



ESCOLA NAVAL



talant de biéfaire

TIAGO VARGAS VITORINO

CONTROLO DE HUMIDADE NOS SUBMARINOS DA CLASSE TRIDENTE

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em
Ciências Militares Navais, na especialidade de
Engenharia Naval – Ramo Mecânica



Alfeite

2019



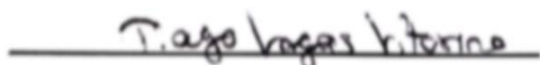
TIAGO VARGAS VITORINO

**CONTROLO DE HUMIDADE NOS
SUBMARINOS DA CLASSE TRIDENTE**

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências
Militares Navais, na especialidade de Engenharia Naval –
Ramo de Mecânica

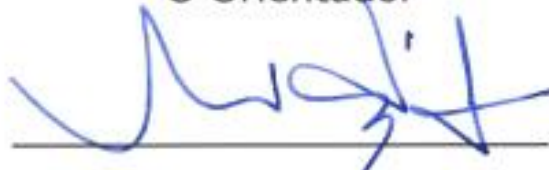
Orientação de: Professor Doutor Miguel José Pereira Sales Cavique Santos

O Aluno Mestrando



ASPOF EN-MEC Tiago Vargas Vitorino

O Orientador



Prof. Doutor Miguel Cavique Santos

Alfeite

2019

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, pelo apoio incondicional que me ofereceram dia após dia, desde o início do meu percurso.

AGRADECIMENTOS

Seria impossível referir todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram com ensinamentos e apoio ao longo de todo o meu percurso académico na Escola Naval. Ainda assim, certas pessoas destacaram-se ao longo da minha vida nos meus últimos anos, às quais eu devo o meu mais profundo agradecimento, pois sem elas a minha jornada não teria sido escrita da mesma forma até ao momento em que me encontro.

Agradeço à minha mãe, Teresa e ao meu pai Carlos, pelo suporte incondicional, pelos ensinamentos, amor e afeto que me ofereceram desde o primeiro dia, pelas palavras de apoio que me deram a força incansável que precisei para enfrentar mais um dia, e mais outro a seguir. Espero ter-vos deixado orgulhosos de mim, e espero que desafios futuros façam com que esse sentimento perdure em vocês.

Agradeço à minha irmã, Sara, e ao meu irmão, Miguel, pelo ombro amigo, e pelo acompanhamento e apoio inestimáveis que a todo o momento encontrei na sua presença. Sem vós, não teria enfrentado este enorme desafio com os meus pés assentes na terra, é muito gratificante poder ter a oportunidade de evoluir diariamente com os vossos conselhos.

Agradeço aos meus amigos próximos, assim como camaradas da Marinha Portuguesa, por terem tornado os momentos mais difíceis em momentos de sorriso e de força, que me fizeram encarar cada etapa com a calma essencial à conclusão das mesmas.

Expresso um sincero agradecimento à minha companheira e amiga Constança, pelo lugar que escolheu ocupar na minha vida, e pelo suporte incondicional que demonstrou durante o meu percurso neste último ano.

Agradeço, profundamente, ao Professor Doutor Miguel Cavique Santos, por todo o aconselhamento, disponibilidade, simpatia e orientação científica e pessoal que me proporcionou desde o primeiro dia de realização desta dissertação, constituindo, sem dúvida, um fator marcante para a execução da mesma.

Agradeço ao CFR EN-MEC Santos Reis, ao CTEN EN-MEC Marcelino Ruivo e ao CTEN EN-MEC Almeida Tavares, assim como à restante Divisão de Submarinos da Marinha Portuguesa, pela disponibilidade e ajuda que me ofereceram, assim como

recomendações efetuadas, que certamente me guiaram no caminho correto na execução desta dissertação.

Por fim, dedico um sincero “obrigado” àqueles que mesmo não se encontrando referenciados neste excerto, constituíram, de algum modo, um forte pilar na concretização dos meus objetivos até este momento, familiares e não só.

RESUMO

Esta dissertação tem como objetivo a procura e avaliação de soluções que resolvam ou limitem o problema da ocorrência de condensações no revestimento interior dos submarinos da classe Tridente da Marinha Portuguesa. O foco do trabalho é estudar o sistema de climatização atualmente instalado a bordo assim como avaliar o comportamento do meio interior do submarino no que diz respeito a cargas térmicas, distribuição de massas de ar e de vapor, e ainda a flutuações de humidade e temperatura.

A dissertação inicia-se pela definição do problema existente. Seguidamente é feito um enquadramento da área da climatização, nomeadamente a nível de controlo de humidade e sistemas de desumidificação, sistemas de arrefecimento, dispersão de poluentes e de humidade, e difusão de vapor em paredes porosas. São ainda apresentados modelos de simulação e *software* de sistemas de climatização e de baterias de arrefecimento. Apresenta-se depois um estudo onde se caracteriza de modo detalhado o sistema de climatização instalado a bordo dos submarinos, e avalia-se a evolução diária das cargas térmicas, latente e sensível, no interior da secção dos alojamentos.

Esta secção dos alojamentos localizada a vante no submarino servirá de foco para este trabalho, dado ser o espaço onde ocorrem mais condensações e onde é libertada a maior parte da carga latente interior. Feita a descrição do sistema, aplicam-se modelos CFD (*Computer Fluid Dynamics*) ao estudo da dispersão de vapor no submarino em regime estacionário fazendo uso da plataforma *Flow Simulation* do *software SOLIDWORKS*, por forma a analisar flutuações de humidade relativa e de temperatura no espaço. Como as variações de humidade específica são pequenas, optou-se por fazer uma avaliação integral do espaço. O espaço é simulado integrando a equação diferencial de geração de humidade em regime transitório por meio de uma aplicação em *MATLAB*, que avalia a evolução da humidade absoluta e a ocorrência de condensação no isolamento. Por fim, e com base na análise dos resultados observados nas simulações, são elaboradas e apresentadas soluções que garantem a eliminação ou atenuação do problema de condensações existente no isolamento dos submarinos. Estas soluções consideram a alteração do funcionamento do sistema de climatização para um modo de desumidificação com reaquecimento, assim como a instalação de uma barreira de vapor no interior do isolamento.

Palavras-chave: modelação CFD, controlo de humidade, humidade relativa, humidade absoluta, migração de vapor.

ABSTRACT

This thesis aims to research and evaluate the solutions to solve or at least to reduce the water vapour condensation in the lining of the Trident class submarines of the Portuguese Navy. The focus of this work is the study of the air conditioning system installed on board, as well as to evaluate the behavior of the interior environment of the submarine in terms of thermal loads, air, mass and steam distribution and variations of humidity and temperature.

The dissertation begins by presenting the problem to be solved. Thus, we present a theoretical introduction on air conditioning technologies, specially addressing the moisture control, dehumidification systems, cooling systems, dispersion of pollutants and moisture, and diffusion of steam into porous walls. This work also addresses models of air conditioning cooling coils. Next, a detailed study and characterization of the air conditioning system installed aboard the submarines allows to establish the daily evolution of the thermal loads, latent and sensible, inside the accommodations section.

This accommodations section located near the bow of the submarine is the focus of this work, because it is the area of the submarine with more latent heat production, and because it is the space where most of the condensations occur. The use of CFD models permits to simulate the steady state behaviour of water vapour in the submarine, by evaluating the specific humidity and temperature in the space using the Flow Simulation platform of the *SOLIDWORKS* software. As the specific humidity is almost constant in the space, it allowed to evaluate the space as an integral model and simulated in transient variation of humidity. The integration of the differential equation, in MATLAB, of water vapour release gives the solution of the evolution of absolute humidity and the occurrence of condensation in the insulation. Finally, based on the analysis of the simulation results, it is possible to raise solutions that solve or reduce the problem of condensation in the insulation of the submarines. These solutions consider changing the operation of the air conditioning system to a dehumidification mode with reheating, as well as the installation of a vapor barrier inside the insulation.

Key-words: CFD modeling, moisture control, relative humidity, humidity ratio, steam migration.

ÍNDICE

Dedicatória.....	II
Agradecimentos.....	IV
Resumo.....	VI
Abstract.....	VIII
Índice.....	X
Índice de Figuras.....	XIV
Índice de Tabelas.....	XVI
Índice de Gráficos.....	XVI
Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	XVII
Introdução.....	1
1. Contextualização do Problema e Objetivo.....	3
2. Enquadramento Teórico.....	7
2.1. Modelação de Cargas Térmicas e Migração de Vapor.....	7
2.2. Modelação CFD em <i>SOLIDWORKS</i>	13
2.3. Modelo Integral da Difusão de Poluentes.....	15
2.4. Arrefecimento e Controlo de Humidade.....	16
2.5. Modelação de Baterias de Arrefecimento.....	26
2.5.1. Modelo “ASHRAE <i>Toolkit</i> ”.....	26
2.5.2. Modelo de “Braun-Lebrun”.....	29
2.5.3. Modelos de Elementos Finitos.....	30
2.6. Migração de Vapor.....	33
3. Descrição do Sistema de Climatização dos Submarinos da Classe Tridente.....	39
3.1. Sistema de Tratamento de Ar.....	40
3.2. Sistema de Arrefecimento.....	42
3.3. Modos de Funcionamento do Sistema de Ventilação.....	46
3.4. Cargas Térmicas.....	47
4. Modelo CFD em Regime Estacionário.....	55
4.1. Desenho do Modelo CAD.....	55
4.2. Definição do Modelo CFD.....	57

4.3. Discussão de Resultados.....	60
5. Simulação Integral do Sistema de Climatização	67
5.1. Modelo Integral da Secção dos Alojamentos	68
5.1.1. Cálculo da Humidade de Insuflação	70
5.1.2. Cálculo da Evolução da Humidade Ambiente	71
5.1.3. Migração de Vapor.....	72
5.1.4. Variação do Ponto de Condensação.....	73
5.1.5. Modo de Desumidificação com Reaquecimento	74
5.2. Modelo Completo	76
5.3. Discussão de Resultados.....	81
6. Soluções que Reduzem a Possibilidade de Condensação.....	85
6.1. Sistema de Climatização em Modo de Desumidificação com Reaquecimento.....	85
6.2. Barreira de Vapor	87
Conclusão	89
Referências Bibliográficas.....	91
Apêndices	97
Apêndice 1 – Tabelas de Cálculo de cargas Térmicas	97
Apêndice 2 – Cálculo dos Valores de Insuflação e Extração Estacionários. 99	
Apêndice 3 – Tabela de Valores Estacionários de Insuflação e Extração.. 101	
Apêndice 4 – Resultados das Simulações CFD em <i>SOLIDWORKS</i>	102
2h-3h	102
7h-8h	103
11h-12h	104
12h-13h	105
13h-14h	106
15h-16h	107
17h-18h	108
18h-19h	109
21h-22h	110

23h-24h	111
Apêndice 5 – Cálculo da Humidade e do Ponto de Condensação em	
<i>MATLAB</i>	112
Algoritmo <i>Humidade_Aloj_Arrefec_Simples</i>	112
Algoritmo <i>Humidade_Aloj_Arrefec_Desum</i>	115
Algoritmo <i>Humidade_Total_Arrefecimento_Simples</i>	118
Algoritmo <i>Humidade_Total_Arrefec_Desum_Parcial</i>	122
Algoritmo <i>Humidade_Total_Arrefec_Desum_Parcial</i>	125
Algoritmo <i>Superficie_Alojamentos_Arrefec_Simples</i>	129
Algoritmo <i>Superficie_Alojamentos_Arrefec_Desum</i>	133
Algoritmo <i>Superficie_Total_Arrefec_Simples</i>	136
Algoritmo <i>Superficie_Total_Arrefec_Desum_Parcial</i>	140
Algoritmo <i>Superficie_Total_Arrefec_Desum_Global</i>	144
Algoritmo <i>Superficie_Total_Arrefec_Desum_Parcial_Barreira</i>	148
Função <i>RungeKuttaH</i>	152
Função <i>fh</i>	152
Função <i>Wbatacc</i>	152
Função <i>Wbatcic</i>	153
Função <i>Wbattcc</i>	154
Função <i>Tbatacc</i>	155
Função <i>Tsat</i>	155
Função <i>Qperdaalaj</i>	155
Função <i>Qperdatot</i>	156
Função <i>Tintalaj</i>	156
Função <i>Tinttot</i>	156
Função <i>Toutalaj</i>	157
Função <i>Touttot</i>	157
Função <i>Tprof</i>	157
Função <i>fT</i>	157
Função <i>fD</i>	157
Anexos.....	159

Anexo 1 – Evoluções Medidas pela <i>Thyssenkrupp</i>	159
Anexo 2 – Diagrama Psicrométrico.....	161
Anexo 3 – Modelo de Resposta das Baterias de Arrefecimento	162
Bateria dos Alojamentos	162
Bateria do TCC	163
Bateria do CIC	164

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Proposta de alteração ao funcionamento do sistema de climatização efetuada pela Thyssenkrupp.....	5
Figura 2 - Geração e refinamento de malha cartesiana pelo SOLIDWORKS Flow Simulation (SOLIDWORKS, 2019).....	14
Figura 3 - Evolução psicrométrica de arrefecimento sem desumidificação (Khemani, 2019a).....	17
Figura 4 - Evolução psicrométrica de arrefecimento com desumidificação (Khemani, 2019b).....	18
Figura 5 - Evolução psicrométrica real de arrefecimento com desumidificação (Khemani, 2019b).....	19
Figura 6 - Modelo esquemático de um sistema de arrefecimento com desumidificação e reaquecimento.....	20
Figura 7 - Ciclo simplificado do sistema de Pennington e evoluções psicrométricas correspondentes (Penney & McClain-cross, 1985; Pettersen et al., 2012).....	22
Figura 8 - Ciclo convencional de refrigeração/bomba de calor por compressão de vapor (Heat Pump Association, 2017).....	23
Figura 9 - Sistema HP-SDC desenvolvido para operação em condições de Verão (Nie et al., 2017).....	23
Figura 10 - Diagrama esquemático de um sistema THIC (Zhu et al., 2010).....	24
Figura 11 - Processador de ar com dessecante líquido acionado por uma bomba de calor (Zhao et al., 2011).....	25
Figura 12 - Representação esquemática de uma bateria de arrefecimento (Kauwale, 2019; Wang et al., 2005).....	31
Figura 13 - Modelo simplificado e distribuição de elementos e nós numa bateria de arrefecimento (Wang et al., 2005).....	31
Figura 14 - Modelo esquemático de um elemento (Wang et al., 2005).....	32
Figura 15 - Formação de condensação por difusão de vapor num isolamento.	34
Figura 16 - Transferência de calor através de superfícies cilíndricas.....	35
Figura 17 - Colocação de uma barreira de vapor num isolamento.....	37
Figura 18 - Modelo CAD do interior da secção dos alojamentos do submarino.....	57
Figura 19 - Simplificação da bateria de arrefecimento da ACU de vante.....	57

Figura 20 - Resultados de temperatura e humidade relativa para o intervalo das 12h às 13h.....	62
Figura 21 - Resultados de temperatura e humidade relativa para o intervalo das 2h às 3h.	63
Figura 22 - - Resultados de temperatura e humidade relativa para o intervalo das 15h às 16h.....	64
Figura 23 - Diagrama das simulações em MATLAB para o sistema de climatização... 68	
Figura 24 - Função de resposta da bateria de arrefecimento dos alojamentos para a temperatura ambiente constante considerada.	70
Figura 25 - Evolução da humidade ambiente na secção dos alojamentos, com o sistema de climatização em modo de arrefecimento simples.....	71
Figura 26 - Evolução do ponto de condensação no isolamento face a diferentes profundidades e temperaturas à superfície, para um funcionamento da bateria de arrefecimento em modo de arrefecimento simples.....	73
Figura 27 - Evolução da humidade ambiente na secção dos alojamentos, com o sistema de climatização em modo de desumidificação com reaquecimento.....	75
Figura 28 - Evolução do ponto de condensação no isolamento face a diferentes profundidades e temperaturas à superfície, para um funcionamento da bateria de arrefecimento em modo de desumidificação com reaquecimento.....	76
Figura 29 - Evoluções da humidade ambiente global, com todas as baterias de arrefecimento em modo de arrefecimento simples (à esquerda) e com todas as baterias de arrefecimento em modo de desumidificação com reaquecimento (à direita).....	78
Figura 30 - Evolução da humidade ambiente global, com a bateria de arrefecimento dos alojamentos a atuar em modo de desumidificação com reaquecimento, e com as restantes baterias de arrefecimento (TCC e CIC) a atuar em modo de arrefecimento simples.....	79
Figura 31 - Variação do ponto de condensação no isolamento para as três situações globais consideradas.....	80
Figura 32 - Diagrama representativo das funções desenvolvidas para as simulações do sistema de climatização.....	81
Figura 33 - Variação do ponto de condensação para um funcionamento do sistema de climatização em modo de desumidificação com inclusão de barreira de vapor a 30 milímetros do casco resistente.....	88

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Características das ACU's.....	44
Tabela 2 - Distribuição da guarnição na secção dos alojamentos.	49
Tabela 3 - Cargas geradas por atividade humana.	50
Tabela 4 - Cargas derivadas do funcionamento de equipamentos de cozinha.	50
Tabela 5 - Variação de valores de temperatura, humidade relativa e humidade absoluta em vários locais da secção dos alojamentos.....	64

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Evolução da carga térmica diária no interior do espaço dos alojamentos. ..	53
--	----

ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

- ACU (*Air Conditioning Unit*)
- BES (*Building Envelope Solutions*)
- CAD (*Computer-Aided Design*)
- CFD (*Computation Fluid Dynamics*)
- CIC (*Combat Information Centre*)
- COP (*Coefficient Of Performance*)
- COV (Composto Orgânico Volátil)
- CTF (*Conduction Transfer Function*)
- EC (*Effective Capacitance*)
- EDO (Equação Diferencial Ordinária)
- EES (*Engineering Equation Solver*)
- EMPD (*Effective Moisture Penetration Depth*)
- HAM (*Heat Air and Moisture*)
- HAMT (*Heat, Air and Moisture Transfer*)
- HP-SDC (*Heat Pump assisted Solid Desiccant Cooling*)
- HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*)
- NRP (Navio da República Portuguesa)
- NTU (*Number of Thermal Units*)
- PTN (Pressão e Temperatura Normal)
- QAI (Qualidade do Ar Interior)
- TCC (*Technical Control Centre*)
- THIC (*Temperature and Humidity Independent Control*)
- UTA (Unidade de Tratamento de Ar)

INTRODUÇÃO

Os submarinos da classe Tridente da Marinha Portuguesa, NRP (Navio da República Portuguesa) Tridente e NRP Arpão, encontram-se sujeitos a fenómenos de condensação em vários pontos do isolamento interior da plataforma. Estas condensações podem ter consequências na saúde dos militares a bordo, assim como aumentar a necessidade de manutenção corretiva do revestimento interior, o que obriga, não apenas custos elevados para a Marinha, como o aumento da necessidade de paragem dos meios navais para manutenção.

Esta problemática apresenta-se como uma limitação à sustentabilidade de dois dos mais importantes meios navais da Marinha Portuguesa, pelo que a sua correta abordagem poderá resultar na redução do custo de manutenção associado. Assim, esta dissertação de mestrado surge no âmbito da procura de soluções ou estratégias viáveis para o problema existente nos dois submarinos da classe Tridente.

A avaliação detalhada do desempenho de sistemas de climatização, assim como projetos e propostas de alteração associadas, hoje em dia, é idealmente acompanhada e fundamentada com simulações de modelos representativos do sistema e do espaço em análise por meio de software dedicado ao estudo do comportamento de fluidos. Posto isto, este trabalho terá as fases de construção e simulação de modelos em regime estacionário, e posteriormente em regime transitório. Estes modelos permitem avaliar o desempenho do sistema de climatização e equipamentos associados em termos de carga térmica sensível e latente a remover, e em termos da difusão das massas de ar e de vapor de água no espaço interior. Permite-se assim obter a humidade junto das paredes isoladas e a seguir no interior do isolamento. Esta abordagem tem por base o conhecimento detalhado, não só das características e dos parâmetros de funcionamento do sistema de climatização, mas também de toda a estrutura e particularidades do meio onde está instalado. As simulações possibilitarão um estudo pormenorizado do problema, no que diz respeito às particularidades do sistema de climatização e do ambiente interior, que possam contribuir para o agravamento do mesmo, assim como, posteriormente, à elaboração de propostas que reduzam ou eliminem a possibilidade de ocorrência de condensações no isolamento.

Em janeiro de 2014, numa tentativa de solucionar este problema, uma empresa multinacional com sede na Alemanha, a *Thyssenkrupp*, efetuou um estudo desta

problemática, utilizando medições a bordo do NRP Arpão durante uma navegação realizada no mar Báltico. O estudo centrou-se na avaliação do comportamento do sistema de climatização com diferentes parâmetros de funcionamento. As medições efetuadas a bordo revelaram valores de humidade relativa dentro de parâmetros aceitáveis em todo o espaço interior do navio, apesar de esta aumentar para valores elevados em locais juntos ao casco resistente. Na secção dos alojamentos, secção do submarino colocada mais a vante, foram medidos valores elevados de temperatura do ponto de orvalho para as condições do ar nesse espaço, superiores à temperatura da água no exterior do submarino. Este último ponto, juntamente com o facto de os sinais de degradação do isolamento interior por ação da condensação terem sido verificados com maior frequência na secção dos alojamentos, fazem deste espaço o centro do estudo para esta dissertação, sendo as eventuais soluções possíveis de implementar na restante plataforma.

É importante definir que todo o trabalho de análise e diagnóstico do problema, assim como de elaboração de soluções, é feito com o submarino a navegar submerso, o que determina o modo de funcionamento do sistema de climatização. A descrição detalhada do sistema de climatização será efetuada em capítulos seguintes desta dissertação.

1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA E OBJETIVO

Em março de 2014, a guarnição do NRP Arpão, durante a navegação, detetou um aumento da humidade a bordo do submarino, particularmente após diminuição da temperatura da água do mar para valores inferiores a 8 °C. Efetuadas inspeções ao navio, encontraram-se locais de ocorrência de condensação, assim como degradação do revestimento interior. Concluiu-se que a degradação do material era mais prejudicial em compartimentos habitacionais e em locais de armazenamento de alimentos, pelo que o seu estado permite a formação de pontos de acumulação bacteriana potencialmente prejudiciais à saúde dos militares, considerando-se assim que o isolamento deveria ser substituído ou beneficiado. Verificou-se, mais tarde, a existência do mesmo problema no outro submarino da mesma classe.

Numa abordagem a este problema, a empresa *Thyssenkrupp*, realizou análises ao comportamento do sistema de climatização, assim como ao estado do isolamento dos submarinos. A abordagem desta empresa iniciou-se por medições a bordo do submarino NRP Arpão, tiradas no ano de 2017, durante uma navegação realizada entre as cidades de Lisboa, Portugal, e Kiel, Alemanha. As medições foram efetuadas por sensores do tipo *data logger* colocados em vários locais interiores do submarino, garantindo uma cobertura das diferentes zonas do mesmo (vante, meio navio e ré), por forma a obter uma evolução de valores de temperatura, humidade relativa, humidade absoluta e temperatura de orvalho, idealmente durante uma navegação submersa de pelo menos 3 dias. Foram também colocados sensores no casco resistente, por forma a medir a temperatura a que este está sujeito, assim como na ponte, local exterior ao submarino, retirando-se este último previamente às imersões da plataforma.

Relativamente a dados obtidos das medições efetuadas durante a navegação, cujos gráficos se encontram disponíveis no Anexo 1, identificou-se que, globalmente, os valores de temperatura garantidos pelo sistema de climatização estiveram dentro dos padrões corretos de funcionamento, tendo a temperatura nas zonas de vante sido mantida entre os 18 °C e os 22 °C quando o submarino se encontrava submerso, ou em *snorkelling*, isto é, submerso com o periscópio içado. Na zona de ré, as temperaturas adquiriram valores mais elevados, derivados do calor libertado pelo motor propulsor em funcionamento. Durante a navegação à superfície, e numa altura em que o submarino se aproximou de zonas mais

a norte no globo terrestre, por encontrar temperaturas exteriores mais baixas, inferiores a 5 °C, a temperatura interior garantida pelo sistema de climatização desceu ligeiramente face aos valores até ao momento verificados.

No que diz respeito a valores de humidade relativa, em imersão, foram verificados valores mais elevados para os setores de vante do que nos setores de ré, possivelmente derivados da maior ocupação humana existente nas zonas de vante, assim como das maiores temperaturas verificadas na zona de ré. No entanto, o valor de humidade relativa, de forma geral, não ultrapassou os 70%. Em navegações à superfície, a humidade relativa desceu ligeiramente em função da humidade relativa no exterior, no entanto, em situações de humidade relativa exterior elevada, o mesmo parâmetro não ultrapassou os 70% no interior. Consideraram-se que os valores de humidade relativa verificados se encontraram dentro daquilo que é “aceitável” pela empresa multinacional. Já para valores de humidade absoluta, considerou-se um panorama menos otimista durante navegações, tanto em profundidade, como em *snorkelling*, verificando-se um nível de humidade absoluta elevada, tanto na zona de vante como na de ré, em locais próximos do casco resistente, onde a temperatura é mais baixa, chegando a assumir valores de 11 g de H₂O/kg de ar. Durante a navegação à superfície, a humidade absoluta igualou a humidade verificada no exterior, não assumindo valores muito elevados.

No que diz respeito à evolução da temperatura no ponto de orvalho para esta navegação, verificou-se que, em profundidade, o valor deste parâmetro manteve-se entre 11 °C e 15 °C, o que se tornou num problema mais crítico quando o submarino entrou em águas mais frias, com temperaturas de água do mar que desciam dos 6 °C, sendo espectável que, nestas situações, exista maior ocorrência de condensação junto ao casco resistente. À superfície, verificou-se uma descida da temperatura de orvalho, provavelmente devido a uma redução da humidade absoluta nesta situação, o que reduziu a diferença entre a temperatura exterior e a temperatura de orvalho para o ar interior.

Tendo em conta as observações efetuadas face aos resultados obtidos das medições realizadas a bordo, considerou-se que uma desumidificação do ar interior seria recomendável para navegações em profundidade, e traria vantagens no que diz respeito à diminuição das condensações no isolamento, como é possível observar na figura 1. No

entanto esta opção tornou-se não viável, visto que implicaria que o ar adquirisse uma humidade relativa muito baixa para o conforto e saúde dos militares do submarino.

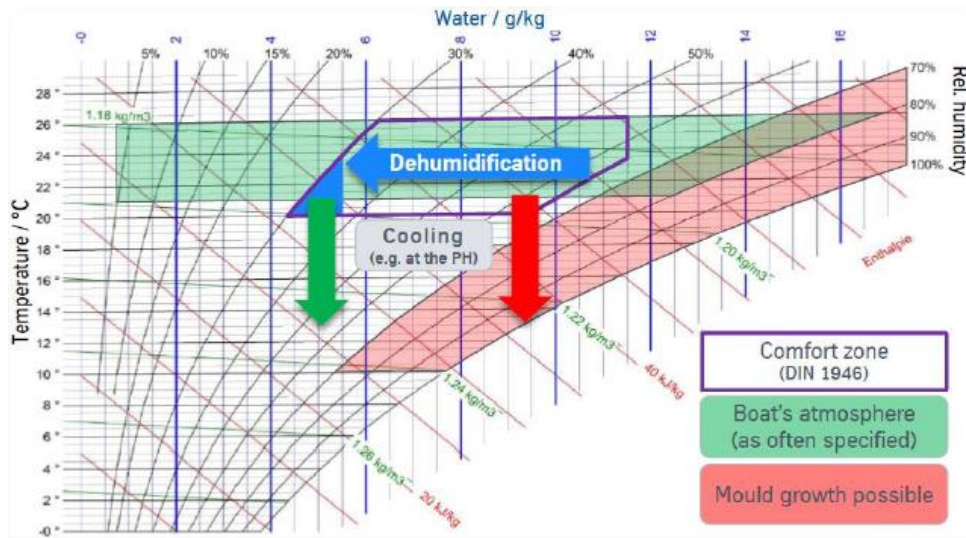


Figura 1 - Proposta de alteração ao funcionamento do sistema de climatização efetuada pela Thyssenkrupp.

Outras alterações propostas surgiram como abordagem ao isolamento existente a bordo, considerando-se que o material utilizado, *SUBMAT*, apesar de garantir resistência à propagação de chama, assim como um bom isolamento sonoro, perde em termos de resistência à humidade. Sugeriu-se, para além de uma limpeza mais regular do isolamento, a adição de fibra de vidro em locais onde a condensação se verificou com maior frequência, assim como a utilização de folhas de alumínio como barreiras de vapor, no entanto, propriedades acústicas poderiam ser comprometidas nesta situação.

Face à análise desenvolvida nos últimos anos, por forma a solucionar este problema, pretende-se nesta dissertação, partindo dos dados verificados e observações efetuadas pela multinacional *Thyssenkrupp*, estudar e analisar o sistema de climatização instalado, assim como a resposta do espaço interior em termos de evolução de cargas térmicas ao longo de um dia, e em termos de flutuação de temperatura e humidades relativa e absoluta. Assim, propõe-se:

- 1) Avaliar o o funcionamento do sistema e das cargas térmicas em regime estacionário;
- 2) Avaliar o sistema em regime dinâmico, no que toca à evolução da humidade absoluta no interior e da ocorrência de condensação no isolamento;

- 3) Definir e avaliar possíveis soluções que visem reduzir a ocorrência de condensação no isolamento dos submarinos.

2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO

2.1. Modelação de Cargas Térmicas e Migração de Vapor

A transferência de calor e de humidade entre a envolvente de um edifício e o ambiente interior estão relacionadas e ocorrem de modo contínuo. O estado da arte atual relativo à modelação das interações termohigrométricas entre o ambiente interior e a envolvente requer ferramentas de simulação dinâmica, em particular a modelação CFD (*Computation Fluid Dynamics*). Este tipo de modelação permite avaliar de modo conjugado as transferências de calor e de massa ao longo de um espaço (Osanyintola & Simonson, 2006; Pazold, Antretter, & Hermes, sem data).

De modo a avaliar este problema, e simular o comportamento termohigrométrico de edifícios, várias estratégias têm vindo a ser estudadas nos últimos anos. É nesta fase que surge o conceito de co-simulação, abordado num estudo que avalia o efeito da modelação acoplada de transferências de calor, ar e humidade (Ferroukhi, Djedjig, Belarbi, Limam, & Abahri, 2015). Este estudo associa dois softwares, um para a simulação dinâmica do edifício e outro para modelar o comportamento termohigrométrico na envolvente interior do edifício. Um modelo multicamada de transferência termohigrométrica (Belleudy, Woloszyn, Chhay, & Cosnier, 2016; Energy Plus, 2011; Tariku, Kumaran, & Fazio, 2010), HAM (*Heat Air and Moisture*), é dinamicamente associado a um modelo térmico de edifícios, BES (Building Envelope Solutions), dando origem ao acoplamento HAM-BES, focado na implementação da co-simulação entre o COMSOL Multiphysics, uma ferramenta de simulação em elementos finitos para a transferência termohigrométrica através da envolvente, com o TRNSYS, uma ferramenta de simulação térmica para edifícios e sistemas dinâmicos. Esta associação foi integrada em MATLAB, para garantir a troca de dados entre o TRNSYS e o COMSOL. Esta abordagem permite uma melhor descrição das transferências de calor e de humidade através dos materiais higroscópicos como parte integral do edifício (Belleudy et al., 2016; Energy Plus, 2011; Ferroukhi et al., 2015; Tariku et al., 2010).

Na maioria dos estudos conduzidos nesta área, as modelações 2D e 3D não consideram a interação e o acoplamento entre as transferências de calor e de humidade no cálculo do consumo energético dos edifícios. É possível estudar este acoplamento incluindo as transferências realizadas na parede de um edifício e as consequências no consumo

energético, realizando uma integração do modelo HAMT (*Heat, Air and Moisture Transfer*) na simulação energética de edifícios (Osanyintola & Simonson, 2006).

A plataforma HAM-BES foi posteriormente aplicada a três casos dinâmicos distintos, em situações de inverno e de verão, sendo que o consumo energético previsível foi representado em função das necessidades de aquecimento (janeiro) e de arrefecimento (agosto). Resultados observados revelaram que quando modelos são avaliados em 2D, a diferença em termos de carga de aquecimento é ainda maior, atingindo valores superiores em 40%. Na época de arrefecimento, comparando os modelos estudados, uma sobrevalorização de cerca de 51% ocorre num dos casos, relativamente aos outros dois (Osanyintola & Simonson, 2006).

Os resultados provenientes dos casos avaliados sublinham a importância da transferência de calor, ar e humidade na previsão de valores de consumo energético e de cargas térmicas associados ao edifício em questão (Osanyintola & Simonson, 2006; Qin, Walton, Belarbi, & Allard, 2011). Verifica-se ainda que existe uma influência multidimensional da transferência termohigrométrica em interações térmicas, que envolve fluxos de calor e de humidade e que influencia os balanços energéticos e mássicos interiores, assim como as cargas térmicas dos edifícios (Ferroukhi et al., 2015).

Outros trabalhos efetuados focam-se na aplicabilidade de diferentes tipos de modelos, que usam como plataforma base o EnergyPlus e o TRNSYS, para o cálculo do efeito da humidade no consumo energético de edifícios em diferentes condições climáticas (Qin et al., 2011; Woods, Winkler, & Christensen, 2013; Yang, Fu, & Qin, 2015). Estes estudos surgem com a motivação de reduzir custos e impactos ambientais relacionados com edifícios, avaliando o seu comportamento energético e a capacidade para manter os valores de humidade e de temperatura dentro de parâmetros aceitáveis (Qin et al., 2011; Yang et al., 2015).

Muitos programas de simulação não têm em conta o efeito da humidade na envolvente do edifício, sendo desenvolvidos com modelos simplificados. A Equação 1 governa a transferência de humidade nestas simulações:

$$\rho_{ar} V_{zona} \frac{d\omega_{zona}}{dt} = \dot{m}_{ar,ventilação} (\omega_{amb} - \omega_{zona}) + \dot{m}_{v,ganho} - \dot{m}_{v,absorvido} \quad (1)$$

Onde o primeiro termo traduz a acumulação de humidade do ar da zona, o segundo termo é a humidade adicionada devido à ventilação, o terceiro termo a geração de humidade no interior, e o último termo a absorção de humidade pelos materiais do edifício. Nestes termos, ρ_{ar} é a massa específica do ar da zona (kg/m^3), V_{zona} é o volume da zona (m^3), ω_{amb} e ω_{zona} são as humidades absolutas da zona e do ambiente, e t é o tempo (s) (Woods et al., 2013).

Os modelos CTF (*Conduction Transfer Function*) são usados em modelos simplificados (Energy Plus, 2011), calculando apenas transferências de calor nas fronteiras. Estes modelos têm uma maior rapidez de cálculo e uma precisão aceitável relativamente às condições termohigrométricas interiores, assim como relativas ao consumo energético (Yang et al., 2015).

Outros programas de simulação de edifícios utilizam um modelo EC (*Effective Capacitance*), que introduzem o conceito de capacitância efetiva de humidade, definindo-o como um multiplicador da capacidade de acumulação de vapor de água no ar do espaço. O modelo EC não visa solucionar explicitamente o termo da absorção de humidade, mas agrega o seu efeito na capacidade de humidade do ar de acordo com a Equação 2:

$$\rho_{ar}(EC)V_{zona} \frac{d\omega_{zona}}{dt} = \dot{m}_{ar,ventilação}(\omega_{amb} - \omega_{zona}) + \dot{m}_{v,ganho} \quad (2)$$

Em que EC é a capacitância de humidade efetiva das paredes e mobília (um edifício com uma $EC = 15$ significa que os materiais do edifício, juntamente com o ar local, têm a capacidade de absorver 15 vezes mais humidade do que o ar local isoladamente). Este modelo é vantajoso no que se refere a negligenciar completamente o amortecimento dos valores de humidade por parte dos materiais. No entanto, os valores de EC são empíricos e têm pouca relação física com a realidade, e a conjugação do ar da sala com os materiais implica que a resistência à transferência de humidade entre os materiais e o volume de ar da sala seja desprezada, o que pode originar uma modelação incorreta (Woods et al., 2013).

Outros modelos, como os modelos HAMT, em EnergyPlus (Energy Plus, 2011), utilizam um método de diferenças finitas para determinar a transferência tanto de massa como de calor através dos materiais do edifício. O modelo HAMT é o mais rigoroso dos quatro apresentados neste trabalho, sendo frequentemente utilizado como padrão para

comparação. Adicionalmente à transferência de vapor, o modelo HAMT calcula transferência de líquidos, o que se torna relevante em ambientes com umidade relativa elevada. No entanto, a validação deste tipo de cálculos exige tecnologias de medição com maior precisão na aquisição de parâmetros, assim como mais tempo de computação comparativamente com os modelos mais simples (Belleudy et al., 2016; Tariku et al., 2010; Woods et al., 2013).

Considerando os problemas anteriores, métodos mais simples, como o modelo EMPD (*Effective Moisture Penetration Depth*) (Energy Plus, 2011), foram desenvolvidos de forma a calcularem o efeito da umidade nos materiais da construção com precisão, e com reduzido tempo de resolução (Cunningham, 1992; Kerestecioglu, Swami, & Kamel, 1990). Este modelo considera uma camada fina fictícia de umidade uniforme contida numa espessura denominada profundidade de penetração de umidade, d_{EMPD} , que se comporta dinamicamente e troca umidade com o ar ambiente, e é calculada a partir da capacidade máxima de umidade e da permeabilidade de vapor (Yang et al., 2015). O modelo EMPD é caracterizado por assumir variações cíclicas de umidade na zona e conseqüentemente de carga latente, pelo que é plausível usá-lo para calcular os ganhos de calor latente no interior, que ocorrem previsivelmente de forma diária. Por outro lado é menos credível na determinação do calor latente transferido por ventilação ou por infiltração, visto a principal limitação à utilização deste método se centrar na perda de precisão em simulações de umidade em longas escalas de tempo, como mudanças sazonais (TRNSYS, 2012). Surgem assim, duas formulações do modelo EMPD, resolvendo ambas a Equação 3 (Woods et al., 2013):

$$\rho_{material} A d_{EMPD} \frac{du}{dt} = h_m A (\omega_{zona} - \omega) \quad (3)$$

Em que u corresponde ao conteúdo de umidade por massa de material, $\rho_{material}$ é a densidade do material absorvente, d_{EMPD} a profundidade de penetração de umidade efetiva, A a área da superfície, h_m o coeficiente de transferência de massa convectiva no ar ($kg/m^2.s$), e ω a umidade absoluta do ar em equilíbrio com o material (Woods et al., 2013).

O primeiro método (EMPD₁) consiste numa formulação não-isotérmica conjugada com funções de transferência de condução para as equações da energia. Este modelo,

apesar de ser frequentemente utilizado no *EnergyPlus* para várias simulações de edifícios, não dispõe ainda de nenhum estudo de validação (Woods et al., 2013). Este modelo transforma a derivada do conteúdo de humidade em relação ao tempo de acordo com a Equação 4:

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial \omega} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\partial u}{\partial T} \frac{dT}{dt} \quad (4)$$

Em que $\partial u/\partial \omega$ e $\partial u/\partial T$ são calculados pela curva de absorção de humidade ($u = f(\phi)$) e pela relação entre a humidade relativa e a temperatura. O termo não isotérmico, que inclui a derivada da temperatura (dT/dt) é calculado através da variação de temperatura entre o passo de tempo anterior e o atual (Woods et al., 2013). Substituindo a equação 3 na equação 4, resulta uma equação diferencial ordinária que pode ser resolvida em ordem a ω (Equação 5):

$$\rho_{material} A d_{EMPD} \left(\frac{\partial u}{\partial \omega} \right) \frac{d\omega}{dt} = h_m A (\omega_{zona} - \omega) + \rho_{seco} A d_{EMPD} \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right) \frac{dT}{dt} \quad (5)$$

O segundo método (EMPD₂), é uma opção do utilizador do *software* TRNSYS, que inclui duas profundidades efetivas: uma camada superficial que tem em conta gradientes a curto termo, e uma camada profunda que representa a resposta dos materiais a eventos de longo termo, como mudanças sazonais. Ao contrário do modelo EMPD₁, é um modelo isotérmico. Os modelos de edifícios que utilizam esta formulação, como o TRNSYS, incluem equações de balanço energético. No entanto, negligenciam os efeitos da temperatura na humidade de equilíbrio contida nos materiais. Tipicamente também negligenciam o calor latente resultante da absorção de água (Woods et al., 2013). Apesar das versões existentes deste modelo, todas calculam a transferência de humidade pelos materiais das paredes usando a Equação 6:

$$\rho_{material} A d_{EMPD} \frac{du}{d\phi_{material}} \frac{d\phi_{material}}{dt} = \frac{A(\omega_{zona} - \omega)}{\frac{1}{h_m} + \frac{d_{EMPD}}{2\rho_{ar}\delta_{perm}}} + \frac{A(\omega_{profundidade} - \omega)}{\frac{d_{EMPD}}{2\rho_{ar}\delta_{perm}} + \frac{d_{EMPD-profundidade}}{2\rho_{ar}\delta_{perm}}} \quad (6)$$

O termo no lado esquerdo traduz a acumulação de humidade no material ($\phi_{material}$ é a humidade relativa no interior do material), ao passo que os dois termos do lado direito são a transferência de humidade da zona para a camada superficial e a transferência da camada superficial para a camada profunda. Nesta equação $1/h_m$ é a resistência à transferência de humidade na camada limite de ar, enquanto que os outros três

termos são as resistências às transferências de humidade por difusão nos materiais (Woods et al., 2013).

Vários trabalhos avaliam o desempenho destes modelos, EC, CTF, HAMT, e das duas formulações do modelo EMPD, comparando-os no que diz respeito à sua capacidade para calcular o efeito da humidade no consumo energético do edifício em diferentes situações (Nguyen, Reiter, & Rigo, 2014).

Simulam-se os quatro modelos em três casos separados, cada um com uma geração periódica de calor latente e ventilação contínua. A humidade exterior é diferente em cada um dos casos: humidade exterior constante, humidade exterior com variação sinusoidal e humidade ambiente de acordo com dados meteorológicos. Aqui, o objetivo é, não determinar o “melhor” modelo, mas comparar a dinâmica de cada um dos modelos para casos simples (Woods et al., 2013; Yang et al., 2015).

Os resultados obtidos revelam que o modelo HAMT assume maior precisão e exatidão para qualquer situação. Para climas quentes e húmidos, o modelo CTF revela-se como uma escolha igualmente apropriada para a simulação das cargas pico de arrefecimento. Contrariamente, o modelo EMPD assume erros muito superiores para poder ser considerado uma escolha inteligente para avaliações neste tipo de situações, apesar de sustentar de um período de computação muito inferior ao do modelo HAMT. Em climas temperados, cálculos dos modelos CTF e EMPD adquirem erros sempre superiores a 15%, não sendo uma escolha indicada para esse tipo de clima. Para climas quentes e secos, o modelo CTF adquire, novamente, valores de erro reduzidos no cálculo das cargas máximas de arrefecimento. O modelo EC possui a vantagem de ser de simples implementação, no entanto, a sua resposta apresenta-se como sendo menos realística do que aquilo que acontece nos restantes modelos (Yang et al., 2015).

Assim, os modelos HAMT verificam uma maior precisão e exatidão nos resultados demonstrados para o maior número de situações possíveis, a custo de um tempo de computação e de cálculo consideravelmente superior ao dos restantes métodos considerados até este ponto.

2.2. Modelação CFD em *SOLIDWORKS*

A base deste conceito é a representação de informação de modelos em 3D de produtos de forma precisa e com elevada qualidade utilizando um sistema CAD (*Computer-Aided Design*) como plataforma para as simulações físicas efetuadas. A aplicação de simulações CFD integradas em modelos CAD não só acelera o processo de projeto, como torna as análises mais precisas (*SOLIDWORKS*, 2019).

