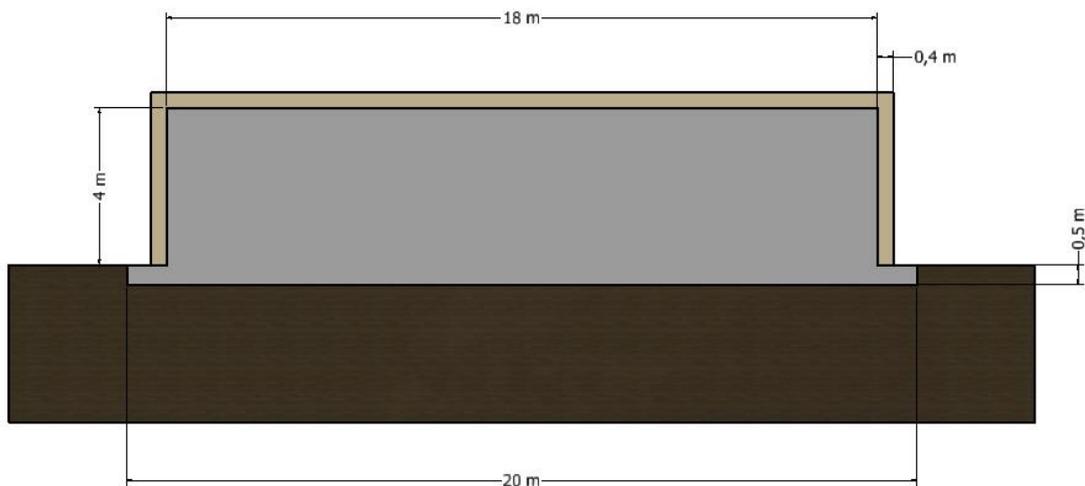


Figura 38 - Corte transversal do módulo incluindo isolamento térmico

Para um primeiro estudo recorreu-se a uma versão mais simplificada do programa de simulação, não existindo perdas térmicas associadas ao módulo de armazenamento. A quantidade de energia armazenada no betão e perdida pelo fluido no processo de carga são semelhantes pois não existem perdas térmicas associadas, acontecendo o mesmo no processo de descarga.

Novamente vão-se efetuar simulações com e sem propriedades do fluido variáveis com a temperatura, sendo que nas simulações em que as propriedades não variam, estas são calculadas a partir de uma temperatura média de funcionamento. Foi efetuado este método pois os programas que utilizam propriedades do fluido variáveis são consideravelmente mais lentos a efetuar a simulação que aqueles que não realizam este processo, sendo algumas comparações em que não é necessária a variação, realizadas com o programa simplificado por comodidade no processamento de informação.

A Tabela 6 descreve as diferentes variações dos casos estudados.

Tabela 6 – Casos de estudo analisados

Caso	Configuração (A*L*C) (m ³)	betão	props. var.	perdas	Caudal (m ³ /h)	ΔT (°C)	nº tubos
1	4*2,5*18	HT	Não	Não	90,9	390-550	600
2	4*2,5*18	HT	Não	Não	75,8	390-550	500
3	4*2,5*18	HT	Não	Não	181,9	390-550	600
4	4*2,5*18	HT	Não	Não	151,6	390-550	500
5	4*2,5*18	HT	Sim	Não	90,9	390-550	600
6	4*2,5*18	fibras	Não	Não	90,9	390-550	600
7	4*2,5*18	grafite	Não	Não	90,9	390-550	600
8	2*(2,5*2,5*12)	HT	Não	Não	90,9	390-550	2*300
9	4*2,5*18	HT	Não	Sim	90,9	390-550	600
10	4*2,5*18	HT	Sim	Sim	90,9	390-550	600
11	4*2,5*18	grafite	Sim	Sim	90,9	390-550	600
12	4*2,5*18	fibras	Sim	Sim	90,9	390-550	600
13	4*2,5*18	quartzo	Sim	Sim	90,9	390-550	600
14	4*2,5*18	Tipo 41	Sim	Sim	90,9	390-550	600
15	4*2,5*18	grafite	Não	Sim	121,2	390-550	400
16	4*2,5*18	grafite	Sim	Sim	121,2	390-550	400
17	4*2,5*18	Tipo 41	Não	Sim	121,2	390-550	400
18	4*2,5*18	Tipo 41	Não	Sim	121,2	390-500	400
19	4*2,5*18	Tipo 41	Sim	Sim	121,2	390-550	400
20	4*2,5*18	grafite	Não	Sim	242,5	390-550	400
21	4*2,5*18	grafite	Sim	Sim	242,5	390-550	400
22	4*2,5*18	Tipo 41	Não	Sim	242,5	390-550	400
23	4*2,5*18	Tipo 41	Não	Sim	242,5	390-500	400
24	4*2,5*18	Tipo 41	Sim	Sim	242,5	390-550	400
25	2*(2,5*2,5*12) (série)	Tipo 41	Sim	Sim	606,2	390-550	1000
26	2*(2,5*2,5*12) (série)	Tipo 41	Sim	Sim	201,9	390-550	1000
27	2*(2,5*2,5*12) (série)	Tipo 41	Sim	Sim	545,6	390-550	900
28	2*(2,5*2,5*12) (série)	Tipo 41	Sim	Sim	201,9	390-550	900
29	2*(2,5*2,5*12) (série)	Tipo 41	Sim	Sim	485,0	390-550	800
30	2*(2,5*2,5*12) (série)	Tipo 41	Sim	Sim	201,9	390-550	800
31	2*(2,5*2,5*12) (série)	Tipo 41	Sim	Sim	424,4	390-550	700
32	2*(2,5*2,5*12) (série)	Tipo 41	Sim	Sim	201,9	390-550	700
33	2*(2,5*2,5*12) (série)	Tipo 41	Sim	Sim	363,7	390-550	600
34	2*(2,5*2,5*12) (série)	Tipo 41	Sim	Sim	201,9	390-550	600
35	2*(2,5*2,5*12) (série)	Tipo 41	Sim	Sim	303,1	390-550	500
36	2*(2,5*2,5*12) (série)	Tipo 41	Sim	Sim	201,9	390-550	500
37	2*(2,5*2,5*12) (série)	Tipo 41	Sim	Sim	242,5	390-550	400
38	2*(2,5*2,5*12) (série)	Tipo 41	Sim	Sim	201,9	390-550	400
39	2*(2,5*2,5*12) (série)	Tipo 41	Sim	Sim	201,9	390-550	333

As Tabelas 7 e 8 mostram algumas variações do caso base que se considerou. A Tabela 8 mostra os valores para as medidas de um só módulo com 4*2,5*18 m³ enquanto a Tabela

9 mostra os valores para dois módulos em paralelo com $2,5*2,5*12 m^3$. O caudal base considerado no módulo é de $90,9 (m^3/h)$ que resulta num caudal de $4,21 * 10^{-5} m^3/s$ dentro do tubo do módulo de armazenamento cilíndrico em estudo. Este valor é o mesmo que o do módulo de armazenamento cilíndrico estudado no capítulo anterior para o caso do estudo do DLR, que resulta num valor de $20 m^3/h$ de caudal no módulo referido por estes.

Tabela 7 - Resultados sem perdas considerando um módulo de $4*2,5*18 m^3$

betão	props. var.	perdas	Caudal (m^3/h)	ΔT ($^{\circ}C$)	nº tubos	t carga/desc. (horas)		E carga/desc. (kWh)	
HT	não	não	90,9	390-550	600	22,7	26,9	19 874	19 868
HT	não	não	75,8	390-550	500	28,2	33,2	19 910	19 909
HT	não	não	181,9	390-550	600	13,8	15,9	19 793	19 787
HT	não	não	151,6	390-550	500	17,5	19,8	19 824	19 823
HT	sim	não	90,9	390-550	600	18,5	19,5	19 998	19 997
fibras	não	não	90,9	390-550	600	12,9	15,5	12 141	12 141
grafite	não	não	90,9	390-550	600	16,4	20,1	20 201	20 201

Tabela 8 - Resultados sem perdas considerando dois módulos de $2,5*2,5*12 m^3$ em paralelo

betão	props. var.	perdas	Caudal (m^3/h)	ΔT ($^{\circ}C$)	nº tubos	t carga/desc. (horas)		E carga/desc. (kWh)	
HT	não	não	90,9	390-550	2*300	26,3	29,5	16 726	16 497

Em primeiro lugar, pode-se reparar que apenas foi feita uma simulação para o caso de dois módulos em paralelo, uma vez que pelos resultados apresentados, dá para concluir que não seria viável a sua instalação devido aos tempos de carga/descarga muito elevados. A relação de energia por m^3 do caso em que se utiliza um só módulo com 600 tubos e betão com uma mistura de alta temperatura é $110,4 kWh/m^3$ enquanto que a configuração com dois módulos para as mesmas condições é $110,7 kWh/m^3$. No entanto, este último demora aproximadamente mais 16% de tempo a carregar e 10% a descarregar, o que torna esta solução menos eficiente em termos de processos. A construção de dois módulos é também mais complicada, sendo também necessário maior quantidade de isolamento, manuseamento mais complicado, bem como requerem maior manutenção.

Existem ligeiras diferenças entre as energias armazenadas no betão e extraídas pelo fluido nos respetivos processos de carga e descarga, podendo ser esta diferença originada por

dois fatores. Um deles é o facto de se assumir uma ligeira perda de calor no início e no final do módulo por transporte, o que originaria uma perda mínima. Outro fator é a sucessão de processos, o que faz com que nem toda energia que é acumulada no betão no processo de carga consiga ser extraída pelo fluido no processo de descarga e assim sucessivamente, originando um erro que varia entre 0,005% e 0,03% para o caso do módulo único, sendo mínimo, podendo ser ignorado. Para o caso de dois módulos em paralelo, este erro é consideravelmente maior (1,4%), sendo que o principal fator que se pode apontar é o facto de se testar um módulo em separado e depois assumir que estes se comportam de maneira semelhante, somando as energias acumuladas.

Com as características apresentadas é também possível observar que a diminuição do número de tubos para 500 no caso do betão com uma mistura de alta temperatura não é uma solução viável pois o tempo de carga aumenta para quase 30 horas, ultrapassando mesmo estas 30 horas no processo de descarga. Para colmatar esta falha simulou-se um caso para 500 tubos em que se utilizou um caudal 2 vezes superior ao caudal do caso base. As energias armazenadas e extraídas mantêm-se idênticas como seria de esperar, tendo os tempos de carga e descarga reduzido significativamente em 38,1% e 40,4% respetivamente, podendo ser esta uma das maneiras de reduzir a quantidade de material utilizado nos módulos.

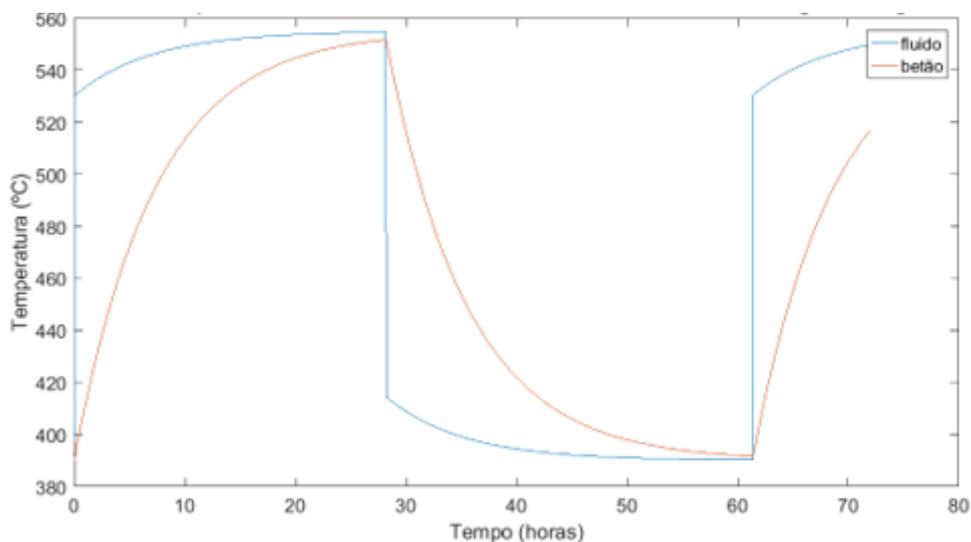


Figura 39 - Desenvolvimento das temperaturas médias do fluido e do betão com uma mistura de alta temperatura para 72 horas de funcionamento sem perdas térmicas nem propriedades variáveis com 500 tubos e com caudal base

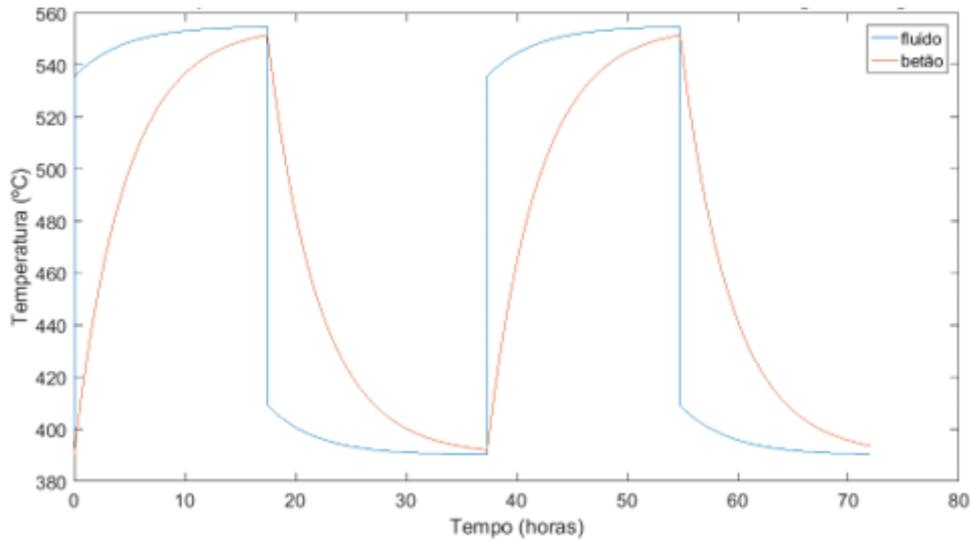


Figura 40 - Desenvolvimento das temperaturas médias do fluido e do betão com uma mistura de alta temperatura para 72 horas de funcionamento sem perdas térmicas nem propriedades variáveis com 500 tubos com o dobro do caudal base

Como é possível observar nas Figuras 39 e 340, com o caudal aumentado para o dobro do caso base consegue-se realizar no mínimo mais um ciclo nas 72 horas de funcionamento para o caso do betão com uma mistura de alta temperatura.

O caso do betão que apresenta uma mistura com fibras apresenta tempos de carga e descarga promissores, sendo as quantidades de energia obtidas nos ciclos um fator menos satisfatório. O betão que apresenta uma mistura com grafite é o que apresenta resultados mais equilibrados, sendo a quantidade de energia nos ciclos superior a qualquer outro caso e os tempos de carga/descarga são aceitáveis.

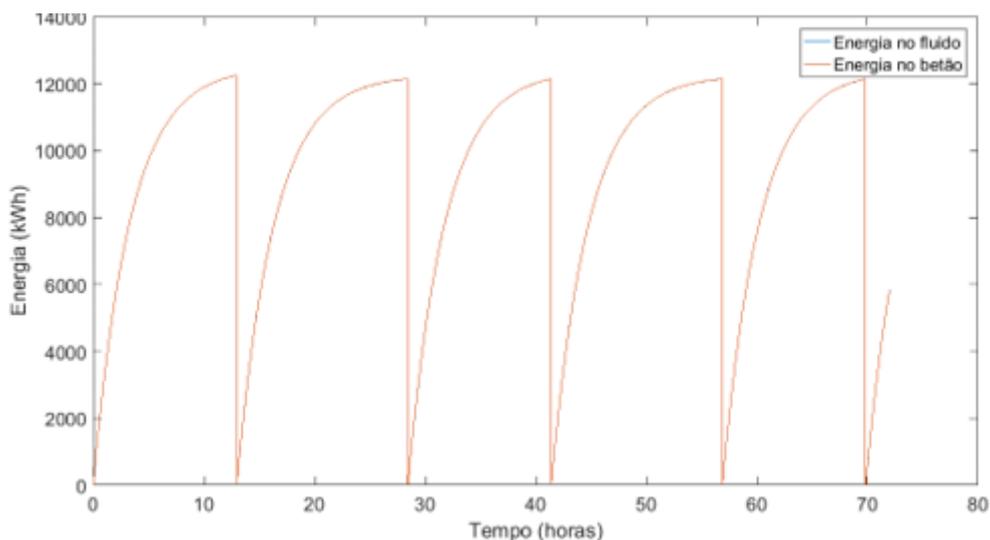


Figura 41 - Variação energética para 72 horas de funcionamento sem perdas térmicas nem propriedades variáveis com 600 tubos para o betão que apresenta uma mistura com fibras

Pela observação da Figura 41 nota-se que o betão que apresenta uma mistura com fibras realiza os ciclos de carga/descarga rapidamente em relação às outras misturas, mas a energia obtida em cada um dos ciclos é relativamente baixa, sendo pouco atrativo para aplicação. Como estes são casos sem perdas térmicas, não é possível distinguir as diferenças entre as energias no betão e no fluido pois estas são idênticas, sendo a transferência de energia quase perfeita, à exceção de pequenos erros já abordados.

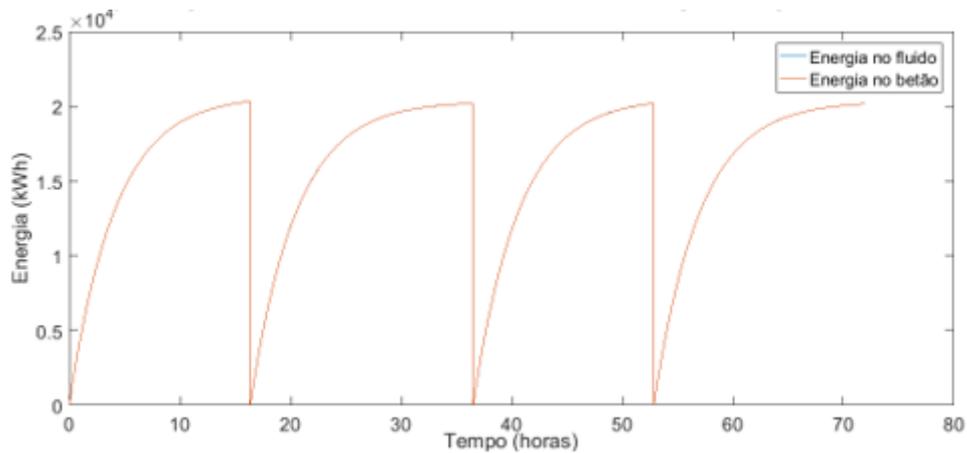


Figura 42 - Variação energética para 72 horas de funcionamento sem perdas térmicas nem propriedades variáveis com 600 tubos para o betão que apresenta uma mistura com grafite

A Figura 42 mostra que o betão que apresenta uma mistura com grafite, apesar de ser mais lento a realizar os ciclos, apresenta uma amplitude energética muito maior, ultrapassando quer na carga quer na descarga os 20 MWh de energia armazenada e extraída, ao contrário dos 12 MWh do betão que apresenta uma mistura com fibras.

5.2. Simulações com perdas térmicas para o ambiente

Tendo sido feita uma triagem a alguns casos inviáveis, procedeu-se à simulação de casos mais detalhados com propriedades variáveis e a incorporação de perdas para o ambiente, com a inclusão de isolamento nas paredes laterais e superior do módulo.

A Tabela 9 mostra os valores obtidos para os casos com perdas.

Tabela 9 - Resultados com perdas e velocidade base considerando um módulo com $4*2,5*18 \text{ m}^3$

betão	props. var.	perdas	Caudal (m^3/h)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	nº tubos	t carga (horas)	t desc. (horas)	E carga (kWh) fluido - betão = perdas	E desc. (kWh) betão - fluido = perdas
HT	não	sim	90,9	390-550	600	27,9	20,4	21 304 - 19 997 = 1 307	19 605 - 18 653 = 952
HT	sim	sim	90,9	390-550	600	21,8	17,1	21 115 - 19 920 = 1 195	19 920 - 19 274 = 646
grafite	sim	sim	90,9	390-550	600	14,8	9,9	22 029 - 20 276 = 1 753	20 276 - 19 511 = 765
fibras	sim	sim	90,9	390-550	600	12,3	9,5	12 933 - 12 176 = 757	12 176 - 11 773 = 403
quartzo	sim	sim	90,9	390-550	600	18,5	14,2	20 885 - 19 626 = 1 259	19 626 - 18 964 = 662
Tipo 41	sim	sim	90,9	390-550	600	16,7	7,7	20 997 - 18 409 = 2 568	18 409 - 17 673 = 736

O primeiro destaque para estes resultados em relação aos resultados em que não existem perdas é que o tempo de descarga foi reduzido em relação ao processo de descarga. Nas simulações sem perdas era o processo de descarga o mais demorado sendo que nas simulações com perdas este se efetua mais rapidamente. Para o primeiro caso da Tabela 9, comparando com o mesmo caso da Tabela 7, pode-se observar um aumento de 22,9% no tempo de carga e uma diminuição de 24,2% no tempo de descarga e um aumento de 0,6% de quantidade de energia armazenada no betão no processo de carga e um decréscimo de 6,1% de quantidade de energia extraída pelo fluido no processo de descarga. Para o segundo caso da Tabela 9, comparando com o quinto caso da Tabela 7 (casos semelhantes à exceção das perdas térmicas), que utiliza o betão com mistura de alta temperatura com propriedades do fluido variáveis com a temperatura, observa-se um aumento de 17,8% no tempo de carga uma diminuição de 12,3% no tempo de descarga e uma diminuição de 0,4% de quantidade de energia armazenada no betão no processo de carga e um decréscimo de 3,6% de quantidade de energia extraída pelo fluido no processo de descarga. Esta variância ocorre devido às perdas térmicas, que fazem com que os módulos demorem mais tempo a carregar e, para o caso de descarga, como existe perda energética, o fluido atinge mais rapidamente a temperatura mínima de aceitação da turbina, existindo menos energia transferida do betão para o fluido de transferência de calor, como se pode observar pelos valores percentuais. A análise com as propriedades do fluido a variar ao longo do tempo permite uma análise mais detalhada, apresentando valores mais fidedignos. Esta diferença pode ser observada nos dois primeiros casos da Tabela 9 simulados, em que se nota um decréscimo nos tempos de carga e descarga, sendo os valores de energia semelhantes (variam em média 0,65% para os valores de energia no

processo de carga e 2,45% no de descarga, sendo que o valor das perdas se reduz em 8,6% no processo de carga e 32,1% no de descarga). Com uma breve comparação dos tipos de betão simulados, percebe-se que para as mesmas condições o betão que apresenta uma mistura com grafite continua a ser o mais atrativo, pois apresenta tempos de carga/descarga relativamente baixos, apenas ultrapassado pelo betão com fibras, sendo a energia transferida e retirada pelo fluido nos processos de carga/descarga muito maiores que neste caso.

Existiu agora a introdução do betão Tipo 41 que apresenta um valor de condutividade muito elevado, sendo que as outras características termofísicas se assemelham ao betão com uma mistura com fibras. Estes tipos de betão apresentam valores de capacidade térmica reduzida. Por outro lado, a densidade apresenta um valor mais elevado, permitindo assim balancear o valor da capacidade de armazenamento ($\rho * c_p$) com o valor de capacidade térmica reduzido.

Posto isto, tentou-se reduzir o número de tubos no inseridos no módulo de armazenamento, com o objetivo de otimizar o custo do módulo no seu total. Como os tipos de betão com grafite e Tipo 41 foram os que apresentaram resultados mais satisfatórios, foi com estes que prosseguimos as simulações mais detalhadas. O objetivo seria encontrar um caso que apresentasse tempos de carga descarga inferiores a 10/8 horas aproximadamente, não comprometendo a energia armazenada e extraída em cada ciclo, tendo em conta os custos de material e de operação.

Para um primeiro caso reduziu-se o número total de tubos para 400 tendo sido aumentada a velocidade do fluido nos tubos para o dobro da velocidade base, resultando num caudal ligeiramente maior que o caudal do caso base ($121,2 \text{ m}^3/\text{h}$). Os resultados estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados com perdas e o dobro da velocidade base considerando dois módulos com $4*2,5*18 \text{ m}^3$

betão	props. var.	perdas	Caudal (m^3/h)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	nº tubos	t carga (horas)	t desc. (horas)	E carga (kWh) fluido - betão = perdas	E desc. (kWh) betão - fluido = perdas
grafite	não	sim	121,2	390-550	400	14,9	10,7	21 632 - 20 105 = 1 527	20 105 - 19 001 = 1 104
grafite	sim	sim	121,2	390-550	400	19,6	11,8	22 556 - 20 199 = 2 357	20 199 - 19 211 = 988
Tipo 41	não	sim	121,2	390-550	400	11,7	8,1	19 836 - 18 300 = 1 537	18 299 - 17 244 = 1 075
Tipo 41	não	sim	121,2	390-500	400	5,5	4,5	8 381 - 7 864 = 517	7 864 - 7441 = 423
Tipo 41	sim	sim	121,2	390-550	400	17,7	9,4	20 952 - 18 354 = 2 598	18 354 - 17 415 = 939

Nota-se que os tempos de carga e descarga aumentam consideravelmente em relação aos casos da Tabela 9 com as mesmas misturas de betão e condições de simulação (32,4% e 19,2% nos processos de carga e descarga respetivamente para o betão que apresenta uma mistura com grafite e 6% e 22,1% nos processos de carga e descarga respetivamente para o betão Tipo 41). As quantidades de energia armazenadas no betão e extraída pelo fluido nestes processos não variam o suficiente para se considerarem relevantes comparados com os valores de variação dos tempos dos ciclos (máximo de variação de 1,5%). O caso em que se usa o betão Tipo 41 apresenta tempos de carga e descarga menores, sendo os valores de energia o fator mais fraco deste betão, sendo menor que o betão que apresenta uma mistura com grafite como já tinha sido visto na Tabela 9. Foi ainda simulado um caso para uma diferença de temperatura entre os 390-500°C, sendo uma variação dos casos anteriores em que se tenta chegar aos 550°C no betão. Isto seria para verificar se seria viável existirem ciclos mais rápidos com uma amplitude energética mais baixa. Podemos verificar este fenómeno nas Figuras 43 e 44.