A plataforma utilizada nesta dissertação para a modelação das transferências de calor e de humidade no ambiente interior é o *SOLIDWORKS Flow Simulation*, uma ferramenta CFD que possibilita a simulação de fluxos de gás e de líquidos em volumes pré-determinados (3D) por forma a determinar comportamentos, capacidades e desempenho de produtos (*SOLIDWORKS*, 2019). É importante referir que o *software* CAD utilizado foi originalmente construído para ferramenta de desenho, e que anos mais tarde foi reconhecida a necessidade de integrar modelação CFD no *software* principal. Assim, o *SOLIDWORKS Flow Simulation* opera, em concordância com o sistema CAD no qual está integrado. O *SOLIDWORKS*, recorrendo diretamente ao CAD como fonte de informação geométrica, gera a malha de elementos finitos para resolução CFD em diversas tecnologias de modelação e de processamento de resultados (mais precisamente técnicas). Sumarizando, o CAD descreve o modelo sólido e o CFD *Flow Simulation* integra as equações de dinâmica de fluidos (Sobachkin & Dumnov, 2014).

Geralmente, os geradores de malha em CFD são baseados em algoritmos adaptados ao corpo físico. O *SOLIDWORKS Flow Simulation* serve-se de malhas com base cartesiana para a respetiva computação (figura 2), sendo que a técnica de geração de malha é um dos elementos-chave para a ponte CAD/CFD neste tipo de simulações. Este tipo de malha é gerado independentemente da geometria do sólido propriamente dita, o que resulta numa interseção arbitrária entre os elementos definidos e a fronteira entre sólido e fluido. Este processo gera elementos (ou células) de forma cúbica adjacentes entre si. A solução do problema é então calculada para o centro de cada elemento. Os elementos interseccionados pela fronteira fluido-sólido são abordados de forma diferente. Nestes locais, superfícies com curvatura pequena, canais estreitos, pequenas saliências, etc., ocorre um refinamento da malha dividindo cada elemento sucessivamente em elementos mais pequenos (figura 2). Este procedimento de refinamento é essencial na resolução das

equações em locais com geometria irregular, necessitando de ferramentas eficientes de geração de malha (Sobachkin & Dumnov, 2014).

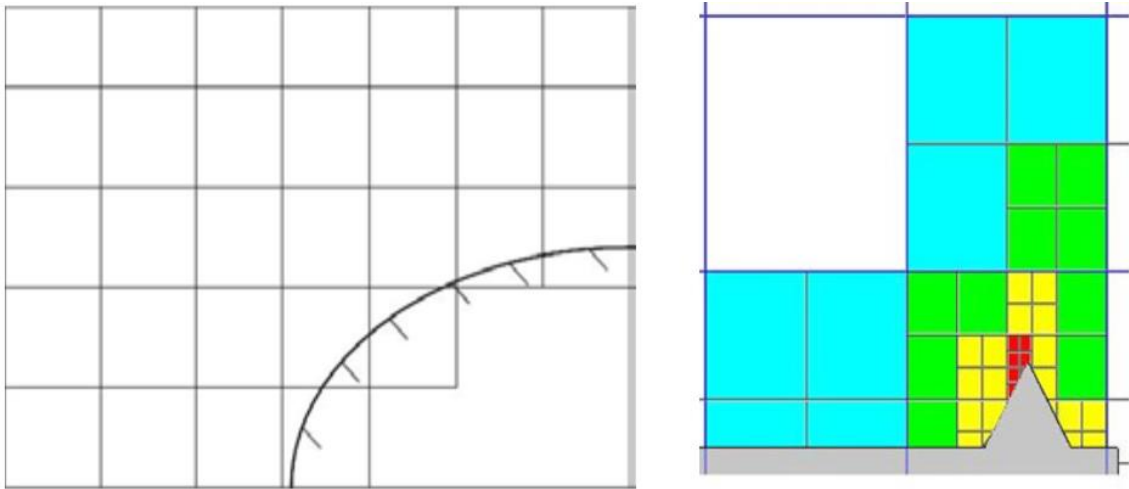


Figura 2 - Geração e refinamento de malha cartesiana pelo SOLIDWORKS Flow Simulation (SOLIDWORKS, 2019).

No presente trabalho, a plataforma *Flow Simulation* será aplicada para estudar em regime permanente a distribuição do ar e humidade no interior do submarino. A avaliação modela ainda o sistema de climatização, como sendo uma bateria de arrefecimento, e avalia a propagação de vapor de água gerado no seu espaço interior em regime estacionário.

2.3. Modelo Integral da Difusão de Poluentes

O problema da difusão de vapor no submarino pode ser interpretado como um problema de difusão integral de poluentes num ambiente interior. Neste caso, o ambiente é representado por um único ponto e fazendo uso da equação diferencial (Equação 7), traduz-se a evolução da concentração de um determinado poluente num espaço para determinadas condições interiores iniciais, e condições de insuflação do ar:

$$V \cdot \frac{dC_i}{dt} = \varepsilon \cdot q_{insf} \cdot C_e + G - \varepsilon \cdot q_{insf} \cdot C_i \quad (7)$$

Em que V é o volume total do espaço considerado (m^3), ε é a eficácia de ventilação, sendo igual a 1 em sistemas em arrefecimento com insuflação superior, q_{insf} corresponde ao caudal de insuflação no espaço (m^3/h), C_e corresponde à concentração do poluente insuflada no espaço (g/m^3), G corresponde à geração do poluente no espaço (g/h) e C_i à concentração (g/m^3) do poluente no interior (com condições iniciais). dC_i/dt traduz a taxa de variação da concentração de poluente em função do tempo, t (h). Reformulando a Equação 7, fica-se com a Equação 8:

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{1}{V} (\varepsilon \cdot q_{insf} (C_e - C_i) + G) \quad (8)$$

Considerando o vapor de água no espaço, isto é, a humidade absoluta, ω , como o “poluente” gerado e insuflado no ambiente interior, é possível determinar a sua evolução. É relevante referir que, para esta adaptação, em vez de uma geração, G , de poluentes, tem-se uma geração de vapor, G_v , nas mesmas unidades, assim como em vez de concentrações de poluente, C_e e C_i , usa-se os valores de humidade absoluta de insuflação, ω^*_{insf} , e humidade absoluta no ambiente interior, ω^*_{amb} , respetivamente, sob a forma g de H_2O/m^3 de ar em vez de g de H_2O/kg de Ar. Note-se que é aproximadamente $\omega^* = 1,2 \times \omega$, dado que $\rho_{ar(24^\circ C)} = 1,2 kg/m^3$ (Engineering ToolBox, 2003). É obtida então a equação diferencial (Equação 9) para a evolução da humidade absoluta em espaços com um caudal de insuflação:

$$\frac{d\omega^*_{amb}}{dt} = \frac{1}{V} (\varepsilon \cdot q_{insf} (\omega^*_{insf} - \omega^*_{amb}) + G_v) \quad (9)$$

Esta equação diferencial será aplicada para avaliar dinamicamente a evolução dos valores de humidade absoluta, assim como para simular a resposta do sistema de

climatização instalado. Será considerado em cada tempo de integração as cargas de calor, sensível e latente. Deverá ser tido em conta o facto do valor da geração de vapor no espaço, G_v , ser diferente consoante a hora do dia, devido à ocupação e utilização do espaço variar. Por outro lado, a humidade absoluta de insuflação varia em função da carga de arrefecimento sensível pedida à bateria de arrefecimento, dado que o sistema controla a temperatura interior. Por outro lado, valores como o do caudal de insuflação, q_{insf} , e do volume interior, V , permanecem constantes durante toda a simulação.

A equação será solucionada através do método de Runge-Kutta de 4ª ordem, Apêndice 5, um método de resolução de EDO's (Equação Diferencial Ordinária) que apresenta um comportamento numérico preciso e exato em vasto número de aplicações. A equação será resolvida ao longo de um período de tempo fazendo uso do *software* MATLAB, onde irá ser desenvolvida uma aplicação que aplique o método anteriormente mencionado de modo a estabelecer um modelo integral da evolução da humidade absoluta no interior do submarino.

2.4. Arrefecimento e Controlo de Humidade

Numa fase inicial, o controlo da temperatura ambiente tem sido o principal foco da indústria de ar condicionado e refrigeração, sendo a carga sensível no espaço o fator mais influente no projeto de sistemas de climatização (Lewis Harriman III, Lstiburek, & Kittler, 2000). No que diz respeito a processos de arrefecimento utilizam-se normalmente baterias de arrefecimento, que são permutadores ar-refrigerante. Em muitos casos o fluido refrigerante de arrefecimento é água, podendo ter glicol. Se o arrefecimento corresponder a uma remoção de carga exclusivamente sensível, a evolução correspondente num diagrama psicrométrico, Anexo 2 (ASHRAE, 1992), é de acordo com a evolução representada na figura 3:

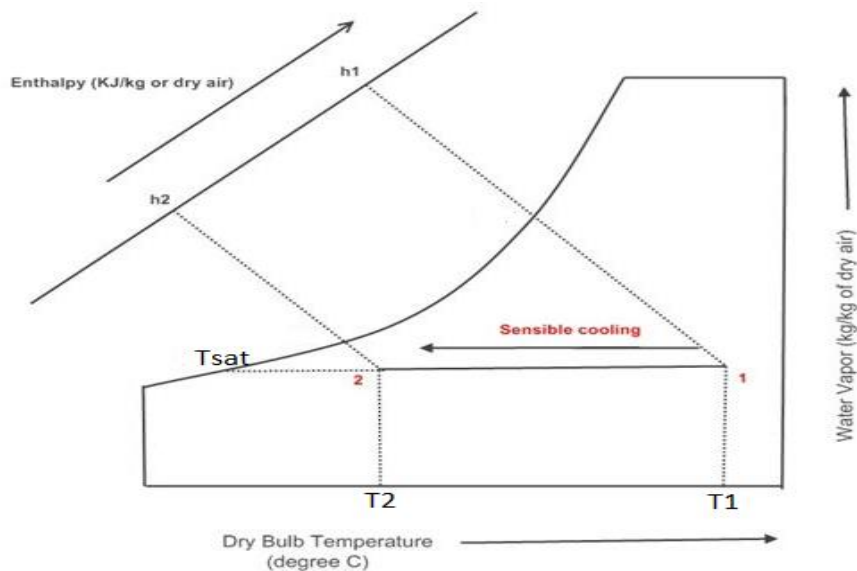


Figura 3 - Evolução psicrométrica de arrefecimento sem desumidificação (Khemani, 2019a).

Em que (1) traduz as condições do ar antes de entrar na bateria arrefecimento, e (2) traduz as condições do mesmo ar à saída da bateria. Neste caso, o calor absorvido (Q em W) pode ser determinado pela Equação 10:

$$Q = \dot{m}_a c_p (T_1 - T_2) \quad (10)$$

Em que \dot{m}_a representa o caudal mássico de ar que atravessa a bateria de arrefecimento (kg/s), c_p o calor específico do ar ($J/kg \cdot ^\circ C$), que nesta situação permanece constante, T_1 a temperatura ($^\circ C$ ou K) no ponto (1), e T_2 representa a temperatura ($^\circ C$ ou K) no ponto (2). É importante referir que, para esta situação, não há qualquer remoção de humidade do ar, pelo que esta permanece constante ao longo de toda a evolução.

Em sistemas convencionais, a remoção de humidade em arrefecimento é efetuada numa bateria onde o ar é arrefecido de modo a que o ponto de orvalho seja atingido no interior da bateria de arrefecimento, provocando condensação do vapor de água e, por consequência, redução do valor da humidade absoluta. Este fenómeno, em termos ideais, pode ser descrito de acordo com a evolução psicrométrica representada na figura 4:

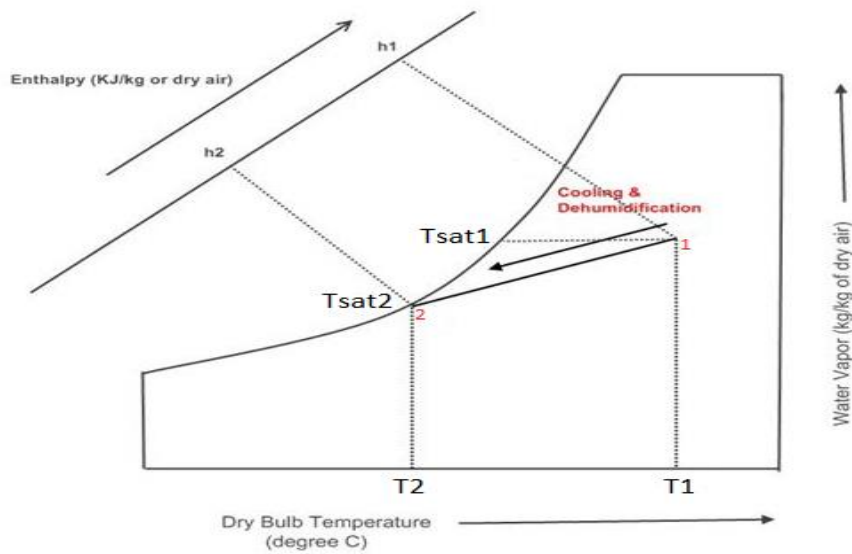


Figura 4 - Evolução psicrométrica de arrefecimento com desumidificação (Khemani, 2019b).

Neste caso, o calor absorvido (W) pode ser determinado pela Equação 11:

$$Q = \dot{m}_a(h_1 - h_2) \quad (11)$$

Em que h_1 e h_2 representam a entalpia do ar (J/kg) à entrada e à saída da bateria de arrefecimento, respetivamente, não sendo desprezável a energia associada à quantidade de água que condensa na mesma. Para este caso, a humidade absoluta presente no ar não permanece constante, sendo necessário o uso dos valores de entalpia para o cálculo da transferência calor. No entanto, numa situação real, pode-se considerar que parte do ar que passa pela bateria de arrefecimento não toca na superfície fria, pelo que o ar sai a uma temperatura superior à da bateria. Nestas situações ocorre uma mistura entre ar nas condições de funcionamento da bateria de arrefecimento e ar, que não tendo qualquer contacto com esta, se mantém nas condições iniciais, como é representado na figura 5:

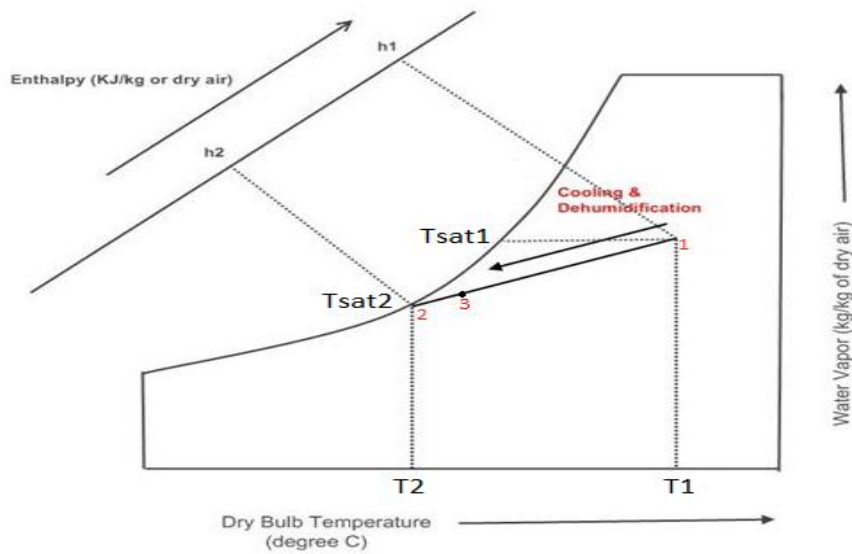


Figura 5 - Evolução psicrométrica real de arrefecimento com desumidificação (Khemani, 2019b).

Nesta situação, o ponto (2) corresponde ao ponto da bateria de arrefecimento, e o ponto (3) corresponde às condições do ar à saída da bateria. Assim o calor absorvido pela bateria passa a ser descrito pela Equação 12:

$$Q = \dot{m}_a(h_1 - h_3) \quad (12)$$

Em que h_3 corresponde às condições reais a que o ar sai da bateria de arrefecimento, sendo possível identificar um fator de contacto caracterizado pela Equação 13:

$$fc = \frac{T_1 - T_3}{T_1 - T_2} \quad (13)$$

Este fator de contacto pode ser entendido como uma medida de suscetibilidade do ar às condições de funcionamento da bateria de arrefecimento. Isto é, quanto mais próximo este valor da unidade, mais perto da temperatura de funcionamento da bateria estará a temperatura real de insuflação do ar no ambiente.

Estes sistemas convencionais, removem humidade do ar arrefecendo-o abaixo do ponto de orvalho, desumidificando-o em simultâneo. Este processo, se implementado para a realização de desumidificação, implica geralmente um gasto energético suplementar para a desumidificação, visto que a temperatura da fonte fria tem de ser reduzida abaixo do ponto de orvalho do ar. Além disto, a utilização destes sistemas pode necessitar de um reaquecimento do ar eventualmente até à temperatura desejada para o espaço (Zhao, Liu, Zhang, & Jiang, 2011). Um sistema de arrefecimento com desumificação,

com reaquecimento pode ser representado pelo esquema da figura 6, em que o ar após entrada no equipamento, perderia calor na bateria de arrefecimento por forma a ultrapassar o seu ponto de orvalho, perdendo vapor de água por condensação, sendo de seguida reaquecido por resistências elétricas até à temperatura desejada para a insuflação:

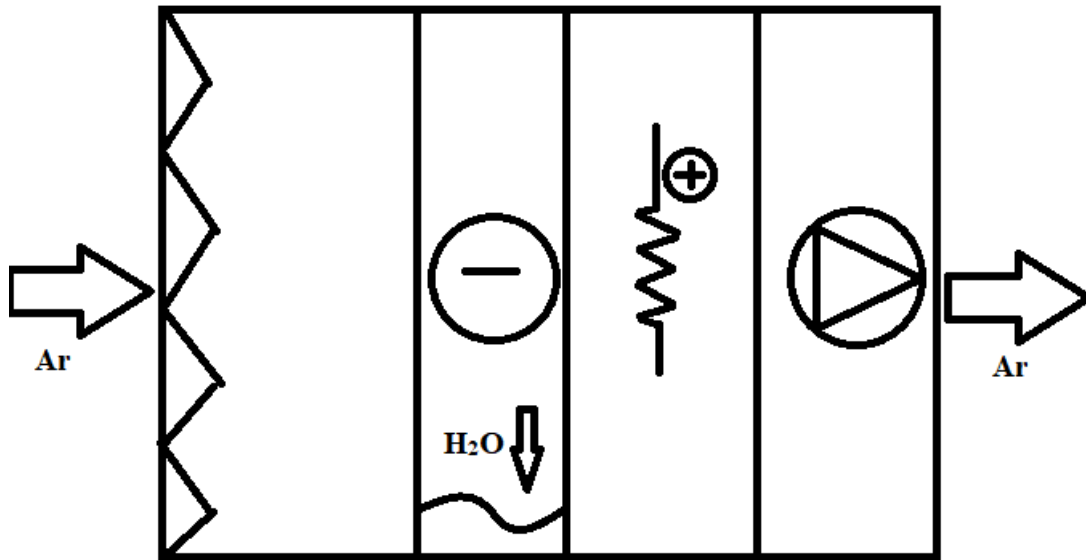


Figura 6 - Modelo esquemático de um sistema de arrefecimento com desumidificação e reaquecimento.

Em muitos ambientes, a humidade no ar tem de ser controlada para evitar o desenvolvimento de fungos e bactérias nos edifícios, nomeadamente em paredes e no próprio sistema de climatização, gerando uma perda da QAI (qualidade do ar interior). Globalmente, problemas de humidade em edifícios estão relacionados com um ou mais de três problemas: infiltração de água do exterior, condensação em climas quentes e húmidos, e condensação em climas frios. Tendo em conta o âmbito em que esta dissertação se insere, um submarino em profundidade estará sujeito a uma situação análoga às condições de um clima frio. Mesmo assim, devido à carga sensível existente no interior por ação humana e de equipamentos instalados, o seu sistema de climatização estará maioritariamente em modo de arrefecimento. Assim, dá-se mais foco, neste trabalho, a problemas relacionados com condensação em climas frios, que geralmente derivam da existência de valores de temperatura de saturação demasiado elevados no ar interior. Torna-se, então, necessária uma abordagem no sentido de controlar níveis de humidade interior de uma forma precisa (Lewis Harriman III et al., 2000).

Outro problema verificado em sistemas de climatização ocorre devido à água condensada na bateria de arrefecimento, que se traduz numa área próspera para o desenvolvimento de bactérias potencialmente nocivas para a saúde humana (Zhu, Li, Liu, Liu, & Jiang, 2010). É com esta motivação que surgem sistemas baseados no ciclo do sistema de Pennington (Penney & McClain-cross, 1985; van Zyl & Warwicker, sem data). Estes sistemas apoiam-se na utilização de um agente dessecante no estado sólido para garantir a função de desumidificação. Estes materiais têm a capacidade de remover humidade do ar circulante por absorção e são colocados num rotor de baixa velocidade que integra o sistema de climatização (Nie, Li, Hu, Fang, & Zhang, 2017). Muitos destes sistemas têm aplicações particulares a climas quentes e húmidos, ou em climas frios e secos, sendo apresentados a título informativo. Devido ao espaço que ocupam, dificilmente poderão ser usados como tecnologia de remoção de vapor de água num submarino.

No ciclo base (figura 7), o ar exterior (1) inicialmente transfere humidade para o material higroscópico do rotor dessecante (2), e de seguida transfere calor sensível para o ar de extração por meio de um regenerador de calor (3). Antes de insuflado (5), o ar é arrefecido até à temperatura desejada num arrefecedor evaporativo (4), garantindo níveis de temperatura e de humidade do ar apropriados às condições interiores desejadas. O ar de extração (6), por sua vez, é inicialmente humidificado adiabaticamente (7), e de seguida recebe calor sensível do ar de insuflação no regenerador (3'). Posteriormente, este ar é aquecido por uma fonte quente (8), e usado para regenerar as propriedades higroscópicas do material do rotor dessecante (2'), que se encontra saturado com humidade absorvida anteriormente do ar de insuflação. Finalmente, após o rotor, o ar de extração é libertado para o exterior (9) (Maalouf, Wurtz, & Allard, sem data; Pettersen, Li, Eikevik, & Bredeesen, 2012).

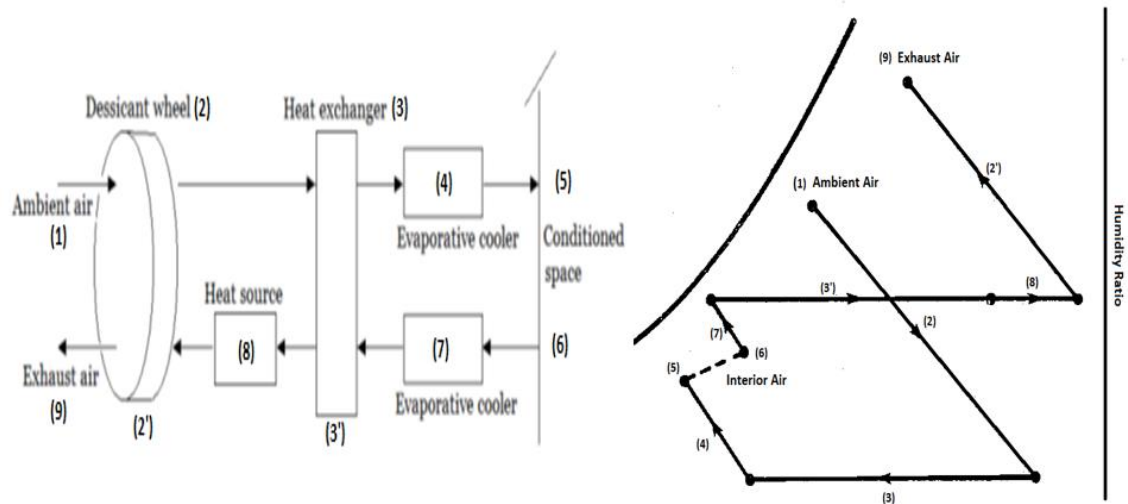


Figura 7 - Ciclo simplificado do sistema de Pennington e evoluções psicrométricas correspondentes (Penney & McClain-cross, 1985; Pettersen et al., 2012).

Neste sistema, tendo a desumidificação sido assegurada pelo rotor dessecante, a temperatura da bateria de arrefecimento não precisa de ter valores tão baixos em comparação com o caso dos ciclos de refrigeração convencionais de compressão de vapor descritos anteriormente, melhorando a eficiência energética deste tipo de sistemas (Nie et al., 2017). Em contrapartida, este sistema pode usar energia elétrica como fonte de calor para o ar de regeneração, o que contribui para um aumento do consumo energético. Baseados neste sistema, outros foram desenvolvidos de modo a evitar o uso de energia elétrica. A eficiência energética aumenta consideravelmente se se utilizar uma fonte de energia renovável como fonte quente para regenerar o rotor dessecante, como por exemplo, a energia solar, energia proveniente de cogeração, ou utilização de calor residual. Outros sistemas utilizam uma unidade de refrigeração ou uma bomba de calor por compressão de vapor (figura 8) no sistema de Pennington convencional, naquilo que é conhecido como um sistema HP-SDC (*Heat Pump assisted Solid Desiccant Cooling*). Este sistema utiliza o calor libertado pelo fluido refrigerante no condensador como fonte quente para regeneração do rotor dessecante, e utiliza o evaporador como fonte fria para arrefecimento do ar, tanto de insuflação como de extração. Sistemas deste tipo revelam valores de COP (*Coefficient Of Performance*) superiores a sistemas apenas com uma bateria de arrefecimento alimentada por um ciclo normal de compressão de vapor para desumidificar o ar (Nie et al., 2017; Pettersen et al., 2012).

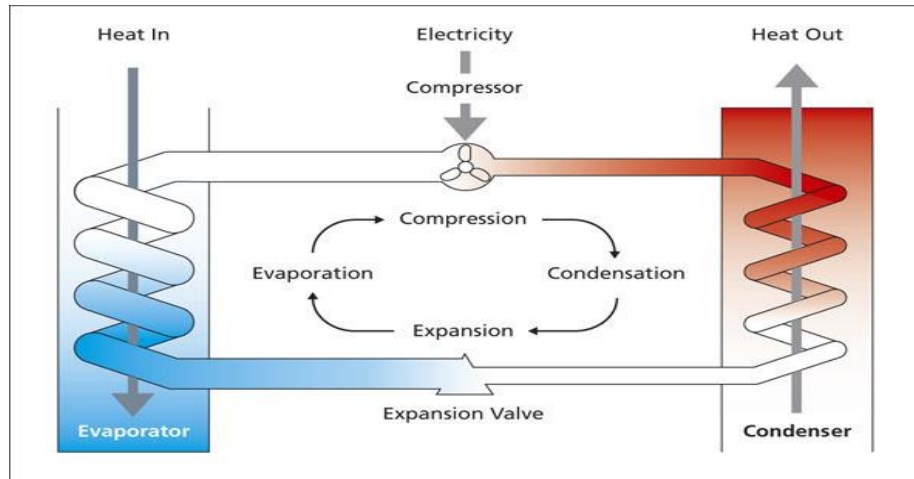


Figura 8 - Ciclo convencional de refrigeração/bomba de calor por compressão de vapor (Heat Pump Association, 2017).

Um exemplo de um sistema que se sirva deste conceito é o representado na figura 9. Este sistema efetua recirculação do ar interior, misturando-o com ar exterior, conduzindo-o ao rotor dessecante e, de seguida, ao evaporador da bomba de calor. Conseguem-se assim insuflar o ar frio e seco no ambiente. Paralelamente, o calor libertado no condensador da bomba de calor servirá para aquecer o ar exterior para regenerar o rotor dessecante. É instalado um outro condensador em paralelo ao primeiro, que serve de *bypass* ao rotor dessecante, pois o calor de condensação é superior ao calor de regeneração necessário neste sistema. Por fim, o ar de extração, o ar de regeneração e o ar exterior proveniente do *bypass*, são misturados e evacuados para o exterior (Nie et al., 2017).

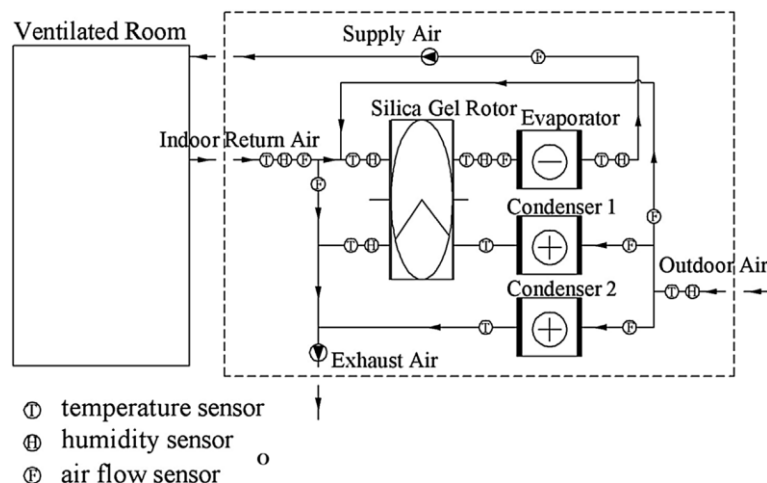


Figura 9 - Sistema HP-SDC desenvolvido para operação em condições de Verão (Nie et al., 2017).

Assim, este sistema aproveita a energia do condensador da bomba de calor para regenerar o rotor, removendo calor latente na roda e no evaporador para conferir ao ar de insuflação o condicionamento térmico exigido (Nie et al., 2017).

Existem ainda sistemas THIC (*Temperature and Humidity Independent Control*) que se baseiam na regulação independente da temperatura e da humidade, por meio de subsistemas dedicados ao controlo exclusivo de cada uma dessas propriedades. A principal vantagem deste tipo de arranjo traduz-se na possibilidade de a fonte fria de arrefecimento ambiente poder operar a níveis de temperatura mais elevados do que num sistema de compressão de vapor convencional. Sistemas deste tipo servem-se de dessecantes líquidos, como soluções de brometo de lítio ou cloreto de lítio, como meio de absorção de humidade (Chen, Yin, & Zhang, 2014; Zhao et al., 2011; Zhu et al., 2010). Como referido, é possível dividir estes sistemas em duas partes, como demonstrado no sistema da figura 10, em que se destaca um subsistema dedicado a controlo de humidade (1) constituído por um ou mais processadores de ar exterior alimentados por uma bomba de calor, sendo o controlo da temperatura assegurado por um subsistema (2) composto por unidades de ventilação e permutador de calor a temperatura mais elevada, por exemplo, a alta temperatura numa torre de arrefecimento (Zhao et al., 2011; Zhu et al., 2010).

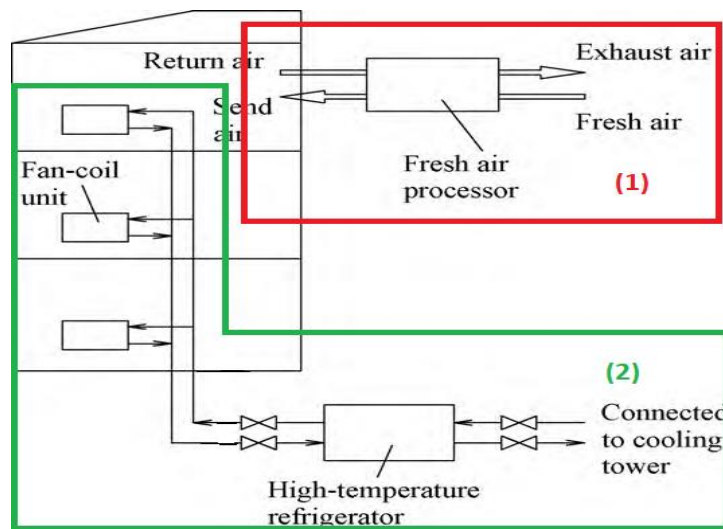


Figura 10 - Diagrama esquemático de um sistema THIC (Zhu et al., 2010).

Os processadores de ar exterior (ou ar novo) utilizam dessecante líquido e são compostos por um recuperador de calor total de dois estágios e por uma unidade de tratamento de ar subdividida num módulo de desumidificação e num módulo de regeneração, ambos associados a um ciclo de uma bomba de calor, figura 11. No que diz respeito

à unidade de tratamento de ar, a solução dessecante aquece no condensador da bomba de calor e concentra-se no módulo de regeneração, transferindo humidade para o ar de extração. De seguida, a solução é arrefecida no permutador de calor e no evaporador da bomba, entrando no módulo de desumidificação para remoção da humidade do ar de insuflação. A solução é posteriormente enviada ao permutador para pré-aquecimento e retorna ao condensador para repetir o ciclo. No recuperador de calor total, o ar exterior (novo) é inicialmente arrefecido e desumidificado pela solução dessecante (a baixa temperatura) antes de atravessar o módulo de desumidificação. A solução é posteriormente bombeada, transferindo a humidade e o calor anteriormente absorvidos para o ar de extração, onde é arrefecida, repetindo o processo (Zhao et al., 2011; Zhu et al., 2010).

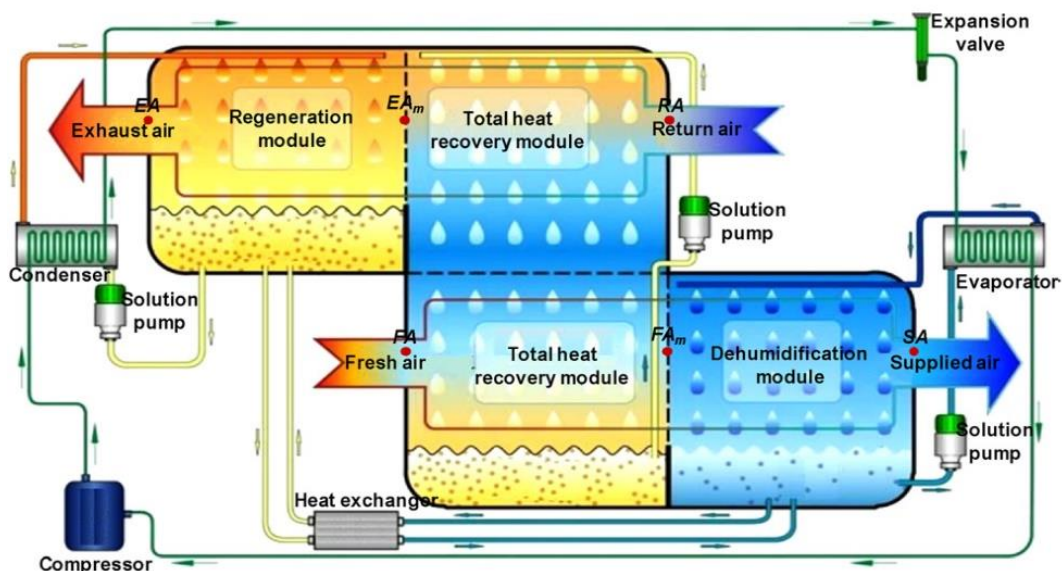


Figura 11 - Processador de ar com dessecante líquido acionado por uma bomba de calor (Zhao et al., 2011).

Nestas instalações, o elevado COP em ambientes quentes e húmidos deve-se à utilização da capacidade de arrefecimento do ar de exaustão para baixar a temperatura do ar novo, assim como ao aproveitamento da capacidade de arrefecimento do evaporador a temperatura mais elevada. O calor libertado pelo condensador da bomba de calor é usado nos processos de regeneração ou para reaquecimento nas unidades de tratamento de ar (Zhao et al., 2011).

2.5. Modelação de Baterias de Arrefecimento

Baterias de arrefecimento são globalmente utilizadas em sistemas HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*) para remover calor do ar circulante e garantir a temperatura que se exige no ar de insuflação. Consistem, geralmente, em permutadores de calor água-ar, em que a água serve como fluido arrefecedor na bateria, para a qual o ar transfere calor por condução e convecção ao longo do permutador. Na bateria há remoção de carga sensível devido à redução da temperatura do ar e de carga latente por condensação do vapor de água contido no ar. Torna-se, então, relevante a avaliação de desempenho das baterias de arrefecimento instaladas em UTA's (Unidades de Tratamento de Ar). As baterias de arrefecimento operam dinamicamente, no sentido de manter a temperatura no ambiente interior num determinado valor, variando geralmente a temperatura de insuflação. Há assim a necessidade de desenvolvimento de modelos dinâmicos que simulem a resposta de uma bateria em diferentes condições (Davies, Herrick, Zhou, & Braun, 2005; Koenig, 2007; Samuel, Stephane, & Vincent, sem data; Yamaguchi et al., 2006).

Com esta motivação, têm sido desenvolvidos vários modelos de baterias de arrefecimento usando *softwares*, como o TRNSYS ou o EES (*Engineering Equation Solver*). É possível categorizar os modelos mais comuns em três grupos distintos: modelos de fronteira variável (modelo “ASHRAE Toolkit”), modelos ϵ -NTU de zona única (modelo de “Braun-Lebrun”) e modelos de elementos finitos.

2.5.1. Modelo “ASHRAE Toolkit”

Este modelo aborda o problema começando por dividir a área total da superfície por onde se dá a transferência de calor em duas porções distintas: uma porção totalmente húmida, correspondente à parte da bateria de arrefecimento na qual ocorre condensação do ar, e uma porção totalmente seca, na qual não se verifica condensação. A fronteira entre estas duas superfícies é variável e determinada pela temperatura da superfície, ou seja, a superfície da bateria considera-se “húmida” quando a sua temperatura iguala a temperatura do ponto de orvalho do ar que entra na bateria. Assim, existem três situações possíveis: um regime totalmente seco, em que a porção seca cobre toda a região de transferência de calor, um regime totalmente húmido em que a parte húmida cobre toda a área,

e um regime parcialmente húmido, em que a fronteira variável define a região na qual ocorre condensação (Davies et al., 2005; Koenig, 2007; Samuel et al., sem data; Yamaguchi et al., 2006).

Num regime totalmente seco, as condições de insuflação do ar são determinadas pelo método ε -NTU básico (efetividade-número de unidades de transferência). Este método resolve a sequência de equações (Equações 14 a 23) para determinar a transferência de calor na superfície da bateria de arrefecimento:

$$AU_{seco} = \frac{1}{R_{ar}c_{p,ar}} \quad (14)$$

$$C_{ar} = \dot{m}_{ar}c_{p,ar} \quad (15)$$

$$C_{\acute{a}gua} = \dot{m}_{\acute{a}gua}c_{p,\acute{a}gua} \quad (16)$$

$$C_{min} = \min(C_{ar}, C_{\acute{a}gua}) \quad (17)$$

$$C_{max} = \max(C_{ar}, C_{\acute{a}gua}) \quad (18)$$

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (19)$$

$$NTU = \frac{AU_{seco}}{C_{min}} \quad (20)$$

$$\varepsilon = f(NTU, C_r) \quad (21)$$

$$Q_{dry,max} = C_{min}(T_{ar,in} - T_{\acute{a}gua,in}) \quad (22)$$

$$Q_{dry} = \varepsilon \cdot Q_{dry,max} \quad (23)$$

Em que AU_{seco} corresponde ao produto do coeficiente global de transferência de calor pela área total de transferência de calor (W/K), R_{ar} à resistência térmica do ar (K/W), $c_{p,ar}$ e $c_{p,\acute{a}gua}$ (médios) correspondem aos calores específicos do ar e da água ($J/kg \cdot K$), respetivamente, C_{ar} e $C_{\acute{a}gua}$ correspondem às taxas de capacidade térmica de cada um dos fluidos do permutador (W/K), \dot{m}_{ar} e $\dot{m}_{\acute{a}gua}$ são, respetivamente, os caudais mássicos do ar e da água (kg/s), C_r à razão de taxas de capacidade, NTU ao número de unidades de transferência, ε à efetividade, Q_{dry} à transferência de calor na bateria de arrefecimento (W), sendo que $Q_{dry,max}$ corresponde à transferência de calor máxima que

pode ocorrer para esta bateria, $T_{ar,in}$ e $T_{\acute{a}gua,in}$ correspondem às temperaturas de entrada, respetivamente, do ar e da água na bateria (K ou $^{\circ}C$). Por fim, é calculada a temperatura de insuflação do ar pela bateria de arrefecimento, fazendo uso da Equação 24:

$$Q_{dry} = \dot{m}_{ar} c_{p,ar} (T_{ar,in} - T_{ar,out}) \quad (24)$$

Em que $T_{ar,out}$ corresponde à temperatura do ar de insuflação (K ou $^{\circ}C$) (Fisher, Liesen, Strand, & Pedersen, 2003; Samuel et al., sem data).

Num regime húmido, ou parcialmente húmido, devem ser tidas em conta, não só as transferências de calor sensível, como de calor latente. Por este motivo, são consideradas as entalpias dos fluidos, em vez das temperaturas. Tendo em conta que neste tipo de regime considera-se uma superfície da bateria de arrefecimento dividida entre totalmente seca e húmida, ou seja, com condensação de água, a entalpia desta última na porção condensada, define-se como a entalpia de um fluido fictício, que corresponde à entalpia do ar saturado à temperatura dessa água. Para este regime, o modelo soluciona as Equações 25 e 26 (Fisher et al., 2003):

$$AU_{húmido} = \frac{1}{R_{ar} c_{p,ar} + R_{cond} c_{p,sat}} \quad (25)$$

$$c_{p,sat} = \frac{h_{dp,in} - h_{cond,sat,in}}{T_{dp,in} - T_{cond,in}} \quad (26)$$

Onde $AU_{húmido}$ corresponde ao coeficiente global de transferência de calor da conjugação ar-água condensada (W/K), R_{cond} à resistência térmica da água condensada na bateria (K/W), $c_{p,sat}$ corresponde ao calor específico do ar saturado ($J/kg.K$), $h_{dp,in}$ e $h_{cond,sat,in}$ correspondem à entalpia do ar à entrada no ponto de orvalho e à entalpia inicial da água condensada no ponto de saturação (J/kg), e $T_{dp,in}$ e $T_{cond,in}$ são, respetivamente, as temperaturas do ponto de orvalho do ar à entrada e a temperatura da água condensada inicial (K ou $^{\circ}C$). De seguida, o método ϵ -NTU é aplicado para determinar a transferência de calor, $Q_{húmido}$ (W), e, posteriormente, as entalpias do ar de insuflação, $h_{ar,out}$, e da água condensada de saída, $h_{cond,sat,out}$ (J/kg), são determinadas, respetivamente, pelas Equações 27 e 28 (Fisher et al., 2003; Samuel et al., sem data):

$$Q_{húmido} = \dot{m}_{ar} (h_{ar,in} - h_{ar,out}) \quad (27)$$

$$Q_{húmido} = \dot{m}_{cond} \frac{c_{p,cond}}{c_{p,sat}} (h_{cond,sat,in} - h_{cond,sat,out}) \quad (28)$$

Em que $h_{ar,in}$ e $h_{cond,sat,in}$ correspondem à entalpia no ponto de orvalho do ar à entrada e à entalpia da ar nas condições de saturação à temperatura da água condensada, e \dot{m}_{cond} corresponde ao caudal mássico da água condensada na superfície da bateria de arrefecimento (kg/s).

Este modelo considera um permutador de calor semi-isotérmico hipotético, em que o ar transfere calor para um fluido fictício com capacidade térmica infinita com temperatura igual à temperatura de condensação. Por fim, a temperatura e humidade de insuflação são calculadas identificando as partes seca e húmida da superfície através da temperatura no ponto de orvalho do ar que entra (Davies et al., 2005; Fisher et al., 2003; Samuel et al., sem data).