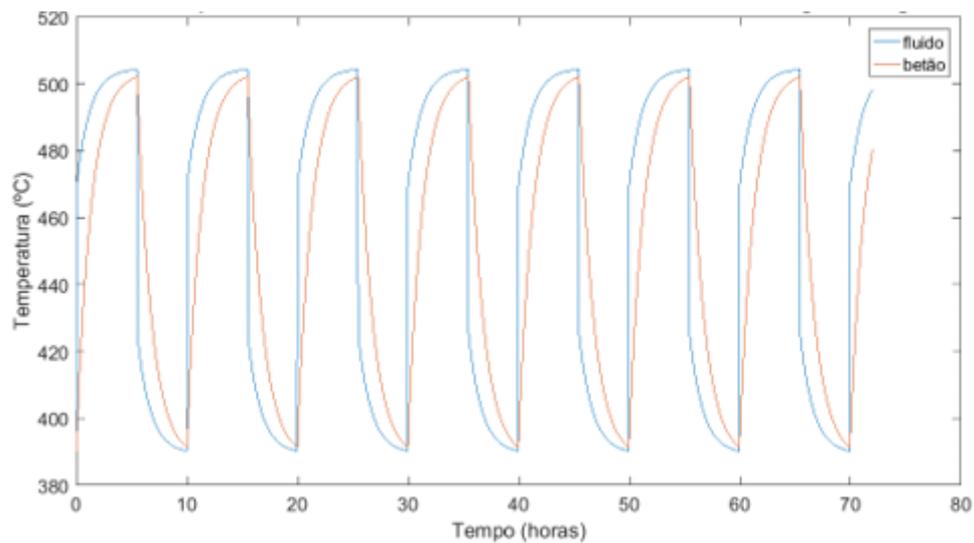


Figura 43 - Desenvolvimento das temperaturas médias do fluido e do betão Tipo 41 para 72 horas de funcionamento com perdas térmicas, sem propriedades variáveis com 400 tubos com o dobro da velocidade base

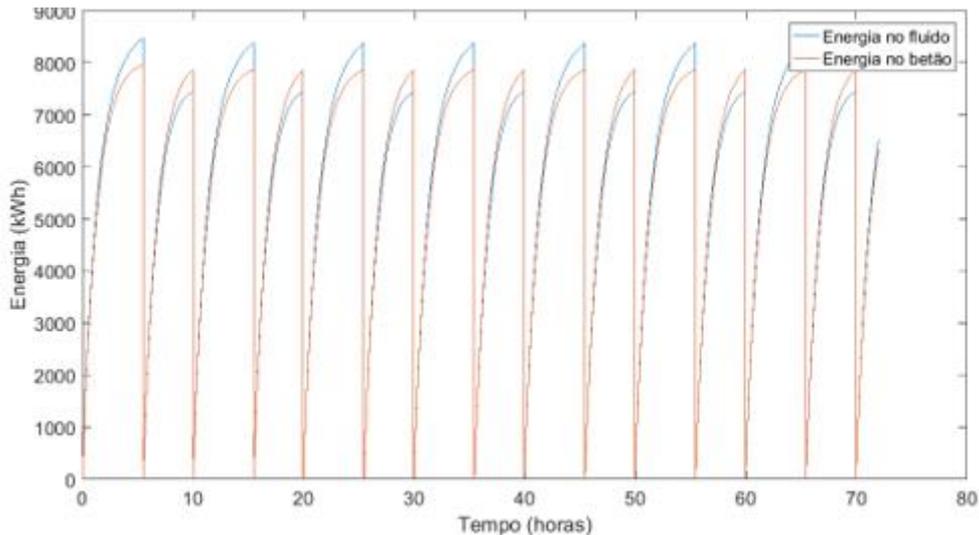


Figura 44 - Variação energética para 72 horas de funcionamento com perdas térmicas, sem propriedades variáveis com 400 tubos e com o dobro da velocidade base para o betão Tipo 41

Para verificar qual dos processos compensa mais em termos de energia por unidade de tempo dividiu-se a soma das energias armazenadas e extraídas pelo fluido pela soma dos tempos destes processos, dando assim um valor de potência. Os valores de potência dos casos da Tabela 10 estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Resultados de potência com perdas e o dobro da velocidade base considerando um módulo com $4*2,5*18 \text{ m}^3$

betão	props. var.	perdas	Caudal (m^3/h)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	nº tubos	Potência (kW)
grafite	não	sim	121,2	390-550	400	1 528
grafite	sim	sim	121,2	390-550	400	1 255
Tipo 41	não	sim	121,2	390-550	400	1 795
Tipo 41	não	sim	121,2	390-500	400	1 530
Tipo 41	sim	sim	121,2	390-550	400	1 320

Fazendo a análise da Tabela 11, o betão Tipo 41 apresenta um valor de 1795 kW para 1528 kW do betão que apresenta uma mistura com grafite nos casos sem as propriedades do fluido variáveis com a temperatura. Quando estas propriedades se variam os valores descem consideravelmente. No entanto, o betão tipo 41 apresenta novamente valores mais elevados, sendo novamente o mais atrativo em termos de valores apresentados. Para o caso em que se atinge apenas os 500°C no processo de carga para o betão, a análise de potência apenas atinge os 1531 kW para o betão Tipo 41, sendo mais baixo que o caso em que se atingem os 550°C . Sabendo ainda que mais ciclos implicam maior desgaste do betão, este caso torna-se inviável.

Sendo estes tempos de processos de carga e descarga ainda elevados, aumentou-se ainda mais a velocidade do fluido dentro dos tubos, sendo esta agora quatro vezes superior à velocidade base. O tempo de carga diminuiu significativamente, sendo um desenvolvimento positivo na eficiência dos processos, atingindo agora valores mais aliciantes. Os valores estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados com perdas e velocidade quatro vezes o valor base considerando um módulo de $4*2,5*18 \text{ m}^3$

betão	props. var.	perdas	Caudal (m^3/h)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	nº tubos	t carga (horas)	t desc. (horas)	E carga (kWh) fluido - betão = perdas	E desc. (kWh) betão - fluido = perdas
grafite	não	sim	242,5	390-550	400	11,6	8,7	21 053 - 19 853 = 1 200	19 852 - 18 963 = 889
grafite	sim	sim	242,5	390-550	400	13,7	9,6	21 689 - 20 023 = 1 666	20 023 - 19 216 = 807
Tipo 41	não	sim	242,5	390-550	400	8,7	6,5	19 268 - 18 116 = 1 152	18 115 - 17 254 = 861
Tipo 41	não	sim	242,5	390-500	400	4,2	3,4	8 144 - 7 754 = 390	7 754 - 7426 = 328
Tipo 41	sim	sim	242,5	390-550	400	10,5	7,2	19 878 - 18 241 = 1 637	18 241 - 17 461 = 780

Os tempos de carga e descarga diminuíram como era esperado, situando-se agora os valores próximos das 8/10 horas que eram objetivo. Na Tabela 13 segue-se a análise de potência que é feita com a relação da divisão da energia armazenada e extraída do módulo com os tempos de carga e descarga.

Tabela 13 - Resultados de potência com perdas e velocidade quatro vezes o valor base considerando um módulo com $4*2,5*18 \text{ m}^3$

betão	props. var.	perdas	Caudal (m^3/h)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	nº tubos	Potência (kW)
grafite	não	sim	242,5	390-550	400	1 912
grafite	sim	sim	242,5	390-550	400	1 684
Tipo 41	não	sim	242,5	390-550	400	2 327
Tipo 41	não	sim	242,5	390-500	400	1 997
Tipo 41	sim	sim	242,5	390-550	400	2 017

Os valores seguem um padrão semelhante ao da Tabela 12 em que o betão Tipo 41 se destaca novamente com valores mais elevados de potência.

Para finalizar a análise antes da modelação de um módulo “ideal”, decidiu-se estudar um outro caso com uma configuração de dois módulos, sendo que desta vez estes se encontram em série e com uma velocidade dentro dos tubos aumentada para quatro vezes o valor base, pois foi com este valor que se atingiram tempos de carga e descarga mais aliciantes. Os módulos estão em série para aproveitar melhor a transferência de energia

do fluido para o módulo e vice-versa. Como o volume dos dois módulos em série é mais baixo que os apenas um módulo individual, foi feito um ajuste para saber qual o número de tubos a colocar nestes dois módulos, atribuindo um valor de massa a cada tubo, como foi feito nas situações anteriores. Equivalente a um módulo de volume de $4*2,5*18 m^3$ com 400 tubos, teríamos para a mesma zona de influência um volume de dos módulos de $2,5*2,5*12 m^2$ com 333 tubos. A Tabela 14 apresenta vários casos para esta configuração de dois módulos em série para a mistura de betão Tipo 41 e a Tabela 15 os respetivos valores de potência.

Tabela 14 - Resultados com perdas considerando dois módulos com $2,5*2,5*12 m^3$ em série.

betão	props. var.	perdas	Caudal (m^3/h)	ΔT ($^{\circ}C$)	nº tubos	t carga (horas)	t desc. (horas)	E carga (kWh) fluido - betão = perdas	E desc. (kWh) betão - fluido = perdas
Tipo 41	sim	sim	363,7	390-550	600	3,5	2,9	15 935 – 15 235 = 700	15 132 – 14 730 = 402
Tipo 41	não	sim	242,5	390-550	400	5,2	4,1	16 029 - 15 126 = 903	15 125 - 14 423 = 723
Tipo 41	sim	sim	242,5	390-550	400	6,6	4,5	16 643 - 15 313 = 1 330	15 197 - 14 556 = 641
Tipo 41	não	sim	201,9	390-550	333	6,9	4,9	16 341 - 15 140 = 1 201	15 139 - 14 287 = 852
Tipo 41	sim	sim	201,9	390-550	333	9,7	5,5	17 168 - 15 203 = 1 965	15 203 - 14 421 = 782

Tabela 15 - Resultados de potência com perdas e velocidade quatro vezes o valor base considerando dois módulos com $2,5*2,5*12 m^3$ em série

betão	props. var.	perdas	Caudal (m^3/h)	ΔT ($^{\circ}C$)	nº tubos	Potência (kW)
Tipo 41	sim	sim	363,7	390-550	600	4 682
Tipo 41	não	sim	242,5	390-550	400	3 177
Tipo 41	sim	sim	242,5	390-550	400	2 690
Tipo 41	não	sim	201,9	390-550	333	2 494
Tipo 41	sim	sim	201,9	390-550	333	1 949

Pela análise das Tabelas 14 e 15 observa-se que os tempos de carga e descarga são muito aliciantes, sendo, no entanto, os valores de energia ligeiramente menores que os casos da configuração com um só módulo, isto pois esta configuração apresenta um volume total de betão mais baixo. A Figura 45 mostra a variação das temperaturas no fluido e no betão Tipo 41 para a configuração de dois módulos em série, 333 tubos e velocidade quatro vezes superior ao caso base.