2.5.2. Modelo de “Braun-Lebrun”

Este modelo não assume uma fronteira variável entre a parte húmida e a parte seca da superfície da bateria de arrefecimento, dado mais uma vez usar as diferenças de entalpias do ar de entrada e de saída (Samuel et al., sem data). Este método calcula simultaneamente a transferência de calor para um regime totalmente húmido e para um regime totalmente seco, e considera aquele que garante uma capacidade de arrefecimento maior, tal é representado pela Equação 29:

$$Q = \max(Q_{seco}, Q_{húmido}) \quad (29)$$

Num regime totalmente seco, o método ε -NTU anteriormente descrito é aplicado para cálculo das condições de saída do ar. Num regime totalmente húmido, considera-se o ar como um fluido hipotético cuja entalpia é inteiramente definida pela temperatura do termómetro húmido, e calculam-se as Equações 30 e 31:

$$c_{p,fict} = \frac{h_{ar,in} - h_{ar,out}}{T_{húmido,in} - T_{húmido,out}} \quad (30)$$

$$R_{fict} = R_{ar} \frac{c_{p,ar}}{c_{p,fict}} \quad (31)$$

Onde $T_{húmido,in}$ e $T_{húmido,out}$ correspondem às temperaturas do termómetro húmido à entrada e à saída, respetivamente, e R_{fict} (K/W) e $c_{p,fict}$ ($J/kg \cdot K$) correspondem, respetivamente, à resistência térmica e ao calor específico do fluido fictício, os quais são utilizados no método ε -NTU (Samuel et al., sem data). À semelhança do método anteriormente descrito, o método resolve as Equações 32, 33 e 34, e calcula as condições de insuflação:

$$C_{fict} = \dot{m}_{ar} c_{p,fict} \quad (32)$$

$$Q_{húmido} = \varepsilon \cdot C_{min}(T_{húmido,in} - T_{água,in}) \quad (33)$$

$$Q_{húmido} = C_{fict}(T_{húmido,in} - T_{húmido,out}) \quad (34)$$

Sendo C_{fict} correspondente à taxa de capacidade térmica do fluido fictício, e $T_{água,in}$ correspondente à temperatura, neste caso constante, da água de arrefecimento.

Identicamente ao modelo “ASHRAE *Toolkit*”, este modelo também considera um permutador semi-isotérmico, em que um fluido é o ar que se pretende refrigerar, e outro é um fluido hipotético com capacidade térmica infinita à temperatura da superfície de contacto (Samuel et al., sem data). A aplicação deste modelo possibilita a modelação de uma bateria de arrefecimento a partir de uma bateria que funcione em condições iguais à anterior num dado ponto do seu funcionamento, pelo que irá ter características idênticas para todos os restantes pontos de funcionamento.

2.5.3. Modelos de Elementos Finitos

Para além dos modelos anteriormente descritos, é possível aplicar métodos de elementos finitos para modelar baterias de arrefecimento (figura 12). Identicamente ao estilo modelação em elementos finitos, que o *SOLIDWORKS Flow Simulation* adota, a modelação de baterias em elementos finitos serve-se da criação de uma malha ao longo de todo o domínio de trabalho (Koenig, 2007; Wang, Liu, & Claridge, 2005).

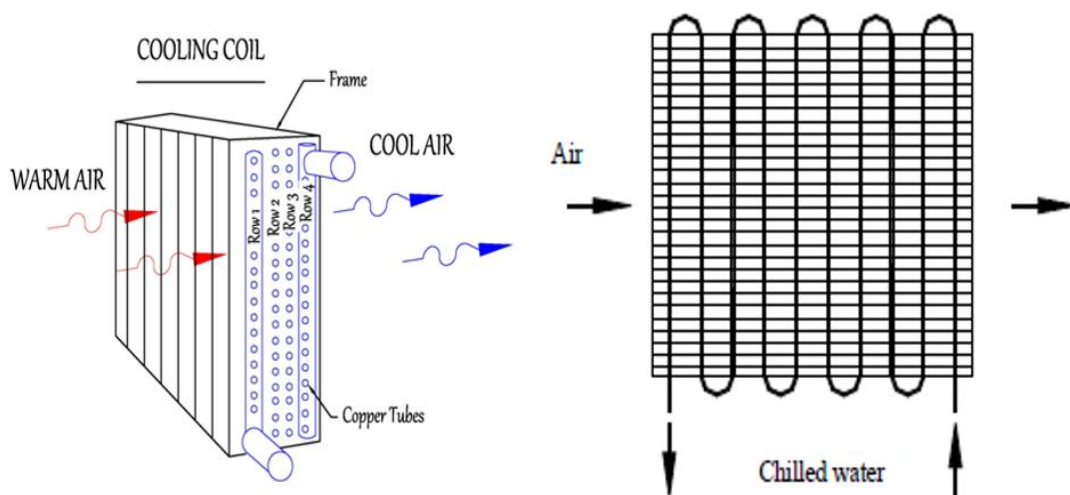


Figura 12 - Representação esquemática de uma bateria de arrefecimento (Kauwale, 2019; Wang et al., 2005).

Uma representação simplificada de uma bateria de arrefecimento, assim como dos elementos e respetivos nós, pode ser observada na figura 13. Sendo q_{as} e q_{al} as transferências de calor, respetivamente, sensível e latente, e q_w a transferência de calor para a água de arrefecimento. É importante realçar que as transferências de calor, tanto sensível como latente, ocorrem, numa fase intermédia, entre o ar húmido e uma camada fina intermédia de ar, ao passo que entre esta última e a água de arrefecimento ocorre transferência de calor exclusivamente sensível (Wang et al., 2005).

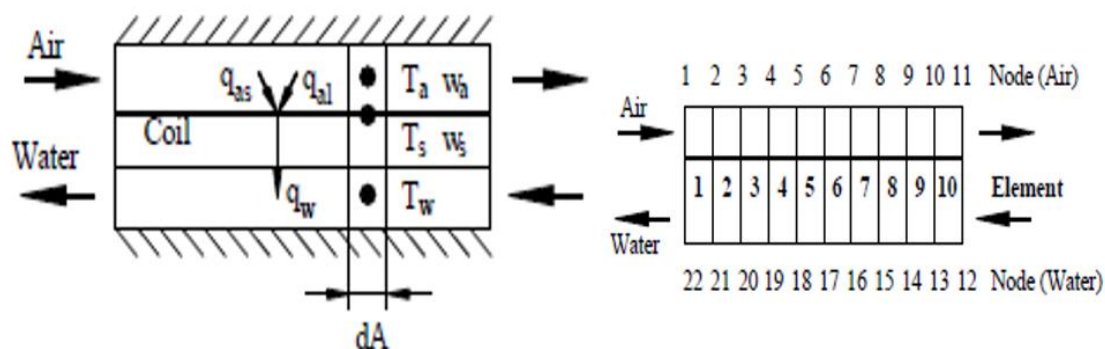


Figura 13 - Modelo simplificado e distribuição de elementos e nós numa bateria de arrefecimento (Wang et al., 2005).

Repare-se que T_a e ω_a referem-se à temperatura e humidade absoluta do ar, respetivamente, e T_s e ω_s à temperatura e humidade na superfície de contacto, e T_w à temperatura da água de arrefecimento. Representa-se, então, um modelo esquemático de um elemento criado (figura 14):

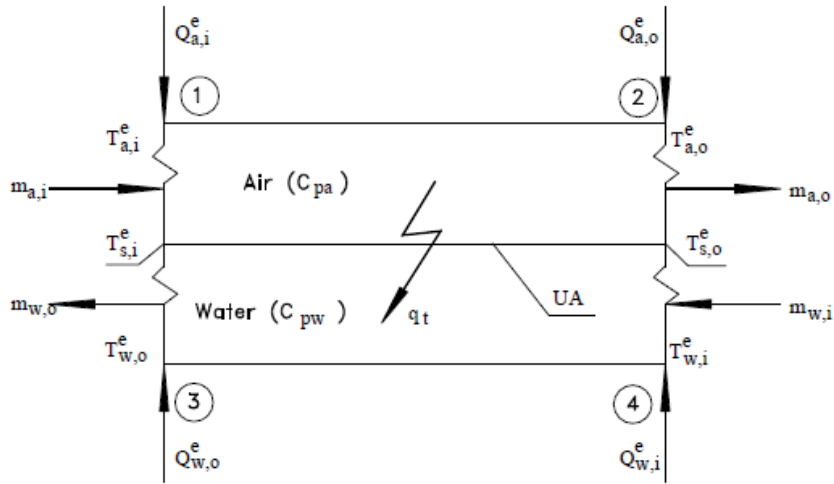


Figura 14 - Modelo esquemático de um elemento (Wang et al., 2005).

Sabendo que ε é calculado de forma idêntica aos restantes métodos (método ε -NTU), e sendo Q^e a transferência de calor no interior de um elemento, para um elemento onde não ocorra perda de massa, ou seja, para um elemento onde se verifiquem as condições $m_{a,0} = m_{a,i} = m_a$ e $m_{w,0} = m_{w,i} = m_w$, esta transferência pode ser expressa pelas Equações 35 a 38:

$$Q_{a,i}^e = -m_a c_{p,a} T_{a,i}^e \quad (35)$$

$$Q_{a,0}^e = m_a c_{p,a} T_{a,i}^e - \varepsilon \cdot C_{min}(T_{a,i}^e - T_{w,i}^e) \quad (36)$$

$$Q_{w,0}^e = m_w c_{p,w} T_{w,i}^e - \varepsilon \cdot C_{min}(T_{a,i}^e - T_{w,i}^e) \quad (37)$$

$$Q_{w,i}^e = -m_w c_{p,w} T_{w,i}^e \quad (38)$$

Por outro lado, para um elemento onde ocorra perda de massa, isto é, $m_{a,0} \neq m_{a,i}$ e $m_{w,0} \neq m_{w,i}$, a transferência de calor pode ser expressa pelas seguintes equações (Equações 39 a 42). Neste caso, um caudal mássico médio é utilizado para calcular o termo $\varepsilon \cdot C_{min}$ pelo método ε -NTU (Wang et al., 2005).

$$Q_{a,i}^e = -m_{a,i} c_{p,a} T_{a,i}^e \quad (39)$$

$$Q_{a,0}^e = m_{a,0} c_{p,a} T_{a,i}^e - \varepsilon \cdot C_{min}(T_{a,i}^e - T_{w,i}^e) \quad (40)$$

$$Q_{w,0}^e = m_{w,0} c_{p,w} T_{w,i}^e - \varepsilon \cdot C_{min}(T_{a,i}^e - T_{w,i}^e) \quad (41)$$

$$Q_{w,i}^e = -m_{w,i} c_{p,w} T_{w,i}^e \quad (42)$$

Seguidamente, escritas as equações básicas dos elementos, estas são integradas em todo o domínio da bateria de arrefecimento, sendo que o fluxo de calor total “recebe” o contributo de cada elemento para solucionar o problema no domínio definido (Wang et al., 2005).

2.6. Migração de Vapor

Migração de vapor, ou difusão de vapor, é um processo no qual o ar ambiente, assim como o vapor de água nele contido, se propaga para o interior de uma superfície composta por um material permeável ao ar. Diversos materiais utilizados na construção civil dispõem de uma rede de poros conectados entre si, permitindo uma transferência de ar e de vapor no seu interior. A migração é devida a gradientes da pressão de vapor provocados por gradientes de temperatura e de pressão total e de pressão de vapor. O comportamento higrométrico terá efeitos do arrefecimento do edifício, de QAI, e de durabilidade das próprias paredes e isolamentos na fronteira. Este fenómeno pode dar origem a problemas de condensação nas fronteiras dos edifícios ou no interior de isolamentos em situações em que a temperatura de orvalho do ar interior seja superior à temperatura exterior, provocando condensações no interior do isolamento (Belleudy et al., 2016; Moon, Ryu, & Kim, 2014; Tariku et al., 2010). Este fenómeno promove o desenvolvimento de crescimento fúngico e bacteriano, potencialmente nocivo para a saúde humana. Em regime estacionário, é possível abordar este problema como um problema de transmissão de calor, considerando uma diferença de temperaturas em faces opostas de uma parede (figura 15).

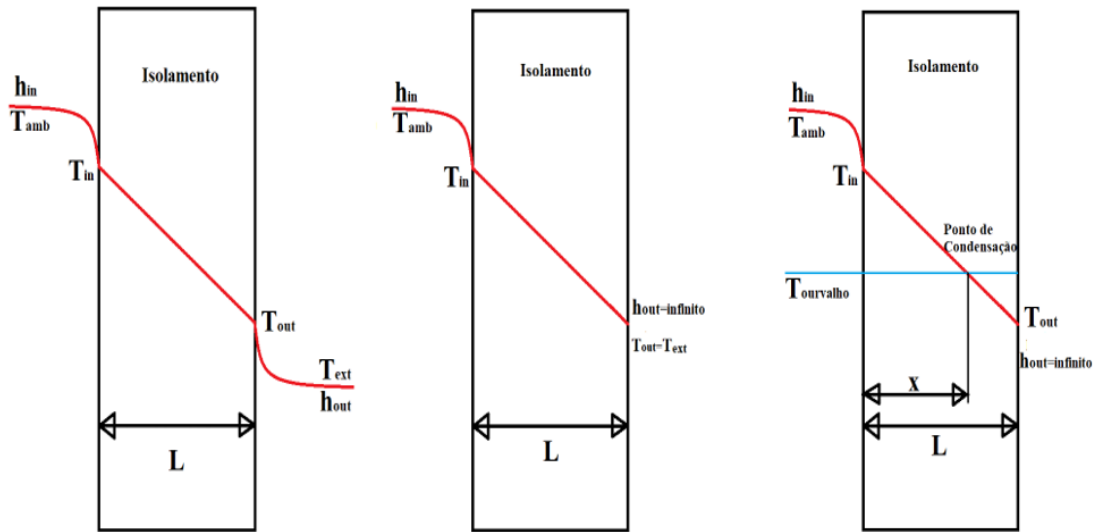


Figura 15 - Formação de condensação por difusão de vapor num isolamento.

Por observação da imagem da esquerda da Figura 15, correspondem-se h_{in} e h_{out} ($W/m^2\text{°C}$) aos coeficientes de convecção do ambiente interior e do exterior, a temperaturas T_{amb} e T_{ext} (°C ou K), respetivamente, T_{in} e T_{out} às temperaturas superficiais da face interior e exterior, respetivamente, do isolamento, e L (m) à espessura do mesmo, sendo que a linha vermelha corresponde à evolução da temperatura entre cada uma das faces do isolamento. Assim, a transferência de calor que atravessa o isolamento pode ser caracterizada pelas Equações 43 a 45:

$$Q_{isol} = AU\Delta T \quad (43)$$

$$AU = \frac{A}{R_t} \quad (44)$$

$$R_t = \frac{1}{h_{in}} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h_{out}} \quad (44)$$

$$\Delta T = T_{amb} - T_{ext} \quad (45)$$

Em que k corresponde à condutividade térmica ($W/m\text{°C}$) do material do isolamento, A à área total (m^2) de transferência de calor, U ao coeficiente global de transferência de calor por unidade de área ($W/m^2\text{°C}$) e R_t à resistência térmica total do meio sujeito ao fluxo de calor ($m^2\text{°C}/W$) (Engineering ToolBox, 2003). Para valores muito elevados de h_{out} (imagem do centro da figura 15), como por exemplo, nas condições exteriores ao

casco de um submarino em escoamento na água, $T_{out} = T_{ext}$, fica-se com as Equações 46 e 47:

$$R_t = \frac{1}{h_{in}} + \frac{L}{k} \quad (46)$$

$$\Delta T = T_{amb} - T_{out} \quad (47)$$

Se a temperatura do ponto de orvalho, $T_{orvalho}$, para as condições de humidade no ar do ambiente interior, tiver um valor superior à temperatura no exterior, T_{out} , isto implica que a temperatura no interior do isolamento, a partir de um determinado ponto, é inferior à temperatura de saturação do vapor, surgindo condensações a partir desse ponto (imagem da direita na Figura 15). Assim, a distância x (m) entre a superfície interior do isolamento e o ponto a partir do qual ocorre condensação, pode ser estimado pela Equação 48:

$$x = \frac{T_{in} - T_{orvalho}}{T_{in} - T_{out}} \times L \quad (48)$$

Este problema pode ser adaptado a uma superfície de forma cilíndrica, tal como a apresentada na figura 16, sendo a imagem da direita correspondente a uma fronteira cilíndrica de duas camadas, equivalente ao que se pode assumir para o caso de um submarino, onde se tem um isolamento e um casco resistente:

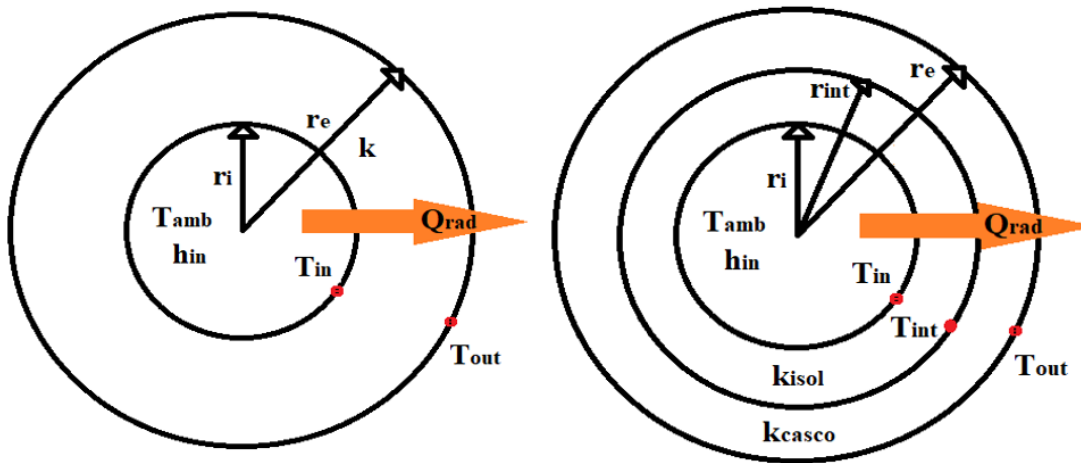


Figura 16 - Transferência de calor através de superfícies cilíndricas.

Para esta situação, r_i , r_{int} e r_e correspondem, respetivamente, aos raios (m) interior, intermédio (entre o isolamento e o casco) e exterior da superfície de transferência,

k_{isol} e k_{casco} correspondem às condutividades térmicas do isolamento interior e do casco resistente, respetivamente, e T_{int} corresponde à temperatura ($^{\circ}\text{C}$ ou K) intermédia. Deste modo, apresentam-se as Equações 49 e 50 da transferência de calor para a situação de apenas uma camada, $Q_{rad,1}$ e para a situação de dupla camada, $Q_{rad,2}$, ambos em W:

$$Q_{rad,1} = \frac{2\pi L(T_{amb} - T_{out})}{\frac{1}{r_i h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{k}} \quad (49)$$

$$Q_{rad,1} = \frac{2\pi L(T_{amb} - T_{out})}{\frac{1}{r_i h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_{int}}{r_i}\right)}{k_{isol}} + \frac{\ln\left(\frac{r_i}{r_{int}}\right)}{k_{casco}}} \quad (50)$$

Em que se considera um cilindro oco de comprimento L (m), e um coeficiente de convecção exterior, $h_{out} = \infty$. Apesar de se considerar uma superfície diferente, é possível calcular o ponto de condensação no interior da fronteira do cilindro da mesma forma que se utilizou para a situação anterior, por meio da Equação 48, para raios suficientemente elevados.

Considerando a evolução da temperatura aproximadamente linear, pode evitar-se a ocorrência de condensação no isolamento colocando uma barreira física no interior do isolamento impermeável à passagem de vapor (Row, 2019), como folhas metálicas ou plásticas. Deste modo, cria-se uma oposição eficiente à passagem de moléculas de água para as porções mais frias do isolamento, baixando a temperatura de saturação do vapor no ar nesses locais (figura 17). Outra estratégia passa por baixar a temperatura do ponto de orvalho do ar interior para valores inferiores aos da temperatura existente nas superfícies exteriores, reduzindo-se a humidade absoluta pela ação do sistema de climatização. Desta forma, a temperatura no interior do isolamento não atinge valores próximos do ponto de orvalho.

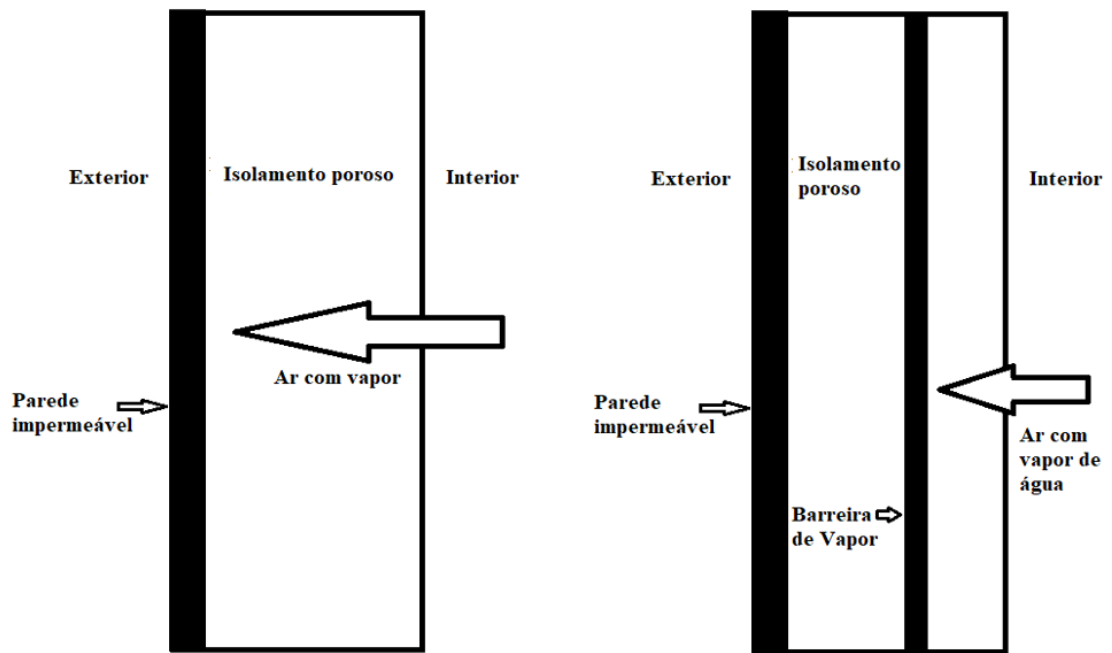


Figura 17 - Colocação de uma barreira de vapor num isolamento.

3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO DOS SUBMARINOS DA CLASSE TRIDENTE

Um sistema de climatização instalado numa plataforma da complexidade de um submarino é responsável por garantir condições, não apenas de trabalho e de habitabilidade para todos os elementos da guarnição, como condições ideais para o correto funcionamento de todos os equipamentos existentes a bordo. Este tipo de navios da Marinha deve estar preparado para cumprir missões com duração de meses, pelo que todos os sistemas a bordo adquirem uma elevada relevância para manter a operacionalidade de toda a guarnição e de toda a plataforma durante esse período.

Este sistema controla e monitoriza valores de temperatura e de humidade no interior do submarino, assim como garante que as concentrações de poluentes estejam abaixo de valores prejudiciais à saúde humana, ou com considerável impacto na produtividade do pessoal de bordo. São controlados os níveis de oxigénio e de dióxido de carbono, assim como de COV's (composto orgânico volátil). Além disso, é ainda controlada a concentração de hidrogénio libertada pelas baterias de acumulação eléctrica existentes nos submarinos.

Com base no diagrama esquemático do sistema de climatização, fornecido pela Divisão de Submarinos da Marinha Portuguesa, é possível subdividir o sistema em dois subsistemas interligados: um sistema de tratamento de ar responsável por garantir a qualidade do ar interior; e um sistema de arrefecimento responsável por manter os níveis de temperatura e humidade apropriados. Pertence a este segundo sistema a unidade de arrefecimento do circuito de água glicolada (*chiller*), as unidades de arrefecimento de ar (ACU- *air conditioning unit*) e o sistema de distribuição e difusão de ar.

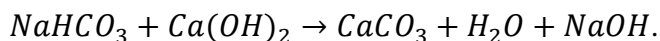
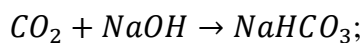
No âmbito da aplicação do sistema de climatização, o espaço interior do submarino pode ser dividido em quatro secções, denominadas de vante para ré: alojamentos, o CIC (*Combat Information Centre*), o TCC (*Technical Control Centre*) e a propulsão. É relevante referir que esta dissertação centra a sua análise e modelo no espaço dos alojamentos, restringindo assim o seu estudo às zonas mais críticas no que diz respeito à ocorrência de condensações. Assumir-se-á assim, que o comportamento das massas de ar e de vapor nas restantes secções seja idêntico. Toda a informação presente neste capítulo

referente ao sistema de climatização instalado a bordo foi fornecida pela Divisão de Submarinos.

3.1. Sistema de Tratamento de Ar

Num submarino, o sistema de tratamento de ar controla as concentrações de oxigénio e de outros gases. Este sistema tem duas estações, uma localizada no TCC e outra localizada na secção dos alojamentos. Cada uma integra duas unidades de absorção de dióxido de carbono (CO₂) e um módulo de controlo de poluentes, sendo que uma das estações se encontra instalada em paralelo com a linha de alimentação destinada às ACU's presentes no TCC, CIC e nos alojamentos, e outra acoplada apenas à ACU da secção dos alojamentos. Em situações normais de navegação, apenas a estação de ré se encontra em funcionamento, possibilitando o controlo dos níveis de CO₂ com uma guarnição até 43 elementos. A estação dos alojamentos é utilizada apenas em situações específicas de emergência, que serão abordadas neste capítulo.

O controlo de dióxido de carbono é realizado nas respetivas unidades por meio de cartuxos que contém soluções compostas por água (H₂O), hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) e hidróxido de sódio (NaOH) também chamada de *soda lime*, que por sua vez possui uma elevada capacidade de absorção de moléculas de CO₂. Esta reação entre a *soda lime* e o dióxido de carbono dá origem a carbonato de cálcio (CaCO₃), bicarbonato de sódio (NaHCO₃), sendo também formado hidróxido de sódio que é novamente reciclado de acordo com as seguintes reações (James, 2016; Mahmoudkhani & Keith, 2009; Nygård, Tomkute, & Olsen, 2017; Port, 2016):



O ar que sai das unidades a ré é conduzido a um filtro localizado na própria estação para remoção de partículas de *soda lime*, outro filtro igual recebe ar das unidades a vante e está localizado na ACU dos alojamentos.

A monitorização dos níveis de CO₂ é feita por meio de avisos a 0,6% de volume de CO₂ na atmosfera interior do navio, e de um alarme a 0,8%. O acionamento das unidades de absorção de CO₂ é feito manualmente por abertura das válvulas que alimentam estas unidades, para o nível de controlo de 0,5%.

Os módulos de controlo de poluentes têm como principal função a eliminação de partículas e gases. Estes módulos, um por cada estação, são constituídos por um filtro de partículas de classe G4, por dois filtros de carvão ativado do tipo ABEK Hg e tipo A. Estes filtros consistem em blocos de carbono processado por forma a adquirirem uma natureza altamente porosa, o que resulta numa enorme área de superfície disponível para adsorção de poluentes, como vapores, moléculas orgânicas, moléculas inorgânicas (sulfato de hidrogénio, cianeto de hidrogénio, cloro), dióxido de enxofre, cloreto de hidrogénio e amónia, numa gama de valores de humidade e temperatura. Estes módulos contêm ainda um catalisador de alta temperatura ($> 200\text{ }^{\circ}\text{C}$) para oxidação de metano e etileno, e um catalisador a temperatura ambiente ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) para oxidação de monóxido de carbono (James, 2016; Port, 2016; Tavan & Hosseini, 2017).

Para além dos poluentes de origem humana e dos materiais interiores, há produção de hidrogénio nas baterias de acumulação elétrica. Estas baterias consistem em 2 elétrodos, um de chumbo (Pb), placa negativa, e outro de óxido de chumbo (PbO_2), placa positiva, ambos mergulhados num meio aquoso com ácido sulfúrico (H_2SO_4) e de água (H_2O). Durante a descarga da bateria de chumbo ocorre a reação $\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2\text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-}$. A placa de chumbo reage de acordo com a equação $\text{Pb} + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{e}^-$, agindo como cátodo, já a placa de óxido de chumbo age como ânodo de acordo com a equação $\text{PbO}_2 + 4\text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$. Esta passagem de eletrões gera corrente elétrica enquanto a bateria é descarregada, resultando numa substituição gradual dos materiais dos elétrodos por sulfato de chumbo (PbSO_4), dando origem à equação total $\text{Pb} + \text{PbO}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow 2\text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$. Quanto a bateria elétrica está à carga, é-lhe fornecida corrente que força uma passagem de eletrões da placa positiva para a negativa, a placa positiva passa a ser o cátodo e a placa negativa o ânodo, provocando a reação inversa em ambas. Na placa positiva (cátodo), o sulfato de chumbo cede eletrões de acordo com a equação $\text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{PbO}_2 + 4\text{H}^+ + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{e}^-$, ao passo que a placa negativa (ânodo) recebe esses eletrões de acordo com a equação $\text{PbSO}_4 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Pb} + \text{SO}_4^{2-}$, sendo a equação total, neste caso $2\text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Pb} + \text{PbO}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4$. A passagem de corrente elétrica na solução aquosa provoca a eletrólise da água presente no meio, de acordo com a equação $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ (Denker, 2004; Ditiangkin, 2013; «*Introduction to Lead-Acid Batteries*», sem data). Este fenómeno de libertação de

hidrogénio, verifica-se tanto na situação de descarga como na de carga das baterias elétricas, mas adquire maiores proporções quando estas se encontram em carga.

O hidrogénio, tendo um limite inferior de explosividade de 4% (volume), é um gás altamente explosivo («LEL of Combustible Gas», sem data). A concentração de hidrogénio a bordo é mantida em valores inferiores a 2% em volume em períodos de imersão longos, por meio de catalisadores de paládio distribuídos pelo interior do casco resistente do submarino. Estes equipamentos aceleram a recombinação das moléculas de hidrogénio livres na atmosfera do navio com o oxigénio, e têm capacidade de eliminar até 200 l/h de H₂ do ambiente, libertando vapor de água para o ambiente como produto da reação. (Bhatia, sem data; Johansson, Försth, & Rosén, 2001; «The catalysis by palladium of the union of hydrogen and oxygen», 2006).

3.2. Sistema de Arrefecimento

O sistema de arrefecimento do navio garante valores de temperatura ambiente inferiores a 26°C e de humidade relativa entre 30% e 70% em todos os compartimentos permanentemente guarnecidos. A instalação é composta por 5 unidades de ar condicionado (ACU) que por sua vez são alimentadas por uma unidade de arrefecimento de água glicolada (*chiller*) a R134a como fluido refrigerante. Das quatro secções indicadas, as de alojamentos, CIC e TCC têm adstritas cada uma a sua ACU. A secção da propulsão possui duas unidades (ACU 1 e ACU 2).

O sistema de água glicolada distribui a água para arrefecimento direto de equipamentos eletrónicos, assim como para as baterias de arrefecimento que arrefecem o ar circulante nas ACU's. Estas unidades controlam a temperatura e indiretamente a humidade dos espaços. O *chiller* tem essencialmente um circuito de refrigeração de refrigerante R134a, de acordo com um arranjo de 2 evaporadores, em que um fornece água a 20 °C para arrefecimento de equipamentos eletrónicos, e outro distribui água a 6 °C para as ACU's. O *chiller* tem um compressor de parafuso e válvula de expansão, conferindo ao fluido uma pressão entre 0,7 bar e 1,5 bar. O sistema serve-se de um compressor do tipo parafuso com duas velocidades de operação correspondentes a 85 kW ou 130 kW de potência de arrefecimento. O motor do compressor tem 17 kW e 32 kW na primeira e

segunda velocidades, respetivamente. A evaporação ocorre a uma temperatura mínima de 1 °C e a condensação a uma temperatura máxima de 40 °C. Justifica-se a utilização de um compressor do tipo parafuso nesta instalação, por ser compacto e de baixo ruído relativamente a outros tipos de compressores.

No evaporador absorve-se num permutador refrigerante-água o calor da água glicolada; no condensador o calor é libertado num permutador para a água salgada do exterior do submarino. A água glicolada circula pela ação de uma bomba, servindo-se de uma segunda bomba em modo *standby*. O mesmo acontece no circuito de água do mar, conferindo redundância em ambos os circuitos. Consoante o regime implementado, a bomba de água do mar debita 12 m³/h ou 24 m³/h, garantindo no circuito de condensação uma pressão inferior a 50 bar, sendo que a bomba de água glicolada tem um caudal de 19 m³/h, pressurizado a 6 bar.

Como referido, a água é distribuída para as 5 unidades de ar condicionado, onde absorve calor do ar circulante. As ACU's possuem duas potências de operação, resultantes de dois regimes de velocidade dos ventiladores, velocidade 1 e velocidade 2. Em qualquer uma das unidades a água é recebida a 6 °C, e é retornada ao circuito a 12 °C. As especificações técnicas de cada uma das ACU's, fornecidas pela Divisão de Submarinos da Marinha Portuguesa, encontram-se discriminadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características das ACU's (Dados fornecidos pela Divisão de Submarinos da Marinha Portuguesa).

ACU	Propulsão - 1		Propulsão - 2		TCC		CIC		Alojamentos	
Regime de Velocidade	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Caudal de insuflação (m^3/h)	1500	3000	5900	9000	2460	3800	1900	3000	2260	3500
Capacidade de refrigeração (kW)	17,5	23	52	67	17,5	21	25	33	30,5	40
Débito estático (Pa)	60	260	160	370	200	500	260	640	180	450
Caudal de água glicolada (m^3/h)	1,1	1,4	3,7	4,1	2,5	3	3,4	4,8	4,3	5,7
Aspiração (temperatura; humidade)	40 °C e 30%				28 °C e 40%		33 °C e 44%		31°C e 60%	
Insuflação (temperatura; humidade)	22 °C e 75%	28 °C e 65%	24 °C e 70%	28 °C e 65%	11,5 °C e 87%	14,4 °C e 80%	11 °C e 97%	12,6 °C e 94%	11 °C e 99%	13,9 °C e 96%
Capacidade de aquecimento (kW)	-		-		2,25 kW; 3,75 kW; 6 kW		1,5 kW; 2,5 kW; 4 kW		2,25 kW; 3,75 kW; 6 kW; 8,25 kW; 9,75 kW; 12 kW	

Note-se que a capacidade de aquecimento de cada ACU é assegurada por resistências elétricas estabelecidas manualmente, com potência sensível de aquecimento bloqueada nos estágios descritos na tabela anterior.

A ACU dos alojamentos é a que se encontra mais a vante e está localizada na casa das máquinas auxiliares nº2. Esta ACU tem dois ventiladores radiais, um que aspira ar da

cozinha e outro de insuflação. Filtros de carvão ativado estão instalados nesta unidade exclusivamente para filtração de odores e partículas do ar da cozinha. Na cozinha estão ainda instalados filtros de gordura no exaustor da cozinha. Está também associado a este sistema, uma unidade de absorção de dióxido de carbono e de adsorção de poluentes. A ACU dos alojamentos é responsável por insuflar ar, normalmente arrefecido, em vários espaços garantidos na secção mais a vante do submarino, incluindo a própria casa, os alojamentos e messes de sargentos e de praças, *weapon storage room*, casa de banho e chuveiros de sargentos e praças, e alojamentos de oficiais nº2. A máquina retorna o ar da casa, da cozinha, da casa de banho e dos chuveiros de sargentos e praças, assim como dos oficiais, recebendo também ar renovado proveniente das unidades de absorção de CO_2 e de poluentes, tanto do TCC como dos alojamentos.

De seguida, e imediatamente a ré dos alojamentos, encontra-se a secção do CIC, que é servida por uma ACU localizado no *electronic room*, responsável por insuflar ar nos alojamentos do Comandante e do Imediato, alojamentos de oficiais nº1, cozinha, messe de oficiais, *radio room*, CIC, recebendo ar das unidades de tratamento de ar localizadas no TCC, da *radio room*, do *electronic room* e do *utility room*.

A ré do CIC encontra-se a secção do TCC. Esta secção dispõe de uma outra unidade de ar condicionado localizada na casa das máquinas auxiliares nº1. Esta ACU é responsável por aspirar e insuflar ar no próprio compartimento, por insuflar ar no TCC, para o quadro principal do navio e para o quadro de distribuição, recebendo ar das unidades de tratamento de ar localizadas nesta secção, dos módulos das *fuel cells* e do TCC.

A secção mais a ré do navio é a secção da propulsão (*engine room*). Aqui encontram-se duas unidades de ar condicionado, ACU 1 e ACU 2, que aspiram e insuflam ar no próprio compartimento para remoção local de carga térmica. Estas unidades apenas são ligadas se existirem elementos da guarnição a efetuar trabalhos na casa, permanecendo desligados durante o restante período.

O controlo da temperatura de insuflação no espaço é realizado ao nível da ACU's por meio de válvulas de controlo de três vias, que regulam o caudal de água glicolada à bateria de arrefecimento da ACU, passando o restante caudal no *bypass* e retornando diretamente ao circuito de água.

Existem ainda instalados na secção da propulsão, dois ventiladores radiais: o ventilador dos poços das baterias de acumulação elétrica com um caudal de $6000\text{ m}^3/h$ a $1,6\text{ kPa}$, e o ventilador principal com um caudal de $2500\text{ m}^3/h$ a $2,5\text{ kPa}$. Ambos os ventiladores têm a função de aspirar ar dos dois poços das baterias elétricas e de o insuflar na casa das máquinas principais ou distribuindo-o para as unidades de tratamento do ar do TCC, para posterior distribuição pelo navio (e eventualmente para os poços das baterias elétricas). No entanto, o ventilador do poço das baterias elétricas apenas é estabelecido quando estas se encontram em modo de carga, sendo o ventilador principal do navio, geralmente, o único ventilador ligado quando o submarino navega em profundidade. Estes ventiladores, garantem um caudal de insuflação de $1400\text{ m}^3/h$ no poço das baterias elétricas de vante, e de $1200\text{ m}^3/h$ no poço de ré.

3.3. Modos de Funcionamento do Sistema de Ventilação

Numa situação de navegação à cota periscópica, o navio serve-se de um tanque de *snorkel* para introduzir ar exterior ao navio para renovação do ar nos poços das baterias elétricas, sendo este ar, identicamente à situação de navegação em profundidade, aspirado pelo ventilador principal (ou pelo ventilador das baterias elétricas), e distribuído tanto para as unidades de tratamento de ar como para a propulsão. A aspiração deste ar, em navegação periscópica, é equilibrada pelo consumo de ar nos dois geradores diesel existentes na secção da propulsão, utilizados quando o submarino navega à cota periscópica ou à superfície.

Em situações de emergência, é possível isolar a secção dos alojamentos do restante navio. Apesar de uma operação do submarino a partir desta secção ser impossível, é possível a sobrevivência do pessoal neste espaço. Nestas situações, por forma a realizar o isolamento do espaço, são acionadas as válvulas de corte presentes na antepara que faz a fronteira entre a secção do CIC e a secção dos alojamentos, mais precisamente a válvula do ar de alimentação do ACU dos alojamentos, a válvula do ar de evacuação da cozinha e as válvulas do ar tanto de evacuação como de alimentação do poço das baterias elétricas nº2; a estação de tratamento de ar acoplada à ACU dos alojamentos é estabelecida para fazer a renovação do ar, e esta ACU deixa de fazer a extração do ar da cozinha, restringindo a sua ventilação ao espaço dos alojamentos. É possível, também, isolar a secção da

propulsão do resto do navio, por meio de válvulas de corte existentes na antepara entre a secção da propulsão e a secção do TCC.

3.4. Cargas Térmicas

Efetuada a descrição do sistema de climatização instalado no navio, avalia-se nesta secção as cargas térmicas do local, na situação de imersão.

O submarino serve-se de um motor elétrico como meio de propulsão, usando de baterias elétricas de chumbo com 648 células, como fonte de energia elétrica para acionamento do motor. Em imersão, os geradores diesel são desligados, usando-se *fuel cells* para carregamento das baterias elétricas.

Na secção da propulsão são aceitáveis valores de temperatura até 40 °C, relativamente elevados face aos restantes compartimentos, que permitem melhorar o funcionamento do motor elétrico e de restantes equipamentos, estando os geradores desligados. Deste modo, reduz-se a carga térmica a remover neste espaço, relativamente a uma situação em que a temperatura fosse igual à do espaço ocupado. Mesmo assim, a carga térmica associada a estes equipamentos é elevada em comparação com equipamentos presentes nas outras secções do navio.

Por outro lado, as restantes secções, por terem no espaço equipamentos eletrónicos mais sensíveis e por estarem permanentemente guarnecidos com militares, têm níveis de temperatura alvo de cerca de 24 °C. A ocupação humana é no máximo de 43 pessoas a bordo, com cerca de metade do pessoal de bordo em repouso e a outra metade em atividade. Esta é a situação mais comum de funcionamento em que o submarino opera de acordo com um regime de bordadas, sendo a maior parte dos locais de trabalho concentrada nas secções do CIC e do TCC, e destinando-se a secção dos alojamentos, de forma geral, ao repouso e refeições da guarnição. Este facto, juntamente com a localização de parte das casas de banho, da cozinha, das messes e de parte dos chuveiros ser na secção dos alojamentos e na secção do CIC, faz com que os compartimentos nesta zona estejam sujeitos a níveis mais elevados de humidade relativa e de poluentes. Deste modo, a secção dos alojamentos é sujeita a uma maior flutuação de cargas sensível e latente que os restantes espaços. Assim sendo, como referido no início deste capítulo, a análise presente nesta dissertação centra-se no piso superior desta secção e na ACU a esta dedicado. Com

base numa estimativa da distribuição do pessoal no interior desta secção, e respetivas atividades ao longo do dia, calculou-se a carga térmica do espaço. Esta distribuição encontra-se descrita na Tabela 2, na qual se considerou um maior número de indivíduos presentes no espaço durante a noite e durante as refeições, assim como um menor número de pessoas presentes durante o resto do dia, devido ao aumento da atividade em outras secções do navio. É importante referir que a cozinha não se localiza nesta secção, e por este motivo a quantidade de elementos aqui presentes não terá influência na contagem total de pessoas nos alojamentos. No entanto, a atividade neste compartimento é relevante, tendo em conta que a ACU dos alojamentos aspira ar proveniente da cozinha.

Tabela 2 - Distribuição da guarnição na secção dos alojamentos.

Hora	Nº de pessoas	Dormir	Repouso	Refeição	Atividade	Cozinha (pessoas)
00h00-01h00	30	18	2	8	2	0
01h00-02h00	30	18	2	8	2	0
01h00-03h00	30	23	2	3	2	0
02h00-04h00	30	18	2	8	2	0
04h00-05h00	30	18	2	8	2	0
05h00-06h00	30	23	2	3	2	0
06h00-07h00	30	18	2	8	2	0
07h00-08h00	30	10	3	13	4	0
08h00-09h00	30	10	3	13	4	0
09h00-10h00	25	8	2	12	3	0
10h00-11h00	15	5	1	6	3	2
11h00-12h00	20	5	1	8	6	2
12h00-13h00	30	3	1	20	6	2
13h00-14h00	30	3	1	20	6	0
14h00-15h00	20	5	1	10	4	0
15h00-16h00	15	6	2	4	3	0
16h00-17h00	15	6	2	4	3	2
17h00-18h00	20	5	1	8	6	2
18h00-19h00	30	3	1	20	6	2
19h00-20h00	30	3	1	20	6	0
20h00-21h00	20	5	1	10	4	0
21h00-22h00	20	9	2	6	3	0
22h00-23h00	25	12	2	8	3	0
23h00-00h00	25	18	2	3	2	0

Para um cálculo das cargas geradas pela ocupação humana de acordo com a atividade executada neste espaço utilizou-se as cargas definidas na Tabela 3.