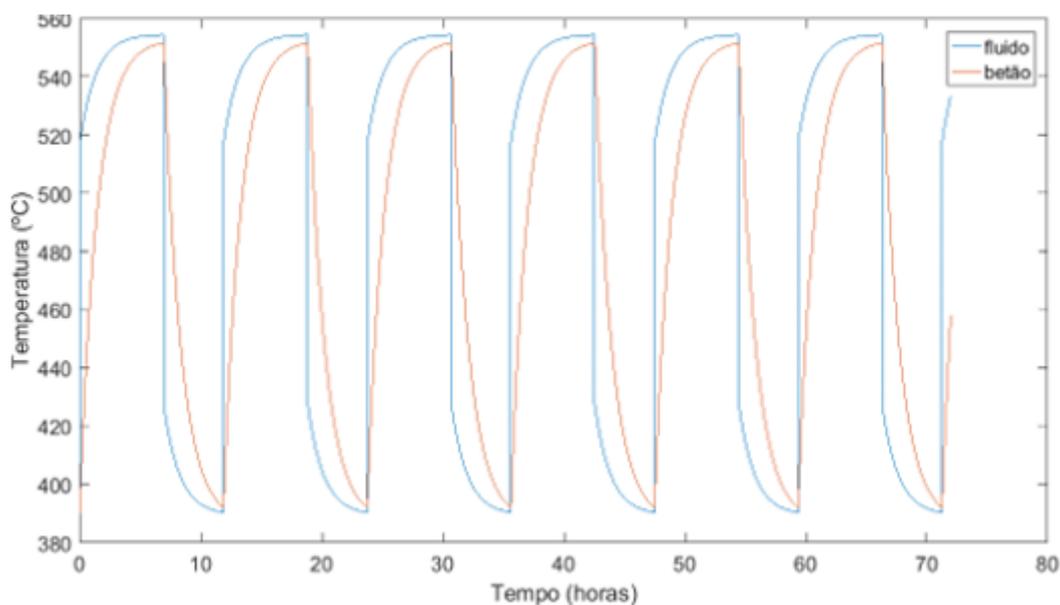


Figura 45 - Desenvolvimento das temperaturas médias do fluido e do betão Tipo 41 para 72 horas de funcionamento com perdas térmicas, sem propriedades variáveis com 333 tubos com 4 vezes o valor da velocidade base. (2*(2,5*2,5*12))

O primeiro caso da Tabela 14 apresenta um valor de potência muito elevado comparado com os dos outros casos. No entanto este utiliza o mesmo número de tubos que usamos nas configurações da Tabela 13 em que apenas se utiliza um módulo. Tendo em conta que o volume total é menor que nos casos anteriores, foi feito o ajuste já referido a partir dos volumes e chegámos ao segundo caso que contém apenas 333 tubos. Contudo o valor de potência continua a ser mais elevado que o caso da configuração anterior (4*2,5*18) para a mesma mistura de betão Tipo 41 sem propriedades variáveis, o que mostra que este caso pode ser mais rentável numa aplicação real.

5.3 Estimativa de custos

Para finalizar este estudo realizou-se uma análise de custos energéticos para saber qual a configuração combina um custo aliciante com uma melhor eficiência dos processos de carga/descarga (Anexo 7).

Como o custo médio do betão Tipo 41 não pode ser determinado pois esta é uma mistura que ainda se encontra a ser melhorada, analisaram-se vários tipos de misturas de betão semelhantes em termos de propriedades em estudos já realizados por Emerson et al (Tabela 16) [52]. Foi concluído através das análises das diferentes misturas (Anexo 7) que o custo referenciado pela empresa cimentícia que desenvolveu o betão Tipo 41 (SECIL) de 220 €/m³ está de acordo com os custos apresentados por Emerson et al. O

custo dos tubos de aço inoxidável foi obtido através de um orçamento pedido a uma empresa de distribuição deste tipo de material (Nicolau e Rosa) e atinge um valor médio de 2,5 €/kg com um volume de acordo com os comprimentos dos módulos, sendo que os raios internos e externos são sempre iguais. O isolamento de lã de rocha tem um valor de 1,6 €/kg, valor obtido através de consulta do website de uma empresa fornecedora do material (OBRAS360), isolando o respetivo módulo nos lados e topo, com uma espessura de 0,4 m.

Tabela 16 - Diferentes misturas de betão estudadas por Emerson et al [52]

Mistura de betão	Densidade (kg/m^3)	Calor específico ($J/kg.K$)	Condutividade térmica ($W/m.K$)	Custo ($€/m^3$)
2	2 163	1 101	2,15	203
3	2 163	1 097	2,09	337
6	2 275	1 160	2,20	221
7	2 275	1 068	2,41	183
8	2 275	1 122	2,28	171
9	2 275	1 084	2,30	270
10	2 275	1 160	2,13	246
26	2 531	-	2,99	430

Em baixo, apresenta-se a Tabela 17 com os valores obtidos para os custos de diferentes configurações. O valor do caudal não altera o custo final do módulo, sendo que o custo da quantidade de sais que percorre o módulo não é significativa para incluir no estudo do custo. Foram estudadas versões com dois tipos de caudal. Um em que se mantém o caudal total em 201,9 (m^3), que é o caudal base da configuração com 333 tubos, dividindo-se depois este caudal pelos tubos do módulo. Para o segundo, assume-se que existe sempre um caudal igual num só tubo, que é quatro vezes o caudal base, fazendo-se posteriormente a soma para todos os tubos, aumentando o caudal total à medida que se aumenta o número de tubos.

Tabela 17 - Custos das diferentes configurações de módulos de betão Tipo 41

Betão	Configuração (m^3)	Perdas	Props. Var.	Caudal (m^3/h)	ΔT ($^{\circ}C$)	nº tubos	Custo (€)
Tipo 41	4*2,5*18	Sim	Sim	90,9	390-550	600	60 583
Tipo 41	4*2,5*18	Sim	Sim	121,2	390-550	400	55 240
Tipo 41	4*2,5*18	Sim	Sim	201,9	390-550	400	55 240
Tipo 41	4*2,5*18	Sim	Sim	242,5	390-550	400	55 240
Tipo 41	4*2,5*18	Sim	Sim	136,4	390-550	900	68 596
Tipo 41	4*2,5*18	Sim	Sim	181,9	390-550	1200	76 610
Tipo 41	2*(2,5*2,5*12) (série)	Sim	Sim	606,2	390-550	1000	73 070
Tipo 41	2*(2,5*2,5*12) (série)	Sim	Sim	363,7	390-550	600	58 904
Tipo 41	2*(2,5*2,5*12) (série)	Sim	Sim	242,5	390-550	400	51 821
Tipo 41	2*(2,5*2,5*12) (série)	Sim	Sim	201,9	390-550	333	49 448

Se compararmos o custo por kg, os tubos de aço inoxidável são os mais caros juntamente com a lã de rocha (Anexo 7) (com o custo apresentado pela empresa cimentícia que desenvolveu o betão Tipo 41 a rondar os 0,10 €/kg). Quando aumentamos o número de tubos o custo da configuração sobe em demasia.

Para 24h de funcionamento, em que a energia disponível é calculada através da soma da energia armazenada no betão no processo de carga e extraída pelo fluido no processo de descarga para o número de ciclos respetivo para a mesma configuração, apresenta-se o custo por unidade de energia na Tabela 18.

Tabela 18 - Relação entre custos por unidade de energia de diferentes configurações com dois módulos com várias quantidades de tubos e caudais variáveis para uma configuração com dois módulos em série.

Betão	Perdas	Props. Var.	Caudal (m ³ /h)	ΔT (°C)	nº tubos	Custo (€)	Energia disponível em 24h (kWh)	Custo por unidade energia (€/kWh)
Tipo 41	Sim	Sim	606,2	390-550	1000	75 041	225 120	0,33
Tipo 41	Sim	Sim	201,9	390-550	1000	75 041	129 815	0,58
Tipo 41	Sim	Sim	545,6	390-550	900	71 302	195 679	0,36
Tipo 41	Sim	Sim	201,9	390-550	900	71 302	122 156	0,58
Tipo 41	Sim	Sim	485,0	390-550	800	67 564	169 513	0,40
Tipo 41	Sim	Sim	201,9	390-550	800	67 564	110 770	0,61
Tipo 41	Sim	Sim	424,4	390-550	700	63 825	143 557	0,44
Tipo 41	Sim	Sim	201,9	390-550	700	63 825	100 211	0,64
Tipo 41	Sim	Sim	363,7	390-550	600	60 087	116 812	0,51
Tipo 41	Sim	Sim	201,9	390-550	600	60 087	90 204	0,67
Tipo 41	Sim	Sim	303,1	390-550	500	54 348	91 182	0,6
Tipo 41	Sim	Sim	201,9	390-550	500	54 348	74 351	0,73
Tipo 41	Sim	Sim	242,5	390-550	400	52 609	66 234	0,79
Tipo 41	Sim	Sim	201,9	390-550	400	52 609	60 956	0,86
Tipo 41	Sim	Sim	201,9	390-550	333	50 104	45 089	1,11

Como é possível observar pela Tabela 18 o aumento do número de tubos permite uma redução do custo por unidade de energia. Mesmo quando se mantém o caudal total em 201,9 m³/h, originando um caudal mais baixo em cada tubo, como por exemplo quando se utilizam 600 e 1000 tubos, o custo por kWh reduz-se em 39,6% e 47,8% respetivamente.

No entanto isto pode não significar uma opção completamente viável, sendo necessária a análise de todos os componentes.

A Figura 46 apresenta a redução do custo por unidade de energia dos módulos com diferente número de tubos de forma progressiva, comparando com o modelo imediatamente anterior com menor número de tubos, para os casos em que se mantém o caudal da situação de 333 tubos ($201,9 \text{ m}^3/\text{h}$) e em que se mantém um caudal quatro vezes superior ao caudal base em cada tubo, aumentando este à medida que se aumenta o número de tubos.

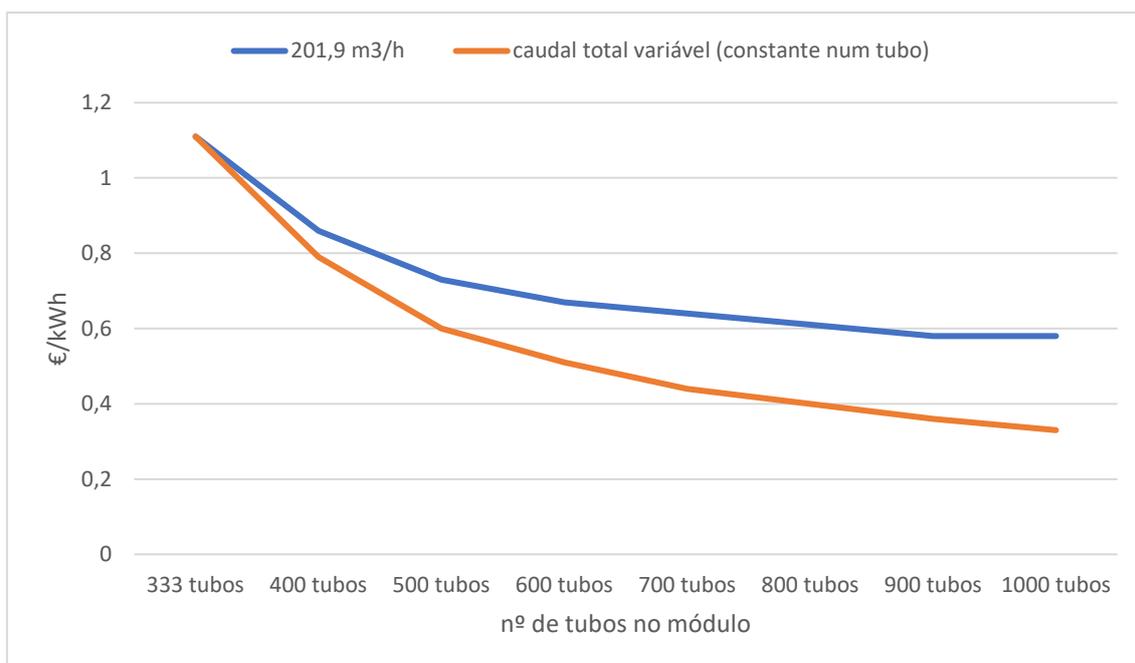


Figura 46 - Variação do custo por energia com a variação do número de tubos colocados no módulo

Como é possível observar, os valores formam uma curva quase exponencial, em que a partir de um certo valor de tubos o custo por kWh quase não reduz, podendo-se assumir, portanto, um valor em que este custo não justifica o investimento inicial ou as alterações na estrutura dos módulos. A Tabela 19 apresenta a percentagem de queda do custo por unidade de energia de algumas configurações em relação à configuração com menor número de tubos anterior.

Tabela 19 - Distância entre tubos e queda do valor de custo por unidade de energia para diferentes configurações

Nº tubos	Distância entre tubos (mm)	Relação entre configurações	Queda do valor de €/kWh (%) (201,9 m^3/h)	Queda do valor de €/kWh (%) (Caudal Variável (4x caudal base))
333	146	-	-	-
400	130	333-400	22,5	28,8
500	118	400-500	15,1	24,1
600	107	500-600	8,2	15,0
700	102	600-700	4,5	13,7

Pode-se observar que quando se passa de uma configuração com 333 tubos para 400 tubos, observa-se uma diminuição do valor do custo por unidade de energia (kWh) de 28,8%, sendo que este valor desce para 24,1% quando se aumenta o número de tubos para 500. Esta é a última diminuição significativa, sendo que quando se passa para uma configuração com 600 tubos o valor de custo por unidade de energia desce apenas 15% em relação ao valor com 500 tubos. A partir deste valor as diminuições são mais ligeiras, atingindo uma diminuição de 8,3% quando se passa de uma configuração com 900 tubos para 1000 tubos.

Também a distância entre tubos fica bastante reduzida, atingindo um valor muito próximo de 100 para o caso com 700 tubos. Este espaçamento é já curto para o tipo de módulo que se pretende construir, originando tubos muito próximos uns dos outros, originando mais facilmente fendilhação na estrutura.

O caudal é também um fator muito importante, pois se o caudal for mantido em cada tubo (4 vezes o valor do caudal base em cada tubo nestes casos), quando se aumenta bastante o número e tubos o valor do caudal total vai atingir valores demasiado elevados como é o exemplo da configuração com 1000 tubos em que o caudal total ultrapassa os 600 m^3/h . Como se pode observar na coluna do custo por unidade de energia da Tabela 19 é nestes casos em que se atingem valores mais reduzidos, sendo que a amplitude não é tão grande quando se utiliza um caudal total constante nos módulos (201,9 m^3/h).

Portanto de modo a existir um equilíbrio entre custo do investimento inicial do módulo, custo por unidade de energia e um caudal e uma configuração de tubos que seja construtivamente realizável, assumiu-se que a configuração mais adequada seria aquela que utiliza 500 tubos.

6. Conclusão

O betão Tipo 41 é aquele que apresenta melhor desempenho em todas as configurações e condições testadas, tendo sido o tipo de betão escolhido para o módulo final, devido principalmente à elevada condutividade, permitindo eficiência nos processos de transferência de energia. Este betão provém de um desenvolvimento laboratorial por parte da empresa SECIL, estando sempre em desenvolvimento novos tipos de betão com propriedades melhoradas, sendo estas propriedades bastante otimizadas comparando com as misturas já testadas em estudos anteriores.

Pela análise de energia transferida em relação à duração dos processos de carga e descarga nas Tabelas 12, 13, 14 e 15 chegamos à conclusão que estes são mais eficientes quando são utilizados dois módulos de betão mais pequenos em série. Esta eficiência deve-se maioritariamente a um maior comprimento dos dois módulos em série (24 m) em relação a um só módulo (18 m), o que faz com que o fluido esteja mais tempo dentro dos tubos a transferir energia para o módulo. Isto permite também aumentar o caudal de fluido, aumentando o rácio de energia transferida, levando a uma necessidade de menos tubos inseridos nos módulos, reduzindo o custo geral do módulo. Esta é uma grande vantagem pois os tubos são um material com um custo elevado, sendo que é necessária uma grande quantidade deste material, tendo isto bastante impacto no custo final do módulo. Conclui-se, portanto, que o caso 35, em que se utilizam dois módulos de betão Tipo 41 em série com 500 tubos e considerando perdas térmicas para o ambiente, propriedades do fluido de transferência de calor variáveis com a temperatura, um delta T no betão de 390-550°C, um caudal de 303,1 m³/h é o que apresenta melhores resultados.

Este módulo de armazenamento de teste servirá de apoio ao sistema de armazenamento já existente na EMSP, permitindo armazenar uma parte da energia produzida na central através da circulação de sais fundidos no interior do módulo. Os resultados simulados para o módulo necessitam de ser validados através da construção de um protótipo, sendo submetido a um plano de testes específico considerando a realização de diversos ciclos de carga e descarga, bem como análise da sua durabilidade.

Estudos publicados em 2013 [52] concluíram que os custos do betão para este tipo de armazenamento poderiam atingir um mínimo de 105 €/m³[52] o que resultaria em 0,72 €/kWhth, comparando com valores por vezes superiores a 25 €/kWhth, como é o caso do

armazenamento sob a forma de sais fundidos em dois tanques [53]. O preço do betão tipo 41 situa-se nos 220 €/m³[54], o que resulta em 2,14 €/kWhth, sendo que a sua elevada condutividade térmica é uma vantagem clara para a utilização deste material.

Apresenta-se o esquema final da configuração do módulo escolhido nas Figuras 47 e 48, encontrando-se as respetivas dimensões do módulo de um módulo de betão no anexo 4 e as medidas exteriores no anexo 5.

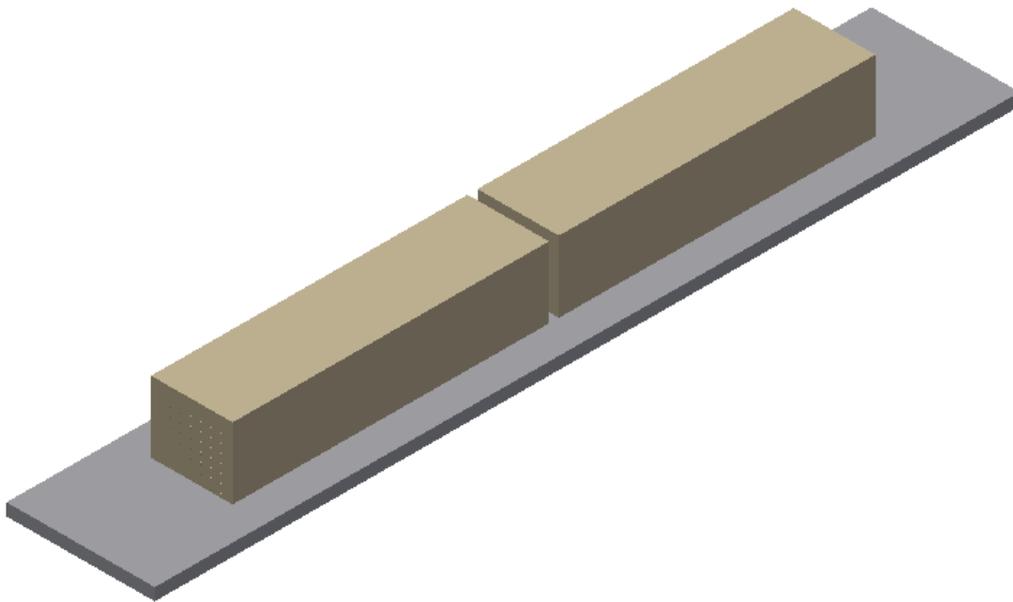


Figura 47 - Módulo final com isolamento

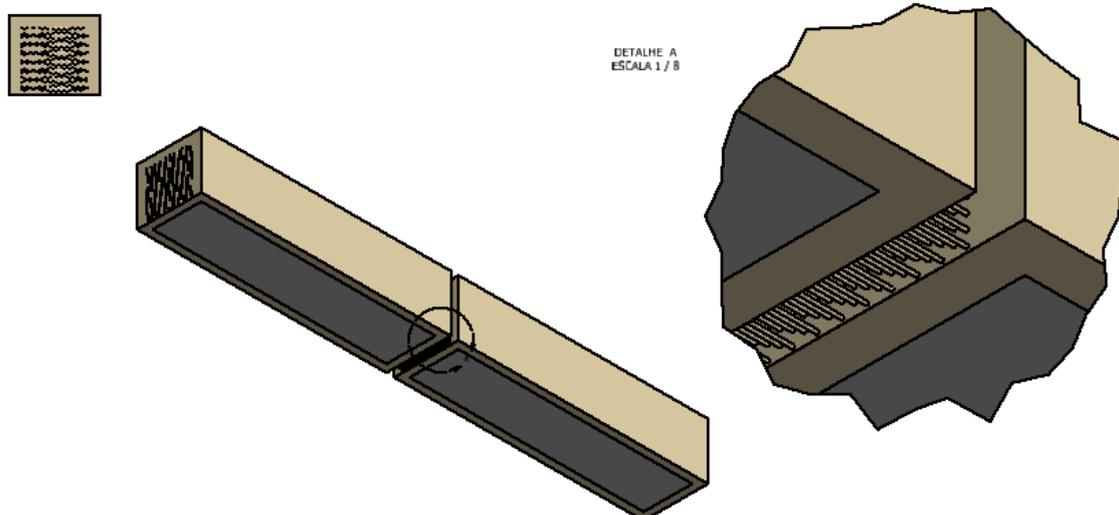


Figura 48 - Detalhe da ligação dos dois módulos na configuração final

6.1. Investigação futura

Em termos de simulação pode existir no futuro um aprimoramento do código com o intuito de se testar diferentes geometrias de tubos por exemplo com chapas de aço soldadas aos tubos para aumentar a área de transferência de calor, ou melhorar as capacidades deste mesmo código de maneira a existir maior detalhe e precisão nos componentes e fatores analisados.

Uma das geometrias tubulares discutidas consistia em agregar uma chapa fina de metal na parte superior dos tubos para aumentar a área de contacto entre estes e o betão com um volume de $l \cdot e \cdot C$, sendo C o comprimento do módulo com volume $L \cdot A \cdot C$ como mostra a Figura 49. Esta investigação poderá realizar-se no seguimento do trabalho realizado e apresentado nesta Tese.

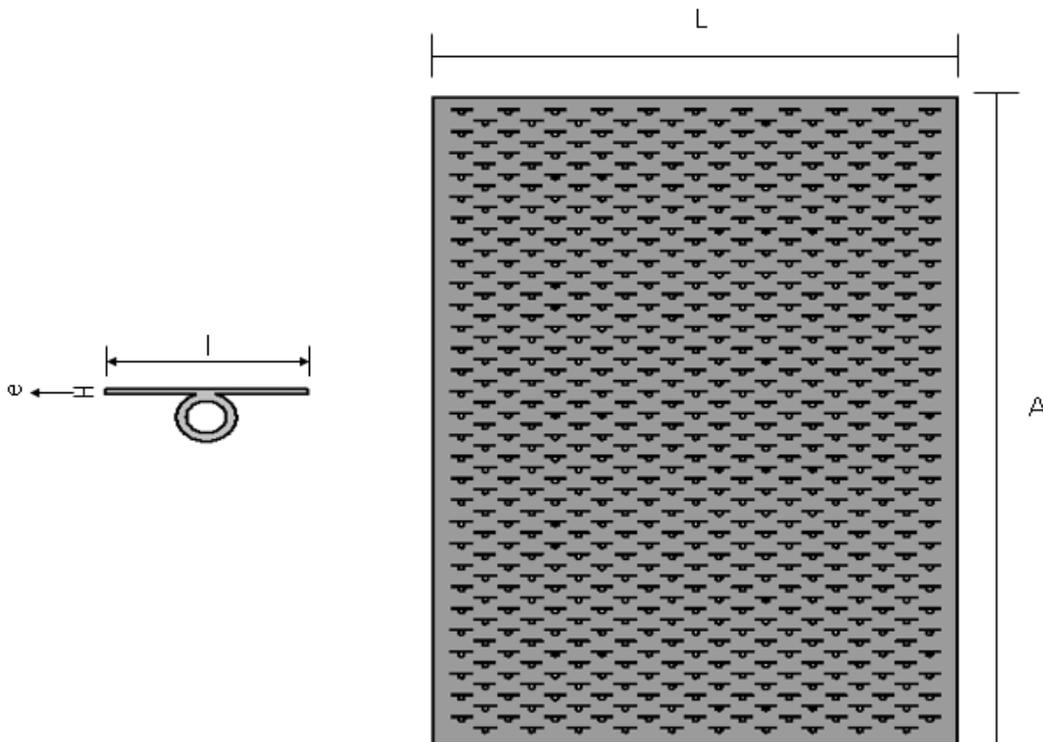


Figura 49 - Esboço do arranjo dos tubos com chapa metálica e aplicação no módulo

Referências

- [1]. <http://www.estelasolar.org/market-outlook/> (acedido em 2016)
- [2]. http://www.solarpaces.org/wp-content/uploads/gp-estela-solarpaces_solar-thermal-electricity-global-outlook-2016_full-report.pdf (acedido em 2016)
- [3]. Narula M, Gleckman Philip. Central receiver vs. linear Fresnel: a comparison of direct molten salt csp plants, Proceedings of SolarPACES-2012 conference, 2012.
- [4]. International Energy Agency, Technology Roadmap Concentrating Solar Power, 2010.
- [5]. G. Morin, W. Platzer, M. Strelow, Reinhard Leithner², Techno-economic system simulation and optimization of solar thermal power plants, 14th SolarPACES International Symposium, Las Vegas, USA March 2008.
- [6]. Technology roadmap – Solar Heating and Cooling. IEA, 2012.
- [7]. Walter Short, Daniel J. Packey, and Thomas Holt, A Manual for the Economic Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies, NREL/TP-462-5173, March 1995.
- [8]. Bialobrzeski R, Optimization of a SEGS solar field for cost effective power output, Georgia Institute of Technology, 2007.
- [9]. A. Häberle, M. Berger, F. Luginsland, C. Zahler, M. Baitsch, H.M. Henning, M. Rommel, Linear Concentrating Fresnel Collector for Process Heat Applications, 3rd European Solar Thermal Conference Estec2007, Freiburg, Germany, 2007.
- [10]. Kuravi S, Trahan J., Goswami D. Y, Rahman M. M, Stefanakos K. E. Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants, Progress in Energy and Combustion Science 39; 2013; p.285-319.
- [11]. M. Passoni and M. Radice, Analisi tecnico-economica di sistemi di accumulo per impianti solari termodinamici a concentrazione parabolico-lineare, Archivio tesi Politecnico di Milano: [<https://www.politesi.polimi.it>], 2011.
- [12]. Dincer I, Rosen MA. Thermal energy storage, systems and applications. New York: Wiley; 2002.
- [13]. S. Relloso, E. Delgado, SolarPaces 2009, Berlin, 15-19 September 2009.
- [14]. J. I. Burgaleta, S. Arias, D. Ramirez, SolarPACES 2011, Granada, 20-23 September 2011.