Considera-se em repouso qualquer indivíduo que não se encontre a executar qualquer tipo de trabalho, a dormir ou em refeição. Considerou-se um valor de calor total de 72 W para um indivíduo a dormir, sendo que este valor foi calculado assumindo uma área média por indivíduo de $1,8 m^2$, sendo que o valor tabelado corresponde a $40 W/m^2$ (ASHRAE, 2013, Capítulo 8.6). Por não se terem dados de calor latente e sensível especificamente para um indivíduo a dormir, considerou-se uma percentagem de calor latente igual à percentagem de calor latente gerada por um indivíduo em repouso (34,78%). Entende-se também que as atividades de trabalho realizadas a bordo equivalem a atividades moderadas realizadas em edifícios de escritórios (ASHRAE, 2013, Capítulo 30.4). Todos os valores tabelados foram para indivíduos do sexo masculino (sexo que constitui a grande maioria da guarnição).

Tabela 3 - Cargas geradas por atividade humana (ASHRAE, 2013).

Atividade	Calor Sensível (W)	Calor Latente (W)	Calor Total (W)
Dormir	47	25	72
Repouso	75	40	115
Atividade Moderada	80	60	140
Sedentária (Refeições)	72,5	72,5	145

Foram tidas em conta, também, as cargas originárias de atividades de cozinha, banho e iluminação. Para a cozinha, recorreu-se a valores tabelados de libertação de calor por panelas de sopa, panelas de pressão e bicos de fogão elétrico (ASHRAE, 2013, Capítulo 30.9) para estimar uma libertação média de calor, sensível e latente, durante as horas normais de funcionamento (Tabela 4).

Tabela 4 - Cargas derivadas do funcionamento de equipamentos de cozinha (ASHRAE, 2013).

Cozinha	Calor Sensível (W)	Calor Latente (W)	Calor Total (W)
Panela de Sopa	495	264	759
Panela de Pressão	1450	750	2200
Chapa Elétrica (1 bico)	1310	910	2220
Total	3255	1924	5179

Para o calor latente resultante dos banhos da guarnição, considerou-se um chuveiro como uma piscina de 1 m^2 de área, com uma superfície de água a 36 °C , com um fator de atividade de 1,2, e, recorrendo à equação da quantidade de vapor de água libertado (Equação 51) (ASHRAE, 2011, Capítulo 4.6), em que $p_w = 5,95 \text{ kPa}$ corresponde à pressão de saturação do vapor a 36 °C , e $p_a = 3,13 \text{ kPa}$ corresponde à pressão de saturação do vapor à temperatura do compartimento (considera-se 24 °C).

$$w_p = 4 \times 10^{-5} \times A \times (p_w - p_a) \times F_a \quad (51)$$

Chega-se então a $w_p = 0,00013536 \text{ kg/s} = 0,487296 \text{ kg/h}$, vapor libertado ao longo de um banho de 36 °C . Sabe-se que o regime de banhos da guarnição permite que cada indivíduo tome banhos de 2 em 2 dias, isto significa que, por dia, 10 indivíduos tomam banho. Optou-se então por assumir uma hora no início e outra no fim do dia em que todos os banhos são tomados. Considerando uma entalpia de mudança de fase de água líquida para vapor à temperatura ambiente $\Delta H_{fg}(24 \text{ °C}) = 2445 \text{ kJ/kg}$ (Engineering ToolBox, 2003), tem-se, durante as horas dos duches, uma libertação de calor latente $Q_l = 2245 \times 0,487296 = 1093,98 \text{ kJ/h} = 303,9 \text{ W}$.

Para a carga sensível de iluminação, considerou-se o espaço a avaliar como um espaço de escritórios, iluminado por LED's (*Light Emitting Diode*) de 80 lúmen/W (Engineering ToolBox, 2004), com 250 lúmen/m^2 (Engineering ToolBox, 2004). Sabendo que a área aproximada do espaço em questão é de 53 m^2 , tem-se $Q_{s,iluminação} = \frac{53 \times 250}{80} = 165 \text{ W}$. Foi tida em conta a simulação do dia e da noite que o submarino implementa a bordo, consistindo na ocultação de luzes durante o período noturno (desde as 21 horas até às 7 horas do dia seguinte).

Finalmente, torna-se necessário abordar a questão da libertação de hidrogénio pelas baterias de acumulação elétrica, assim como a da sua eliminação. Cada um dos 648 elementos destas baterias liberta 200 ml/h de H_2 , de acordo com a Divisão de Submarinos da Marinha Portuguesa, totalizando $129,6 \text{ l/h}$ de H_2 a serem libertados para o meio durante a carga das baterias elétricas. Sabendo que os catalisadores têm capacidade para recombinar esta quantidade de H_2 (até 200 l/h), é possível assumir que, durante o período de carga das baterias, esta quantidade de hidrogénio está a ser recombinada com oxigénio para geração e libertação de vapor de água para o meio ambiente, de acordo com a

equação $2H_2 + O_2 \Rightarrow 2H_2O$. Considerando condições PTN (pressão e temperatura normais) na atmosfera do submarino ($V_{molar} = 24,2 \text{ l}$), ou seja, $1 \text{ l } H_2 \Rightarrow 1 \text{ l } H_2O$, e sabendo que a entalpia de formação da água à temperatura em questão é $\Delta H(24 \text{ }^\circ\text{C}) \simeq 286 \text{ kJ/mol}$ (U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Basic Energy Sciences, Division of Chemical Sciences, & Geosciences and Biosciences, 2019), é possível concluir que há uma geração de $129,6 \text{ l/h}$ de H_2O ($5,4 \text{ mol/h}$) sob a forma de vapor, e uma libertação de $1544,4 \text{ kJ/h}$, ou seja, 429 W por parte dos 25 catalisadores quando as baterias elétricas se encontram em modo de carga. Por ação do sistema de climatização e do ventilador principal do navio, todo o ar existente nos poços das baterias elétricas acaba por ser distribuído por todo o navio, homogeneizando a percentagem de H_2 existente no ambiente do submarino. Por esta razão, os catalisadores encontram-se igualmente distribuídos por todo o espaço interior. É conhecido que o submarino possui de volume interior 1076 m^3 , dos quais apenas 184 m^3 pertencem à secção dos alojamentos que é insuflada pela ACU correspondente. Estima-se assim, proporcionalmente, que dos 25 catalisadores existentes no espaço interior, 6 estejam localizados na secção dos alojamentos, o que corresponde a uma libertação total de $31,1 \text{ l/h}$ de H_2O e a um calor sensível gerado de 103 W no interior deste espaço durante os períodos em que as baterias elétricas estão em modo de carga. Para cálculo do calor latente gerado, utiliza-se o valor da entalpia de vaporização da água à temperatura ambiente $\Delta H_{fg}(24 \text{ }^\circ\text{C}) = 2445 \text{ kJ/kg} = 2445 \text{ J/g}$, e a massa molar da água $M(H_2O) = 18 \text{ g/mol}$. Sabendo que são gerados pelos 25 catalisadores $5,4 \text{ mol/h}$ de H_2O , têm-se $1,3 \text{ mol/h}$ a serem gerados no espaço a considerar (6 catalisadores), ou seja, $23,4 \text{ g}$ de H_2O , o que corresponde a 16 W de calor latente na secção dos alojamentos.

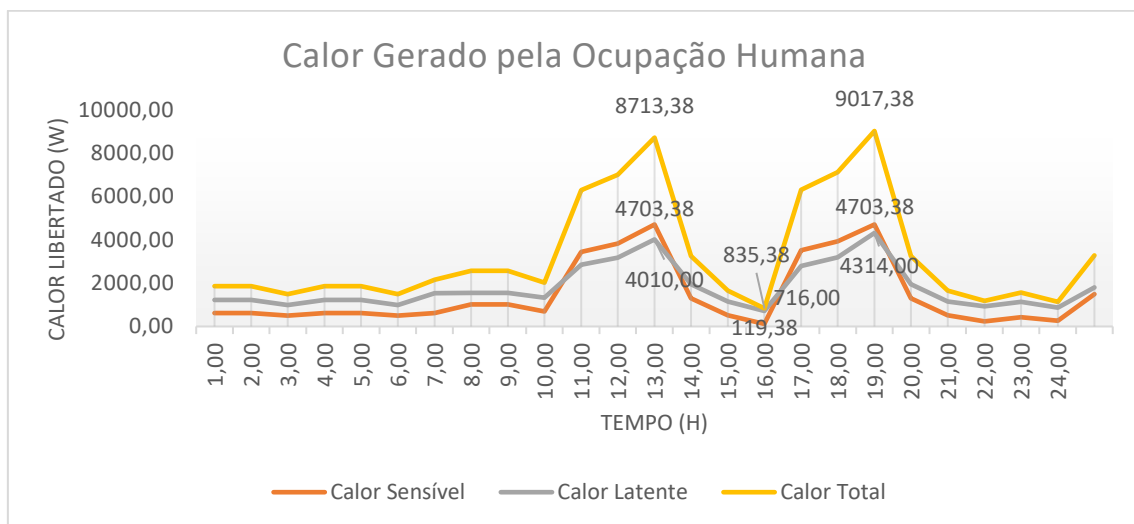
Finalmente, quantifica-se o calor perdido, através do isolamento e do casco resistente, pelo submarino para a água do mar no exterior. Considerando o espaço dos alojamentos como metade de um cilindro, torna-se aplicável a Equação 50 a esta situação, visto que devido ao escoamento constante da água do mar pela estrutura hidrodinâmica do submarino é possível assumir valores muito elevados para o coeficiente de convexão exterior, $h_{out} = \infty$. Esta adaptação dá origem à Equação 52 para o calor perdido através do isolamento:

$$Q_{perd} = \frac{\pi L(T_{amb} - T_{out})}{\frac{1}{r_i h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_{int}}{r_i}\right)}{k_{isol}} + \frac{\ln\left(\frac{r_i}{r_{int}}\right)}{k_{casco}}} \quad (52)$$

Note-se que a diferença entre esta equação e a anterior, é o facto de esta não possuir o multiplicador 2, pelo que o espaço a considerar, secção dos alojamentos, corresponde a metade de um cilindro, e não a um cilindro total. Assim, considerando $L = 17,7 \text{ m}$, $r_i = 3,07 \text{ m}$, $r_{int} = 3,12 \text{ m}$, $r_e = 3,15 \text{ m}$, $k_{isol} = 0,04 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, $k_{casco} = 50 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ (Engineering ToolBox, 2005), $T_{amb} = 24 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{out} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ e $h_{in} = 7 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$, resolve-se a equação, obtendo $Q_{perd} = 1110,62 \text{ W}$, sendo que este valor é calculado para uma temperatura exterior aproximada de $15 \text{ }^\circ\text{C}$.

Com os dados até ao momento referidos, assim como os apresentados nas Tabelas 3 e 4, e usando a distribuição de pessoal considerada ao longo de um dia na Tabela 2, origina-se a tabela do Apêndice 1, a partir da qual se obtém a evolução em regime estacionário da carga térmica nesta secção ao longo das 24 horas de um dia, representada no gráfico 1.

Gráfico 1 - Evolução da carga térmica diária no interior do espaço dos alojamentos.



Neste gráfico é possível identificar que as horas do dia em que é gerado maior calor são entre as 12 e as 14 horas, e entre as 18 e as 20 horas. As 16 horas coincidem com o ponto em que menos calor é gerado por ocupação humana, estando os valores correspondentes identificados nos próprios gráficos. É importante referir que esta evolução é feita em regime estacionário para cada hora do dia, sendo considerada constante em

cada hora para efeitos dos cálculos do funcionamento das baterias de arrefecimento da ACU.

4. MODELO CFD EM REGIME ESTACIONÁRIO

Estando descrito o funcionamento, características e particularidades relacionadas com o sistema de climatização instalado nos submarinos da classe Tridente, surge a necessidade de avaliar o comportamento do ar no espaço. Esta avaliação tem por objetivo conhecer os valores de humidade e de temperatura ao longo do espaço a considerar, tendo em consideração as cargas térmicas sensíveis e latentes, nas 24 horas no interior do submarino.

Para a avaliação estacionária da propagação do ar no interior do espaço dos alojamentos é utilizada a plataforma *CFD Flow Simulation* do *software CAD SOLIDWORKS*. Usando o *CAD* do *software* desenha-se a estrutura e objetos existentes no interior da secção dos alojamentos, utilizando-se seguidamente o *Add-In Flow Simulation* e atribuindo vários cenários de geração de cargas latentes e sensíveis em diversas áreas do modelo desenhado. Finalmente o modelo é corrido por forma a efetuar o cálculo da distribuição de humidade relativa e de temperatura pelo volume de cálculo.

4.1. Desenho do Modelo CAD

Nesta fase desenha-se um modelo aproximado da geometria do interior do submarino, mais especificamente o piso superior da secção que inclui os alojamentos, a cozinha, os alojamentos de oficiais nº1 e parte da casa de banho de oficiais. Pretende-se, não só modelar as estruturas existentes no espaço interior, sujeitas ao efeito do ar circulante, mas também o sistema de distribuição de ar instalada nesta secção de vante, no que diz respeito a locais de insuflação e de extração de ar ambiente. Baseado na planta geral fornecida pela Divisão de Submarinos, o modelo centra-se, na representação da localização e geometria das principais fontes de carga latente e sensível (camas, armários, materiais de cozinha, áreas de trabalho, locais de refeição, chuveiros, lavatórios, sanitários, iluminação, etc.), assim como na representação das condutas, locais de insuflação e de extração do sistema de climatização dos alojamentos, cujo diagrama representativo foi fornecido pela Divisão de Submarinos. O material do modelo não foi definido nesta fase, mas na fase da modelação CFD, posterior a esta, como material único (aço galvanizado) para todos os objetos construídos, com a motivação de fazer reduzir o tempo de cálculo

nas simulações do modelo. Esta medida torna-se viável visto que esta dissertação tem por objeto de estudo a distribuição e variação dos valores de humidade relativa e de temperatura no interior do submarino, face às situações de carga térmica interior verificadas num dia típico de funcionamento.

No menu inicial do *SOLIDWORKS*, abriu-se um novo documento do tipo *Part* com o nome de “Parte Interior”. Neste documento, no submenu *Sketch* começou-se por desenhar uma plataforma que iria servir de base para as diferentes estruturas e objetos existentes no interior do espaço a considerar. Utilizando as funções *Corner Rectangle*, *Center Rectangle*, *Line*, *Circle*, *Centerpoint Arc*, *Ellipse*, *Partial Ellipse*, *Smart Dimension*, *Convert Entities* e *Trim Entities* do submenu *Sketch*, assim como as funções *Extruded Boss/Base*, *Revolved Boss/Base*, *Extruded Cut* e *Linear Pattern* do submenu *Features*, é desenhada e construída uma aproximação das estruturas e objetos existentes no interior do submarino, assim como das condutas de ventilação do local (figura 18). O espaço interior desenhado contém: uma cozinha com 4 bicos de fogão, um lava-loiças, e armários de diferentes dimensões; uma casa de banho de oficiais com lavatório e sanitário; dois alojamentos de oficiais (nº 1 e nº 2) com armários e um beliche de 3 camas cada um; uma casa de banho de sargentos e praças com sanitários, lavatórios e chuveiros; um corredor longitudinal com 6 catalisadores de hidrogénio; uma área de maiores dimensões destinada a alojamentos de praças e de sargentos; e o espaço para refeições, na qual existem armários, 4 mesas pequenas para refeições com 2 bancos cada uma, mais uma mesa de maiores dimensões com 4 bancos pequenos e um sofá; conjuntos de beliches de 2 e de 3 camas, resultando num total de 26 camas adicionais às 6 já mencionadas, totalizando 32 camas disponíveis no espaço total simulado; e ainda 4 câmaras de lançamento de torpedos considerados fechados.

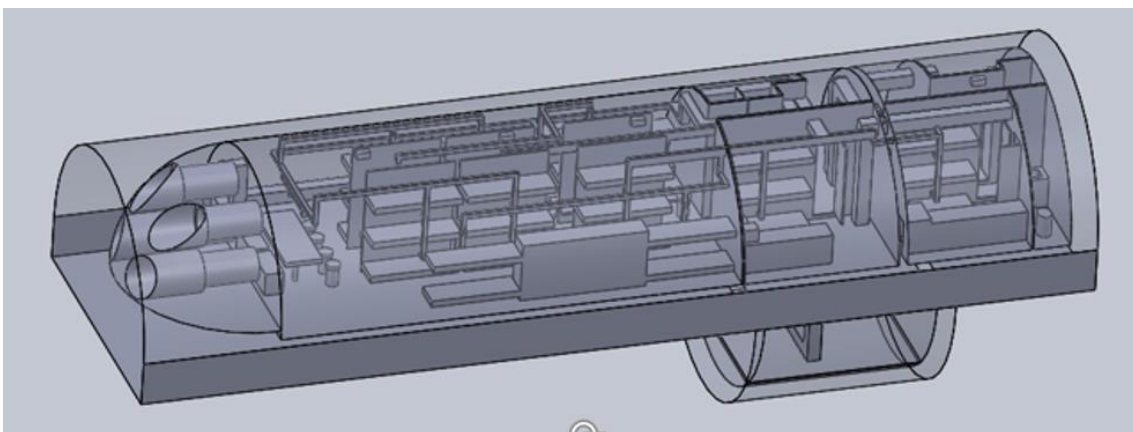


Figura 18 - Modelo CAD do interior da secção dos alojamentos do submarino.

Utilizando as funções anteriormente enunciadas, o ACU, localizado na casa das máquinas auxiliares nº 2, no pavimento inferior, é considerado como um simples bloco sólido no interior de uma conduta que atravessa este compartimento (figura 19). A especificar numa fase seguinte, o ar “entrará” numa das faces deste bloco nas condições do ar ambiente, e “sairá” pela outra face nas condições de insuflação, simulando-se o processo de arrefecimento na bateria de arrefecimento equivalente à instalada no local.

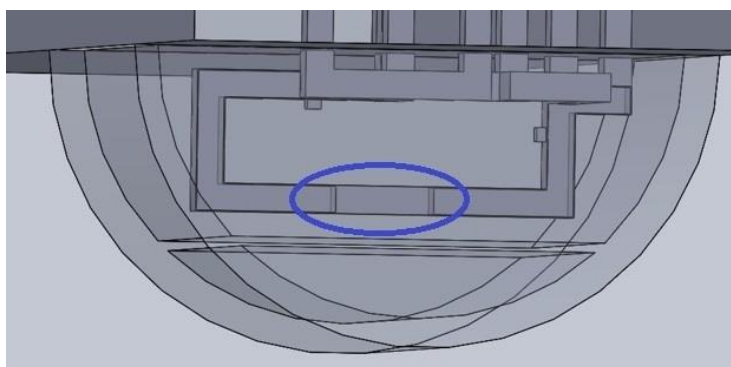


Figura 19 - Simplificação da bateria de arrefecimento da ACU de vante.

Concluído o desenho e construção do modelo CAD do espaço de estudo em avaliação, efetuou-se uma cópia do documento “Parte Interior”, denominando-a “Modelo Completo”, no qual se procedeu, seguidamente, à estruturação das particularidades do modelo CFD a aplicar.

4.2. Definição do Modelo CFD

O modelo CFD em questão, como referido, foi definido por meio do *Flow Simulation* do *SOLIDWORKS*, sendo que parte dos parâmetros de entrada foram determinados por meio de uma aplicação desenvolvida em *MATLAB*. Partindo-se do gráfico 1 apresentado no capítulo anterior, seleccionou-se 10 pontos que representam as situações típicas de carga térmica ao longo do dia, como, por exemplo, as condições de carga térmica máxima e mínima, e condições de carga intermédia. O modelo CFD simulou o escoamento em regime estacionário, usando os valores de calor sensível e latente gerados por equipamentos e atividades, assim como a resposta da bateria de arrefecimento, em função das condições a garantir no ambiente interior.

Relativamente aos valores de carga latente e sensível, assumem-se os valores referidos anteriormente nas Tabelas 3 e 4, assim como os valores de carga sensível e/ou latente referente a duchas, iluminação, catalisadores de hidrogénio e perda sensível pelo isolamento, mencionados no Apêndice 1. Ao longo de cada uma das 10 simulações, os valores das cargas serão constantes.

Para modelar uma resposta da bateria de arrefecimento face a cada uma das situações de carga térmica, recorreu-se a um programa comercial de simulação da *Airmec Essential Services*, com certificação *Eurovent* e denominado *airCalc*, que considera uma bateria de arrefecimento equivalente à instalada. As características da bateria utilizada no programa garantem cargas sensíveis e latentes para as condições limite de 32 °C indicadas pela Divisão de Submarinos. Com esta bateria de arrefecimento, foi possível caracterizar a evolução das condições do ar em função das condições do ar de extração e da carga sensível no espaço à temperatura de conforto interior de 24 °C, considerando uma temperatura da água do mar junto ao casco resistente de 15 °C. Na realidade, o ACU irá modular o caudal de água na bateria de modo a garantir uma temperatura constante no interior. No entanto, a temperatura da bateria de arrefecimento varia em função da carga a remover, pelo que a humidade removida é menor em condições de menor carga térmica. Os dados do comportamento desta bateria de arrefecimento encontram-se no Anexo 3.

Nesta fase, surge a utilização da plataforma *MATLAB* no âmbito de desenvolver uma aplicação que faça uso dos valores referentes ao modelo da bateria de arrefecimento, tabelados no Anexo 3, e que aplique a Equação 9 referente à evolução dinâmica da carga latente no interior de um espaço, sendo que, para este caso em particular, esta irá ser aplicada em regime estacionário, pelo que o valor de carga térmica gerada será fixo em cada simulação. A aplicação desenvolvida, com o nome *Calculo_Valores_Estacionarios*, e cujo código se encontra disponível no Apêndice 2, resolve, para os 10 pontos horários do Apêndice 1, a equação diferencial da difusão de vapor anteriormente mencionada, por forma a determinar o valor da temperatura do ar de insuflação, assim como as humidades, tanto de extração, como de insuflação para cada um dos pontos. A cada ponto corresponde uma simulação diferente a efetuar no *Flow Simulation*.

O programa desenvolvido entende-se como uma versão adaptada para regime estacionário das simulações dinâmicas do sistema de climatização, a serem abordadas

seguidamente no Capítulo 5 desta dissertação. Posteriormente à atuação do programa, os valores referentes aos pontos estudados são caracterizados numa tabela apresentada no Apêndice 3.

Definidas as condições interiores e as condições de insuflação para os 10 pontos diferentes, procede-se à caracterização, com base nestes dados, de cada simulação na plataforma *Flow Simulation*. No menu principal do *Add-In Flow Simulation*, é criado um projeto para cada simulação, cujo nome é o intervalo de horas à qual a simulação corresponde. Como definições gerais do projeto (*General Settings*) considerou-se, como fluidos de trabalho, vapor de água e ar, assim como uma parede adiabática nas fronteiras do domínio de computação, o efeito da gravidade sobre o modelo, e uma rugosidade das superfícies de $0,1 \mu\text{m}$. Considerou-se ainda, no submenu *Turbulence Parameters*, um modelo do tipo k- ϵ . Seguidamente, na árvore do projeto (*Project Tree*), foi aberto o subgrupo *Input Data*, onde foram ativadas condições de fronteira (*Boundary Conditions*), fazendo corresponder taxas de libertação de carga latente (*g de vapor/h*) a todas as fontes interiores identificadas em cada ponto, assim como o caudal de insuflação de ar para cada ponto horário na face de saída do bloco desenhado. Na face oposta é atribuída como condição de fronteira, uma pressão atmosférica, que se traduzirá na face pela qual o ar é extraído do ambiente, tal assunção é possível assumindo que se mantém o ambiente interior à pressão atmosférica, o que resulta num caudal de extração igual ao caudal de insuflação atribuído na outra face. Posteriormente, são atribuídas fontes de calor (*Heat Sources*) para cada geração de calor sensível considerado na simulação, e uma perda de calor pelo isolamento do submarino para o exterior. Por forma a tornar o processo de cálculo mais rápido, definem-se objetivos (*Goals*) de forma a direcionar a simulação para o cálculo de valores de temperatura, humidade e caudal volúmico, tanto de uma forma global, como em pontos específicos do modelo CAD. Finalmente, no mesmo subgrupo, é atribuída uma malha (*Mesh*) de nível 5, o que se traduzirá num processo de cálculo demorado que inclui mais de 800 iterações por simulação. Efetuada a definição dos parâmetros de cada uma das simulações do modelo CFD, o modelo é executado pela função *Run*.

Após se darem por concluídas todas as simulações, no subgrupo *Results* são ativados *Cut Plots* que representam valores de temperatura do ar, humidade relativa e velocidade do ar, assim como ativadas as trajetórias de fluxo (*Flow Trajectories*) que demonstram as mesmas três grandezas. Por fim, são criados três *Goal Plots* para a evolução das

iterações no cálculo da temperatura, humidade relativa e caudal de extração. Esta demonstração de resultados, disponível para visualização no Apêndice 4, torna possível uma visualização abrangente daquilo que acontece no interior do espaço, facilitando análises posteriores à distribuição de vapor e de temperatura verificadas.

4.3. Discussão de Resultados

É objetivo neste capítulo avaliar flutuações a nível de valores de humidade relativa e de humidade absoluta, assim como a sua distribuição por todo o volume de trabalho no interior do submarino. Para um entendimento correto de todo o comportamento higrotérmico observado nos resultados apresentados pelo *software* nesta análise, torna-se necessária uma compreensão e justificação de todos os fenómenos, tanto conspícuos como globais, que o programa disponibiliza ao utilizador. Em particular é necessário considerar os processos de transferência de calor sensível e latente, e assunções que a plataforma possa ter efetuado que influenciem os resultados.

De acordo com os *Cut Plots* e *Flow Trajectories* apresentados pelo programa, disponíveis para visualização no Apêndice 4, é possível tirar conclusões relativamente à globalidade das 10 simulações realizadas. No que diz respeito à temperatura nas zonas habitáveis (compartimentos do piso superior) varia entre 20 °C e 27 °C. Na zona casa das máquinas auxiliares nº2 predominam valores de temperatura entre 17 °C e 21 °C, devido ao facto de ser uma zona com pouca carga térmica considerada, e onde o ar proveniente da bateria de arrefecimento é primeiramente insuflado. Foi verificado também que, em todas as simulações, a temperatura do ar de extração, isto é, a temperatura do ar imediatamente antes de entrar na bateria de arrefecimento, apresenta valores entre 22 °C e 24 °C, o que traduz uma ligeira redução da temperatura relativamente ao valor assumido para a temperatura ambiente no modelo da bateria de arrefecimento utilizado (24 °C). Este último fenómeno poderá estar relacionado com uma distribuição menos homogénea do ar relativamente ao que acontece na realidade do submarino e o facto das dimensões das condutas de distribuição de ar não estarem corretamente dimensionadas. Também se verifica uma ligeira redução da temperatura ambiente em locais próximos das paredes do submarino, como resultado da perda de calor sensível, via isolamento, para o exterior.

Relativamente a valores de humidade relativa no ambiente interior, obtêm-se, de forma geral, níveis entre 40% e 60% em todas as simulações do modelo feitas para as horas em que os equipamentos na cozinha estão desligados. Se ligados, a humidade relativa atinge valores de 85% em várias zonas do espaço em questão. Observa-se, também, valores de humidade relativa ligeiramente maiores nos locais próximos do isolamento.

É possível dividir as simulações efetuadas, em função da generalidade de resultados observados, em três grupos distintos: horas de confeção e consumo de refeições, horas noturnas e horas de repouso diurnas. Em cada um destes grupos de simulações do modelo CFD, são observadas flutuações dos valores de temperatura e de humidade relativa característicos das atividades inerentes às horas do dia em consideração.

Nas simulações efetuadas para as horas em que refeições estão a ser confeccionadas (figura 20) ou consumidas, os equipamentos da cozinha estão em funcionamento e há atividade nos locais designados para tomada de refeições. Como tal, o efeito da carga térmica, tanto sensível como latente, é sentido de forma mais evidente em todo o modelo CFD. É possível encontrar, durante o horário de refeições, temperaturas superiores a 40 °C no interior das condutas de extração do ar da cozinha, assim como temperaturas superiores a 30 °C no interior da cozinha, resultando em valores de humidade relativa muito baixa, perto de 20%, nos patamares superiores destes locais. Nas zonas de tomada de refeição, nomeadamente perto de mesas e bancos, a temperatura varia entre 25 °C e 30 °C, derivadas das atividades decorrentes nestes locais. A humidade relativa apresenta valores de 50% e 60% na globalidade do espaço interior, e apresenta valores entre 70% e 90% no compartimento da bateria de arrefecimento e em locais próximos da parede do submarino.

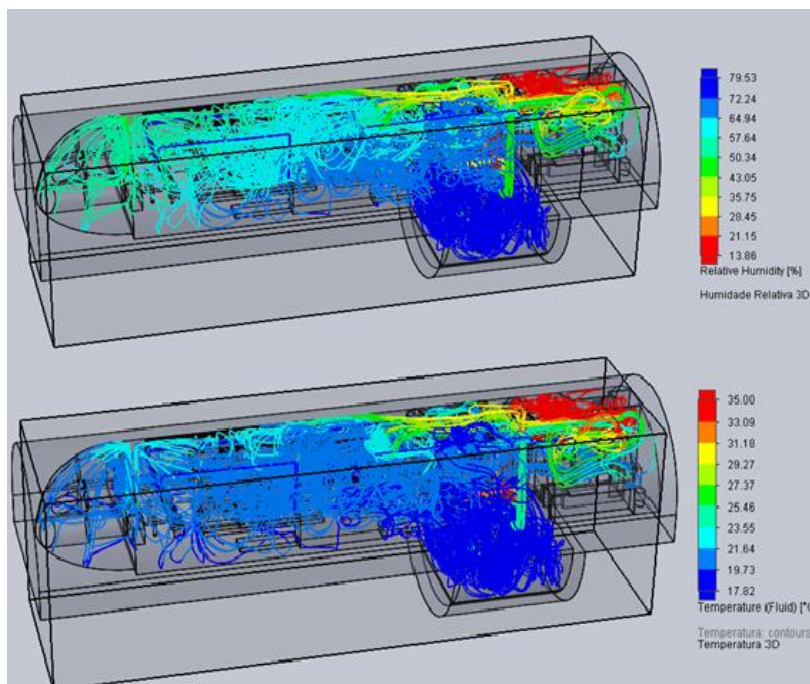


Figura 20 - Resultados de temperatura e humidade relativa para o intervalo das 12h às 13h.

Relativamente ao horário noturno (figura 21), horas durante as quais há mais pessoal de bordo a dormir, a amplitude térmica do ar no espaço reduz-se consideravelmente, passando a apresentar valores entre 22 °C e 25 °C em toda a secção considerada, à exceção de locais onde o pessoal da guarnição se encontre, seja a dormir, em repouso ou a tomar alguma refeição ligeira e pontual, onde a temperatura pode subir até 28 °C. Mais uma vez, no compartimento da bateria de arrefecimento, locais próximos das paredes ou locais que não tenham qualquer tipo de atividade noturna, a temperatura ronda os 20 °C. Relativamente a níveis de humidade relativa para estes períodos, são observados valores entre 40% e 60% na totalidade das zonas habitadas, sendo que os valores mais elevados são observados nos locais onde se encontra pessoal a dormir ou em repouso, ou em locais onde sejam verificados valores de temperatura mais baixos.

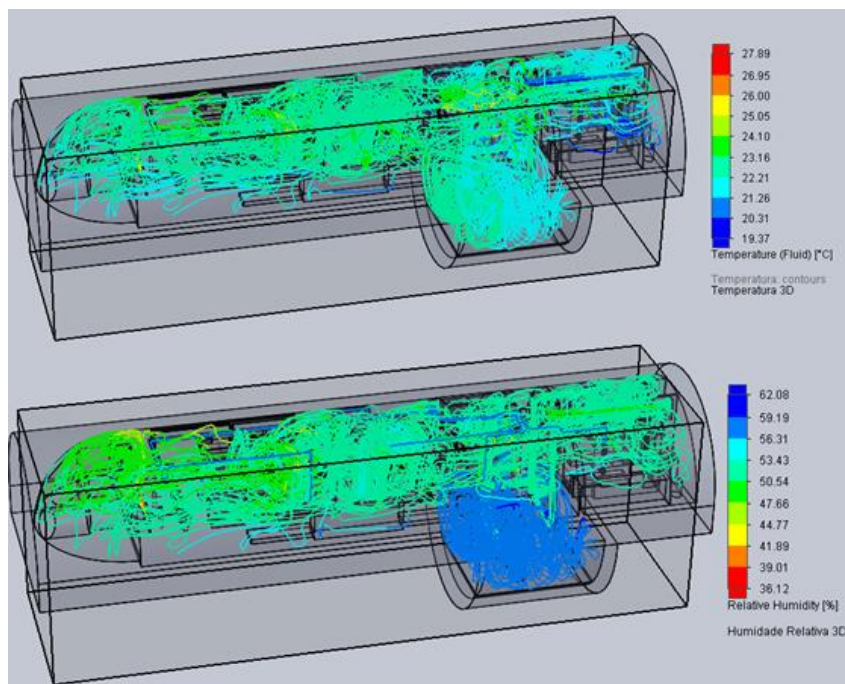


Figura 21 - Resultados de temperatura e humidade relativa para o intervalo das 2h às 3h.

Durante as horas de repouso diurno (figura 22), entendidas como horas em que a atividade nos compartimentos, assim como o número de militares presentes no local é substancialmente menor, a temperatura assume valores numa gama de 23 °C a 25 °C nos espaços comuns, podendo subir ligeiramente até aos 28 °C perto de locais onde refeições ligeiras possam estar a ser tomadas, e descer até aos 19 °C em locais próximos do isolamento. Nas zonas onde a temperatura é ligeiramente mais baixa, a humidade relativa atinge valores máximos de 70%. Fora destes locais, é bem distribuída e perto de 50% em todo o volume considerado.

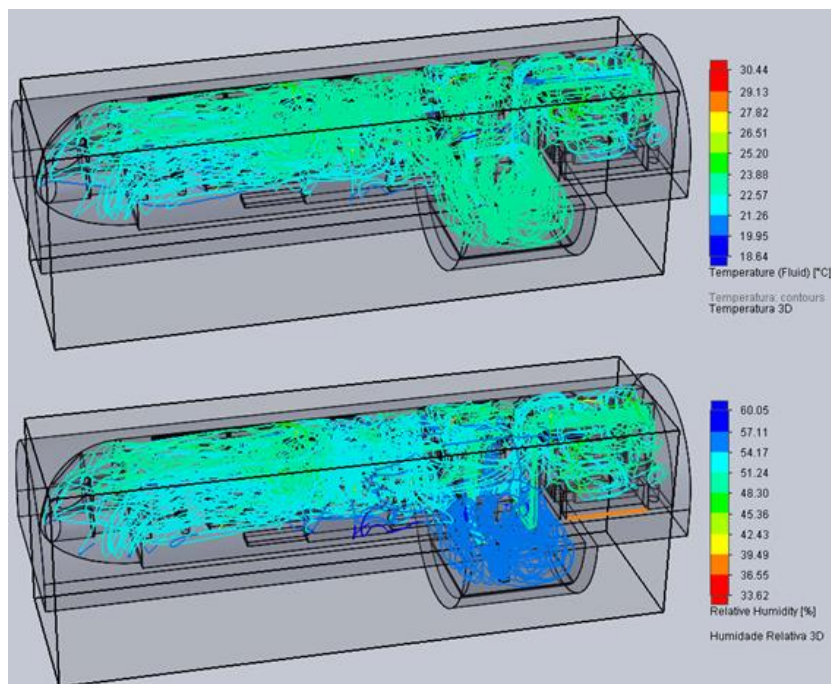


Figura 22 - - Resultados de temperatura e humidade relativa para o intervalo das 15h às 16h.

Tendo em conta os resultados anteriormente descritos, apresenta-se, na Tabela 5, uma visão geral dos valores encontrados na secção dos alojamentos:

Tabela 5 - Variação de valores de temperatura, humidade relativa e humidade absoluta em vários locais da secção dos alojamentos.

Horários	Locais	Temperatura	Humidade Relativa	Humidade Absoluta
Horário de Refeições	Cozinha	40	20	9,2
	Local de Refeições	28	60	14,3
	Zona da Bateria de Arrefecimento	20	70	10,3
	Perto do Isolamento	20	65	9,5
Horário de Noturno	Global	24	50	9,3
	Local das Camas	28	50	11,9
	Locais desabitados	20	60	8,8
	Perto do Isolamento	19	70	9,6
Horário Diurno de Repouso	Global	24	50	9,3
	Local de Refeições	28	60	14,3
	Perto do Isolamento	19	70	9,6

Os resultados apresentados pelo *software Flow Simulation*, indicam que nas horas de confeitura e tomada de refeição em que há um aumento considerável da carga térmica sensível e latente na cozinha e nas zonas de refeição, há maior variação da temperatura ambiente e da humidade relativa, e a humidade relativa toma valores muito elevados em determinadas zonas da secção dos alojamentos. Verifica-se que, para os restantes períodos, a distribuição da temperatura do ar, assim como da humidade relativa, se dá de forma aproximadamente homogénea e dentro de valores aceitáveis. Verifica-se sempre uma ligeira redução da temperatura no espaço da ACU dos alojamentos, assim como nas proximidades da parede, o que resultará num ligeiro aumento da humidade relativa nestes locais. Estes aumentos de humidade relativa irão facilitar a ocorrência de condensação nos locais onde são observados, particularmente em locais próximos do isolamento, no interior do qual a temperatura atingirá valores que se aproximarão da temperatura no ponto de orvalho para as condições do ar existentes. Relativamente a valores de humidade absoluta, verifica-se um aumento desta em locais onde maior ocupação humana é verificada, assim como em zonas de tomada de refeições, sendo durante estes períodos que o pico de humidade absoluta é atingido. Apesar da variação verificada, o valor de humidade absoluta em locais próximos do isolamento permaneceu aproximadamente uniforme em todo o espaço, entre 9 e 10 $g H_2O/kg Ar$, podendo este considerar-se, por ação da difusão de massas de ar no espaço e da distribuição de ar efetuada pelo ventilador do navio, como um ponto único, cuja humidade absoluta corresponde à verificada no isolamento, o que servirá de fundamento para as simulações desenvolvidas no Capítulo seguinte. Estes valores de humidade absoluta calculados, podem ser validados pelos resultados das análises realizadas pela *Thyssenkrupp*, Anexo 1, cuja natureza foi descrita num dos capítulos iniciais.

5. SIMULAÇÃO INTEGRAL DO SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO

Sendo a humidade específica razoavelmente constante no interior do espaço de alojamento, pode avaliar-se a humidade num modelo integral sendo todo o espaço representado por um único ponto. A equação diferencial permite simular dinamicamente a variação no tempo dos níveis de humidade em função das variáveis do processo. Assume-se nesta avaliação, que a temperatura ambiente se mantém constante e uniforme em todo o espaço a simular. O objetivo é descrever uma evolução da humidade absoluta em função do tempo, considerando a resposta das baterias de arrefecimento. Pretende-se, também, caracterizar a migração de vapor e a possibilidade de condensação do vapor de água no interior do isolamento por meio do cálculo do gradiente térmico ao longo do mesmo, e da temperatura de orvalho correspondente às condições verificadas no ar interior.

As aplicações desenvolvidas focam-se na análise do comportamento da humidade na secção dos alojamentos, sendo posteriormente efetuadas adaptações para a situação global da totalidade do espaço interior do submarino. Em qualquer abordagem, as simulações do funcionamento do sistema são em modo de arrefecimento com potência de arrefecimento em função do calor sensível gerado no espaço. Seguidamente, realizam-se simulações de um sistema atuante que se mantenha com a bateria de arrefecimento em modo de desumidificação, isto é, com a válvula de *bypass* totalmente aberta, com reaquecimento até à temperatura pretendida, assegurado por aquecedores elétricos integrados nos próprios ACU's.

Apresenta-se o fluxograma seguinte, ilustrado na figura 23, que representa, esquematicamente, a organização das simulações efetuadas:

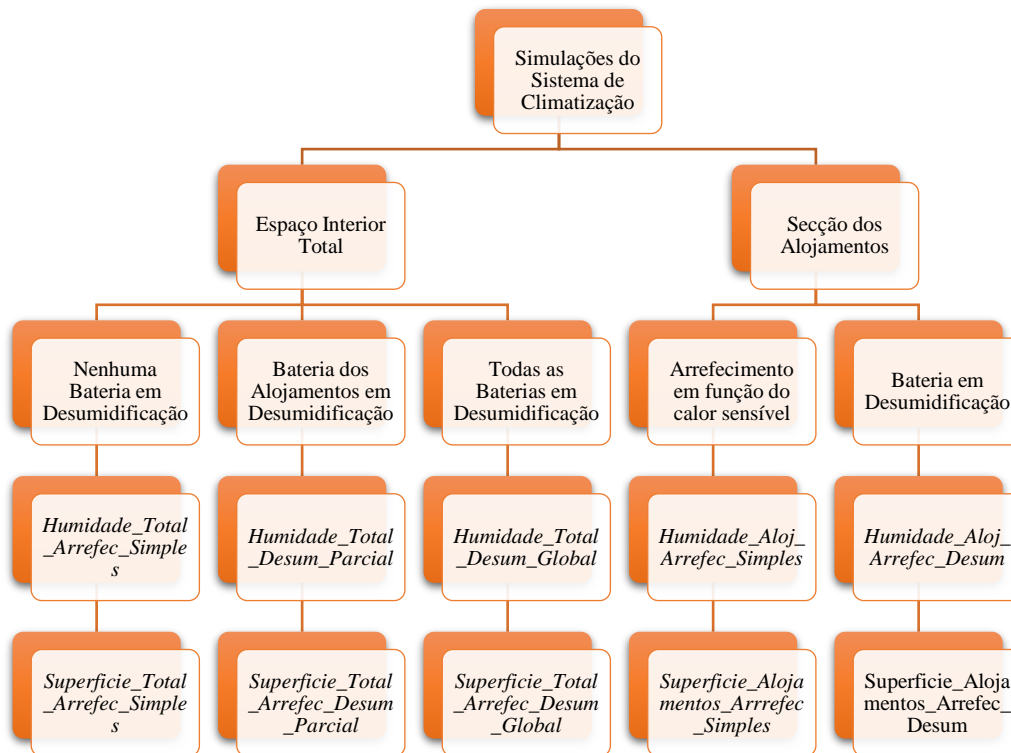


Figura 23 - Diagrama das simulações em MATLAB para o sistema de climatização.

5.1. Modelo Integral da Secção dos Alojamentos

Simula-se a ação do sistema de climatização no modo de funcionamento atual, para avaliar a evolução da humidade. Esta evolução, conta com a variação das cargas térmicas geradas no espaço e com a carga térmica libertada para o exterior do submarino, de acordo com a estrutura e características do isolamento, assim como com os diferenciais de temperatura entre ambas as faces do mesmo e com as funções de resposta da bateria de arrefecimento dos alojamentos e com o modelo assumido para a difusão de vapor de água no ambiente interior. Seguidamente a mesma aplicação proporciona uma avaliação da ocorrência de condensação no isolamento, com fundamento nas condições às quais este estará sujeito, nomeadamente a temperatura no ponto de orvalho do ar interior e temperatura da água exterior à profundidade a que se encontra.