- [15]. Fichtner (2010), Technology Assessment of CSP Technologies for a Site-Specific Project in South Africa Final Report, The World Bank and ESMAP, Washington D.C.
- [16]. http://www.nrel.gov/csp/troughnet/pdfs/uh_storage_overview_ws030320.pdf (acedido em 2016)
- [17]. Solar thermocline storage systems: preliminary design study. EPRI, Palo Alto, CA: 2010. 1019581
- [18]. Tian Y, Zhao C.Y. A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications, *applied Energy* 104; 2013, p.538-553.
- [19]. John E, Hale M, Selvam P. Concrete as a thermal energy storage medium for thermocline solar energy storage systems, *Solar Energy* 96; 2013; p.194-204.
- [20]. Gil A., Medrano M., Martorell I., Lázaro A., Dolado P., Zalba B., Cabeza L. F., State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 31–55.
- [21]. Pilkington Solar International, GmbH. Survey of thermal storage for parabolic trough power plants. National Renewable Energy Laboratory; 2000 [SR-550-27925].
- [22]. Herrmann U, Geyer M, Kearney D. Overview on thermal storage systems. Workshop on Thermal Storage for Trough Power Plants. FLABEG Solar International GmbH; 2006
- [23]. Laing D, Steinmann WD, Tamme R, Richter C. Solid media thermal storage for parabolic trough power plants. *Solar Energy* 2006;80:1283–9.
- [24]. Tamme R, Steinmann W, Laing D. Thermal energy storage technology for industrial process heat applications. In: *Proceedings of the International Solar Energy Conference*; 2005. p. 417–22.
- [25]. Laing D, Steinmann W-D. Tamme R, Richter C, Solid media thermal storage for parabolic trough power plants, *Solar Energy* 80; 2006; p.1283-1289.
- [26]. Laing D, Lehmann D, Bahl C. Concrete storage for solar thermal power plants and industrial process heat, 3rd International Renewable energy storage Conference, Berlin, 2008.
- [27]. Laing D, Bahl C, Bauer T, Fiss M, Breidenbach N, Hempel M. High-temperature solid-media thermal energy storage for solar thermal power plants, *proceedings of the IEEE*, vol.100, No.2; 2012.

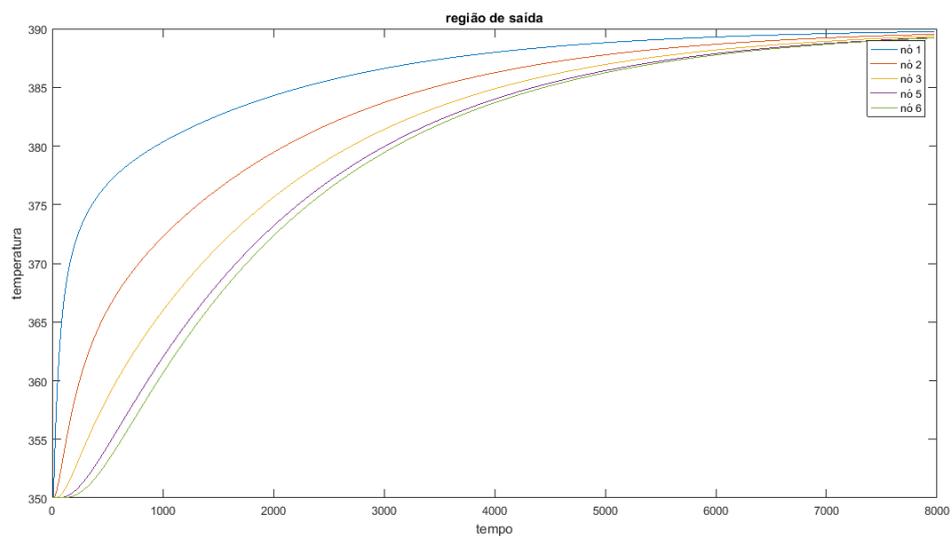
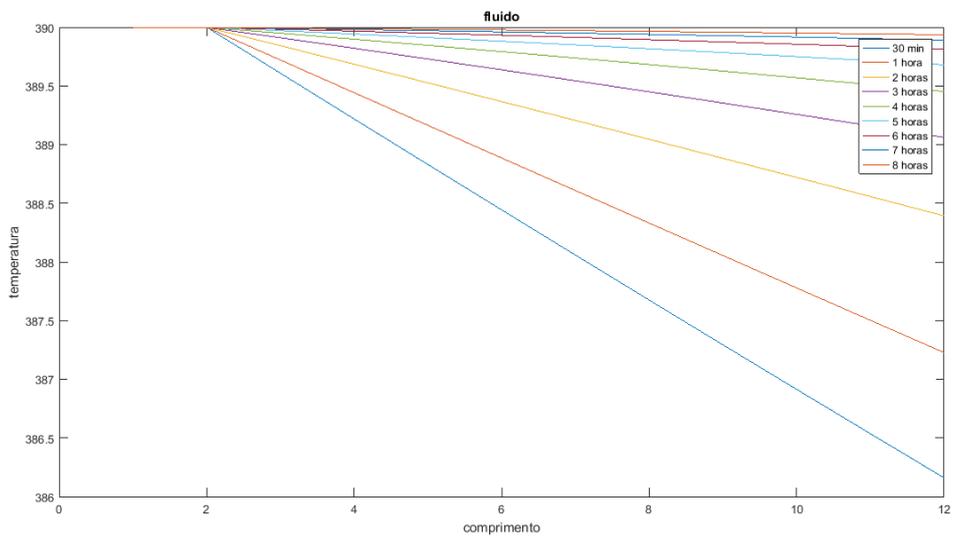
- [28]. Martins M., Villalobos U., Delclos T., Armstrong P., Bergan P. G., Calvet N., New concentrating solar power facility for testing high temperature concrete thermal energy storage, The 7th International Conference on Applied Energy – ICAE2015, Energy Procedia 75 (2015) 2144 – 2149.
- [29]. Kearney D, Herrmann U, Nava P, et al. Assessment of a molten salt heat transfer fluid in a parabolic trough solar field. J Solar Energy Eng-Trans ASME 2003;125:170–6.
- [30]. Sena-Henderson L. Advantages of using molten salts, national solar thermal test facilities. SANDIA Laboratories internal report; 2006.
- [31]. Foster M. Theoretical investigation of the system SnOx/Sn for the thermochemical storage of solar energy. In: Proceedings of the 11th SolarPACES. International Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies; 2002.
- [32]. Kearney D, Kelly B, Cable R, et al. Evaluation of a molten salt heat transfer fluid in a parabolic trough solar field. Int Sol Energy Conf 2002;293–9.
- [33]. Brosseau D, Kelton JW, Ray D, Edgar M, Chisman K, Emms B. Testing of thermocline filler materials and molten-salt heat transfer fluids for thermal energy storage systems in parabolic trough power plants. J Solar Energy EngTrans ASME 2005;127:109–16.
- [34]. Reilly HE, Kolb WJ. Evaluation of molten salt power tower technology based on the experience of solar two. SANDIA report SAND2001-3674; 2001.
- [35]. Moens L, Blake DM. Advanced heat transfer and thermal storage fluids. In: Proceedings International Solar Energy Conference; 2005. p. 791–3.
- [36]. Moens L, Blake DM, Rudnicki DL, Hale MJ. Advanced thermal storage fluids for solar parabolic trough systems. J Sol Energy Eng Trans ASME 2003;125: 112–6.
- [37]. C. Libby, L. Derez, R. Bedilion, J. Pietruszkiewicz, M. Lamar, R. Hollenbach, SolarPACES Conference, Perpignan (France), September 2010.
- [38]. J. Pacheco, S. K. Showalter and W. J. Kolb, "Development of a Molten-Salt Thermocline Thermal Storage System for Parabolic Trough Plants," Journal of Solar Engineering , vol. 124, pp. 123-153, 2002, doi:10.1115/1.1464123.
- [39]. Tamme R, Laing D, Steinmann WD. Advanced thermal energy storage technology for parabolic trough. J Solar Energy Eng-Trans ASME 2004;126:794–800

- [40]. Laing D, Steinman WD, Fiss M, Tamme R, Brand T, Bahl C. Solid media thermal storage development and analysis of modular storage operation concepts for parabolic trough power plants. *J Solar Energy Eng* 2008;130:61–5.
- [41]. Rafidi N, Blasiak W. . *Appl Therm Eng* 2005;25:2966–82.
- [42]. Y. Jian, Q. Falcoz, P. Neveu, F. Bai, Y. Wang, Z. Wang, Design and optimization of solid thermal energy storage modules for solar thermal power plant applications, International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, SolarPACES 2014, *Energy Procedia* 69 (2015) 891 – 899.
- [43]. Y. Jian, F. Bai, Q. Falcoz, Z. Wang, Control strategy of the module concrete thermal energy storage for parabolic trough power plants, International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, SolarPACES 2014, *Energy Procedia* 69 (2015) 891 – 899.
- [44]. Laing D., Lehmann D., Fiss M., Bahl C., Test results of concrete thermal energy storage for parabolic trough power plants, *Journal of Solar Energy Engineering*, NOVEMBER 2009, Vol. 131
- [45]. Calvet N., *Advancing Thermal Energy Storage Systems & CSP Components for Low Carbon Access to Energy*, Masdar Institute Solar Science and technology.
- [46]. Bergman T. L, Lavine A. S., Incropera F. P., Dewitt D. P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Seventh Edition.
- [47]. R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot, *Transport Phenomena*, First Edition, 1960 John Wiley and Sons, inc, New York
- [48]. Serrano-López R., Fradera J., Cuesta-López S., *Molten Salt Database Applications*, Science and Technology Park, September 2013.
- [49]. Therminol VP-1 by Solutia.
- [50]. Ferone C., Colangelo F., Frattini D., Roviello G., Cioffi R. di Maggio R., Finite Element Method Modeling of Sensible Heat Thermal Energy Storage with Innovative Concretes and Comparative Analysis with Literature Benchmarks, *Energies* 2014, 7, 5291-5316.
- [51]. Ozger, O.B.; Girardi, F.; Giannuzzi, G.M.; Salomoni, V.A.; Majorana, C.E.; Fambri, L.; Baldassino, N.; di Maggio, R. Effect of nylon fibres on mechanical and thermal properties of hardened concrete for energy storage systems. *Mater. Des.* 2013, 51, 989–997.

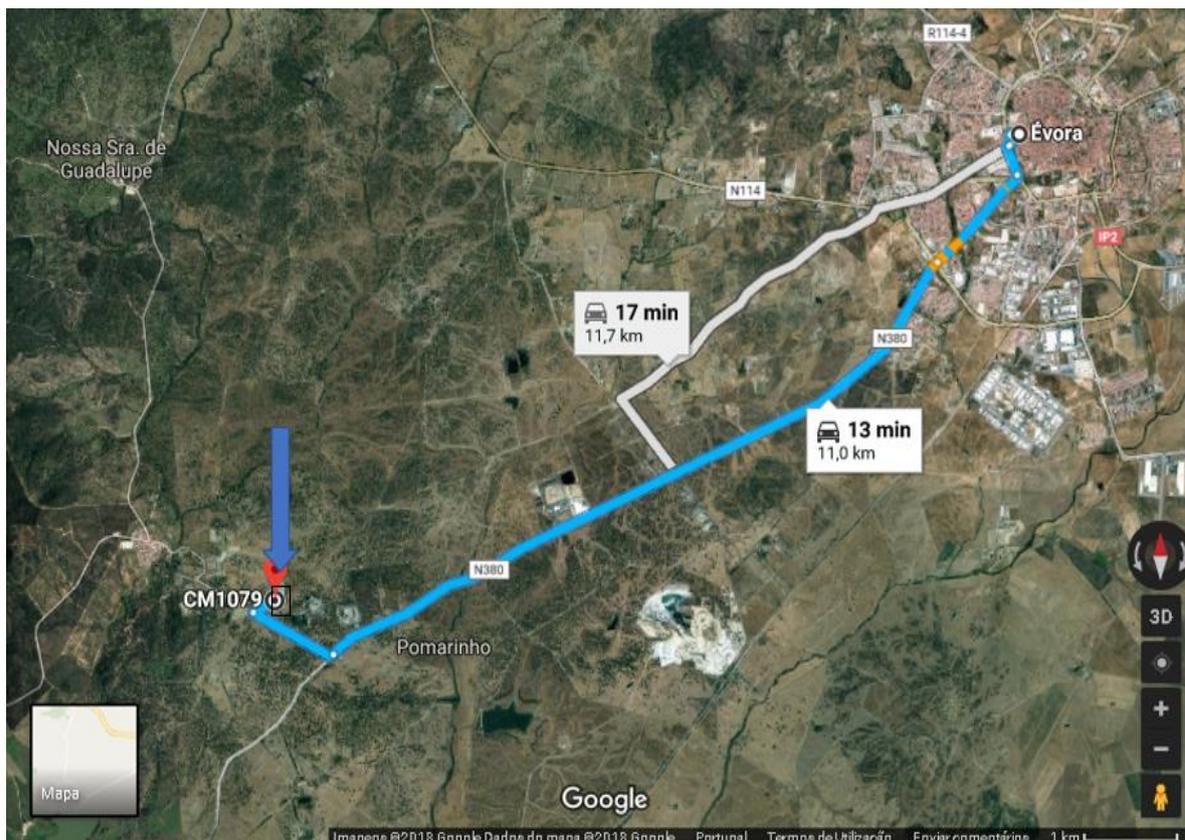
- [52]. Guo, C.; Zhu, J.; Zhou, W.; Chen, W. Fabrication and thermal properties of a new heat storage concrete material. *J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed.* 2010, 25, 628–630.
- [53]. Emerson J., Micah H., Panneer S., Concrete as a thermal energy storage medium for thermocline solar energy storage systems, University of Arkansas, June 2013, *Solar Energy* 96 (2013) 194–204.
- [54]. Ulf H., Bruce K., Henry P., Two-tank molten salt for parabolic trough solar power plants, *Energy* 29 (2004) 883-893.
- [55]. Projeto NEWSOL (<http://www.newsol.uevora.pt/pt-pt/>)

Anexos

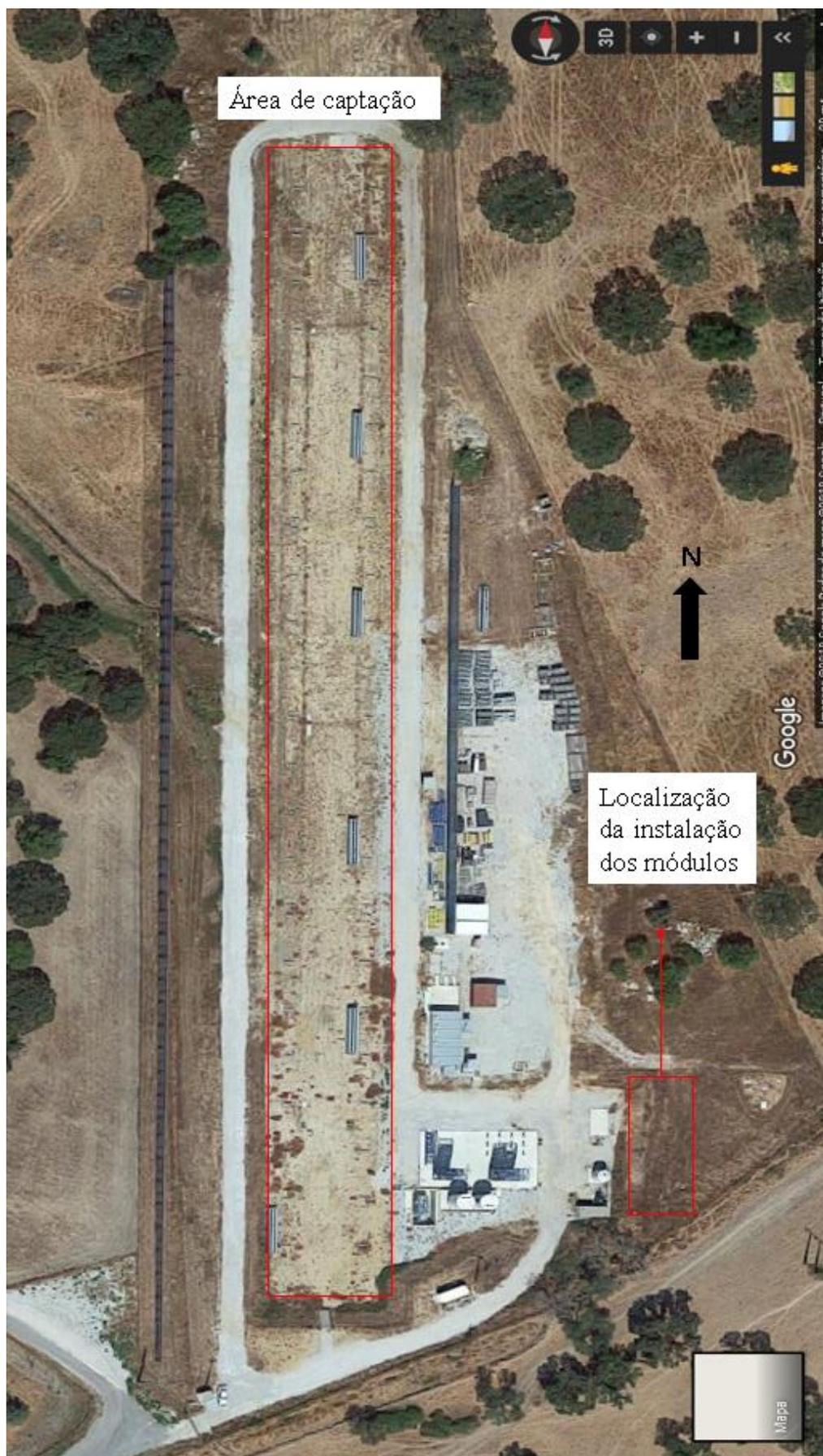
Anexo 1 – Resultados da variação da temperatura do fluido e do betão com uma mistura de alta temperatura na região de saída realizados com o segundo método dos nós para o caso da validação do modelo com o estudo do DLR.



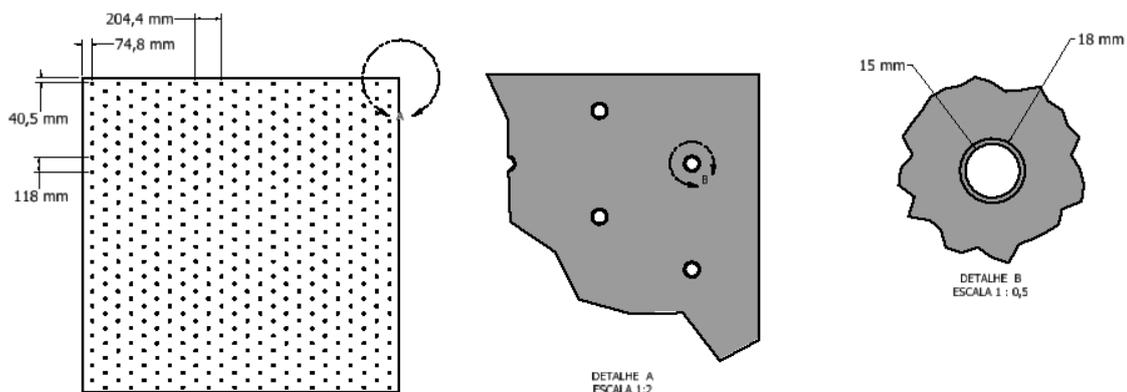
Anexo 2 – Rota Évora – central EMSP



Anexo 3 – Planta da EMSP

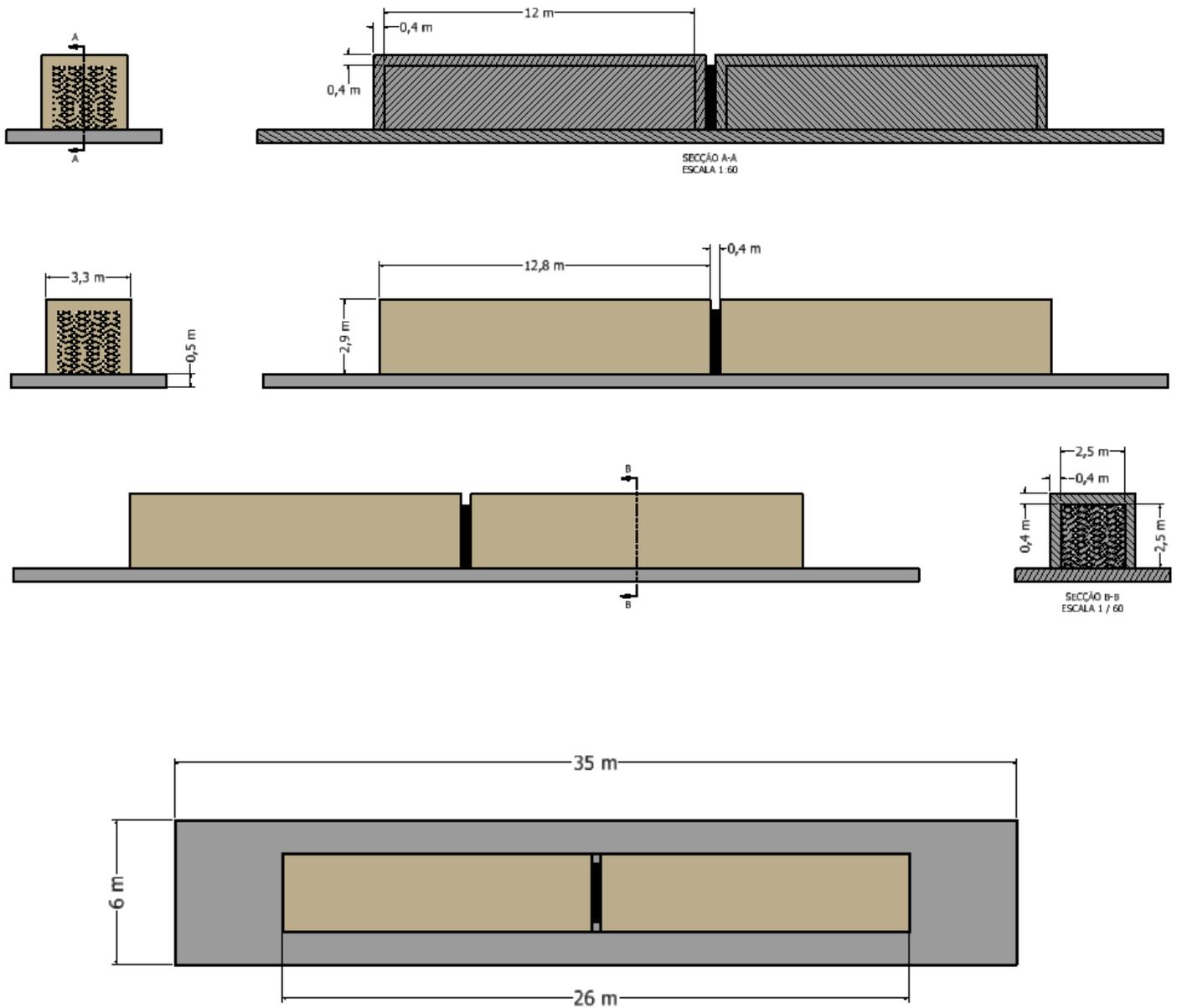


Anexo 4 – Dimensões internas do módulo final com $2,5*2,5*12\text{ m}^3$ e 504 tubos



Nota: O anexo apresentado apresenta 504 tubos por uma questão estética da distribuição de tubos no módulo, não traduzindo o módulo real simulado com 500 tubos.

Anexo 5 – Dimensões da configuração final com dois módulos de armazenamento de $2,5 \times 2,5 \times 12 \text{ m}^3$ em série com 504 tubos e das fundações.