O programa desenvolvido, com o nome *Humidade_Aloj_Arrefec Simples*, descrito no Apêndice 5, inicia-se com uma predefinição das variáveis e valores a considerar para a simulação, que se encontram na tabela presente no mesmo apêndice. No apêndice

apresentam-se as dimensões do submarino e características do isolamento, temperatura da água à superfície e na profundidade considerada até à profundidade máxima de 150 metros, temperatura ambiente interior, caudal de insuflação da ACU dos alojamentos, volume do espaço, intervalo e tempo total de integração, de modo a simular o sistema ao longo de 7 dias (168 horas). São definidos dois vetores constituídos pelos valores das cargas latente (G) e sensível (Q_{sen}) considerados para a evolução descrita no Apêndice 1 e no gráfico 1. Desta forma, em termos reais, a bateria de arrefecimento atua com base na temperatura verificada no interior, aumentando a carga removida se a temperatura no interior for superior a 24 °C, e diminuindo se esta for inferior a 24 °C. Assim, os vetores definidos traduzem a evolução das cargas latente e sensível, por hora, ao longo dos 7 dias.

A temperatura da água à profundidade considerada é calculada e retornada pela função T_{prof} (Apêndice 5). Esta função, considera que a curva correspondente à evolução da temperatura em função da profundidade apresenta aproximadamente a mesma forma em todo o globo, dependente da temperatura da água à superfície e da profundidade considerada (Joseph, 2006). O programa usa as subfunções fT e fD (Apêndice 5) para aplicar a Equação 53:

$$\begin{aligned}
 T(D) &= -0,338 \\
 &+ \frac{(T_{superfície} + 0,0338) \cdot (1 + e^{-0,016D+1,244})}{1,485 \times 10^{-4} \times (T_{superfície} + 0,0338) \times D + (1 + e^{-0,016D+1,244})} \quad (53)
 \end{aligned}$$

Em que D corresponde à profundidade em metros, e $T_{superfície}$ à temperatura da água verificada à superfície.

Seguidamente, utilizando os valores de condutividade térmica do isolamento e do casco resistente, os raios associados ao sistema isolamento-casco, assim como o comprimento do submarino abrangido pela secção dos alojamentos considerada, a função $Q_{perdaalaj}$, disponível no Apêndice 5, calcula o calor dissipado para o exterior ao submarino aplicando a Equação 52 em função da profundidade considerada.

Numa fase seguinte, assumido um valor inicial de humidade absoluta ambiente correspondente a uma temperatura de 24 °C a 50% de humidade relativa, a aplicação calcula a humidade específica do ar de insuflação e seguidamente a evolução consequente no valor de humidade ambiente gerada, ao longo de 7 dias. Apresentada a evolução da

humidade em função do tempo, a ocorrência de condensação do vapor de água é avaliada com base nas condições interiores e exteriores do isolamento.

5.1.1. Cálculo da Humidade de Insuflação

A resposta da bateria de arrefecimento em termos de insuflação é calculada durante as várias iterações do ciclo do programa, pela função *Wbatacc*, já mencionada no Capítulo 4, que assume os valores da carga sensível no ambiente e da humidade no ambiente como variáveis de *input*, retornando a humidade de insuflação como *output*. A figura 24 apresenta os valores de operação e de resposta da bateria de arrefecimento calculados pelo programa de simulação comercial mencionado no Capítulo 4, e disponíveis no Anexo 3 que traduzem uma evolução da humidade do ar insuflado pela bateria de arrefecimento em função da humidade no ambiente, e a carga térmica sensível gerada no ambiente.

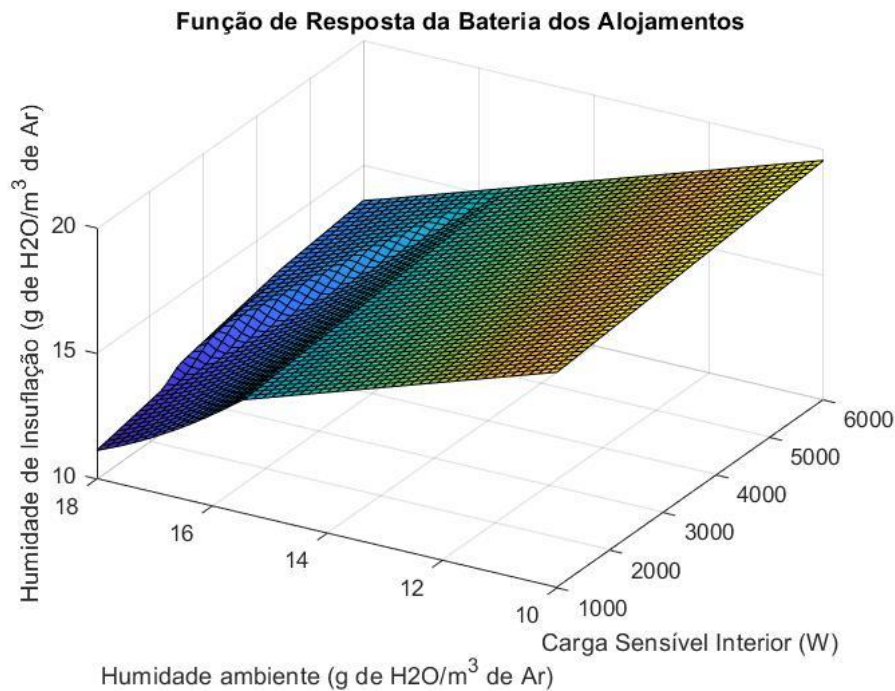


Figura 24 - Função de resposta da bateria de arrefecimento dos alojamentos para a temperatura ambiente constante considerada.

5.1.2. Cálculo da Evolução da Humidade Ambiente

Definidos os parâmetros para a resposta do sistema em termos de humidade de insuflação, procede-se ao cálculo da evolução dos valores de humidade no ambiente interior ao longo dos 7 dias. Este cálculo é feito de forma equivalente ao utilizado para a avaliação em regime estacionário realizada no Capítulo 4, isto é, resolve a Equação 9, que traduz a evolução dinâmica da carga latente no interior de um espaço (função fh), pelo método de Runge-Kutta (função $RungeKuttaH$), com a importante diferença da carga latente, em vez de permanecer estática no ambiente durante a simulação, adota um valor diferente a cada hora. Obtém-se assim o valor da humidade ambiente gerada, repetindo o processo durante um período de 168 horas (7 dias), guardando-se, a cada cálculo o valor da humidade ambiente num vetor. Seguidamente, converte-se o vetor guardado ao longo do ciclo para g de H_2O/kg de Ar , dado que os valores de humidade absoluta foram calculados em g de H_2O/m^3 de Ar . Na figura 25 apresenta-se a evolução da humidade absoluta no ambiente ao longo de 7 dias para o modo de funcionamento considerado para o sistema de climatização, considerando o submarino a navegar a 100 metros de profundidade, com uma temperatura da água à superfície de 17 °C.

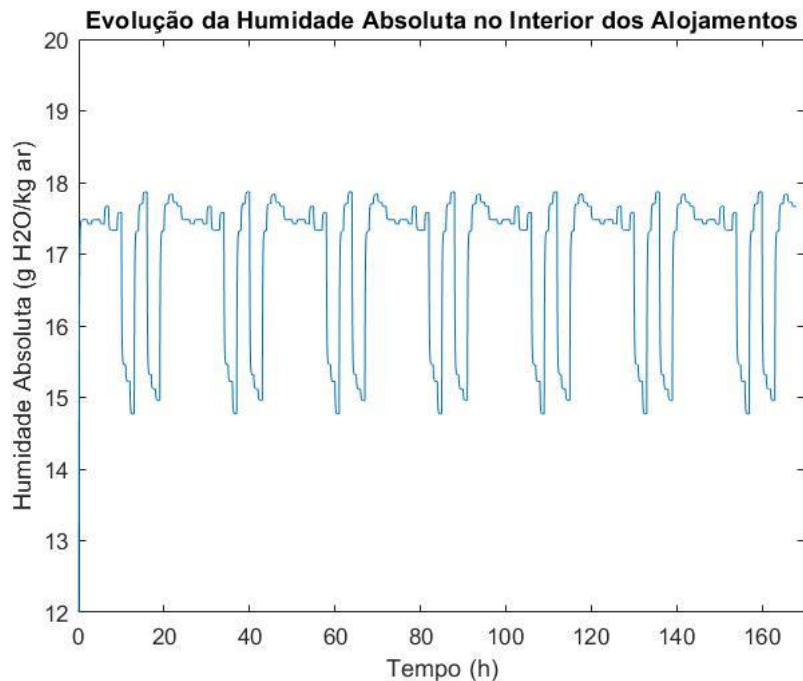


Figura 25 - Evolução da humidade ambiente na secção dos alojamentos, com o sistema de climatização em modo de arrefecimento simples.

5.1.3. Migração de Vapor

Definidas as condições interiores do ar de temperatura e de humidade absoluta, assim como as condições exteriores ao casco do submarino, avalia-se a seguir a ocorrência de condensação no interior do isolamento. A variação da temperatura no interior do isolamento e do casco resistente pode ser considerada linear dado que a temperatura interior é constante e a temperatura exterior tem uma variação lenta. O comportamento é equivalente ao estudado no Subcapítulo 2.6. Assume-se no isolamento o valor médio da humidade específica, invariante ao longo do tempo, dado que a migração do vapor no isolamento tem uma escala de tempos muito superior às variações no ar, sendo este tipo de análise descrita e apresentada no Apêndice 6. A humidade absoluta é determinada pela média da humidade no ar nos dias considerados, e, conseqüentemente, a temperatura do ponto de orvalho é constante, calculada pela função T_{sat} , disponível no Apêndice 5.

Assim, o programa aborda este problema começando por calcular as temperaturas em cada uma das faces do isolamento, a partir da temperatura do ar interior e da água exterior. Utiliza-se as funções $T_{intaloj}$ e $T_{outaloj}$, disponíveis no Apêndice 5, que aplicam a Equação 52, considerando o valor do calor dissipado calculado previamente, para determinar as temperaturas das faces interior e exterior do isolamento, respetivamente. De seguida, o programa considera uma variação linear da temperatura no interior do isolamento e uma humidade interior constante, e determina a partir de que ponto ocorre condensação. Esta última etapa é realizada por meio de uma estrutura *if* que assume a inexistência de condensação nos casos em que a temperatura exterior ao submarino é superior à do interior e para os casos em que a temperatura de saturação nunca seja atingida no interior do submarino. Por outro lado, assume existência de condensação nos casos em que a temperatura de saturação exceda ou iguale a temperatura da face interior do isolamento. Para casos em que a temperatura de saturação seja atingida em determinado ponto, o programa retorna a distância (mm) à face exterior do isolamento, assim como a percentagem de isolamento em que ocorre condensação.

5.1.4. Variação do Ponto de Condensação

Para uma melhor avaliação da resposta do isolamento em termos de condensação, torna-se relevante determinar a relação entre a ocorrência de condensações e as condições às quais o submarino se encontra, relativas a temperatura da água do mar à superfície e em profundidade. Assim, paralelamente à aplicação anteriormente definida, é desenvolvida outra com o nome *Superfície_Alojamentos_Arrefec Simples*, disponível no Apêndice 5, que calcula a evolução da humidade absoluta na secção dos alojamentos e o ponto de condensação no isolamento para uma gama variada de valores de temperatura à superfície e de profundidade. Este código aplica um ciclo *for* que calcula o ponto de condensação para temperaturas à superfície entre 0 °C e 30 °C, para uma profundidade até 150 metros a partir do nível da água do mar. Numa fase final, estando definidos três vetores diferentes, um para o ponto de condensação, um para a temperatura à superfície e outro para a profundidade, o programa relaciona estes três parâmetros, construindo uma superfície como a que se apresenta na figura 26. É importante sublinhar que o ponto de condensação é medido relativamente ao casco resistente, podendo ser entendido como uma medida da “quantidade” de isolamento onde se verifica condensação.

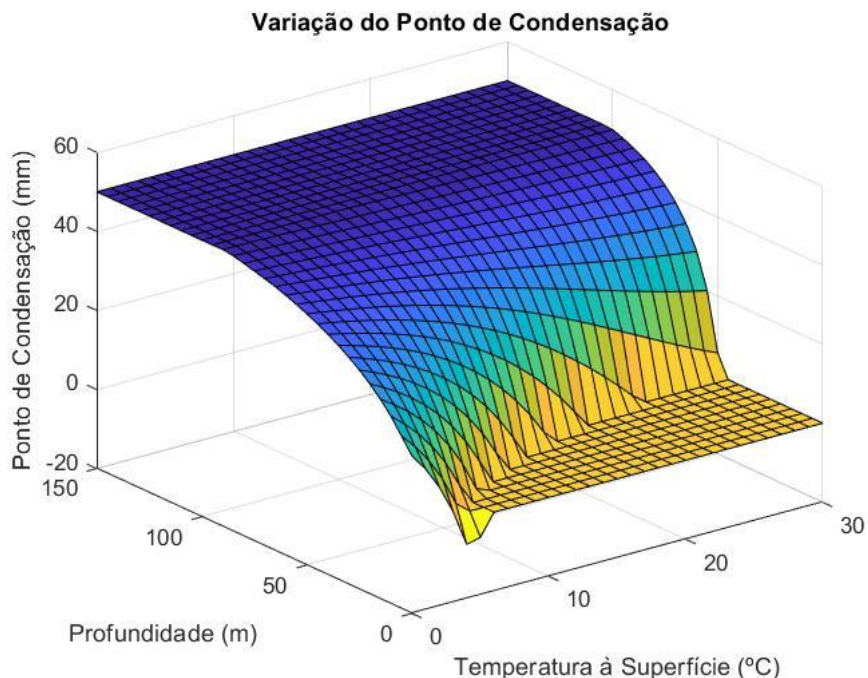


Figura 26 - Evolução do ponto de condensação no isolamento face a diferentes profundidades e temperaturas à superfície, para um funcionamento da bateria de arrefecimento em modo de arrefecimento simples.

Verifica-se, de facto, que a ocorrência de condensação é provável, mesmo para navegações em climas cujas temperaturas não atinjam valores particularmente baixos, sendo também provável em baixas profundidades de navegação. Neste regime, durante navegações em águas no Atlântico Norte, próximas de Portugal, é provável que se verifique condensação no isolamento durante a maior parte da duração das missões, contribuindo para uma degradação acelerada do isolamento.

5.1.5. Modo de Desumidificação com Reaquecimento

Uma das possíveis soluções a implementar seria colocar o ACU com a bateria de arrefecimento em modo de desumidificação com reaquecimento, tal como explicado no início do Capítulo 5, pretendendo-se, nesta fase, descrever a simulação realizada em *MATLAB*, correspondente a esse modo de funcionamento.

A aplicação desenvolvida até este ponto representa um modelo da ação do sistema de climatização na secção dos alojamentos, assim como a resposta correspondente em termos de evolução da humidade e condensação de vapor no isolamento nesta secção. A partir do código deste programa, é desenvolvida outra aplicação, com o nome *Humidade_Aloj_Arefec_Desum*, Apêndice 5, por forma a representar um modelo do sistema a atuar em modo de desumidificação com reaquecimento. Este processo de desumidificação, seria assegurado pela bateria de arrefecimento que funcionaria à carga máxima, para que o ponto de orvalho fosse atingido, de modo a condensar o vapor de água. Sendo o ar insuflado frio, há necessidade de reaquecer para uma temperatura que garanta a temperatura interior de 24 °C. Este reaquecimento seria assegurado por resistências térmicas existentes na ACU.

Numa perspetiva do código para este modelo, a alteração a efetuar ao código do modelo anterior é simples. Considera-se o vetor da carga sensível existente no espaço, Q_{sen} , constante e equivalente ao calor sensível que a bateria de arrefecimento removeria do ar se operasse com a válvula de *bypass* completamente aberta. Considerou-se então $Q_{sen} = 8500 W$, o que implica que a bateria de arrefecimento irá remover, constantemente, esta carga sensível do ambiente interior, e conseqüentemente a carga latente correspondente. Seguidamente as resistências asseguram o aumento da temperatura até ao valor de insuflação. Deste modo a função *Wbatacc* recebe sempre o mesmo valor de calor

sensível como valor de *input*, retornando um valor de humidade de insuflação. Neste código considera-se a carga latente, G , igual à do modelo anterior, é variável consoante a evolução diária da carga térmica considerada no Apêndice 1. A figura 27 representa a evolução da humidade absoluta no ambiente interior da secção dos alojamentos para este caso, considerando o submarino a navegar a 100 metros de profundidade, com uma temperatura da água à superfície de 17 °C. Considerou-se uma temperatura provável para as águas do Atlântico Norte, assim como uma profundidade que os submarinos da classe Tridente não ultrapassam com muita frequência.

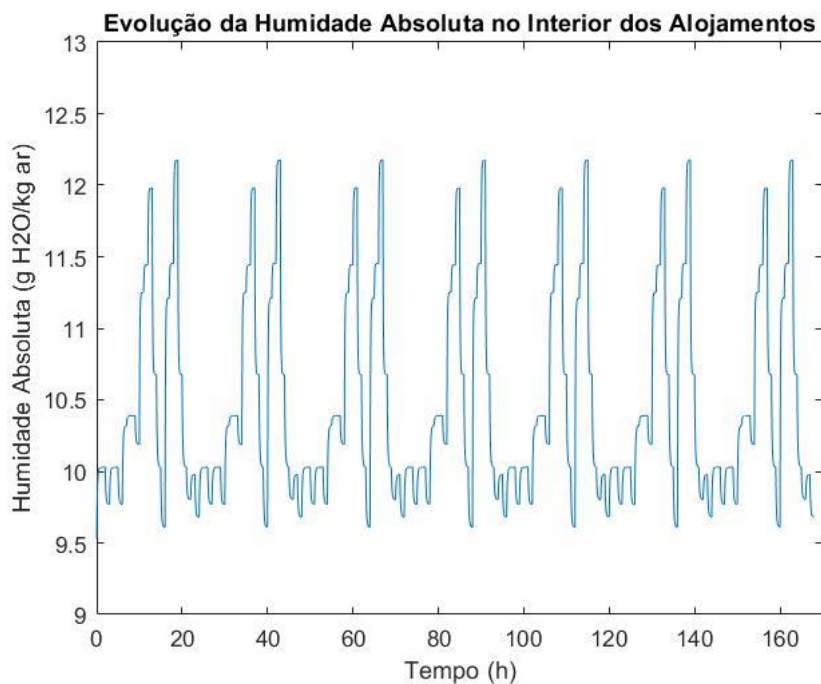


Figura 27 - Evolução da humidade ambiente na secção dos alojamentos, com o sistema de climatização em modo de desumidificação com reaquecimento.

Identicamente ao procedimento adotado para o funcionamento da bateria em modo de arrefecimento simples, avaliou-se em modo de desumidificação a condensação no interior do isolamento. Assim, paralelamente a esta aplicação, é também calculada a superfície correspondente, figura 28, cujo programa de cálculo é intitulado *Superfície_Alojamentos_Desum*, Apêndice 5, que traduz a evolução da ocorrência de condensação no isolamento, em função da profundidade e da temperatura da água à superfície.

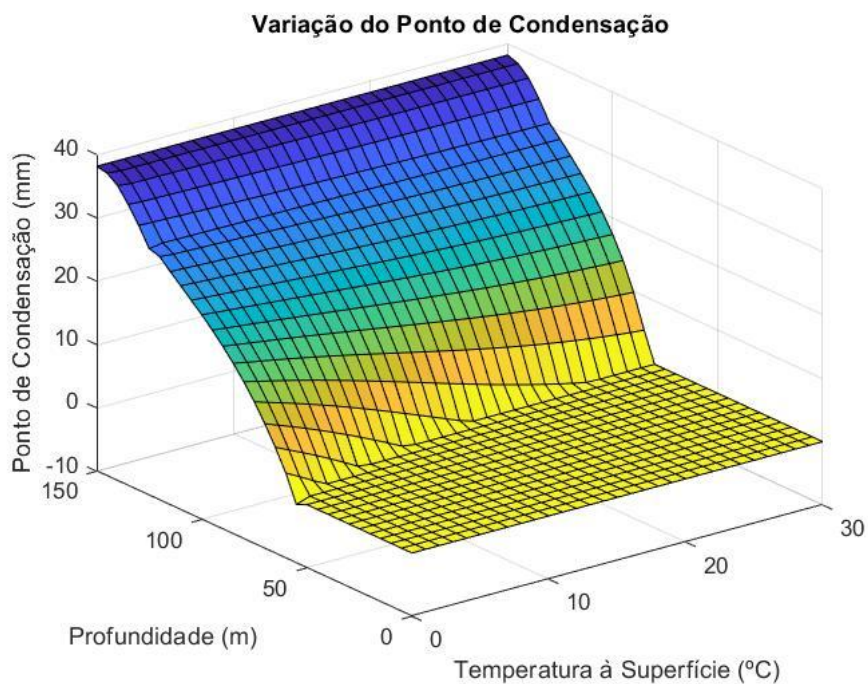


Figura 28 - Evolução do ponto de condensação no isolamento face a diferentes profundidades e temperaturas à superfície, para um funcionamento da bateria de arrefecimento em modo de desumidificação com reaquecimento.

5.2. Modelo Completo

Estando os modelos para o funcionamento da bateria de arrefecimento da secção de vante (alojamentos), assim como representadas as evoluções e respostas do espaço correspondente no âmbito da difusão de vapor e da condensação no isolamento, faz-se nesta secção uma adaptação para uma situação de funcionamento de todas as ACU's do submarino. Esta hipótese justifica-se, visto que há uma distribuição das massas de ar e vapor ao longo de todo o submarino. Esta avaliação é apenas indicativa, dado não se ter recolhido informação técnica referente a valores de carga térmica sensível existente nas secções do CIC, do TCC e da propulsão. Assim, assumiu-se que as ACU's da propulsão estão desligadas, pois a contribuição desta secção para a carga térmica global do navio é pequena. Na modelação global do sistema apenas são consideradas as baterias de arrefecimento dos alojamentos, do CIC e do TCC, assim como as cargas térmicas sensíveis e latentes ocorrentes nestas três secções. A modelação dos valores de resposta das baterias de arrefecimento do CIC e do TCC é feita do mesmo modo que na bateria dos alojamentos, recorrendo-se ao mesmo programa de simulação comercial, considerando baterias de

arrefecimento equivalentes às instaladas nestas duas secções, com valores de funcionamento indicados no Anexo 3. O cálculo da humidade de insuflação, no interior do ciclo de cálculo, é feito individualmente para cada uma das baterias de arrefecimento, através das funções W_{batacc} , W_{batcic} e W_{battcc} , disponíveis no Apêndice 5, sendo depois calculada uma humidade de insuflação global W_{insf} no espaço através da Equação 54:

$$W_{insf} = \frac{(\dot{q}_{acc} \times W_{insf,acc}) + (\dot{q}_{tcc} \times W_{insf,tcc}) + (\dot{q}_{cic} \times W_{insf,cic})}{\dot{q}_{acc} + \dot{q}_{tcc} + \dot{q}_{cic}} \quad (54)$$

Em que \dot{q}_{acc} , \dot{q}_{tcc} e \dot{q}_{cic} correspondem aos caudais de insuflação (m^3/h) das baterias de arrefecimento dos alojamentos, TCC e CIC, respetivamente, e $W_{insf,acc}$, $W_{insf,tcc}$ e $W_{insf,cic}$ correspondem às humidades de insuflação (g de H_2O/m^3 de Ar) pelas baterias de arrefecimento dos alojamentos, do TCC e do CIC, respetivamente. Esta mistura de caudais torna-se possível devido à ação do ventilador principal do navio, que garante uma homogeneização do ar interior por todo o volume do submarino.

Assume-se que carga latente nas secções do TCC e do CIC depende somente da ocupação de pessoal a trabalhar nas respetivas zonas e dos catalisadores de hidrogénio existentes. Assumindo que, em navegação, o número de pessoas a efetuar trabalhos nestas secções permanece fixo, e considerando 5 pessoas na secção do TCC e 6 na secção do CIC em atividade moderada de escritórios (ASHRAE, 2013, Capítulo 30.4), estima-se uma libertação de 441,70 g de H_2O/h e de 530,04 g de H_2O/h em cada uma das secções, respetivamente. Esta libertação de vapor é somada à carga latente proveniente dos 19 catalisadores dedicados para estas duas zonas, que corresponde a 74,61 g de H_2O/h . Para a carga sensível removida por estas duas baterias de arrefecimento, consideraram-se duas opções, uma em que a carga sensível removida é igual à que estas baterias removeriam com a válvula de *bypass* totalmente aberta correspondendo ao funcionamento em modo de desumidificação, e outra em que a carga sensível é equivalente e proporcional à carga média a que a bateria de arrefecimento dos alojamentos está sujeita, correspondendo a uma versão aproximada do funcionamento destas duas baterias de arrefecimento em modo de arrefecimento.

Desta forma, foram desenvolvidas três aplicações diferentes, com códigos disponíveis no Apêndice 5, para uma situação global do interior do submarino. A primeira, intitulada *Humidade_Total_Arrefec_Simples*, considera as três baterias de arrefecimento

(Alojamentos, TCC e CIC) em modo de arrefecimento; a segunda, intitulada *Humidade_Total_Desum_Global*, considera um modelo em que as três baterias de arrefecimento atuam em modo de desumidificação com reaquecimento. A figura 29, representa as evoluções da humidade absoluta correspondentes a cada uma das simulações anteriormente descritas, ambas executadas considerando o submarino a navegar a 100 metros de profundidade, com uma temperatura da água à superfície de 17 °C.

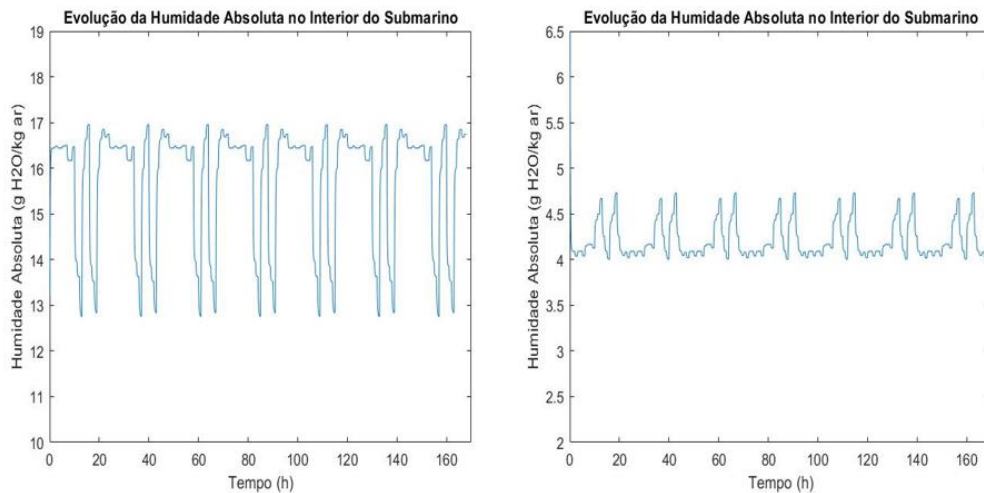


Figura 29 - Evoluções da humidade ambiente global, com todas as baterias de arrefecimento em modo de arrefecimento simples (à esquerda) e com todas as baterias de arrefecimento em modo de desumidificação com reaquecimento (à direita).

Com o nome *Humidade_Total_Desum_Parcial*, é desenvolvida uma terceira aplicação que simula o sistema de climatização em termos globais. Neste modelo a bateria de arrefecimento dos alojamentos atua em modo de desumidificação com reaquecimento, mas as restantes baterias de arrefecimento atuam em modo de arrefecimento, mantendo uma carga “média” fixa a remover do ambiente. A figura 30, representa o gráfico da evolução da humidade absoluta global para esta situação, considerando o submarino a navegar a 100 metros de profundidade, com uma temperatura da água à superfície de 17 °C:

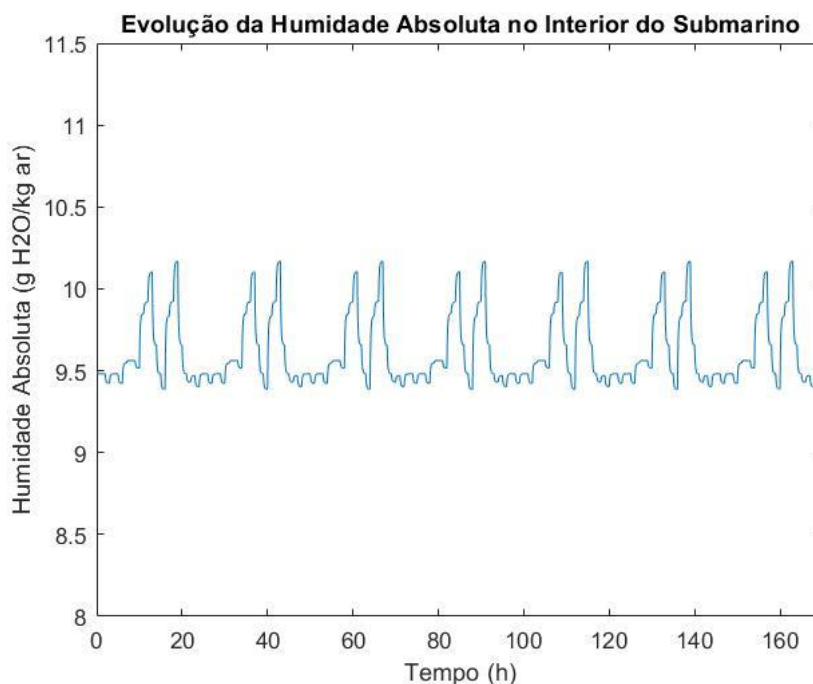


Figura 30 - Evolução da humidade ambiente global, com a bateria de arrefecimento dos alojamentos a atuar em modo de desumidificação com reaquecimento, e com as restantes baterias de arrefecimento (TCC e CIC) a atuar em modo de arrefecimento simples.

À semelhança do que foi feito para as simulações exclusivas para a secção de vante, o mesmo estudo referente à variação do ponto de condensação foi feito para estas simulações globais. Identicamente aos outros casos, isto foi feito através de três aplicações desenvolvidas paralelamente às três aplicações descritas anteriormente. Assim, são construídas três superfícies distintas representadas na figura 31, e com códigos disponíveis no Apêndice 5, uma para funcionamento das baterias de arrefecimento em modo de arrefecimento intitulada *Superfície_Total_Arrefec_Simples* (imagem da esquerda da Figura 31), uma para um funcionamento das três baterias de arrefecimento em modo de desumidificação com reaquecimento, cuja aplicação se intitula *Superfície_Alojamentos_Desum_Global* (imagem da direita da Figura 31), e uma terceira representante do ponto de condensação para um funcionamento da bateria de arrefecimento dos alojamentos em modo de desumidificação, mas com as restantes em modo de arrefecimento, denominada *Superfície_Alojamentos_Desum_Parcial* (imagem de baixo da Figura 31).

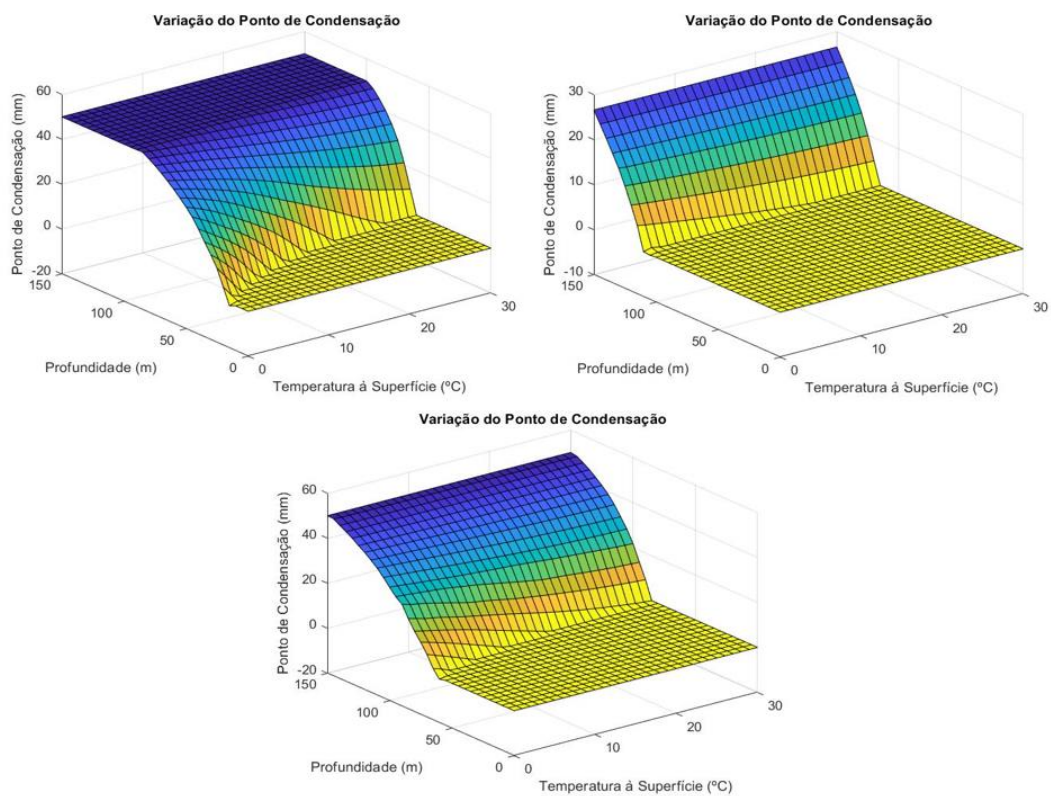


Figura 31 - Variação do ponto de condensação no isolamento para as três situações globais consideradas.

Como balanço final da descrição das simulações até ao momento efetuada, na Figura 32 apresenta-se um diagrama representativo do funcionamento das várias aplicações desenvolvidas e das funções utilizadas, cuja descrição detalhada será objeto deste capítulo.

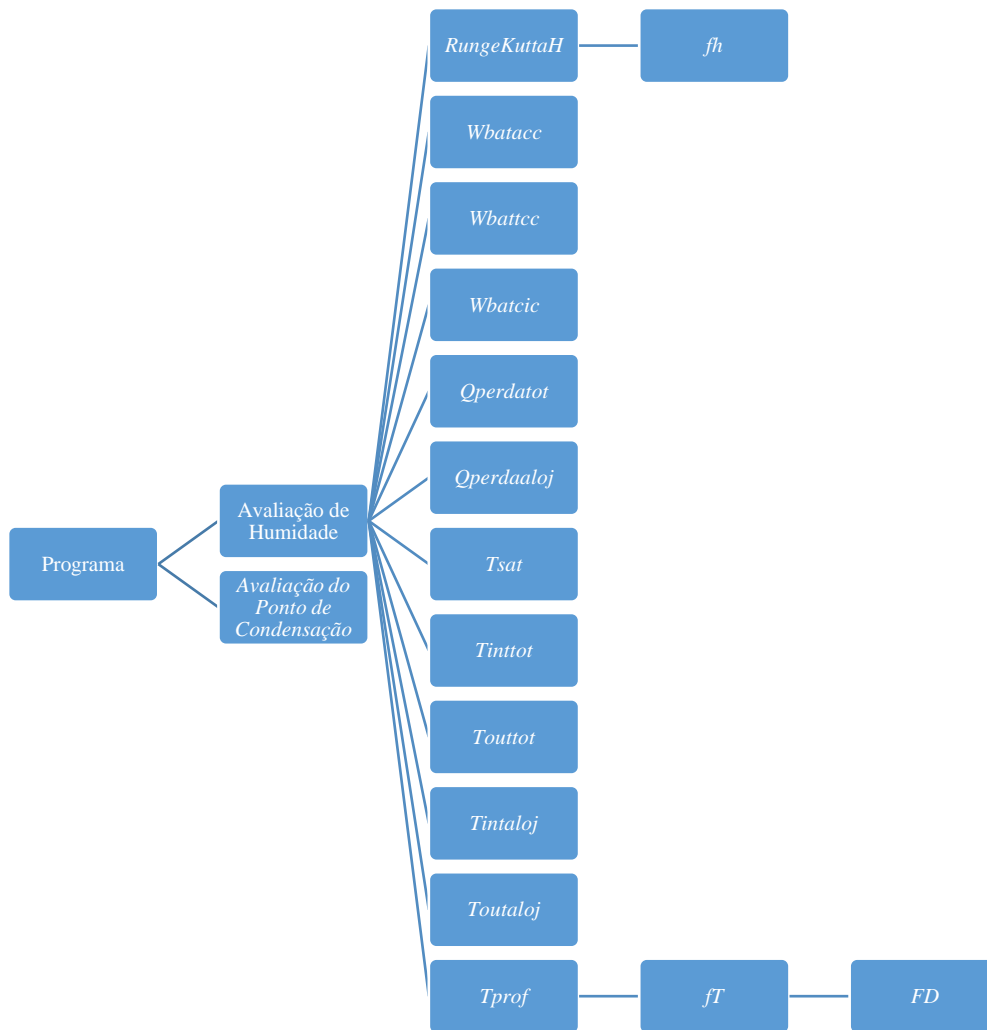


Figura 32 - Diagrama representativo das funções desenvolvidas para as simulações do sistema de climatização.

5.3. Discussão de Resultados

Os resultados obtidos anteriormente, servirão de fundamento para uma melhor compreensão dos fenómenos termohigrométricos ocorrentes a bordo, assim como para resolução do problema de condensação existente no isolamento do navio. Como referido ao longo desta dissertação, a abordagem do problema centrar-se-á na secção dos alojamentos. As restantes avaliações servem de indicação do comportamento do sistema, mas terão de ser avaliadas com dados mais precisos.

Analisando os resultados obtidos na secção dos alojamentos em modo de arrefecimento em função da carga sensível no ambiente, é possível identificar, na figura 25, que a humidade absoluta está entre 14,6 e 18,0 *g de H₂O / g de Ar*, o que corresponde a um

intervalo de operação de humidade relativa, entre 77,5% e 95,1%, sugerindo um aumento relativamente aos dados medidos pela empresa alemã *Thyssenkrupp*, o que poderá estar relacionado com o facto de se estar a considerar a secção dos alojamentos isoladamente do restante submarino. A condensação de vapor de água ocorre a 44,7 mm do casco resistente, o que colocaria cerca de 89,5% do isolamento sujeito a fenómenos de condensação, na situação de temperatura ambiente de 24 °C, temperatura da água do mar à superfície de 17 °C, o submarino a operar a uma profundidade de 100 metros e a humidade absoluta média para a evolução calculada $\omega_{méd} = 16,9 \text{ g de } H_2O/\text{g de Ar}$. Na avaliação da variação do ponto de condensação no isolamento para a totalidade do espaço interior, observando a figura 26, é possível identificar que para profundidades superiores a 50 metros ocorre condensação para qualquer valor de temperatura à superfície (até 30 °C), e que em profundidades superiores a cerca de 90 metros ocorre condensação em praticamente toda a espessura do isolamento (50 mm). Neste regime, apenas gamas de temperatura superiores a 10 °C para a água do mar à superfície, e profundidades inferiores a 30 metros, colocam o submarino numa situação sem condensação no isolamento.

Alterando o modo de funcionamento da bateria de arrefecimento da secção de vante para um modo de desumidificação com reaquecimento, observa-se (figura 27) uma redução na gama de valores de humidade absoluta ambiente em que o sistema de climatização dos alojamentos opera, para valores entre 9,6 e 12,3 g de $H_2O/\text{g de Ar}$, isto é, entre 51,4% e 65,6% de humidade relativa. Esta redução para as mesmas condições de temperatura à superfície e profundidade, garantiam uma redução da humidade absoluta média para 10,5 g de $H_2O/\text{g de Ar}$, o que resultaria em fenómenos de condensação a uma distância média do casco de 0,13 mm, implicando que apenas 0,25% do isolamento ficaria sujeito a condensação do vapor de água. Relativamente à variação do ponto de condensação no isolamento, um cenário mais favorável é igualmente observado. Analisando a figura 28, observa-se que, para temperaturas acima de 0 °C, não ocorre condensação em qualquer ponto do isolamento até profundidades de 50 metros, e que para temperaturas superficiais superiores a 20 °C, apenas ocorre condensação a partir dos 80 metros de profundidade, aproximadamente. É possível, também, concluir que em profundidades inferiores a 150 metros, não se verificam situações em que o isolamento esteja totalmente sujeito a fenómenos de condensação, para o intervalo de temperatura considerado à superfície.

Verifica-se, com base nestes dados, que esta alteração do modo de funcionamento da bateria de arrefecimento dos alojamentos, apresenta resultados favoráveis tanto na redução do nível médio da humidade no interior do submarino, como na redução de ocorrência de condensação no seu isolamento, garantindo uma operação da plataforma, numa maior variedade de situações de navegação, livre de ocorrência de condensação no interior.

Alargando agora o foco por forma a abranger uma situação mais global de operação do sistema de climatização, é possível concluir que, ao considerarem-se as restantes secções do espaço interior do submarino, os valores de humidade estimados são ligeiramente mais baixos em comparação com os valores resultantes de uma abordagem exclusivamente ao espaço dos alojamentos. No entanto, observando as figuras 29 e 30, no âmbito dos valores de humidade absoluta existentes, é identificada a mesma redução do valor médio deste parâmetro quando se considera somente a bateria de arrefecimento dos alojamentos em modo de desumidificação, (mantendo as restantes a remover uma carga sensível média constante do espaço), sendo que a gama de valores de humidade absoluta passa de um intervalo de operação entre 12,8 e 17,0 *g de H₂O/g de Ar*, isto é, entre 68,2% e 89,9% de humidade relativa, para um intervalo de 9,4 a 10,2 *g de H₂O/g de Ar*, o que corresponde a 50,3% e 54,6% de humidade relativa. Esta situação irá resultar numa redução idêntica da temperatura no ponto de orvalho para o ar neste regime, diminuindo, para as mesmas condições exteriores, a probabilidade de condensação no interior do isolamento. Nas mesmas figuras, identifica-se também que a possibilidade de colocar todas as baterias de arrefecimento em modo de desumidificação traria resultados ainda mais favoráveis na redução dos valores de humidade absoluta, passando a operar entre 4,0 e 4,8 *g de H₂O/g de Ar* (21,6% e 25,9% de humidade relativa), no entanto, esta gama de valores de humidade relativa não garante condições adequadas para os militares que habitam o submarino. Na figura 31, observa-se que o ponto de condensação médio tem tendência a assumir valores mais baixos à medida que as baterias de arrefecimento são estabelecidas em modo de desumidificação, chegando a apresentar valores muito otimistas quando se utilizam as três baterias para desumidificar, garantindo a inexistência de condensação até profundidades de cerca de 110 metros.

É importante reforçar que a adaptação de um modelo focado na secção dos alojamentos para a totalidade do submarino traz uma imprecisão considerável aos resultados

apresentados. No entanto, o estudo dos resultados obtidos das várias aplicações efetuadas, constituem uma evidência clara de que a utilização das baterias das ACU's em modo de desumidificação com reaquecimento pode proporcionar cenários mais favoráveis no que diz respeito à redução do nível global de humidade relativa e absoluta no ambiente interior, e à redução da probabilidade de condensação no isolamento do submarino.

6. SOLUÇÕES QUE REDUZEM A POSSIBILIDADE DE CONDENSAÇÃO

É finalidade desta dissertação completar a análise do sistema de climatização com estratégias e soluções de viável aplicação que visem eliminar ou reduzir a existência de condensações no interior do isolamento do submarino. Duas estratégias são propostas, sendo que a primeira passa por implementar uma alteração do modo de funcionamento do sistema de climatização para um modo de desumidificação com reaquecimento, com simulações e respetivos resultados abordados ao longo do Capítulo 5, e a segunda consiste na instalação de uma barreira de vapor no interior do isolamento, conceito estudado no Subcapítulo 2.6.