Anexo 6 – Parte inicial do código desenvolvido para um caso de betão

```
clear
clc
close all

%29/05/2018
%Código em Matlab desenvolvido por Daniel Lopes. Modelo 2-D baseado em
%equações de transferência de calor [46] para 1 módulo de betão com
%uma mistura de alta temperatura (até 550°C) com tubos de aço
%inoxidável %Erros ou sugestões podem ser enviados para
dsl.sor@gmail.com

%tempo
time=50;

%Dimensões estruturais
L=18;
H=4;
W=2.5;
ri=0.0075;
ro=0.009;
ntubos=400;
rc=sqrt(((H*W/ntubos)-((ro^2)*pi-(ri^2)*pi))/pi);
P=2*pi*ri;
Sf=pi*(ri^2);
Ss=(rc^2)*pi-Sf;

%correlações das propriedades do fluido de transferência de calor
T=550;
Tw=400;
Qv=4.21*10^(-5)*4;
Qdesc=4.21*10^(-5)*4;
v=Qv/(pi*(ri^2));
vdesc=Qdesc/(pi*(ri^2));
rof=2263.628-0.636*(T+273);
cpf=1396.044+0.172*(T+273);
viscf=0.075439-2.77*10^(-4)*(T)+3.49*10^(-7)*((T)^2)-1.474*10^(-
10)*((T)^3);
viscfw=0.075439-2.77*10^(-4)*(Tw)+3.49*10^(-7)*((Tw)^2)-1.474*10^(-
10)*((Tw)^3);
kf=0.45;
diff=kf/(rof*cpf);
% rof=734;
% cpf=2520;
% viscf=0.000163;
% viscfw=0.0001562;
% kf=0.082;
% diff=kf/(rof*cpf);

%propriedades do betão
ros=2305;
cps=1002;
ks=3.18;
difs=ks/(ros*cps);

%deltas
dx=1;
```

```

dt=dx/v;

%nós
nodesj=2;
nodesil=L/dx+2;
nodesi=round(nodesil);
tmax1=time*3600/dt;
tmax=round(tmax1);

%Condições de fronteira
ti=390;
t0=550;
T(1,1,1)=t0;
T(1,2:nodesi,1)=ti;
T(1,2:nodesi-1,2)=ti;
T1(1,1,1)=t0;
T1(1,2:nodesi,1)=ti;
T1(1,2:nodesi-1,2)=ti;

for t=2:tmax

    for i=2:nodesi

        for j=1

            %cálculo de perdas com propriedades do fluido variáveis
com a

            %temperatura
            rof(t,i,j)=-0.90797*T(t-1,i-1,j)+0.00078116*(T(t-1,i-
1,j)^2)-2.367*10^(-6)*(T(t-1,i-1,j)^3)+1083.25;
            cpf(t,i,j)=(0.002414*T(t-1,i-1,j)+5.9591*10^(-6)*(T(t-1,i-
1,j)^2)-2.9879*10^(-8)*(T(t-1,i-1,j)^3)+4.4172*10^(-11)*(T(t-1,i-
1,j)^4)+1.498)*1000;
            kf(t,i,j)=-8.19477*10^(-5)*T(t-1,i-1,j)-1.92257*10^(-
7)*(T(t-1,i-1,j)^2)+2.5034*10^(-11)*(T(t-1,i-1,j)^3)-7.2974*10^(-
15)*(T(t-1,i-1,j)^4)+0.137743;
            viscf(t,i,j)=exp(544.149/(T(t-1,i-1,j)+114.43)-
2.59578)*(rof(t,i,j)/1000)/1000;
            viscfw(t,i,j)=exp(544.149/((T(t-1,i-1,j)+10)+114.43)-
2.59578)*(rof(t,i,j)/1000)/1000;
            diff(t,i,j)=kf(t,i,j)/(rof(t,i,j)*cpf(t,i,j));

            Re(t,i,j)=rof(t,i,j)*v*2*ri/viscf(t,i,j);
            Redesc(t,i,j)=rof(t,i,j)*vdesc*2*ri/viscf(t,i,j);
            Pr(t,i,j)=(viscf(t,i,j)/rof(t,i,j))/diff(t,i,j);

            if Re<3000

                %para escoamentos laminares

                Nu(t,i,j)=1.86*(Re(t,i,j)^(1/3))*(Pr(t,i,j)^(1/3))*((2*ri/L)^(1/3))*((
viscf(t,i,j)/viscfw(t,i,j))^(0.14));

                Nudesc(t,i,j)=1.86*(Redesc(t,i,j)^(1/3))*(Pr(t,i,j)^(1/3))*((2*ri/L)^(
1/3))*((viscf(t,i,j)/viscfw(t,i,j))^(0.14));

            else

                %para escoamentos turbulentos

```

```

        f(t,i,j)=(0.79*log(Re(t,i,j))-1.64)^(-2);
        Nu(t,i,j)=((f(t,i,j)/8)*(Re(t,i,j)-
1000)*Pr(t,i,j))/(1+12.7*((f(t,i,j)/8)^(1/2))*((Pr(t,i,j)^(1/3))-1));
        fdesc(t,i,j)=(0.79*log(Redesc(t,i,j))-1.64)^(-2);
        Nudesc(t,i,j)=((fdesc(t,i,j)/8)*(Redesc(t,i,j)-
1000)*Pr(t,i,j))/(1+12.7*((fdesc(t,i,j)/8)^(1/2))*((Pr(t,i,j)^(1/3))-
1));

    end

    %cálculo das propriedades do fluido de transferência de
calor
    %variáveis com a temperatura
    hdx(t,i,j)=Nu(t,i,j)*kf(t,i,j)/(ri*2);
    hdxdesc(t,i,j)=Nudesc(t,i,j)*kf(t,i,j)/(ri*2);
    hE(t,i,j)=1/(((4*ro*(rc^4)*log(rc/ro)-
3*ro*(rc^4)+4*(ro^3)*(rc^2)-(ro^5))/(4*(rc^2-
ro^2)^2))*((1/hdx(t,i,j))+(1/ks)));
    hEdesc(t,i,j)=1/(((4*ro*(rc^4)*log(rc/ro)-
3*ro*(rc^4)+4*(ro^3)*(rc^2)-(ro^5))/(4*(rc^2-
ro^2)^2))*((1/hdxdesc(t,i,j))+(1/ks)));

    %cálculos de perdas térmicas
    Ta=25;
    Tsolo=35;
    Lisol=0.3;
    Lbetao=0.5;
    kisol=0.033;
    A1=H*W;
    A2=H*L;
    A3=L*W;
    Q1(t,i,j)=((T(t-1,i,j)-Tsolo)/(Lbetao/(ks*A3)));
    Q2(t,i,j)=((T(t-1,i,j)-Ta)/(Lisol/(kisol*A3)));
    Q3(t,i,j)=2*((T(t-1,i,j)-Ta)/(Lisol/(kisol*A1)));
    Q4(t,i,j)=2*((T(t-1,i,j)-Ta)/(Lisol/(kisol*A2)));
    Qtotal(t,i,j)=Q1(t,i,j)+Q2(t,i,j)+Q3(t,i,j)+Q4(t,i,j);
    Qp(t,i,j)=Qtotal(t,i,j)/ntubos/(nodesi-2);

    end

    end

    if T(t-1,nodesi-1,2)<550

        if T(t-1,nodesi-1,2)<=T(t-1,nodesi-1,1)

            %Cálculo da matriz de temperatura do processo de carga
através
            %da primeira condição
            T(t:tmax,1,1)=555;

            for j=1

                for i=2

                    T(t,i,j)=T(t-
1,i,j)+((Qv*rof(t,i,j)*cpf(t,i,j)*(T(t-1,i-1,j)-T(t-
1,i,j)))/(rof(t,i,j)*Sf*cpf(t,i,j)*dx))*dt;

```

```

end

for i=3:nodesi

    %T(t,i,j)=T(t-1,i,j)+((hdx*P*dx*(T(t-1,i-1,j+1)-
T(t-1,i-1,j))+Qv*rof*cpf*(T(t-1,i-1,j)-T(t-
1,i,j)))/(rof*Sf*cpf*dx))*dt;
    T(t,i,j)=T(t-1,i-1,j)+(hE(t,i,j)*P*dx*(T(t-1,i-
1,j+1)-T(t-1,i-1,j)))/((Qv*rof(t,i,j))*cpf(t,i,j));

end

end

for j=2

    for i=2:nodesi-1

        T(t,i,j)=T(t-1,i,j)+((hE(t,i,j-1)*P*dx*(T(t-
1,i,j)-T(t-1,i,j-1))+Qp(t,i,j-1))/((-1)*(ros*Ss*dx*cps)))*dt;

        end
    end

    T1(t,1:nodesi,1)=T(t,1:nodesi,1);
    T1(t,2:nodesi-1,2)=T(t,2:nodesi-1,2);

    else % T(t-1,nodesi-1,2)>T(t-1,nodesi,1)

        if T(t-1,nodesi,1)>=391

            if T(t-1,1,1)<391

                %Cálculo da matriz de temperatura do processo de
descarga através
                %da primeira condição
                T(t-1:tmax,1,1)=390;

                for j=1

                    for i=2

                        T(t,i,j)=T(t-
1,i,j)+((Qdesc*rof(t,i,j)*cpf(t,i,j)*(T(t-1,i-1,j)-T(t-
1,i,j)))/(rof(t,i,j)*Sf*cpf(t,i,j)*dx))*dt;

                        end

                        for i=3:nodesi

                            %T(t,i,j)=T(t-1,i,j)+((hdx*P*dx*(T(t-1,i-
1,j+1)-T(t-1,i-1,j))+Qv*rof*cpf*(T(t-1,i-1,j)-T(t-
1,i,j)))/(rof*Sf*cpf*dx))*dt;
                            T(t,i,j)=T(t-1,i-
1,j)+(hEdesc(t,i,j)*P*dx*(T(t-1,i-1,j+1)-T(t-1,i-
1,j)))/((Qdesc*rof(t,i,j))*cpf(t,i,j));

```

```

        end

    end

    for j=2

        for i=2:nodesi-1

            T(t,i,j)=T(t-1,i,j)+((hE(t,i,j-
1)*P*dx*(T(t-1,i,j)-T(t-1,i,j-1))+Qp(t,i,j-1))/((-
1)*(ros*Ss*dx*cps)))*dt;

        end

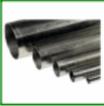
    end

    T1(t,1:nodesi,1)=fliplr(T(t,1:nodesi,1));
    T1(t,2:nodesi-1,2)=fliplr(T(t,2:nodesi-1,2));

```

Anexo 7 – Orçamentos dos custos dos materiais

Aço inoxidável:

Designação	Código EAN	Código de barras	Unidade Embalagem	Preço un.sem IVA Preço un.com IVA
Tubo Inox Cravar				
	Tubo Inox 316 - 15x1,0mm (6 m)	103000015 5603480027113		UN 10 21,84 € 26,86 €
	Tubo Inox 316 - 18x1,0mm (6 m)	103000018 5603480027120		UN 10 24,72 € 30,41 €
	Tubo Inox 316 - 22x1,2mm (6 m)	103000022 5603480027137		UN 5 33,84 € 41,62 €
	Tubo Inox 316 - 28x1,2mm (6 m)	103000028 5603480027144		UN 5 43,68 € 53,73 €
	Tubo Inox 316 - 35x1,5mm (6 m)	103000035 5603480027151		UN 5 69,12 € 85,02 €
	Tubo Inox 316 - 42x1,5mm (6 m)	103000042 5603480027168		UN 5 82,56 € 101,55 €
	Tubo Inox 316 - 54x1,5mm (6 m)	103000054 5603480027175		UN 3 103,68 € 127,53 €
	Tubo Inox 316 - 76,1x2mm (6 m)	103000076 5603480069663		UN 1 200,40 € 246,49 €
	Tubo Inox 316 - 88,9x2mm (6 m)	103000088 5603480069670		UN 1 243,05 € 298,95 €
	Tubo Inox316-108x2mm (vara 6 m)	103000098 5603480069687		UN 1 302,74 € 372,37 €
	Tubo Inox 316 - 18x1,0mm (3 m)	103000318		UN 10 13,85 € 17,04 €

Assunto: V/ Consulta N°. / de:

Agradecemos a vossa consulta em referência e, pelo presente, temos o prazer de vos propor o eventual fornecimento do seguinte material:

OFERTA

AISI 316

ALTERNATIVA Tubo 20x1,5 → **3,64€/m**

CONDIÇÕES GERAIS

PREÇOS	Para a totalidade do material, líquido no nosso armazém; Preços + IVA
PRAZO DE ENTREGA	Imediato, salvo venda ou imprevistos.
LOCAL DE ENTREGA	N/ armazém Linhó, ou despacho por vossa conta
VALIDADE DA PROPOSTA	2 dias
CONDIÇÕES DE PAGAMENTO	A combinar

Lã de Rocha:

É PROFISSIONAL? VENHA FAZER PARTE DO NOSSO GRUPO!

CATEGORIAS **OBRAS360** by SOTECNISOL 0,00 €

[INÍCIO](#) | [LOJA](#) | [ROCTERM](#) | [LÃ DE ROCHA A GRANEL G0 \(CAMADAS\)](#) VOLTAR



IMAGEM INDISPONÍVEL

Lã de rocha a granel G0 (Camadas)

Rocterm
Ref. 0010010822

1,6015 € /KG ~~2,0664 € /KG~~

33,63 € (21 Kg)
IVA INCLUIDO

ESPECIFICAÇÕES

Saco 21 kg

+ Ver todas as características

Quantidade

- +

Betão [52]:

Table 11
Properties of thermocline concrete mixtures (Mixtures 25 and 26).

Concrete properties	Concrete mixtures			
	25		26	
	Before	After	Before	After
Compressive strength (MPa)	41	7 ¹	158	96 109 ¹
Comp. strength retained (%)	17.0		61.0 69.0	
Unit weight (kg/m ³)	2323	2115	2531	2403
Cost (\$/m ³)	124		510	
Measured thermal conductivity, K (W/m K)	NA		2.99	
Predicted specific heat, C_p (kJ/kg K)	0.934 ^a 1.101 ^b		–	–

^a Calculated specific heat with C_p of water = 2.20 kJ/kg K.

^b Calculated specific heat with C_p of water = 4.18 kJ/kg K.

¹ Specimens were conditioned before thermal cycling.