6.1. Sistema de Climatização em Modo de Desumidificação com Reaquecimento

Uma estratégia proposta, como referido, consiste em utilizar as capacidades de arrefecimento da bateria dos alojamentos para efetuar desumidificação do ar extraído do ambiente interior, seguido de um reaquecimento por forma a aumentar a temperatura do ar de insuflação de modo a garantir uma temperatura interior de 24 °C. Na análise das simulações teóricas deste regime efetuada no capítulo anterior, é demonstrado que seriam assegurados valores de humidade relativa entre 40% e 60%, aproximadamente, o que se apresenta como uma considerável redução dos níveis de humidade face ao valor verificado com o sistema no modo de funcionamento atualmente estabelecido, entre 80% e 95% de humidade relativa. A redução dos valores máximos e médios de humidade absoluta do ar em circulação contribui diretamente para uma redução do valor da temperatura no ponto de orvalho para as condições interiores do ar, assim, face a uma fonte fria na face exterior do isolamento, esta temperatura no ponto de orvalho, por assumir agora valores mais baixos, não seria atingida com tanta facilidade no interior do isolamento, diminuindo a probabilidade de condensação para várias condições.

Em jeito de curiosidade, pelas simulações efetuadas, observa-se que o sistema amplia a sua capacidade para remover vapor de água do ar se colocar, juntamente com a bateria de arrefecimento dos alojamentos, as baterias de arrefecimento das secções do

TCC e do CIC a efetuar desumidificação. Este regime de funcionamento, apesar de garantir níveis de humidade relativa reduzidos (na ordem dos 20%), e, conseqüentemente, eliminar a possibilidade de condensação para as profundidades consideradas quase na totalidade, não seria apropriado, pelo que opera em valores de humidade relativa que não garantem as condições de conforto para os militares que habitam o submarino, não sendo considerado este regime como uma possível solução para o problema.

A implementação deste regime é possível nas baterias de arrefecimento existentes a bordo dos submarinos em questão, pelo que a capacidade de desumidificação seria garantida atuando na válvula de três vias de controlo do caudal de água glicolada. Fixando esta válvula na posição de abertura máxima, garantir-se-ia um caudal máximo de água glicolada para o circuito da bateria de arrefecimento, para arrefecimento do ar, maximizando a carga de arrefecimento da bateria de arrefecimento dos alojamentos, neste caso. Assim, a carga sensível é removida do ar, sendo que a carga latente é removida por condensação do vapor de água no interior do equipamento, resultando uma elevada redução do valor de humidade absoluta do ar, assim como da temperatura do mesmo.

A função de aquecimento do ar para valores desejáveis seria assegurada por aquecedores instalados nas ACU's, que consistem em resistências elétricas colocadas no interior do equipamento. A ACU dos alojamentos, como já mencionada no Subcapítulo 3.2, dispõe de três aquecedores elétricos com cargas fixas de aquecimento de $2,25\text{ kW}$, $3,75\text{ kW}$ e 6 kW , o que oferece a esta ACU, por combinação entre os três aquecedores, uma capacidade de adição de carga sensível dividida em seis estágios selecionáveis: $2,25\text{ kW}$, $3,75\text{ kW}$, 6 kW , $8,25\text{ kW}$, $9,75\text{ kW}$ e 12 kW . Em termos teóricos, o controlo da temperatura, mantendo o valor de 24 °C , será feito por adição ou redução do estágio dos aquecedores, conforme o valor da temperatura medida no espaço seja inferior ou superior à temperatura selecionada (24 °C), respetivamente.

6.2. Barreira de Vapor

Verifica-se, pelos resultados demonstrados no Capítulo 5, que implementando um regime de desumidificação no funcionamento do sistema de climatização de bordo, são alcançados níveis mais baixos de humidade relativa no ambiente, assim como uma redução da possibilidade de ocorrência de condensação no revestimento. Aplicando um regime de funcionamento da bateria de arrefecimento dos alojamentos em modo de desumidificação, mantendo o regime de arrefecimento simples em função da carga sensível para as restantes ACU's, não só reduz o nível de humidade existente no ar e a temperatura de orvalho correspondente para o valor de humidade absoluta média calculado, como mantém a humidade relativa dentro de intervalos que promovam condições de conforto e de habitabilidade para a guarnição. Deste modo, apesar de se eliminar a possibilidade de condensação no isolamento para profundidades até 70 metros, de acordo com o que é possível observar na imagem de baixo na figura 31, não se garante o mesmo desempenho para profundidades superiores, onde é possível identificar uma subida da probabilidade de condensação para profundidades superiores. Isto acontece porque, por forma a manter níveis de humidade apropriados, a temperatura no ponto de orvalho não é baixa o suficiente para que não seja alcançada em profundidades superiores (temperaturas exteriores mais baixas).

Justifica-se, então, a instalação de uma barreira de vapor por forma a promover resultados mais favoráveis no que diz respeito a ocorrência de condensação no isolamento. Note-se, em jeito de observação da figura 31, que as situações para as quais 30 milímetros do isolamento, ou menos, se consideram sujeitos aos efeitos de condensação de vapor, inserem-se em valores de profundidade até 100 metros. Posto isto, é espectável que colocando uma barreira de vapor neste ponto do isolamento, o que corresponde a 60% do mesmo, se verifique uma inexistência de condensação no isolamento do submarino até 100 metros de profundidade.

A figura 33, representa o resultado de uma simulação do cálculo da variação do ponto de condensação, com o sistema de climatização a atuar em modo de desumidificação, com uma barreira de vapor instalada no isolamento, a 30 milímetros do casco resistente.

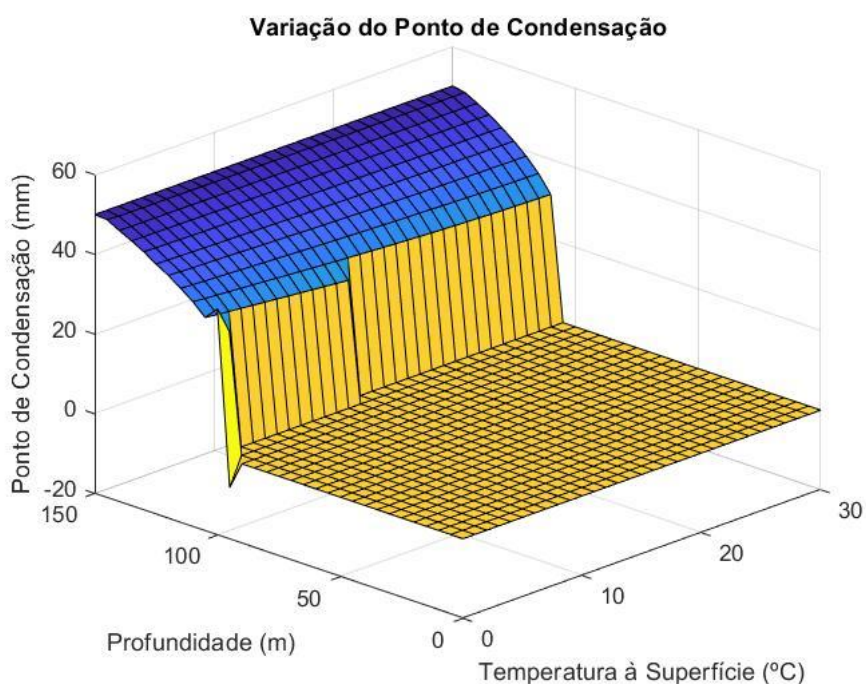


Figura 33 - Variação do ponto de condensação para um funcionamento do sistema de climatização em modo de desumidificação com inclusão de barreira de vapor a 30 milímetros do casco resistente.

É possível identificar rapidamente que, neste cenário, o isolamento do submarino estaria livre de qualquer ocorrência de condensação no seu interior até profundidades de 100 metros, servindo de melhoria relativamente a uma situação em que a única medida tomada seja a alteração ao modo de funcionamento da bateria de arrefecimento.

Como balanço posterior à elaboração das estratégias abordadas, é importante referir que, mesmo na aplicação destas medidas, a ocorrência de condensação no isolamento não era evitada para valores maiores de profundidade, provando-se a alteração ao sistema de climatização inadequada e ineficaz para profundidades superiores a 100 metros. Este fenómeno é explicado pelo facto de, para profundidades superiores a 100 metros, a temperatura da água exterior ao submarino adquirir níveis muito baixos de temperatura, o que irá tornar a temperatura de saturação associada ao ar interior mais facilmente atingível no interior do isolamento, mesmo para valores médios de humidade absoluta e relativa no interior do submarino.

CONCLUSÃO

Os submarinos da classe Tridente, em particular os seus sistemas de climatização, têm vindo a constituir um alvo de grande preocupação técnica derivada dos problemas de condensação que têm apresentado no isolamento ao longo dos últimos anos, com maior relevância em zonas da secção de vante dos submarinos. Ao longo do trabalho que se apresenta, foi possível concluir que a condensação do vapor de água existente no ar ambiente do submarino é resultado de dois fatores distintos: dos níveis elevados de humidade que o sistema de climatização permite que se mantenham no ambiente interior, o que aumenta a temperatura de saturação do ar interior para valores próximos da temperatura da água exterior ao casco resistente, mesmo navegando em águas de zonas temperadas do globo terrestre (15 °C a 25 °C), e das reduzidas temperaturas da água exterior ao casco que eventualmente possam ser atingidas em navegações em zonas mais frias, o que implica temperaturas mais baixas em locais próximos do casco resistente, que ultrapassem a temperatura de saturação, mesmo que esta tivesse valores reduzidos.

De acordo com as simulações CFD presentes nesta dissertação, é demonstrado que os níveis de humidade relativa se mantêm em níveis aceitáveis e geralmente bem distribuídos por todo o espaço interior da secção dos alojamentos. No entanto, a humidade absoluta assume valores bastante elevados, o que resulta em temperaturas de orvalho mais elevadas para as condições do ar no espaço, sendo este o principal contributo para o aparecimento de condensação no isolamento. Conclui-se, numa abordagem totalmente teórica, que o nível de humidade absoluta decresce ao alterar-se o modo de funcionamento das baterias de arrefecimento das ACU's para um modo de desumidificação com reaquecimento, permitindo temperaturas no ponto de orvalho substancialmente mais baixas. Esta alteração irá reduzir a probabilidade de ocorrência de condensações no isolamento para navegações em águas de climas temperados, no entanto, não tem um efeito tão eficiente para navegações em zonas em que a água do mar em profundidade atinja temperaturas muito baixas. Nesta situação, a instalação de uma barreira de vapor no isolamento irá melhorar o cenário no que diz respeito à existência de zonas húmidas no isolamento, apesar de não se eliminar totalmente o problema, por exemplo, em zonas polares, onde se atingem temperaturas muito próximas de 0 °C na água à superfície. Face ao anteriormente descrito, propõe-se para a redução da ocorrência de condensação no isolamento, as seguintes medidas:

- 1) Alteração do modo de funcionamento da bateria de arrefecimento dos alojamentos para um modo de desumidificação com reaquecimento;
- 2) Utilização das baterias de arrefecimento das restantes secções do submarino em modo de desumidificação, por forma a efetuar um controlo de humidade para parâmetros aceitáveis;
- 3) Instalação de uma barreira de vapor no isolamento.

É deixado para considerar em trabalhos futuros, uma avaliação do sistema de climatização na totalidade do submarino, assim como uma modelação de um sistema de controlo de humidade, aplicado às baterias de arrefecimento. Propõem-se também estudos equivalentes dedicados ao sistema de climatização destes submarinos, assim como à resposta do meio interior do submarino em termos de distribuição de massas e fenómenos de condensação, durante navegações periscópicas, à superfície e em situação de atracado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHRAE. (1992). Psychrometric Chart No. 1.
- ASHRAE. (2011). *ASHRAE Handbook - HVAC Applications*. ASHRAE.
- ASHRAE. (2013). *ASHRAE Handbook: Fundamentals*. (ASHRAE, Ed.). Atlanta.
- BELLEUDY, C., WOLOSZYN, M., CHHAY, M., & COSNIER, M. (2016). A 2D model for coupled heat, air, and moisture transfer through porous media in contact with air channels, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 95, 453–465.
- BHATIA, A. (sem data). *Battery Room Ventilation and Safety Course No: M05-021 Credit: 5 PDH*.
- CHEN, Y., YIN, Y., & ZHANG, X. (2014). Performance analysis of a hybrid air-conditioning system dehumidified by liquid desiccant with low temperature and low concentration, *Energy and Buildings*, 77, 91–102.
- CUNNINGHAM, M. J. (1992). *Effective penetration depth and effective resistance in moisture transfer, Building and Environment*.
- DAVIES, P., HERRICK, R. W., ZHOU, X., & BRAUN, J. E. (2005). *DYNAMIC MODELING OF CHILLED WATER COOLING COILS*.
- DENKER, J. (2004). *Lead-Acid Battery: Principles of Operation*. Obtido de <https://www.av8n.com/physics/lead-acid.htm#sec-drift-diff>
- DITIANGKIN, P. (2013). *Nuclear Submarine Batteries and Radiation Considered in Shielding*. Obtido de <http://large.stanford.edu/courses/2013/ph241/ditiangkin1/>
- Energy Plus. (2011). *Engineering Reference*. (Department of Energy & Lawrence Berkeley National Laboratory, Eds.).
- FERROUKHI, M. Y., DJEDJIG, R., BELARBI, R., LIMAM, K., & ABAHRI, K. (2015). *Effect of coupled heat, air and moisture transfers modeling in the wall on the hygrothermal behavior of buildings*, *Energy Procedia* (Vol. 78, pp. 2584–2589). Elsevier Ltd.
- FISHER, D. E., LIESEN, R. J., STRAND, R. K., & PEDERSEN, C. O. (2003). *ASHRAE Toolkit for Building Load Calculations*. *ASHRAE Transactions* (Vol. 109).

- Heat Pump Association. (2017). *The Vapour Compression Cycle*. Obtido de <https://www.heatpumps.org.uk/consumers/heat-pump-technical-information/the-vapour-compression-cycle/>
- Introduction to Lead-Acid Batteries*. (sem data). Obtido de http://www.altenergy.org/renewables/lead-acid_batteries.html
- JAMES, C. A. (2016). *Carbon Air Filters: What They Are, How they Work and the Difference in Carbon Filters*. Obtido de <https://inspiredliving.com/airpurifiers/carbon-filters.htm>
- JOHANSSON, Å., FORSTH, M., & ROSÉN, A. (2001). *The H₂/O₂ Reaction on a Palladium Model Catalyst Studied with Laser-Induced Fluorescence and Microcalorimetry*. *Int. J. Mol. Sci*, 2, 221–229.
- JOSEPH. (2006). *The Temperature of Ocean Water at a Given Depth*. Obtido de <https://residualanalysis.blogspot.com/2010/02/temperature-of-ocean-water-at-given.html>
- KAWALE, J. (2019). *HVAC Coils*. Obtido de <https://www.engproguides.com/coil.html>
- KERESTECIOGLU, A., SWAMI, M., & KAMEL, A. (1990). *Theoretical And Computational Investigation Of Simultaneous Heat And Moisture Transfer In Buildings: «Evaporation And Condensation » Theory*. ASHRAE Transactions.
- KHEMANI, H. (2019a). *Psychrometric Processes: Sensible Cooling & Sensible Heating of Air*. Obtido de <https://www.brighthubengineering.com/hvac/41436-psychrometric-processes-sensible-cooling-and-sensible-heating-of-air/>
- KHEMANI, H. (2019b). *What is Dehumidification? Cooling & Dehumidification, Heating & Dehumidification*.
- KOENIG, R. (2007, Setembro). *Modulate coil heat transfer*, *ASHRAE Journal*.
- LEL of Combustible Gas*. (sem data). Obtido de <https://www.indsci.com/training/general-gas-education/lel-of-combustible-gas/>
- HARRIMAN, B. G. L., LSTIBUREK, J., & KITTLER, R. (2000). *ASHRAE Journal Improving Humidity Control for Commercial Buildings About the Authors*.
- MAALOUF, C., WURTZ, E., & ALLARD, F. (sem data). *Evaluation of the cooling*

potential of a desiccant evaporative cooling system using the SimSPARK environment.

MAHMOUDKANI, M., & KEITH, D. W. (2009). *Low-energy sodium hydroxide recovery for CO₂ capture from atmospheric air-Thermodynamic analysis*, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 3(4), 376–384.

MOON, H. J., RYU, S. H., & KIM, J. T. (2014). *The effect of moisture transportation on energy efficiency and IAQ in residential buildings*, *Energy and Buildings*, 75, 439–446.

NGUYEN, A.-T., REITER, S., & RIGO, P. (2014). *A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis.*

NIE, J., LI, Z., HU, W., FANG, L., & ZHANG, Q. (2017). *Theoretical modelling and experimental study of air thermal conditioning process of a heat pump assisted solid desiccant cooling system*, *Energy and Buildings*, 153, 31–40.

NYGARD, H. S., TOMKUTE, V., & OLSEN, E. (2017). *Kinetics of CO₂ Absorption by Calcium Looping in Molten Halide Salts*, *Energy Procedia* (Vol. 114, pp. 250–258). Elsevier Ltd.

OSANYINTOLA, O. F., & SIMONONSON, C. J. (2006). *Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact*, *Energy and Buildings*, 38, 1270–1282.

PAZOLD, M., ANTRETTTER, F., & HERMES, M. (sem data). *Coupling Hygrothermal Whole Building Simulation And Air-Flow Modelling To Determine Strategies For Optimized Natural Ventilation.*

PENNEY, T. R., & MCLAIN-CROSS, I. (1985). *Promising Advances in Desiccant Cooling.*

PETTERSEN, S., LI, Y., EIKEVIK, T. M., & BREDESEN, A. M. (2012). *Investigation on an Open Cycle Water Chiller based on Desiccant Dehumidification.*

PORT, J. (2016). *Oxygen generators and carbon dioxide scrubbers explained.* Obtido de <https://cosmosmagazine.com/technology/oxygen-generators-and-carbon-dioxide-scrubbers-explained>

- QIN, M., WALTON, G., BELARBI, R., & ALLARD, F. (2011). *Simulation of whole building coupled hygrothermal-airflow transfer in different climates, Energy Conversion and Management*.
- ROW, M. (2019). *What are Insulation Vapour Barriers and Why are They Important*. Obtido de https://www.insulationshop.co/what_are_insulation_vapour_barriers
- SAMUEL, G., STEPHANE, B., & VINCENT, L. (sem data). *Comparative and empirical validation of three water cooling coil models*.
- SOBACHKIN, A., & DUMNOV, G. (2014). *Numerical Basis of CAD-Embedded CFD*.
- SOLIDWORKS. (2019). *SOLIDWORKS Flow Simulation*. Obtido de <https://www.solidworks.com/product/solidworks-flow-simulation>
- TARIKU, F., KUMARAN, K., & FAZIO, P. (2010). *Transient model for coupled heat, air and moisture transfer through multilayered porous media, International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(15–16), 3035–3044.
- TAVAN, Y., & HOSSEINI, S. H. (2017). *A novel rate of the reaction between NaOH with CO₂ at low temperature in spray dryer*, 3(1), 51–55.
- The catalysis by palladium of the union of hydrogen and oxygen*, (2006). *Proceedings of the Royal Society of London. Series A - Mathematical and Physical Sciences*, 147(860), 68–75.
- TRNSYS. (2012). *Volume 6: Multizone Building modeling with Type56 and TRNBuild, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison*.
- U.S. Department of Energy, Office of Science, Office of Basic Energy Sciences, Division of Chemical Sciences, & Geosciences and Biosciences. (2019). *Water Enthalpy of Formation*. Obtido de [https://atct.anl.gov/Thermochemical Data/version 1.118/species/?species_number=986](https://atct.anl.gov/Thermochemical%20Data/version%201.118/species/?species_number=986)
- VAN ZYL, R., & WARWICKER, B. (sem data). *Desiccants the Future Background to desiccant air-conditioning systems*.
- WANG, G., LIU, M., & CLARIDGE, D. E. (2005). *Decoupled Modeling of Chilled Water Cooling Coils Using a Finite Element Method*.
- WOODS, J., WINKLER, J., & CHRISTENSEN, D. (2013). *Evaluation of the Effective*

Moisture Penetration Depth Model for Estimating Moisture Buffering in Buildings.

YAMAGUCHI, H., MIYATA, M., ODA, H., SHIOYA, M., WATANABE, T., NIWA, H., & YOSHIDA, H. (2006). *Experimental Study of a Cooling Coil and the Validation of its Simulation Model for the Purpose of Commissioning. China Building Commissioning for Energy Efficiency and Comfort (Vol. VI).*

YANG, J., FU, H., & QIN, M. (2015). *Evaluation of Different Thermal Models in EnergyPlus for Calculating Moisture Effects on Building Energy Consumption in Different Climate Conditions, Procedia Engineering (Vol. 121, pp. 1635–1641).* Elsevier Ltd.

ZHAO, K., LIU, X. H., ZHANG, T., & JIANG, Y. (2011). *Performance of temperature and humidity independent control air-conditioning system in an office building, Energy and Buildings, 43(8), 1895–1903.*

ZHU, W., LI, Z., LIU, S., LIU, S., & JIANG, Y. (2010). *In situ performance of independent humidity control air-conditioning system driven by heat pumps, Energy and Buildings, 42(10), 1747–1752.*

APÊNDICES

Apêndice 1 – Tabelas de Cálculo de cargas Térmicas

Hora	Nº de pessoas	Dormir	Repouso	Refeição	Actividade	Cozinha (pessoas)	Equipamentos da Cozinha	Iluminação do Espaço	Banhos	Hidrogénio	Calor Sensível (W)	Calor Latente (W)	Calor Total (W)
00h-01h	30	18	2	8	2	0	0	0	0	0	742,38	1113,00	1855,38
01h-02h	30	18	2	8	2	0	0	0	0	0	742,38	1113,00	1855,38
02h-03h	30	23	2	3	2	0	0	0	0	0	647,38	843,00	1490,38
03h-04h	30	18	2	8	2	0	0	0	0	0	742,38	1113,00	1855,38
04h-05h	30	18	2	8	2	0	0	0	0	0	742,38	1113,00	1855,38
05h-06h	30	23	2	3	2	0	0	0	0	0	647,38	843,00	1490,38
06h-07h	30	18	2	8	2	0	0	0	1	0	742,38	1417,00	2159,38
07h-08h	30	10	3	13	4	0	0	1	0	0	1076,88	1487,50	2564,38
08h-09h	30	10	3	13	4	0	0	1	0	0	1076,88	1487,50	2564,38
09h-10h	25	8	2	12	3	0	0	1	0	0	742,38	1278,00	2020,38
10h-11h	15	5	1	6	3	2	1	1	0	0	3471,88	2816,50	6288,38
11h-12h	20	5	1	8	6	2	1	1	0	0	3856,88	3141,50	6998,38
12h-13h	30	3	1	20	6	2	1	1	0	1	4722,88	3990,50	8713,38
13h-14h	30	3	1	20	6	0	0	1	0	1	1322,88	1921,50	3244,38
14h-15h	20	5	1	10	4	0	0	1	0	1	544,88	1113,50	1658,38
15h-16h	15	6	2	4	3	0	0	1	0	1	158,38	677,00	835,38
16h-17h	15	6	2	4	3	2	1	1	0	1	3558,38	2746,00	6304,38
17h-18h	20	5	1	8	6	2	1	1	0	1	3959,88	3157,50	7117,38
18h-19h	30	3	1	20	6	2	1	1	1	1	4722,88	4294,50	9017,38
19h-20h	30	3	1	20	6	0	0	1	0	1	1322,88	1921,50	3244,38
20h-21h	20	5	1	10	4	0	0	1	0	1	544,88	1113,50	1658,38
21h-22h	20	9	2	6	3	0	0	0	0	1	298,88	877,50	1176,38
22h-23h	25	12	2	8	3	0	0	0	0	0	501,38	1062,00	1563,38
23h-24h	25	18	2	3	2	0	0	0	0	0	379,88	750,50	1130,38
Média	25,42	10,50	1,71	9,63	3,58	0,50	0,25	0,58	0,08	0,42	1552,90	1724,65	3277,55

Para as colunas dos Banhos, Iluminação e Hidrogénio, os valores 1 e 0 indicam apenas se esta função está ativa ou não, respetivamente.

Atividade	Calor Sensível (W)	Calor Latente (W)	Calor Total (W)
Dormir	53,5	18,5	72
Repouso	75	40	115
Atividade Moderada (Escritórios)	80	60	140
Sedentária (Refeições)	72,5	72,5	145
Banho		304	304
Baterias elétricas em carga	103	16	119

Cozinha	Calor Sensível (W)	Calor Latente (W)	Calor Total (W)
Panela de Sopa	495	264	759
Panela de Pressão	1450	750	2200
Chapa Elétrica (1 bico)	1310	910	2220
Total	3255	1924	5179

Iluminação de um led branco (lúmen/watt)	Iluminação necessária (lúmen/m2)	Área total (m2)	Calor Sensível Total no Espaço (W)
80	250	53	165

Calor dissipado nos alojamentos (W) para uma profundidade de 100 metros e 15 °C de temperatura na água exterior
1110,6167

Apêndice 2 – Cálculo dos Valores de Insuflação e Extração Estacionários

```
% Avaliação estacionária das condições ambientais no interior do submarino
clc
clear
global h V qinsf Qsen G;
disp('Avaliação da evolução semanal de humidade no submarino');
% *****
qinsf = 2260; % Caudal volúmico de insuflação (m3/h)
V = 184; % Volume do espaço (m3)
h = 0.1; % Intervalo tempo de integração (passo)
Tempoinic = 1;
Tempofinal = 5; % Tempo de integração total
Tempo = Tempofinal - Tempoinic + 1;
nint = floor(Tempo/h); % Número total de intervalos
Wamb = 11.4; % Humidade inicial (24°C/50%) em gH2O/m3ar (considerando densidade do ar
1,2 kg/m3)
tempo = 0.0; % Tempo inicial
% Geração de vapor no interior - Alojamentos e resto do submarino (g/h)
G = [1241.23 2190.18 4625.52 5875.58 2829.20 996.81 4649.08 6323.19 1292.02 1105.03];
% Geração de calor sensível interior (W)
Qsen = [647.38 1076.88 3856.88 4722.88 1322.88 158.38 3959.88 4722.88 298.88 379.88];
% Condições de carga térmica a avaliar
Winsuf=zeros(1,length(G));
Tinsuf=zeros(1,length(G));
W=zeros(1,length(G));
t=zeros(1,nint);
T=zeros(1,length(G));
% Resolução da equação diferencial
for i=1:length(G)
for j=1:nint
Gv =G(i);
Qs=Qsen(i);
Winsf = Wbatacc(Qs,Wamb); % Humidade absoluta insuflada (1º valor)
Tinsf = Tbatacc(Qs,Wamb); % Temperatura de insuflação
Wambiente=RungeKuttaH(tempo,Wamb,h,qinsf,Gv,Winsf,V);
```

```
tempo=tempo+h;
Wamb=Wambiente;
Winsuf(i)=Winsf;
Tinsuf(i)=Tinsf;
W(i)=Wambiente;
t(j)=tempo;
end
T(i)=i;
end
w = W/1.2;
w = w';
winsuf = Winsuf/1.2;
winsuf = winsuf';
tinsuf = Tinsuf';
```

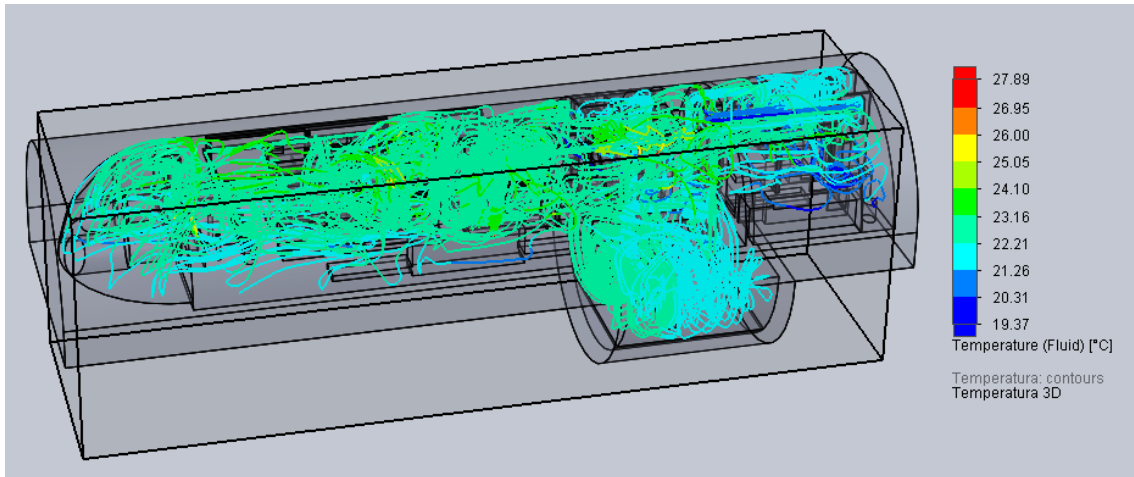
Apêndice 3 – Tabela de Valores Estacionários de Insuflação e Extração

Ponto	Hora	Calor Total (kW)	Calor Sensível (kW)	Calor Latente (W)	Geração de Vapor (g/h)	Humidade Relativa de Entrada (%)	Humidade Absoluta de Entrada (g/kg)	Temperatura de Saída (°C)	Humidade Relativa de Saída (%)	Humidade Absoluta de Saída (g/kg)
1	02h-03h	1490,38	647,38	843,00	1241,23	91,9	17,38	23,1	94,6	16,93
2	07h-08h	2564,38	1076,88	1487,50	2190,18	91,5	17,30	22,6	95,0	16,49
3	11h-12h	6998,38	3856,88	3141,50	4625,52	80,6	15,18	19,0	97,4	13,48
4	12h-13h	8713,38	4722,88	3990,50	5875,58	78,2	14,73	17,8	98,1	12,57
5	13h-14h	3244,38	1322,88	1921,50	2829,20	91,4	17,29	22,3	95,3	16,24
6	15h-16h	835,38	158,38	677,00	996,81	94,2	17,83	23,8	93,4	17,46
7	17h-18h	7117,38	3959,88	3157,50	4649,08	80,0	15,08	18,8	97,8	13,36
8	18h-19h	9017,38	4722,88	4294,50	6323,19	79,2	14,92	17,8	98,2	12,59
9	21h-22h	1176,38	298,88	877,50	1292,02	94,1	17,80	23,6	93,8	17,32
10	23h-24h	1130,38	379,88	750,50	1105,03	93,2	17,63	23,5	93,9	17,22

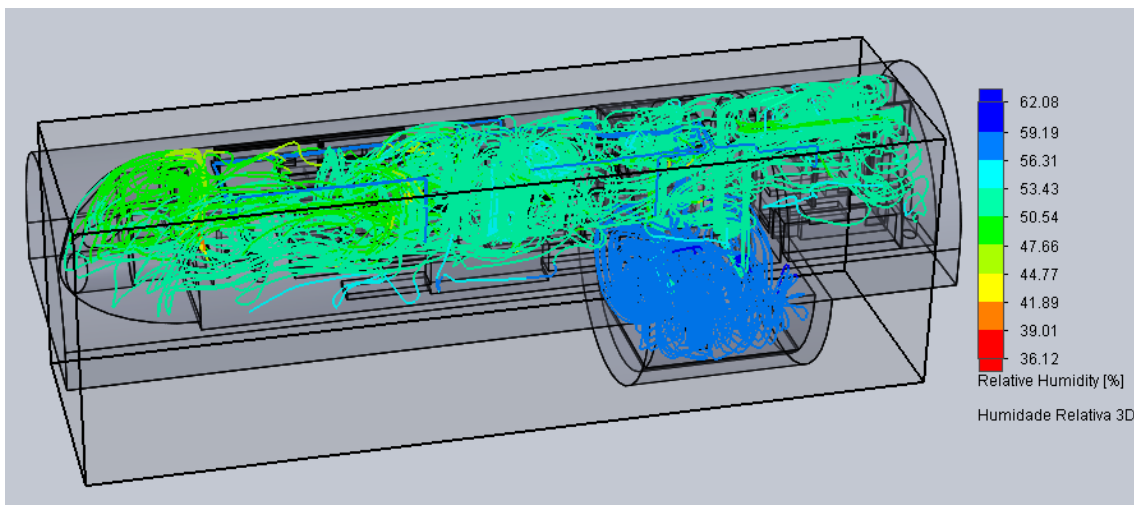
Apêndice 4 – Resultados das Simulações CFD em *SOLIDWORKS*

2h-3h

(Temperatura)

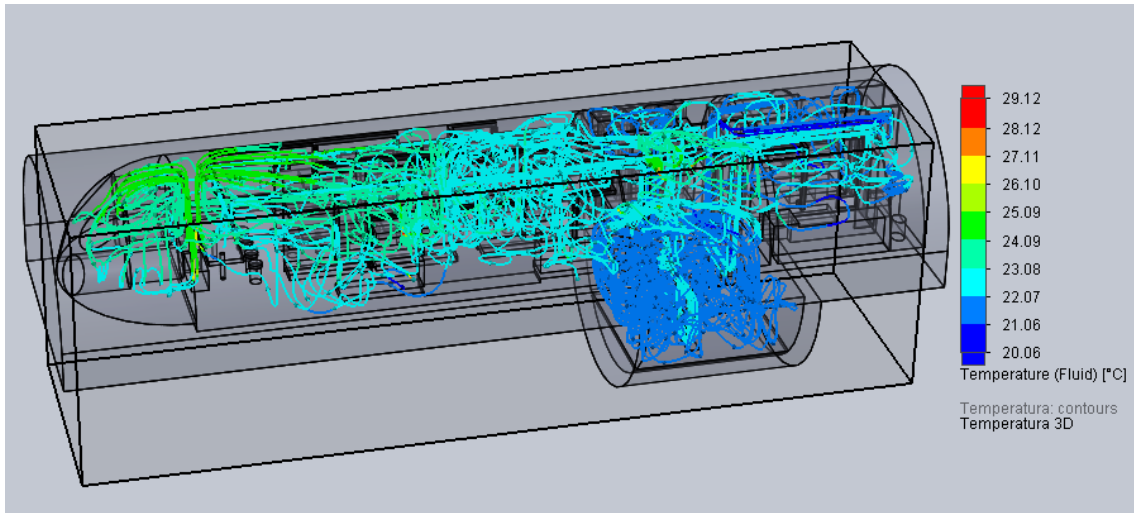


(Humidade relativa)

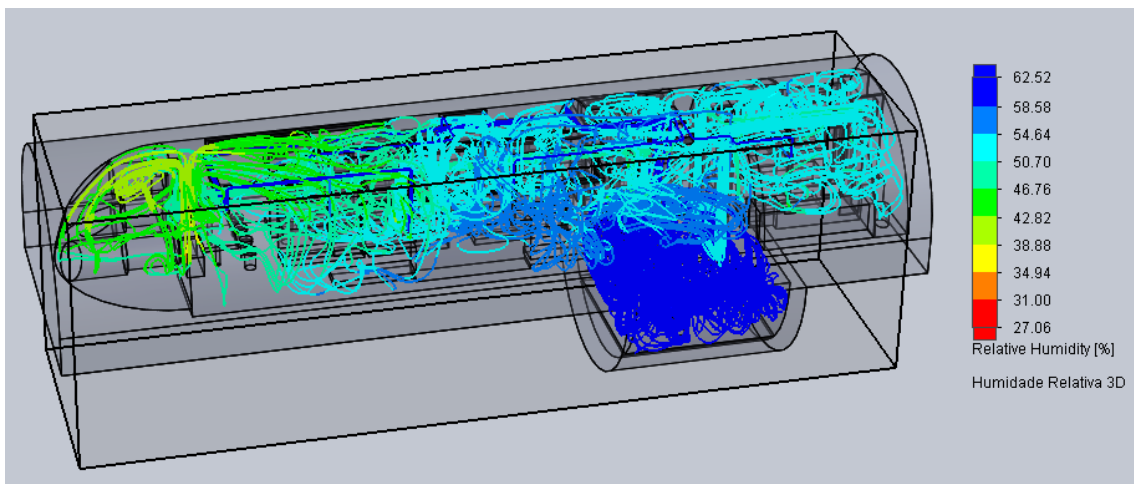


7h-8h

(Temperatura)

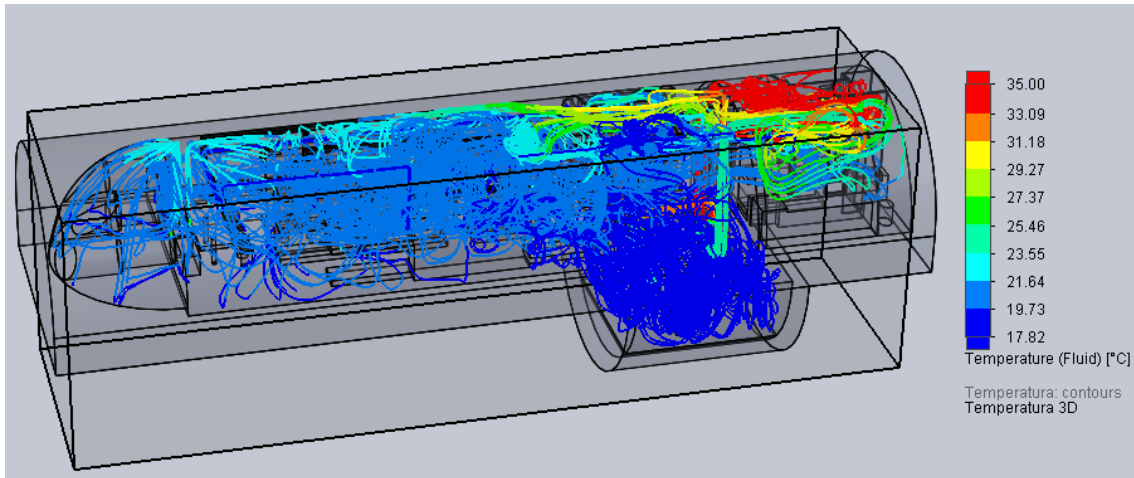


(Humidade Relativa)

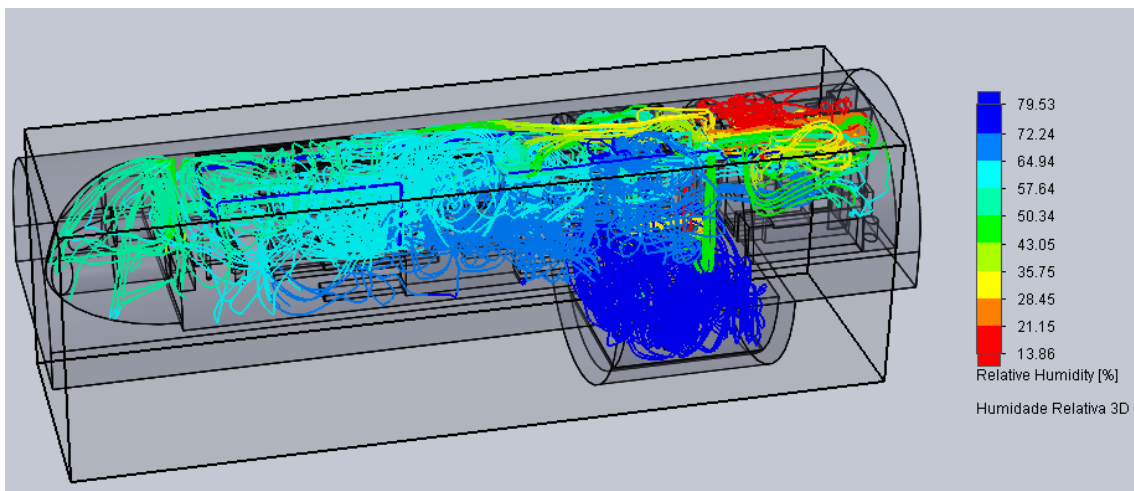


11h-12h

(Temperatura)

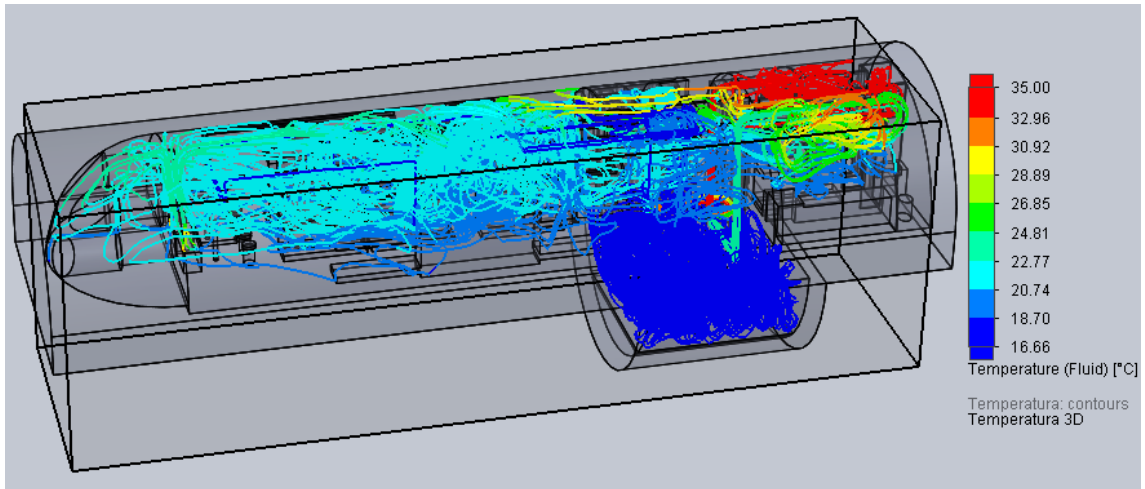


(Humidade Relativa)

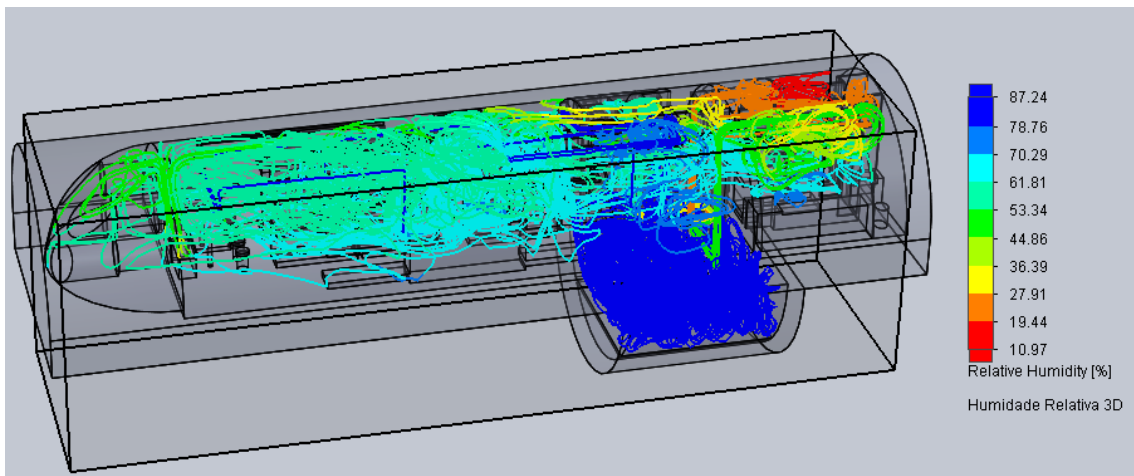


12h-13h

(Temperatura)

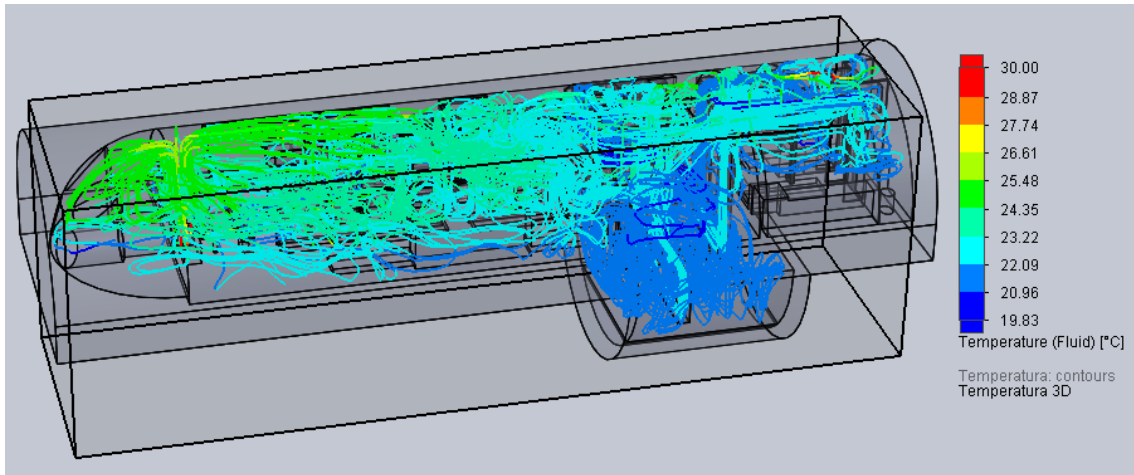


(Humidade relativa)

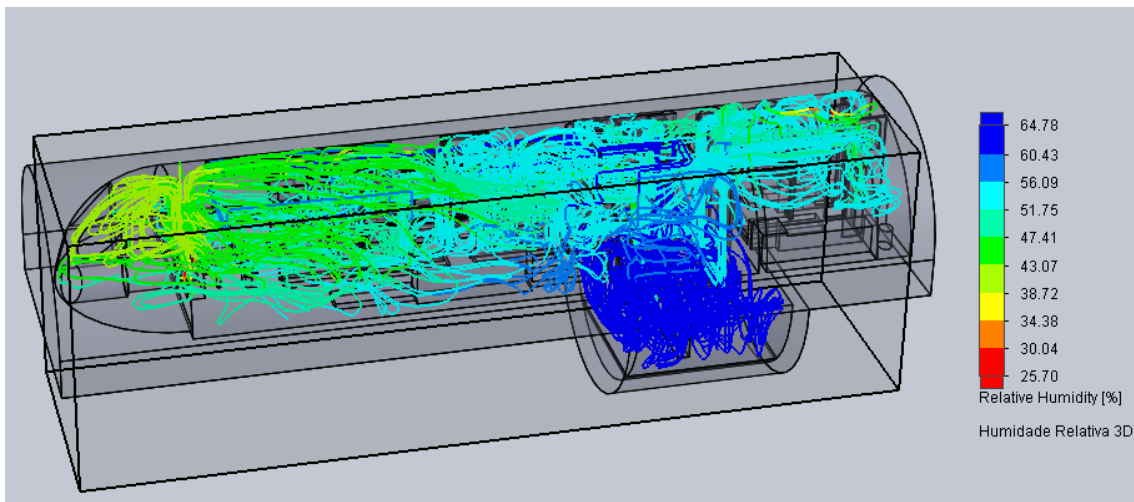


13h-14h

(Temperatura)

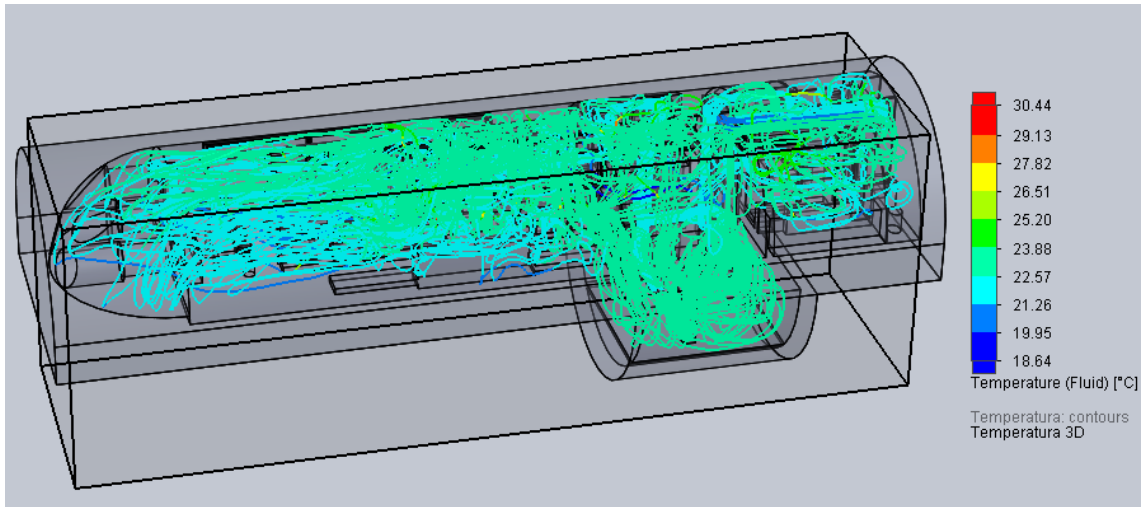


(Humidade Relativa)

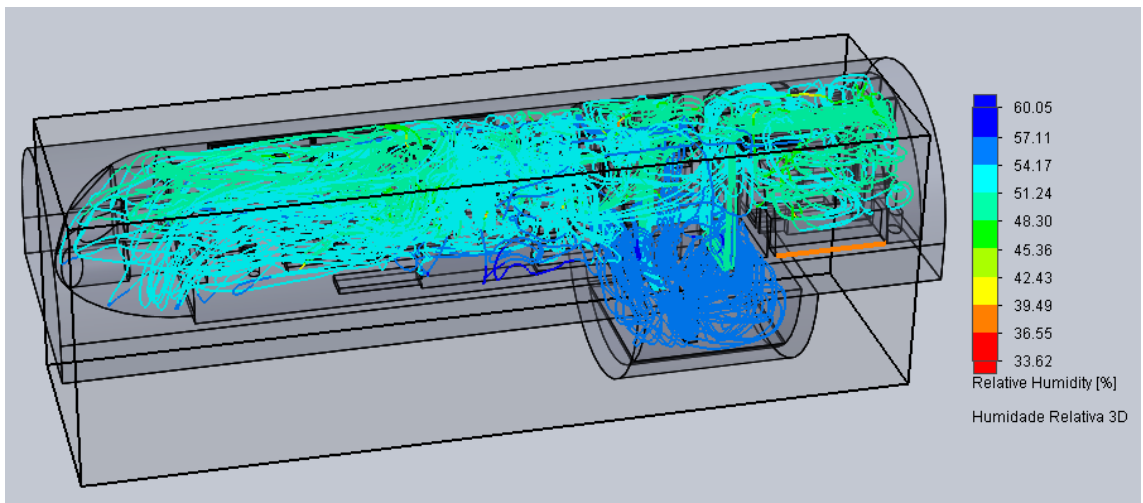


15h-16h

(Temperatura)

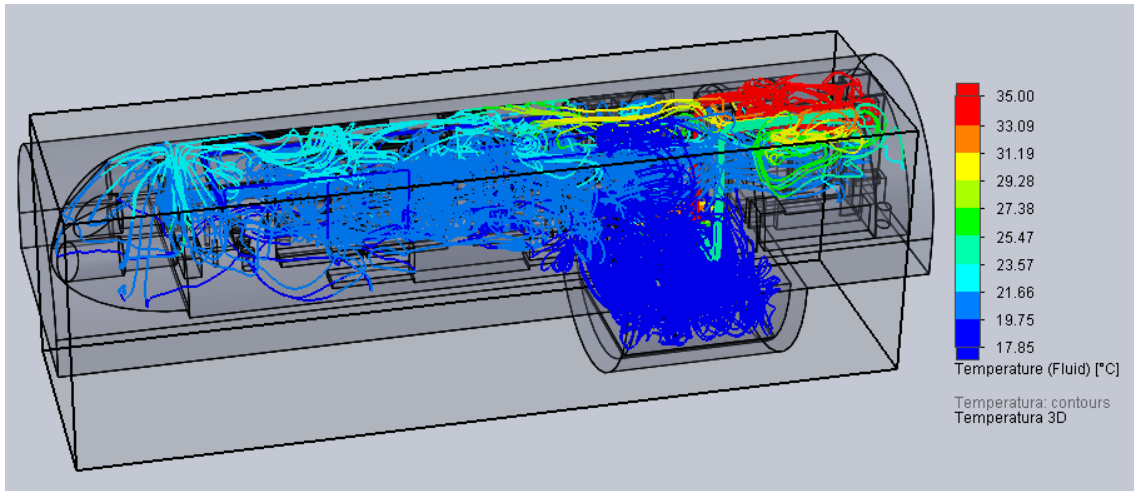


(Humidade relativa)

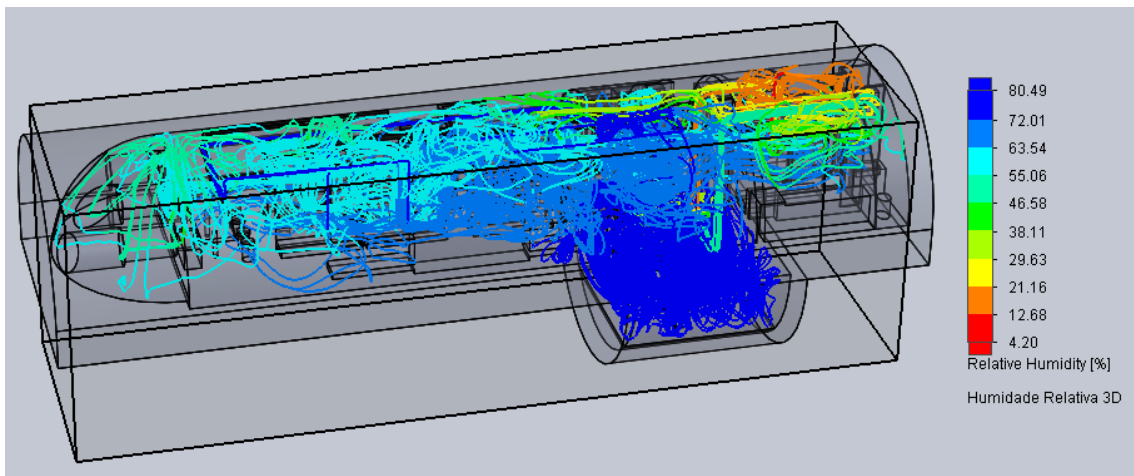


17h-18h

(Temperatura)

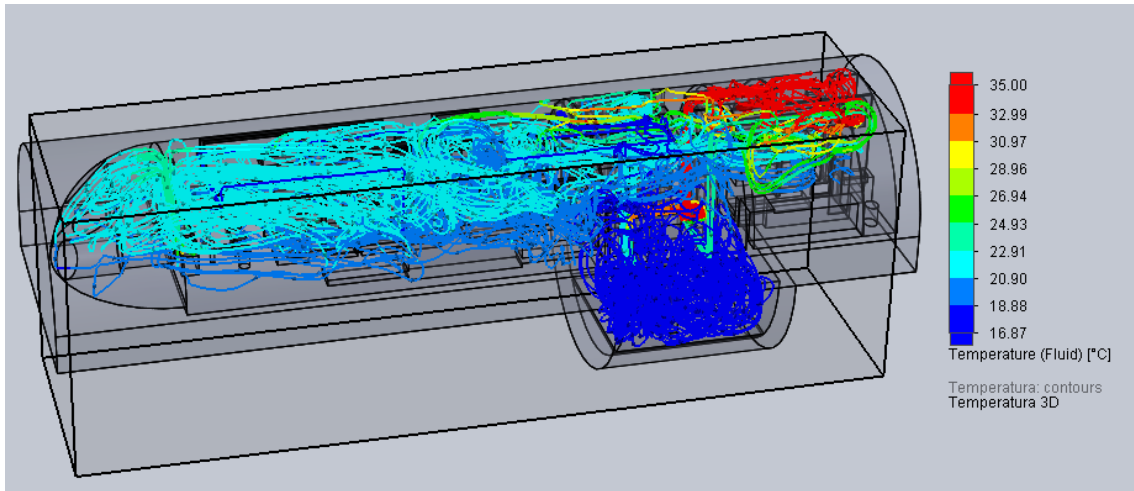


(Humidade Relativa)

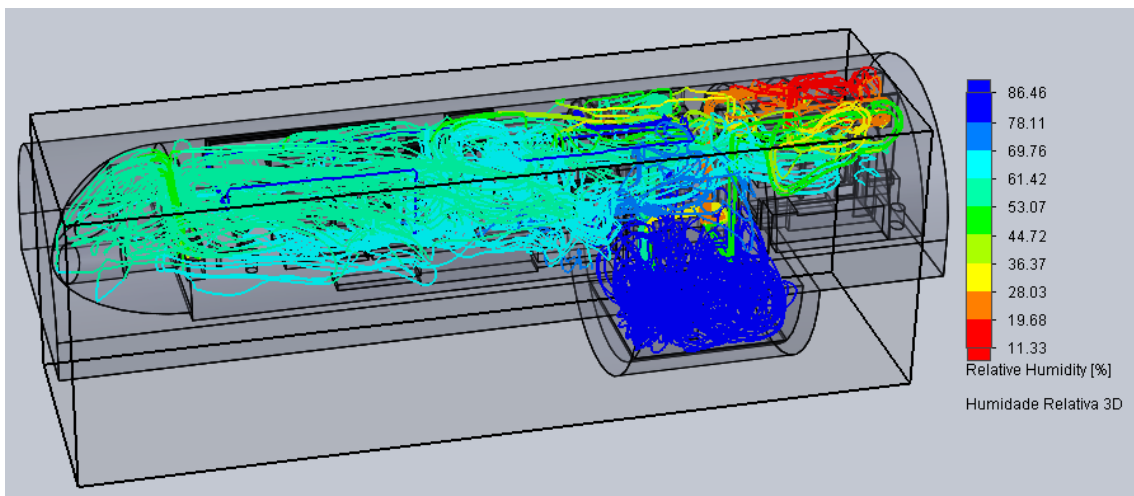


18h-19h

(Temperatura)

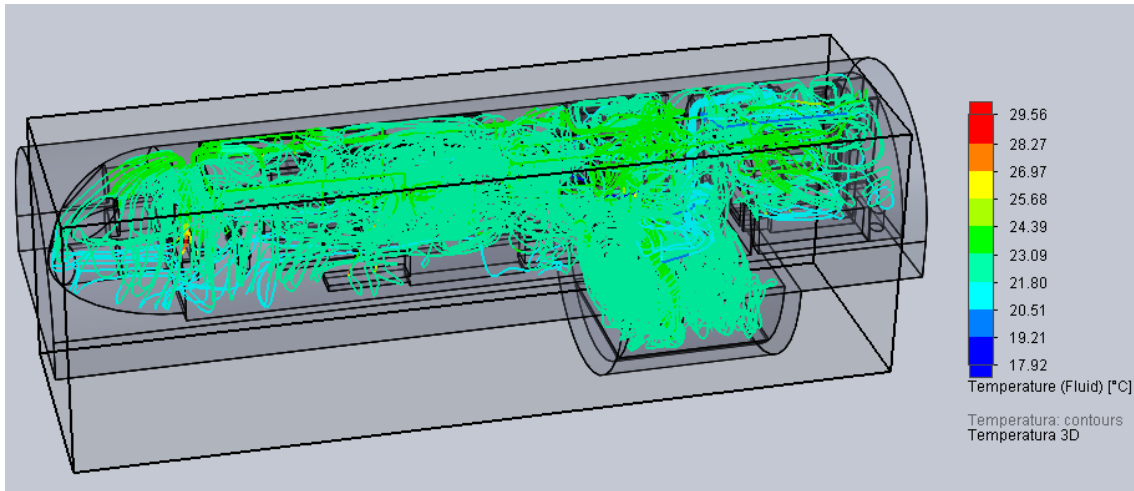


(Humidade Relativa)

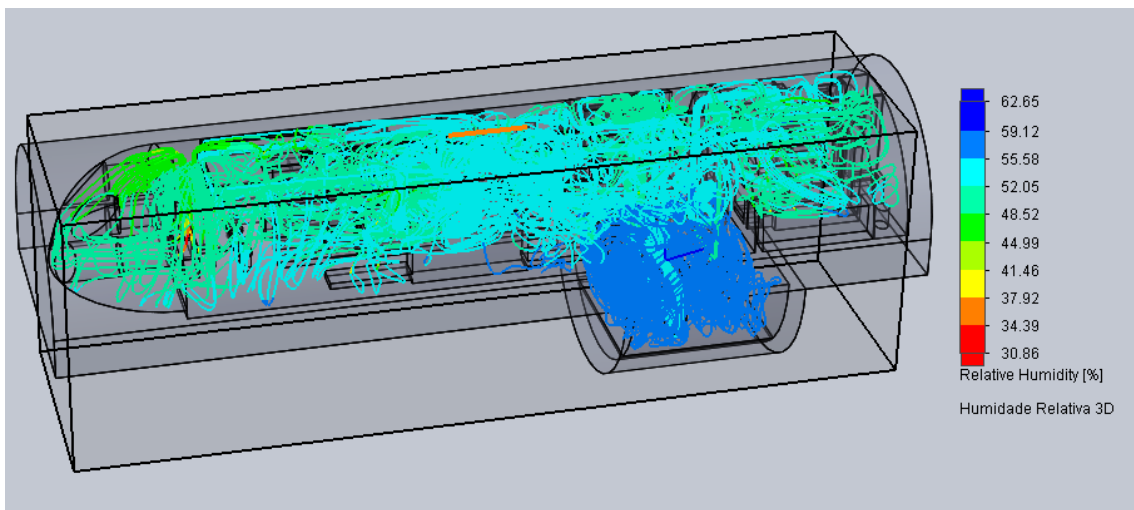


21h-22h

(Temperatura)

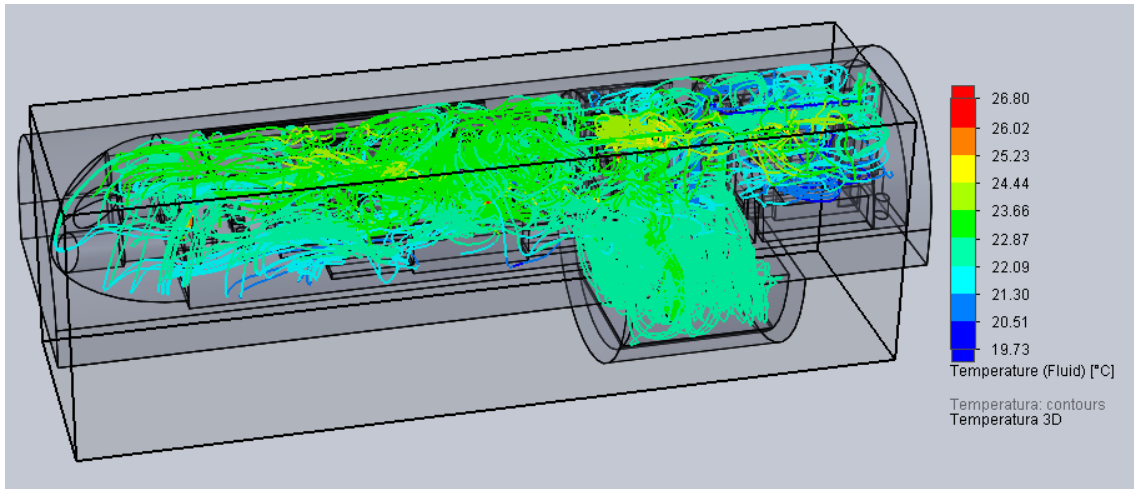


(Humidade Relativa)

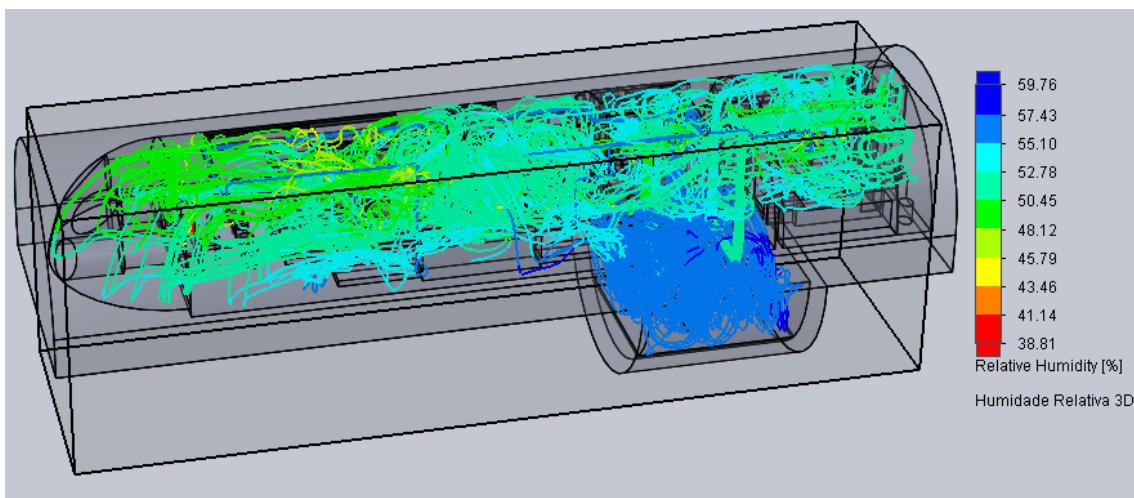


23h-24h

(Temperatura)



(Humidade relativa)



Apêndice 5 – Cálculo da Humidade e do Ponto de Condensação em *MATLAB*

Algoritmo *Humidade_Aloj_Arrefec_Simples*

```
clc
clear
global h V qinsf Qsen G Tsup D Tambint eisol ecasco hi kisol kcasco Di Laloj;
disp('Avaliação da evolução semanal de humidade no submarino');
Tsup = 17; % Temperatura da água à superfície (°C)
Tambint = 24; % Temperatura ambiente interior (°C)
D = 100; % Profundidade (m)
hi=7; % Coeficiente de convecção no interior
kisol=0.04; % Condutividade térmica do isolamento
kcasco=50; % Condutividade térmica do casco (aço)
Di=6.3; % Diâmetro do submarino
Laloj=17.7; % Comprimento correspondente à secção dos alojamentos
eisol=0.05; % Espessura do isolamento
ecasco=0.03; % Espessura do casco de aço
re=Di/2; % Raio exterior do submarino
rint=re-ecasco; % Raio intermédio (superfície entre o isolamento e o casco resistente de aço)
ri=rint-eisol; % Raio interior
% Cálculo temperatura em à profundidade D
Tdeep=Tprof(Tsup,D);
qinsf = 2260; % Caudal volúmico de insuflação (m3/h)
V = 184; % Volume do espaço (m3)
h = 0.01; % Intervalo tempo de integração h (15 minutos)
Tempoinic = 1;
Tempofinal = 168; % Tempo de simulação total
Tempo = Tempofinal - Tempoinic + 1; % 168 horas (7 dias)
nint = floor(Tempo/h); % Número total de intervalos
Wamb = 11.4; % Humidade inicial (24°C/50%) em gH2O/m3ar (considerando densidade do ar
1,2 kg/m3)
tempo = 0.0; % Tempo inicial
% Geração de vapor no interior - Alojamentos e resto do submarino (g/h)
G = [1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639 996
4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190
```

```

1881 4146 4625 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638
1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323
2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625
5875 2829 1639 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638
1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292
1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639
996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190
2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105];

```

%Geração de calor sensível interior (W)

```

Qsen = [1853 1853 1758 1853 1853 1758 1853 2187.5 2187.5 1853 4582.5 4967.5 5833.5
2433.5 1655.5 1269 4669 5070.5 5833.5 2433.5 1655.5 1409.5 1612 1490.5 1853 1853 1758
1853 1853 1758 1853 2187.5 2187.5 1853 4582.5 4967.5 5833.5 2433.5 1655.5 1269 4669
5070.5 5833.5 2433.5 1655.5 1409.5 1612 1490.5 1853 1853 1758 1853 1853 1758 1853
2187.5 2187.5 1853 4582.5 4967.5 5833.5 2433.5 1655.5 1269 4669 5070.5 5833.5 2433.5
1655.5 1409.5 1612 1490.5 1853 1853 1758 1853 1853 1758 1853 2187.5 2187.5 1853 4582.5
4967.5 5833.5 2433.5 1655.5 1269 4669 5070.5 5833.5 2433.5 1655.5 1409.5 1612 1490.5
1853 1853 1758 1853 1853 1758 1853 2187.5 2187.5 1853 4582.5 4967.5 5833.5 2433.5
1655.5 1269 4669 5070.5 5833.5 2433.5 1655.5 1409.5 1612 1490.5 1853 1853 1758 1853
1853 1758 1853 2187.5 2187.5 1853 4582.5 4967.5 5833.5 2433.5 1655.5 1269 4669 5070.5
5833.5 2433.5 1655.5 1409.5 1612 1490.5 1853 1853 1758 1853 1853 1758 1853 2187.5
2187.5 1853 4582.5 4967.5 5833.5 2433.5 1655.5 1269 4669 5070.5 5833.5 2433.5 1655.5
1409.5 1612 1490.5];

```

Qdiss = Qperdaalój(Tambint,Lalój,Tdeep,ri,hi,rint,kisol,re,kcasco); %calor perdido pelo isolamento (W)

W=zeros(1,nint);

t=zeros(1,nint);

% Resolução de uma Equação Diferencial

for i=1:nint

 j=ceil(i*h);

 Gv =G(j);

 Qs=Qsen(j)-Qdiss;

 Winsf = Wbatacc(Qs,Wamb); %Humidade absoluta insuflada

 Wambiente=RungeKuttaH(tempo,Wamb,h,qinsf,Gv,Winsf,V);

 tempo=tempo+h;

 Wamb=Wambiente;

```

W(i)=Wambiente;
t(i)=tempo;
end
w = W/1.2; % passar para g H2O/kg ar
wmed=mean(w(nint*0.75:nint)); % Calcular humidade média do último 1/4 de tempo
Ts=Tsaturacao(wmed); % Calculo da temperatura de saturação correspondente
%Mostrar gráfico da evolução da humidade
plot(t,w);
ymin=floor(min(w));
ymax=ceil(max(w));
xlim([0 170]);
ylim([ymin ymax]);
title('Evolução da Humidade Absoluta no Interior dos Alojamentos');
xlabel ('Tempo (h)');
ylabel ('Humidade Absoluta (g H2O/kg ar)');
%Mostrar humidade média e temperatura de saturação correspondente
Hmedia=['Humidade Ambiente Média: ',num2str(wmed),' g de H2O/kg de ar'];
Tsaturacao=['Temperatura de Saturação Correspondente: ',num2str(Ts),' °C'];
disp(Hmedia);
disp(Tsaturacao);
%Mostrar Temperaturas exteriores (à superfície e em profundidade)
T=['Temperatura à superfície: ',num2str(Tsup),' °C'];
Tprofund= ['A ',num2str(D),' m: ',num2str(Tdeep),' °C'];
disp(T);
disp(Tprofund);
% Cálculo do ponto de condensação
Tintisol=Tintalaj(Tambint,Lalaj,ri,hi,Qdiss);
Toutisol=Toutalaj(Tdeep,Lalaj,re,rint,kcasco,Qdiss);
DT=Tintisol-Toutisol;
dt=Tintisol-Ts;
if Toutisol>=Tintisol
    disp('Temperatura exterior superior à temperatura ambiente, sem condensação');
elseif Ts>=Tintisol
    disp('Temperatura de saturação atingida no ambiente interior');
elseif dt>=DT

```

```

disp('Não ocorre condensação no isolamento');
else
x=dt/DT;
p=(1000*eisol)*(1-x);
b=100-(100*x);
y=['Ocorre condensação a uma distância de ',num2str(p),'mm do casco resistente, correspon-
dendo a ',];
z=[num2str(b),'% do isolamento sujeito a condensação'];
disp(y);
disp(z);
end

```

Algoritmo *Humidade_Aloj_Arrefec_Desum*

```

clc
clear
global h V qinsf Qsen G Tsup D Tambint eisol ecasco hi kisol kcasco Di Laloj;
disp('Avaliação da evolução semanal de humidade no submarino');
Tsup = 17; % Temperatura da água à superfície (°C)
Tambint = 24; % Temperatura ambiente interior (°C)
D = 100; % Profundidade (m)
hi=7; % Coeficiente de convecção no interior
kisol=0.04; % Condutividade térmica do isolamento
kcasco=50; % Condutividade térmica do casco (aço)
Di=6.3; % Diâmetro do submarino
Laloj=17.7; % Comprimento correspondente à secção dos alojamentos
eisol=0.05; % Espessura do isolamento
ecasco=0.03; % Espessura do casco de aço
re=Di/2; % Raio exterior do submarino
rint=re-ecasco; % Raio intermédio (superfície entre o isolamento e o casco resistente de aço)
ri=rint-eisol; % Raio interior
% Calcular temperatura em à profundidade D
Tdeep=Tprof(Tsup,D);
qinsf = 2260; % Caudal volúmico de insuflação (m3/h)
V = 184; % Volume do espaço (m3)

```

```

h = 0.01; % Intervalo tempo de integração h
Tempoinic = 1;
Tempofinal = 168; % Tempo de simulação total
Tempo = Tempofinal - Tempoinic + 1; % 168 horas (7 dias)
nint = floor(Tempo/h); % Número total de intervalos
Wamb = 11.4; % Humidade inicial (24°C/50%) em gH2O/m3ar (considerando densidade do ar
1,2 kg/m3)
tempo = 0.0; % Tempo inicial
% Geração de vapor no interior - Alojamentos e resto do submarino (g/h)
G = [1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639 996
4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190
1881 4146 4625 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638
1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323
2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625
5875 2829 1639 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638
1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292
1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639
996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190
2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105];
% Geração de calor sensível interior (W)
Qsen = 8500; % Bateria sempre na carga máxima
Qdiss = Qperdaalof(Tambint,Lalof,Tdeep,ri,hi,rint,kisol,re,kcasco); % calor perdido pelo isola-
mento (W)
W=zeros(1,nint);
t=zeros(1,nint);
% Resolução de uma Equação Diferencial
for i=1:nint
    j=ceil(i*h);
    Gv =G(j);
    Qs=Qsen-Qdiss;
    Winsf = Wbatacc(Qs,Wamb); % Humidade absoluta insuflada
    Wambiente=RungeKuttaH(tempo,Wamb,h,qinsf,Gv,Winsf,V);
    tempo=tempo+h;
    Wamb=Wambiente;
    W(i)=Wambiente;

```

```

    t(i)=tempo;
end
w = W/1.2; %passar para g H2O/kg ar
wmed=mean(w(nint*0.75:nint)); %Calcular humidade média do último 1/4 de tempo
Ts=Tsatur(wmed); %Calculo da temperatura de saturação correspondente
%Mostrar gráfico da evolução da humidade
plot(t,w);
ymin=floor(min(w));
ymax=ceil(max(w));
xlim([0 170]);
ylim([ymin ymax]);
title('Evolução da Humidade Absoluta no Interior dos Alojamentos');
xlabel ('Tempo (h)');
ylabel ('Humidade Absoluta (g H2O/kg ar)');
%Mostrar humidade média e temperatura de saturação correspondente
Hmedia=['Humidade Ambiente Média: ',num2str(wmed),' g de H2O/kg de ar'];
Tsaturacao=['Temperatura de Saturação Correspondente: ',num2str(Ts),' °C'];
disp(Hmedia);
disp(Tsaturacao);
%Mostrar Temperaturas exteriores (à superfície e em profundidade)
T=['Temperatura à superfície: ',num2str(Tsup),' °C'];
Tprofund= ['A ',num2str(D),' m: ',num2str(Tdeep),' °C'];
disp(T);
disp(Tprofund);
%Cálculo do ponto de condensação
Tintisol=Tintalaj(Tambint,Lalaj,ri,hi,Qdiss);
Toutisol=Toutalaj(Tdeep,Lalaj,re,rint,kcasco,Qdiss);
DT=Tintisol-Toutisol;
dt=Tintisol-Ts;
if Toutisol>=Tintisol
    disp('Temperatura exterior superior à temperatura ambiente, sem condensação');
elseif Ts>=Tintisol
    disp('Temperatura de saturação atingida no ambiente interior');
elseif dt>=DT
    disp('Não ocorre condensação no isolamento');

```

```

else
    x=dt/DT;
    p=(1000*eisol)*(1-x);
    b=100-(100*x);
    y=['Ocorre condensação a uma distância de ',num2str(p),'mm do casco resistente, correspon-
dendo a ',];
    z=[num2str(b),'% do isolamento sujeito a condensação'];
    disp(y);
    disp(z);
end

```

Algoritmo Humidade_Total_Arrefecimento_Simples

```

clc
clear
global h V qcic qtcc qacc Qacc Qtcc Qcic Gacc Gtcc Gcic Gcat Tsup D Tambint eisol ecasco hi
kisol kcasco Di Ltot;
disp('Avaliação da evolução semanal de humidade no submarino');
Tsup = 17; % Temperatura da água à superfície (°C)
Tambint = 24; % Temperatura ambiente interior (°C)
D = 100; % Profundidade (m)
hi=7; % Coeficiente de convecção no interior
kisol=0.04; % Condutividade térmica do isolamento
kcasco=50; % Condutividade térmica do casco (aço)
Di=6.3; % Diâmetro do submarino
Ltot=35.4; % Comprimento correspondente à secção dos alojamentos
eisol=0.05; % Espessura do isolamento
ecasco=0.03; % Espessura do casco de aço
re=Di/2; % Raio exterior do submarino
rint=re-ecasco; % Raio intermédio (superfície entre o isolamento e o casco resistente de aço)
ri=rint-eisol; % Raio interior
% Cálculo da temperatura em à profundidade D
Tdeep=Tprof(Tsup,D);
qcic = 1900;
qtcc = 2460;

```



```

1853 1853 1758 1853 1853 1758 1853 2187.5 2187.5 1853 4582.5 4967.5 5833.5 2433.5
1655.5 1269 4669 5070.5 5833.5 2433.5 1655.5 1409.5 1612 1490.5 1853 1853 1758 1853
1853 1758 1853 2187.5 2187.5 1853 4582.5 4967.5 5833.5 2433.5 1655.5 1269 4669 5070.5
5833.5 2433.5 1655.5 1409.5 1612 1490.5 1853 1853 1758 1853 1853 1758 1853 2187.5
2187.5 1853 4582.5 4967.5 5833.5 2433.5 1655.5 1269 4669 5070.5 5833.5 2433.5 1655.5
1409.5 1612 1490.5];

```

```

Qdiss = Qperdatot(Tambint,Ltot,Tdeep,ri,hi,rint,kisol,re,kcasco); % calor perdido pelo isola-
mento (W)

```

```

W=zeros(1,nint);

```

```

t=zeros(1,nint);

```

```

% Resolução de uma Equação Diferencial

```

```

for i=1:nint % cada vector é linha

```

```

    j=ceil(i*h);

```

```

    Gv =Gacc(j)+Gcic+Gtcc+Gcat;

```

```

    Qs=Qacc(j)+Qtcc+Qcic-Qdiss;

```

```

    Winsfacc = Wbatacc(Qs,Wamb); % Resposta da bateria dos alojamentos

```

```

    Winsfcic = Wbatcic (Qs,Wamb); % Resposta da bateria do CIC

```

```

    Winsftcc = Wbatcic (Qs,Wamb); % Resposta da bateria do TCC

```

```

    Winsf = ((qacc*Winsfacc)+(qcic*Winsfcic)+(qtcc*Winsftcc))/qinsf;

```

```

    Wambiente=RungeKuttaH(tempo,Wamb,h,qinsf,Gv,Winsf,V);

```

```

    tempo=tempo+h;

```

```

    Wamb=Wambiente;

```

```

    W(i)=Wambiente;

```

```

    t(i)=tempo;

```

```

end

```

```

w = W/1.2; % passar para g H2O/kg ar

```

```

wmed=mean(w(nint*0.75:nint)); % Calcular humidade média do último 1/4 de tempo

```

```

Ts=Tsatur(wmed); % Calculo da temperatura de saturação correspondente

```

```

%Mostrar gráfico da evolução da humidade

```

```

plot(t,w);

```

```

ymin=floor(min(w));

```

```

ymax=ceil(max(w));

```

```

xlim([0 170]);

```

```

ylim([ymin ymax]);

```

```

title('Evolução da Humidade Absoluta no Interior do Submarino');

```

```

xlabel ('Tempo (h)');
ylabel ('Humidade Absoluta (g H2O/kg ar)');
%Mostrar humidade média e temperatura de saturação correspondente
Hmedia=['Humidade Ambiente Média: ',num2str(wmed),' g de H2O/kg de ar'];
Tsaturacao=['Temperatura de Saturação Correspondente: ',num2str(Ts),' °C'];
disp(Hmedia);
disp(Tsaturacao);
%Mostrar Temperaturas exteriores (à superfície e em profundidade)
T=['Temperatura à superfície: ',num2str(Tsup),' °C'];
Tprofund= ['A ',num2str(D),' m: ',num2str(Tdeep),' °C'];
disp(T);
disp(Tprofund);
%Cálculo do ponto de condensação
Tintisol=Tinttot(Tambint,Ltot,ri,hi,Qdiss);
Toutisol=Touttot(Tdeep,Ltot,re,rint,kcasco,Qdiss);
DT=Tintisol-Toutisol;
dt=Tintisol-Ts;
if Toutisol>=Tintisol
    disp('Temperatura exterior superior à temperatura ambiente, sem condensação');
elseif Ts>=Tintisol
    disp('Temperatura de saturação atingida no ambiente interior');
elseif dt>=DT
    disp('Não ocorre condensação no isolamento');
else
    x=dt/DT;
    p=(1000*eisol)*(1-x);
    b=100-(100*x);
    y=['Ocorre condensação a uma distância de ',num2str(p),'mm do casco resistente, correspon-
dendo a ',];
    z=[num2str(b),'% do isolamento sujeito a condensação'];
    disp(y);
    disp(z);
end

```

Algoritmo *Humidade_Total_Arrefec_Desum_Parcial*

```
clc
clear
global h V qcic qtcc qacc Qacc Qtcc Qcic Gacc Gcic Gtcc Gcat Tsup D Tambint eisol ecaso hi
kisol kcasco Di Ltot;
disp('Avaliação da evolução semanal de humidade no submarino');
Tsup = 14; % Temperatura da água à superfície (°C)
Tambint = 24; % Temperatura ambiente interior (°C)
D = 100; % Profundidade (m)
hi=7; % Coeficiente de convecção no interior
kisol=0.04; % Condutividade térmica do isolamento
kcasco=50; % Condutividade térmica do casco (aço)
Di=6.3; % Diâmetro do submarino
Ltot=35.4; % Comprimento correspondente à secção dos alojamentos
eisol=0.05; % Espessura do isolamento
ecasco=0.03; % Espessura do casco de aço
re=Di/2; % Raio exterior do submarino
rint=re-ecasco; % Raio intermédio (superfície entre o isolamento e o casco resistente de aço)
ri=rint-eisol; % Raio interior
% Cálculo da temperatura em à profundidade D
Tdeep=Tprof(Tsup,D);
qcic = 1900;
qtcc = 2460;
qacc = 2260;
qinsf = qacc+qcic+qtcc; % Caudal volumico de insuflação (m3/h)
V = 772.38; % Volume do espaço (m3)
h = 0.1; % Intervalo tempo de integração
Tempoinic = 1;
Tempofinal = 168; % Tempo de integração total
Tempo = Tempofinal - Tempoinic + 1; % 168 horas (7 dias)
nint = floor(Tempo/h); % Número total de intervalos
Wamb = 11.4; % Humidade inicial (24°C/50%) em gH2O/m3ar (considerando densidade do ar
1,2 kg/m3)
tempo = 0.0; % Tempo inicial
% Geração de vapor no interior - Alojamentos e resto do submarino (g/h)
```



```

end
w = W/1.2; %passar para g H2O/kg ar
wmed=mean(w(nint*0.75:nint)); %Calcular humidade média do último 1/4 de tempo
Ts=Tsatur(wmed); %Calculo da temperatura de saturação correspondente
%Mostrar gráfico da evolução da humidade
plot(t,w);
ymin=floor(min(w));
ymax=ceil(max(w));
xlim([0 170]);
ylim([ymin ymax]);
title('Evolução da Humidade Absoluta no Interior do Submarino');
xlabel ('Tempo (h)');
ylabel ('Humidade Absoluta (g H2O/kg ar)');
%Mostrar humidade média e temperatura de saturação correspondente
Hmedia=['Humidade Ambiente Média: ',num2str(wmed),' g de H2O/kg de ar'];
Tsaturacao=['Temperatura de Saturação Correspondente: ',num2str(Ts),' °C'];
disp(Hmedia);
disp(Tsaturacao);
%Mostrar Temperaturas exteriores (à superfície e em profundidade)
T=['Temperatura à superfície: ',num2str(Tsup),' °C'];
Tprofund= ['A ',num2str(D),' m: ',num2str(Tdeep),' °C'];
disp(T);
disp(Tprofund);
%Cálculo do ponto de condensação
Tintisol=Tinttot(Tambint,Ltot,ri,hi,Qdiss);
Toutisol=Touttot(Tdeep,Ltot,re,rint,kcasco,Qdiss);
DT=Tintisol-Toutisol;
dt=Tintisol-Ts;
if Toutisol>=Tintisol
    disp('Temperatura exterior superior à temperatura ambiente, sem condensação');
elseif Ts>=Tintisol
    disp('Temperatura de saturação atingida no ambiente interior');
elseif dt>=DT
    disp('Não ocorre condensação no isolamento');
else

```

```

x=dt/DT;
p=(1000*eisol)*(1-x);
b=100-(100*x);
y=['Ocorre condensação a uma distância de ',num2str(p),'mm do casco resistente, correspon-
dendo a ',];
z=[num2str(b),'% do isolamento sujeito a condensação'];
disp(y);
disp(z);
end

```

Algoritmo Humidade_Total_Arrefec_Desum_Parcial

```

clc
clear
global h V qcic qtcc qacc Qacc Qtcc Qcic Gacc Gcic Gtcc Gcat Tsup D Tambint eisol ecasco hi
kisol kcasco Di Ltot;
disp('Avaliação da evolução semanal de humidade no submarino');
Tsup = 0; % Temperatura da água à superfície (°C)
Tambint = 24; % Temperatura ambiente interior (°C)
D = 150; % Profundidade (m)
hi=7; % Coeficiente de convecção no interior
kisol=0.04; % Condutividade térmica do isolamento
kcasco=50; % Condutividade térmica do casco (aço)
Di=6.3; % Diâmetro do submarino
Ltot=35.4; % Comprimento correspondente à secção dos alojamentos
eisol=0.05; % Espessura do isolamento
ecasco=0.03; % Espessura do casco de aço
re=Di/2; % Raio exterior do submarino
rint=re-ecasco; % Raio intermédio (superfície entre o isolamento e o casco resistente de aço)
ri=rint-eisol; % Raio interior
% Cálculo da temperatura em à profundidade D
Tdeep=Tprof(Tsup,D);
qcic = 1900;
qtcc = 2460;
qacc = 2260;

```

```

qinsf = qacc+qcic+qtcc; %Caudal volúmico de insuflação (m3/h)
V = 772.38; %Volume do espaço (m3)
h = 0.1; %Intervalo tempo de integração h (15 minutos)
Tempoinic = 1;
Tempofinal = 168; %Tempo de integração total
Tempo = Tempofinal - Tempoinic + 1; %168 horas (7 dias)
nint = floor(Tempo/h); %Número total de intervalos
Wamb = 11.4; %Humidade inicial (24°C/50%) em gH2O/m3ar (considerando densidade do ar
1,2 kg/m3)
tempo = 0.0; %Tempo inicial
%Geração de vapor no interior - Alojamentos e resto do submarino (g/h)
Gcat = 74.61; %Consideram-se 19 catalisadores adicionais aos considerados nos alojamentos
Gtcc = 441.70; %Consideram-se 5 pessoas no TCC
Gcic = 530.04; %Consideram-se 6 pessoas no CIC
Gacc = [1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639
996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190
2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638
1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639 996 4043 4649
6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146
4625 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638
1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323 2829 1639
1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829
1639 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086
2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105];
%Geração de calor sensível nos alojamentos - CIC, TCC e Alojamentos (W)
Qcic = 5351; %aproximação da carga máxima verificada no CIC
Qtcc = 6512; %aproximação da carga máxima verificada no TCC
Qacc = 8500;
Qdiss = Qperdatot(Tambint,Ltot,Tdeep,ri,hi,rint,kisol,re,kcasco); %calor perdido pelo isola-
mento (W)
W=zeros(1,nint);
t=zeros(1,nint);
% Resolução da equação diferencial
for i=1:nint
    j=ceil(i*h);

```

```

Gv =Gacc(j)+Gcic+Gtcc+Gcat;
Qs=Qacc+Qtcc+Qcic-Qdiss;
Winsfacc = Wbatacc(Qs,Wamb); %Resposta da bateria dos alojamentos
Winsfcic = Wbatcic (Qs,Wamb); %Resposta da bateria do CIC
Winsftcc = Wbatcc (Qs,Wamb); %Resposta da bateria do TCC
Winsf = ((qacc*Winsfacc)+(qcic*Winsfcic)+(qtcc*Winsftcc))/qinsf;
Wambiente=RungeKuttaH(tempo,Wamb,h,qinsf,Gv,Winsf,V);
tempo=tempo+h;
Wamb=Wambiente;
W(i)=Wambiente;
t(i)=tempo;
end
w = W/1.2; %passar para g H2O/kg ar
wmed=mean(w(nint*0.75:nint)); %Calcular humidade média do último 1/4 de tempo
Ts=Tsaturacao(wmed); %Calculo da temperatura de saturação correspondente
%Mostrar gráfico da evolução da humidade
plot(t,w);
ymin=floor(min(w));
ymax=ceil(max(w));
xlim([0 170]);
ylim([2 6.5]);
title('Evolução da Humidade Absoluta no Interior do Submarino');
xlabel ('Tempo (h)');
ylabel ('Humidade Absoluta (g H2O/kg ar)');
%Mostrar humidade média e temperatura de saturação correspondente
Hmedia=['Humidade Ambiente Média: ',num2str(wmed),' g de H2O/kg de ar'];
Tsaturacao=['Temperatura de Saturação Correspondente: ',num2str(Ts),' °C'];
disp(Hmedia);
disp(Tsaturacao);
%Mostrar Temperaturas exteriores (à superfície e em profundidade)
T=['Temperatura à superfície: ',num2str(Tsup),' °C'];
Tprofund= ['A ',num2str(D),' m: ',num2str(Tdeep),' °C'];
disp(T);
disp(Tprofund);
%Cálculo do ponto de condensação

```

```

Tintisol=Tinttot(Tambint,Ltot,ri,hi,Qdiss);
Toutisol=Touttot(Tdeep,Ltot,re,rint,kcasco,Qdiss);
DT=Tintisol-Toutisol;
dt=Tintisol-Ts;
if Toutisol>=Tintisol
    disp('Temperatura exterior superior à temperatura ambiente, sem condensação');
elseif Ts>=Tintisol
    disp('Temperatura de saturação atingida no ambiente interior');
elseif dt>=DT
    disp('Não ocorre condensação no isolamento');
else
    x=dt/DT;
    p=(1000*eisol)*(1-x);
    b=100-(100*x);
    y=['Ocorre condensação a uma distância de ',num2str(p),'mm do casco resistente, correspon-
dendo a ',];
    z=[num2str(b),'% do isolamento sujeito a condensação'];
    disp(y);
    disp(z);
end

```

Algoritmo *Superficie_Alojamentos_Arrefec_Simples*

```
clc
clear
global h V qinsf Qsen G Tambint eisol hi kisol kcasco Di Laloj ecasco Dmax Tsupmax;
disp('Avaliação da evolução semanal de humidade no submarino');
hi=7; %Coeficiente de convecção no interior
kisol=0.04; %Condutividade térmica do isolamento
kcasco=50; %Condutividade térmica do casco (aço)
Di=6.3; %Diâmetro do submarino
Laloj=17.7; %Comprimento correspondente à secção dos alojamentos
eisol=0.05; %Espessura do isolamento
ecasco=0.03; %Espessura do casco de aço
re=Di/2; %Raio exterior do submarino
rint=re-ecasco; %Raio intermédio (superfície entre o isolamento e o casco resistente de aço)
ri=rint-eisol; %Raio interior
Dmax=150; %Profundidade máxima (m)
Tsupmax=30; %Temperatura de superfície máxima (°C)
ponto_isolamento=zeros(Dmax,Tsupmax);
profundidade=zeros(Dmax,Tsupmax);
temperatura_superficie=zeros(Dmax,Tsupmax);
Tambint = 24; %Temperatura ambiente interior (°C)
qinsf = 2260; %Caudal volúmico de insuflação (m3/h)
V = 184; %Volume do espaço (m3)
h = 0.1; %Intervalo tempo de integração h (15 minutos)
Tempoinic = 1;
Tempofinal = 168; %Tempo de integração total
Tempo = Tempofinal - Tempoinic + 1; %168 horas (7 dias)
nint = floor(Tempo/h); %Número total de intervalos
Wamb = 11.4; %Humidade inicial (24°C/50%) em gH2O/m3ar (considerando densidade do ar
1,2 kg/m3)
tempo = 0.0; %Tempo inicial
%Geração de vapor no interior - Alojamentos e resto do submarino (g/h)
G = [1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639 996
4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190
1881 4146 4625 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638
```

1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323
 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625
 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638
 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292
 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639
 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190
 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105];

%Geração de calor sensível interior (W)

Qsen = [1853 1853 1758 1853 1853 1758 1853 2187.5 2187.5 1853 4582.5 4967.5 5833.5
 2433.5 1655.5 1269 4669 5070.5 5833.5 2433.5 1655.5 1409.5 1612 1490.5 1853 1853 1758
 1853 1853 1758 1853 2187.5 2187.5 1853 4582.5 4967.5 5833.5 2433.5 1655.5 1269 4669
 5070.5 5833.5 2433.5 1655.5 1409.5 1612 1490.5 1853 1853 1758 1853 1853 1758 1853
 2187.5 2187.5 1853 4582.5 4967.5 5833.5 2433.5 1655.5 1269 4669 5070.5 5833.5 2433.5
 1655.5 1409.5 1612 1490.5 1853 1853 1758 1853 1853 1758 1853 2187.5 2187.5 1853 4582.5
 4967.5 5833.5 2433.5 1655.5 1269 4669 5070.5 5833.5 2433.5 1655.5 1409.5 1612 1490.5
 1853 1853 1758 1853 1853 1758 1853 2187.5 2187.5 1853 4582.5 4967.5 5833.5 2433.5
 1655.5 1269 4669 5070.5 5833.5 2433.5 1655.5 1409.5 1612 1490.5 1853 1853 1758 1853
 1853 1758 1853 2187.5 2187.5 1853 4582.5 4967.5 5833.5 2433.5 1655.5 1269 4669 5070.5
 5833.5 2433.5 1655.5 1409.5 1612 1490.5 1853 1853 1758 1853 1853 1758 1853 2187.5
 2187.5 1853 4582.5 4967.5 5833.5 2433.5 1655.5 1269 4669 5070.5 5833.5 2433.5 1655.5
 1409.5 1612 1490.5];

W=zeros(1,nint);

t=zeros(1,nint);

for v=1:Dmax

for Tsup = 1:Tsupmax % Temperatura da água à superfície (°C)

 D=v; % Profundidade (m)

 Tdeep=Tprof(Tsup,D); % Calcular temperatura em à profundidade D

 Qdiss = Qperdaalj(Tambint,Lalaj,Tdeep,ri,hi,rint,kisol,re,kcasco); % calor perdido pelo iso-
 lamento (W)

 % Cálculo da equação diferencial

 for i=1:nint

 j=ceil(i*h);

 Gv =G(j);

 Qs=Qsen(j)-Qdiss;

 Winsf = Wbatacc(Qs,Wamb); % Humidade absoluta insuflada (1º valor)

```

Wambiente=RungeKuttaH(tempo,Wamb,h,qinsf,Gv,Winsf,V);
tempo=tempo+h;
Wamb=Wambiente;
W(i)=Wambiente;
t(i)=tempo;
end
w = W/1.2; %passar para g H2O/kg ar
wmed=mean(w(nint*0.75:nint)); %Calcular humidade média do último 1/4 de tempo
Ts=Tsatur(wmed); %Calculo da temperatura de saturação correspondente
%Cálculo do ponto de condensação
Tintisol=Tintalaj(Tambint,Lalaj,ri,hi,Qdiss);
Toutisol=Toutalaj(Tdeep,Lalaj,re,rint,kcasco,Qdiss);
DT=Tintisol-Toutisol;
dt=Tintisol-Ts;
if Toutisol>=Tintisol
    p=0;
elseif Ts>=Tintisol
    p=50;
elseif dt>=DT
    p=0;
else
    x=dt/DT;
    p=1000*eisol*(1-x);
end
ponto_isolamento(v,Tsup)=p;
profundidade (v,Tsup)=D;
temperatura_superficie(v,Tsup)=Tsup;
end
end
%passar dados para colunas únicas
ponto_isolamento=ponto_isolamento';
ponto_isolamento=ponto_isolamento(:);
ponto_isolamento=flipud(ponto_isolamento);
temperatura_superficie=temperatura_superficie';
temperatura_superficie=temperatura_superficie(:);

```

```

profundidade=profundidade';
profundidade=profundidade(:);
%construir superfície interpoladora
%P=[temperatura_superficie profundidade];
F=scatteredInterpolant(temperatura_superficie,profundidade,ponto_isolamento); %Superfície
interpoladora
x=(0:1:30);
y=(0:5:150);
f=zeros(length(x),length(y));
for i=1:31
for j=1:31
f(i,j)=F(x(i),y(j));
end
end
surf(x,y,f)
title('Variação do Ponto de Condensação')
xlabel('Temperatura à Superfície (°C)')
ylabel('Profundidade (m)')
zlabel('Ponto de Condensação (mm)')
oldcmap = colormap;
colormap( flipud(oldcmap) );

```

Algoritmo *Superficie_Alojamentos_Arrefec_Desum*

```
clc
clear
global h V qinsf Qsen G Tambint eisol hi kisol kcasco Di Laloj ecasco Dmax Tsupmax;
disp('Avaliação da evolução semanal de humidade no submarino');
hi=7; %Coeficiente de convecção no interior
kisol=0.04; %Condutividade térmica do isolamento
kcasco=50; %Condutividade térmica do casco (aço)
Di=6.3; %Diâmetro do submarino
Laloj=17.7; %Comprimento correspondente à secção dos alojamentos
eisol=0.05; %Espessura do isolamento
ecasco=0.03; %Espessura do casco de aço
re=Di/2; %Raio exterior do submarino
rint=re-ecasco; %Raio intermédio (superfície entre o isolamento e o casco resistente de aço)
ri=rint-eisol; %Raio interior
Dmax=150; %Profundidade máxima (m)
Tsupmax=30; %Temperatura de superfície máxima (°C)
ponto_isolamento=zeros(Dmax,Tsupmax);
profundidade=zeros(Dmax,Tsupmax);
temperatura_superficie=zeros(Dmax,Tsupmax);
Tambint = 24; %Temperatura ambiente interior (°C)
qinsf = 2260; %Caudal volúmico de insuflação (m3/h)
V = 184; %Volume do espaço (m3)
h = 0.1; %Intervalo tempo de integração h (15 minutos)
Tempoinic = 1;
Tempofinal = 168; %Tempo de integração total
Tempo = Tempofinal - Tempoinic + 1; %168 horas (7 dias)
nint = floor(Tempo/h); %Número total de intervalos
Wamb = 11.4; %Humidade inicial (24°C/50%) em gH2O/m3ar (considerando densidade do ar
1,2 kg/m3)
tempo = 0.0; %Tempo inicial
%Geração de vapor no interior - Alojamentos e resto do submarino (g/h)
G = [1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639 996
4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190
1881 4146 4625 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638
```

```

1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323
2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625
5875 2829 1639 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638
1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292
1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639
996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190
2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105];

```

%Geração de calor sensível interior (W)

Qsen = 8500; %Bateria sempre na carga máxima

W=zeros(1,nint);

t=zeros(1,nint);

for v=1:Dmax

for Tsup = 1:Tsupmax % Temperatura da água à superfície (°C)

 D=v; % Profundidade (m)

 Tdeep=Tprof(Tsup,D); % Calcular temperatura em à profundidade D

 Qdiss = Qperdaalj(Tambint,Lalaj,Tdeep,ri,hi,rint,kisol,re,kcasco); % calor perdido pelo isolamento (W)

% Cálculo da equação diferencial

for i=1:nint

 j=ceil(i*h);

 Gv =G(j);

 Qs=Qsen-Qdiss;

 Winsf = Wbatacc(Qs,Wamb); % Humidade absoluta insuflada (1º valor)

 Wambiente=RungeKuttaH(tempo,Wamb,h,qinsf,Gv,Winsf,V);

 tempo=tempo+h;

 Wamb=Wambiente;

 W(i)=Wambiente;

 t(i)=tempo;

end

w = W/1.2; % passar para g H2O/kg ar

wmed=mean(w(nint*0.75:nint)); % Calcular humidade média do último 1/4 de tempo

Ts=Tsatur(wmed); % Calculo da temperatura de saturação correspondente

% Cálculo do ponto de condensação

Tintisol=Tintalaj(Tambint,Lalaj,ri,hi,Qdiss);

Toutisol=Toutalaj(Tdeep,Lalaj,re,rint,kcasco,Qdiss);

```

DT=Tintisol-Toutisol;
dt=Tintisol-Ts;
if Toutisol>=Tintisol
    p=0;
elseif Ts>=Tintisol
    p=50;
elseif dt>=DT
    p=0;
else
    x=dt/DT;
    p=1000*eisol*(1-x);
end
ponto_isolamento(v,Tsup)=p;
profundidade (v,Tsup)=D;
temperatura_superficie(v,Tsup)=Tsup;
end
end
%passar dados para colunas únicas
ponto_isolamento=ponto_isolamento';
ponto_isolamento=ponto_isolamento(:);
ponto_isolamento=flipud(ponto_isolamento);
temperatura_superficie=temperatura_superficie';
temperatura_superficie=temperatura_superficie(:);
profundidade=profundidade';
profundidade=profundidade(:);
%construir superfície interpoladora
%P=[temperatura_superficie profundidade];
F=scatteredInterpolant(temperatura_superficie,profundidade,ponto_isolamento); %Superfície
interpoladora
x=(0:1:30);
y=(0:5:150);
f=zeros(length(x),length(y));
for i=1:31
for j=1:31
f(i,j)=F(x(i),y(j));

```

```

end
end
surf(x,y,f)
title('Variação do Ponto de Condensação')
xlabel('Temperatura à Superfície (°C)')
ylabel('Profundidade (m)')
zlabel('Ponto de Condensação (mm)')
oldcmap = colormap;
colormap( flipud(oldcmap) );

```

Algoritmo Superfície_Total_Arrefec_Simples

```

clc
clear
global h V hi kisol kcasco Di Ltot ecasco Dmax Tsupmax qcic qtcc qacc Qacc Qtcc Qcic Gacc
Gtcc Gcic Gcat Tambint eisol;
disp('Avaliação da evolução semanal de humidade no submarino');
hi=7; % Coeficiente de convecção no interior
kisol=0.04; % Condutividade térmica do isolamento
kcasco=50; % Condutividade térmica do casco (aço)
Di=6.3; % Diâmetro do submarino
Ltot=35.4; % Comprimento total do conjunto alojamentos-cic-tcc
eisol=0.05; % Espessura do isolamento
ecasco=0.03; % Espessura do casco de aço
re=Di/2; % Raio exterior do submarino
rint=re-ecasco; % Raio intermédio (superfície entre o isolamento e o casco resistente de aço)
ri=rint-eisol; % Raio interior
Dmax=150; % Profundidade máxima (m)
Tsupmax=30; % Temperatura de superfície máxima (°C)
ponto_isolamento=zeros(Dmax,Tsupmax);
profundidade=zeros(Dmax,Tsupmax);
temperatura_superficie=zeros(Dmax,Tsupmax);
Tambint = 24; % Temperatura ambiente interior (°C)
qcic = 1900;
qtcc = 2460;

```



```

1853 1853 1758 1853 1853 1758 1853 2187.5 2187.5 1853 4582.5 4967.5 5833.5 2433.5
1655.5 1269 4669 5070.5 5833.5 2433.5 1655.5 1409.5 1612 1490.5 1853 1853 1758 1853
1853 1758 1853 2187.5 2187.5 1853 4582.5 4967.5 5833.5 2433.5 1655.5 1269 4669 5070.5
5833.5 2433.5 1655.5 1409.5 1612 1490.5 1853 1853 1758 1853 1853 1758 1853 2187.5
2187.5 1853 4582.5 4967.5 5833.5 2433.5 1655.5 1269 4669 5070.5 5833.5 2433.5 1655.5
1409.5 1612 1490.5];
W=zeros(1,nint);
t=zeros(1,nint);
for v=1:Dmax
for Tsup = 1:Tsupmax % Temperatura da água à superfície (°C)
    D=v; % Profundidade (m)
    Tdeep=Tprof(Tsup,D); % Calcular temperatura em à profundidade D
    Qdiss = Qperdatot(Tambint,Ltot,Tdeep,ri,hi,rint,kisol,re,kcasco); % calor perdido pelo isola-
mento (W)
% Cálculo da equação diferencial
for i=1:nint
    j=ceil(i*h);
    Gv =Gacc(j)+Gcic+Gtcc+Gcat;
    Qs=Qacc(j)+Qtcc+Qcic-Qdiss;
    Winsfacc = Wbatacc(Qs,Wamb); % Resposta da bateria dos alojamentos
    Winsfcic = Wbatcic (Qs,Wamb); % Resposta da bateria do CIC
    Winsftcc = Wbatcc (Qs,Wamb); % Resposta da bateria do TCC
    Winsf = ((qacc*Winsfacc)+(qcic*Winsfcic)+(qtcc*Winsftcc))/qinsf;
    Wambiente=RungeKuttaH(tempo,Wamb,h,qinsf,Gv,Winsf,V);
    tempo=tempo+h;
    Wamb=Wambiente;
    W(i)=Wambiente;
    t(i)=tempo;
end
w = W/1.2; % passar para g H2O/kg ar
wmed=mean(w(nint*0.75:nint)); % Calcular humidade média do último 1/4 de tempo
Ts=Tsatur(wmed); % Calculo da temperatura de saturação correspondente
% Cálculo do ponto de condensação
Tintisol=Tinttot(Tambint,Ltot,ri,hi,Qdiss);
Toutisol=Touttot(Tdeep,Ltot,re,rint,kcasco,Qdiss);

```

```

DT=Tintisol-Toutisol;
dt=Tintisol-Ts;
if Toutisol>=Tintisol
    p=0;
elseif Ts>=Tintisol
    p=50;
elseif dt>=DT
    p=0;
else
    x=dt/DT;
    p=1000*eisol*(1-x);
end
ponto_isolamento(v,Tsup)=p;
profundidade(v,Tsup)=D;
temperatura_superficie(v,Tsup)=Tsup;
end
end
%passar dados para colunas únicas
ponto_isolamento=ponto_isolamento';
ponto_isolamento=ponto_isolamento(:);
ponto_isolamento=flipud(ponto_isolamento);
temperatura_superficie=temperatura_superficie';
temperatura_superficie=temperatura_superficie(:);
profundidade=profundidade';
profundidade=profundidade(:);
%construir superfície interpoladora
%P=[temperatura_superficie profundidade];
F=scatteredInterpolant(temperatura_superficie,profundidade,ponto_isolamento); %Superfície
interpoladora
x=(0:1:30);
y=(0:5:150);
f=zeros(length(x),length(y));
for i=1:31
for j=1:31
f(i,j)=F(x(i),y(j));

```

```

end
end
surf(x,y,f)
title('Variação do Ponto de Condensação')
xlabel('Temperatura à Superfície (°C)')
ylabel('Profundidade (m)')
zlabel('Ponto de Condensação (mm)')
oldcmap = colormap;
colormap( flipud(oldcmap) );

```

Algoritmo Superfície_Total_Arrefec_Desum_Parcial

```

clc
clear
global h V qcic qtcc qacc Qacc Qtcc Qcic Gacc Gtcc Gcic Gcat Tambint eisol hi kisol kcasco Di
ecasco Ltot Dmax Tsupmax;
disp('Avaliação da evolução semanal de humidade no submarino');
hi=7; % Coeficiente de convecção no interior
kisol=0.04; % Condutividade térmica do isolamento
kcasco=50; % Condutividade térmica do casco (aço)
Di=6.3; % Diâmetro do submarino
Ltot=35.4; % Comprimento total do conjunto alojamentos-cic-tcc
eisol=0.05; % Espessura do isolamento
ecasco=0.03; % Espessura do casco de aço
re=Di/2; % Raio exterior do submarino
rint=re-ecasco; % Raio intermédio (superfície entre o isolamento e o casco resistente de aço)
ri=rint-eisol; % Raio interior
Dmax=150; % Profundidade máxima (m)
Tsupmax=30; % Temperatura de superfície máxima (°C)
ponto_isolamento=zeros(Dmax,Tsupmax);
profundidade=zeros(Dmax,Tsupmax);
temperatura_superficie=zeros(Dmax,Tsupmax);
Tambint = 24; % Temperatura ambiente interior (°C)
qcic = 1900;
qtcc = 2460;

```

$q_{acc} = 2260;$
 $q_{insf} = q_{acc} + q_{cic} + q_{tcc};$ % Caudal volúmico de insuflação (m³/h)
 $V = 772.38;$ % Volume do espaço (m³)
 $h = 0.1;$ % Intervalo tempo de integração
 $Tempoinic = 1;$
 $Tempofinal = 168;$ % Tempo de integração total
 $Tempo = Tempofinal - Tempoinic + 1;$ % 168 horas (7 dias)
 $nint = \text{floor}(Tempo/h);$ % Número total de intervalos
 $W_{amb} = 11.4;$ % Humidade inicial (24°C/50%) em gH₂O/m³ar (considerando densidade do ar 1,2 kg/m³)
 $tempo = 0.0;$ % Tempo inicial
 % Geração de vapor no interior - Alojamentos e resto do submarino (g/h)
 $G_{cat} = 74.61;$ % Consideram-se 19 catalisadores adicionais aos considerados nos alojamentos
 $G_{tcc} = 441.70;$ % Consideram-se 5 pessoas no TCC
 $G_{cic} = 530.04;$ % Consideram-se 6 pessoas no CIC
 $G_{acc} = [1638 \ 1638 \ 1241 \ 1638 \ 1638 \ 1241 \ 2086 \ 2190 \ 2190 \ 1881 \ 4146 \ 4625 \ 5875 \ 2829 \ 1639$
 $996 \ 4043 \ 4649 \ 6323 \ 2829 \ 1639 \ 1292 \ 1563 \ 1105 \ 1638 \ 1638 \ 1241 \ 1638 \ 1638 \ 1241 \ 2086 \ 2190$
 $2190 \ 1881 \ 4146 \ 4625 \ 5875 \ 2829 \ 1639 \ 996 \ 4043 \ 4649 \ 6323 \ 2829 \ 1639 \ 1292 \ 1563 \ 1105 \ 1638$
 $1638 \ 1241 \ 1638 \ 1638 \ 1241 \ 2086 \ 2190 \ 2190 \ 1881 \ 4146 \ 4625 \ 5875 \ 2829 \ 1639 \ 996 \ 4043 \ 4649$
 $6323 \ 2829 \ 1639 \ 1292 \ 1563 \ 1105 \ 1638 \ 1638 \ 1241 \ 1638 \ 1638 \ 1241 \ 2086 \ 2190 \ 2190 \ 1881 \ 4146$
 $4625 \ 5875 \ 2829 \ 1639 \ 996 \ 4043 \ 4649 \ 6323 \ 2829 \ 1639 \ 1292 \ 1563 \ 1105 \ 1638 \ 1638 \ 1241 \ 1638$
 $1638 \ 1241 \ 2086 \ 2190 \ 2190 \ 1881 \ 4146 \ 4625 \ 5875 \ 2829 \ 1639 \ 996 \ 4043 \ 4649 \ 6323 \ 2829 \ 1639$
 $1292 \ 1563 \ 1105 \ 1638 \ 1638 \ 1241 \ 1638 \ 1638 \ 1241 \ 2086 \ 2190 \ 2190 \ 1881 \ 4146 \ 4625 \ 5875 \ 2829$
 $1639 \ 996 \ 4043 \ 4649 \ 6323 \ 2829 \ 1639 \ 1292 \ 1563 \ 1105 \ 1638 \ 1638 \ 1241 \ 1638 \ 1638 \ 1241 \ 2086$
 $2190 \ 2190 \ 1881 \ 4146 \ 4625 \ 5875 \ 2829 \ 1639 \ 996 \ 4043 \ 4649 \ 6323 \ 2829 \ 1639 \ 1292 \ 1563 \ 1105];$
 % Geração de calor sensível nos alojamentos - CIC, TCC e Alojamentos (W)
 $Q_{cic} = 1759;$ % aproximação da carga máxima verificada no CIC
 $Q_{tcc} = 2141;$ % aproximação da carga máxima verificada no TCC
 $Q_{acc} = 8500;$
 $W = \text{zeros}(1, nint);$
 $t = \text{zeros}(1, nint);$
 for $v = 1 : D_{max}$
 for $T_{sup} = 1 : T_{supmax}$ % Temperatura da água à superfície (°C)
 $D = v;$ % Profundidade (m)
 $T_{deep} = T_{prof}(T_{sup}, D);$ % Calcular temperatura em à profundidade D

```

Qdiss = Qperdatot(Tambint,Ltot,Tdeep,ri,hi,rint,kisol,re,kcasco); % calor perdido pelo isolamento (W)
% Cálculo da equação diferencial
for i=1:nint
    j=ceil(i*h);
    Gv =Gacc(j)+Gcic+Gtcc+Gcat;
    Qs=Qacc+Qtcc+Qcic-Qdiss;
    Winsfacc = Wbatacc(Qs,Wamb); % Resposta da bateria dos alojamentos
    Winsfcic = Wbatcic (Qs,Wamb); % Resposta da bateria do CIC
    Winsftcc = Wbatcc (Qs,Wamb); % Resposta da bateria do TCC
    Winsf = ((qacc*Winsfacc)+(qcic*Winsfcic)+(qtcc*Winsftcc))/qinsf;
    Wambiente=RungeKuttaH(tempo,Wamb,h,qinsf,Gv,Winsf,V);
    tempo=tempo+h;
    Wamb=Wambiente;
    W(i)=Wambiente;
    t(i)=tempo;
end
w = W/1.2; % passar para g H2O/kg ar
wmed=mean(w(nint*0.75:nint)); % Calcular humidade média do último 1/4 de tempo
Ts=Tsatur(wmed); % Calculo da temperatura de saturação correspondente
% Cálculo do ponto de condensação
Tintisol=Tinttot(Tambint,Ltot,ri,hi,Qdiss);
Toutisol=Touttot(Tdeep,Ltot,re,rint,kcasco,Qdiss);
DT=Tintisol-Toutisol;
dt=Tintisol-Ts;
if Toutisol>=Tintisol
    p=0;
elseif Ts>=Tintisol
    p=50;
elseif dt>=DT
    p=0;
else
    x=dt/DT;
    p=1000*eisol*(1-x);
end

```

```

ponto_isolamento(v,Tsup)=p;
profundidade(v,Tsup)=D;
temperatura_superficie(v,Tsup)=Tsup;
end
end
%passar dados para colunas únicas
ponto_isolamento=ponto_isolamento';
ponto_isolamento=ponto_isolamento(:);
ponto_isolamento=flipud(ponto_isolamento);
temperatura_superficie=temperatura_superficie';
temperatura_superficie=temperatura_superficie(:);
profundidade=profundidade';
profundidade=profundidade(:);
%construir superfície interpoladora
%P=[temperatura_superficie profundidade];
F=scatteredInterpolant(temperatura_superficie,profundidade,ponto_isolamento); %Superfície
interpoladora
x=(0:1:30);
y=(0:5:150);
f=zeros(length(x),length(y));
for i=1:31
for j=1:31
f(i,j)=F(x(i),y(j));
end
end
surf(x,y,f)
title('Variação do Ponto de Condensação')
xlabel('Temperatura à Superfície (°C)')
ylabel('Profundidade (m)')
zlabel('Ponto de Condensação (mm)')
oldcmap = colormap;
colormap( flipud(oldcmap) );

```

Algoritmo Superfície_Total_Arrefec_Desum_Global

```
clc
clear
global h V qcic qtcc qacc Qacc Qtcc Qcic Gacc Gtcc Gcic Gcat Tambint eisol hi kisol kcasco Di
ecasco Ltot Dmax Tsupmax;
disp('Avaliação da evolução semanal de humidade no submarino');
hi=7; %Coeficiente de convecção no interior
kisol=0.04; %Condutividade térmica do isolamento
kcasco=50; %Condutividade térmica do casco (aço)
Di=6.3; %Diâmetro do submarino
Ltot=35.4; %Comprimento total do conjunto alojamentos-cic-tcc
eisol=0.05; %Espessura do isolamento
ecasco=0.03; %Espessura do casco de aço
re=Di/2; %Raio exterior do submarino
rint=re-ecasco; %Raio intermédio (superfície entre o isolamento e o casco resistente de aço)
ri=rint-eisol; %Raio interior
Dmax=150; %Profundidade máxima (m)
Tsupmax=30; %Temperatura de superfície máxima (°C)
ponto_isolamento=zeros(Dmax,Tsupmax);
profundidade=zeros(Dmax,Tsupmax);
temperatura_superfície=zeros(Dmax,Tsupmax);
Tambint = 24; %Temperatura ambiente interior (°C)
qcic = 1900;
qtcc = 2460;
qacc = 2260;
qinsf = qacc+qcic+qtcc; %Caudal volúmico de insuflação (m3/h)
V = 772.38; %Volume do espaço (m3)
h = 0.1; %Intervalo tempo de integração h (15 minutos)
Tempoinic = 1;
Tempofinal = 168; %Tempo de integração total
Tempo = Tempofinal - Tempoinic + 1; %168 horas (7 dias)
nint = floor(Tempo/h); %Número total de intervalos
Wamb = 11.4; %Humidade inicial (24°C/50%) em gH2O/m3ar (considerando densidade do ar
1,2 kg/m3)
tempo = 0.0; %Tempo inicial
```

```

%Geração de vapor no interior - Alojamentos e resto do submarino (g/h)
Gcat = 74.61; %Consideram-se 19 catalisadores adicionais aos considerados nos alojamentos
Gtcc = 441.70; %Consideram-se 5 pessoas no TCC
Gcic = 530.04; %Consideram-se 6 pessoas no CIC
Gacc = [1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639
996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190
2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638
1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639 996 4043 4649
6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146
4625 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638
1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323 2829 1639
1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829
1639 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086
2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105];
%Geração de calor sensível nos alojamentos - CIC, TCC e Alojamentos (W)
Qcic = 5351; %aproximação da carga máxima verificada no CIC
Qtcc = 6512; %aproximação da carga máxima verificada no TCC
Qacc = 8500;
W=zeros(1,nint);
t=zeros(1,nint);
for v=1:Dmax
for Tsup = 1:Tsupmax % Temperatura da água à superfície (°C)
    D=v; %Profundidade (m)
    Tdeep=Tprof(Tsup,D); % Cálculo da temperatura em à profundidade D
    Qdiss = Qperdatot(Tambint,Ltot,Tdeep,ri,hi,rint,kisol,re,kcasco); % calor perdido pelo isola-
mento (W)
% Cálculo da equação diferencial
for i=1:nint
    j=ceil(i*h);
    Gv =Gacc(j)+Gcic+Gtcc+Gcat;
    Qs=Qacc+Qtcc+Qcic-Qdiss;
    Winsfacc = Wbatacc(Qs,Wamb); % Resposta da bateria dos alojamentos
    Winsfcic = Wbateic (Qs,Wamb); % Resposta da bateria do CIC
    Winsftcc = Wbatcc (Qs,Wamb); % Resposta da bateria do TCC
    Winsf = ((qacc*Winsfacc)+(qcic*Winsfcic)+(qtcc*Winsftcc))/qinsf;

```

```

Wambiente=RungeKuttaH(tempo,Wamb,h,qinsf,Gv,Winsf,V);
tempo=tempo+h;
Wamb=Wambiente;
W(i)=Wambiente;
t(i)=tempo;
end
w = W/1.2; % passar para g H2O/kg ar
wmed=mean(w(nint*0.75:nint)); % Calcular humidade média do último 1/4 de tempo
Ts=Tsatur(wmed); % Calculo da temperatura de saturação correspondente
% Cálculo do ponto de condensação
Tintisol=Tinttot(Tambint,Ltot,ri,hi,Qdiss);
Toutisol=Touttot(Tdeep,Ltot,re,rint,kcasco,Qdiss);
DT=Tintisol-Toutisol;
dt=Tintisol-Ts;
if Toutisol>=Tintisol
    p=0;
elseif Ts>=Tintisol
    p=50;
elseif dt>=DT
    p=0;
else
    x=dt/DT;
    p=1000*eisol*(1-x);
end
ponto_isolamento(v,Tsup)=p;
profundidade(v,Tsup)=D;
temperatura_superficie(v,Tsup)=Tsup;
end
end
% passar dados para colunas únicas
ponto_isolamento=ponto_isolamento';
ponto_isolamento=ponto_isolamento(:);
ponto_isolamento=flipud(ponto_isolamento);
temperatura_superficie=temperatura_superficie';
temperatura_superficie=temperatura_superficie(:);

```

```

profundidade=profundidade';
profundidade=profundidade(:);
%construir superfície interpoladora
%P=[temperatura_superficie profundidade];
F=scatteredInterpolant(temperatura_superficie,profundidade,ponto_isolamento); %Superfície
interpoladora
x=(0:1:30);
y=(0:5:150);
f=zeros(length(x),length(y));
for i=1:31
for j=1:31
f(i,j)=F(x(i),y(j));
end
end
surf(x,y,f)
title('Variação do Ponto de Condensação')
xlabel('Temperatura à Superfície (°C)')
ylabel('Profundidade (m)')
zlabel('Ponto de Condensação (mm)')
oldcmap = colormap;
colormap( flipud(oldcmap) );

```

Algoritmo Superfície_Total_Arrefec_Desum_Parcial_Barreira

```
clc
clear
global h V qcic qtcc qacc Qacc Qtcc Qcic Gacc Gtcc Gcic Gcat Tambint eisol hi kisol kcasco Di
ecasco Ltot Dmax Tsupmax;
disp('Avaliação da evolução semanal de humidade no submarino');
Barreira=30; % Distância da barreira de vapor ao casco resistente (mm)
hi=7; % Coeficiente de convecção no interior
kisol=0.04; % Condutividade térmica do isolamento
kcasco=50; % Condutividade térmica do casco (aço)
Di=6.3; % Diâmetro do submarino
Ltot=35.4; % Comprimento total do conjunto alojamentos-cic-tcc
eisol=0.05; % Espessura do isolamento
ecasco=0.03; % Espessura do casco de aço
re=Di/2; % Raio exterior do submarino
rint=re-ecasco; % Raio intermédio (superfície entre o isolamento e o casco resistente de aço)
ri=rint-eisol; % Raio interior
Dmax=150; % Profundidade máxima (m)
Tsupmax=30; % Temperatura de superfície máxima (°C)
ponto_isolamento=zeros(Dmax,Tsupmax);
profundidade=zeros(Dmax,Tsupmax);
temperatura_superficie=zeros(Dmax,Tsupmax);
Tambint = 24; % Temperatura ambiente interior (°C)
qcic = 1900;
qtcc = 2460;
qacc = 2260;
qinsf = qacc+qcic+qtcc; % Caudal volúmico de insuflação (m3/h)
V = 772.38; % Volume do espaço (m3)
h = 0.1; % Intervalo tempo de integração
Tempoinic = 1;
Tempofinal = 168; % Tempo de integração total
Tempo = Tempofinal - Tempoinic + 1; % 168 horas (7 dias)
nint = floor(Tempo/h); % Número total de intervalos
Wamb = 11.4; % Humidade inicial (24°C/50%) em gH2O/m3ar (considerando densidade do ar
1,2 kg/m3)
```

```

tempo = 0.0; %Tempo inicial
%Geração de vapor no interior - Alojamentos e resto do submarino (g/h)
Gcat = 74.61; %Consideram-se 19 catalisadores adicionais aos considerados nos alojamentos
Gtcc = 441.70; %Consideram-se 5 pessoas no TCC
Gcic = 530.04; %Consideram-se 6 pessoas no CIC
Gacc = [1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639
996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190
2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638
1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639 996 4043 4649
6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146
4625 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638
1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323 2829 1639
1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086 2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829
1639 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105 1638 1638 1241 1638 1638 1241 2086
2190 2190 1881 4146 4625 5875 2829 1639 996 4043 4649 6323 2829 1639 1292 1563 1105];
%Geração de calor sensível nos alojamentos - CIC, TCC e Alojamentos (W)
Qcic = 1759; %aproximação da carga máxima verificada no CIC
Qtcc = 2141; %aproximação da carga máxima verificada no TCC
Qacc = 8500;
W=zeros(1,nint);
t=zeros(1,nint);
for v=1:Dmax
for Tsup = 1:Tsupmax %Temperatura da água à superfície (°C)
    D=v; %Profundidade (m)
    Tdeep=Tprof(Tsup,D); %Cálculo da temperatura em à profundidade D
    Qdiss = Qperdatot(Tambint,Ltot,Tdeep,ri,hi,rint,kisol,re,kcasco); %calor perdido pelo isola-
mento (W)
% Cálculo da equação diferencial
for i=1:nint
    j=ceil(i*h);
    Gv =Gacc(j)+Gcic+Gtcc+Gcat;
    Qs=Qacc+Qtcc+Qcic-Qdiss;
    Winsfacc = Wbatacc(Qs,Wamb); %Resposta da bateria dos alojamentos
    Winsfcic = Wbatcic (Qs,Wamb); %Resposta da bateria do CIC
    Winsftcc = Wbatfcc (Qs,Wamb); %Resposta da bateria do TCC

```

```

Winsf = ((qacc*Winsfacc)+(qcic*Winsfcic)+(qtcc*Winsftcc))/qinsf;
Wambiente=RungeKuttaH(tempo,Wamb,h,qinsf,Gv,Winsf,V);
tempo=tempo+h;
Wamb=Wambiente;
W(i)=Wambiente;
t(i)=tempo;
end
w = W/1.2; %passar para g H2O/kg ar
wmed=mean(w(nint*0.75:nint)); %Calcular humidade média do último 1/4 de tempo
Ts=Tsatur(wmed); %Calculo da temperatura de saturação correspondente
% Cálculo do ponto de condensação
Tintisol=Tinttot(Tambint,Ltot,ri,hi,Qdiss);
Toutisol=Touttot(Tdeep,Ltot,re,rint,kcasco,Qdiss);
DT=Tintisol-Toutisol;
dt=Tintisol-Ts;
if Toutisol>=Tintisol
    p=0;
elseif Ts>=Tintisol
    p=50;
elseif dt>=DT
    p=0;
else
    x=dt/DT;
    p=1000*eisol*(1-x);
end
%barreira de Vapor
if p<Barreira
    p=0;
end
ponto_isolamento(v,Tsup)=p;
profundidade(v,Tsup)=D;
temperatura_superficie(v,Tsup)=Tsup;
end
end
%passar dados para colunas únicas

```

```

ponto_isolamento=ponto_isolamento';
ponto_isolamento=ponto_isolamento(:);
ponto_isolamento=flipud(ponto_isolamento);
temperatura_superficie=temperatura_superficie';
temperatura_superficie=temperatura_superficie(:);
profundidade=profundidade';
profundidade=profundidade(:);
%construir superfície interpoladora
%P=[temperatura_superficie profundidade];
F=scatteredInterpolant(temperatura_superficie,profundidade,ponto_isolamento); %Superfície
interpoladora
x=(0:1:30);
y=(0:5:150);
f=zeros(length(x),length(y));
for i=1:31
for j=1:31
f(i,j)=F(x(i),y(j));
end
end
surf(x,y,f)
title('Variação do Ponto de Condensação')
xlabel('Temperatura à Superfície (°C)')
ylabel('Profundidade (m)')
zlabel('Ponto de Condensação (mm)')
oldcmap = colormap;
colormap( flipud(oldcmap) );

```

Função *RungeKuttaH*

```
function Wamb1 = RungeKuttaH(tempo,Wamb,h,qinsf,Gv,Winsf,V)
K1=fh(tempo,Wamb,qinsf,Gv,Winsf,V);
K2= fh(tempo+h/2,Wamb+h/2*K1,qinsf,Gv,Winsf,V);
K3= fh(tempo+h/2,Wamb+h/2*K2,qinsf,Gv,Winsf,V);
K4= fh(tempo+h, Wamb+h*K3,qinsf,Gv,Winsf,V);
Wamb1=Wamb + h/6*(K1+2*K2+2*K3+K4);
```

Função *fh*

% Equação diferencial da diluição de uma espécie adaptada à evolução da humidade no espaço

```
function dW = fh(tempo,Wamb,qinsf,Gv,Winsf,V)
dW=(1/V)*(qinsf*(Winsf-Wamb)+Gv);
```

Função *Wbatacc*

%Superfície interpoladora que relaciona o calor sensível no espaço e a humidade absoluta no ambiente com a humidade absoluta insuflada

%BATERIA DOS ALOJAMENTOS

```
function Hinsfacc = Wbatacc(Qs,Wamb)
qsenacc=[8320 8100 7710 6200 7730 7410 7100 5850 7070 6830 6400 5200 6520 6190 5720
4420]; % vector do calor sensível
hambacc=[9.3 9.3 9.3 9.3 11.2 11.2 11.2 11.2 13.2 13.2 13.2 13.2 15.1 15.1 15.1 15.1]; % vector
da humidade no ambiente
hambacc=hambacc*1.2; %Passar para gH2O/m3ar (considerando densidade do ar 1,2 kg/m3)
hinsfacc=[8.71 8.83 9.03 9.36 9.46 9.66 9.99 10.84 10.18 10.4 10.78 11.91 10.92 11.18 11.62
12.91]; % vector da humidade insuflada
hinsfacc=hinsfacc*1.2; %Passar para gH2O/m3ar (considerando densidade do ar 1,2 kg/m3)
Pacc=[qsenacc' hambacc']; %Passar os vectores para colunas
hinsfacc=hinsfacc';
Facc=scatteredInterpolant(Pacc,hinsfacc); %Superfície interpoladora
Hinsfacc=Facc(Qs,Wamb);
```

Função *Wbatcic*

%Superfície interpoladora que relaciona o calor sensível no espaço e a humidade absoluta no ambiente com a humidade absoluta insuflada

%BATERIA DO CIC

```
function Hinsfcic = Wbatcic(Qs,Wamb)
```

```
qsencic=[9630 9380 8820 7160 9300 8940 8150 6350 8900 8560 7700 5560 8680 8150 7180  
4950]; % vector do calor sensível
```

```
hambcic=[9.3 9.3 9.3 9.3 11.2 11.2 11.2 11.2 13.2 13.2 13.2 13.2 15.1 15.1 15.1 15.1]; % vector  
da humidade no ambiente
```

```
hambcic=hambcic*1.2; %Passar para gH2O/m3ar (considerando densidade do ar 1,2 kg/m3)
```

```
hinsfcic=[7.18 7.36 7.79 9.09 7.44 7.73 8.35 10.07 7.70 8.07 8.80 10.92 7.96 8.41 9.24 11.65];
```

```
% vector da humidade insuflada
```

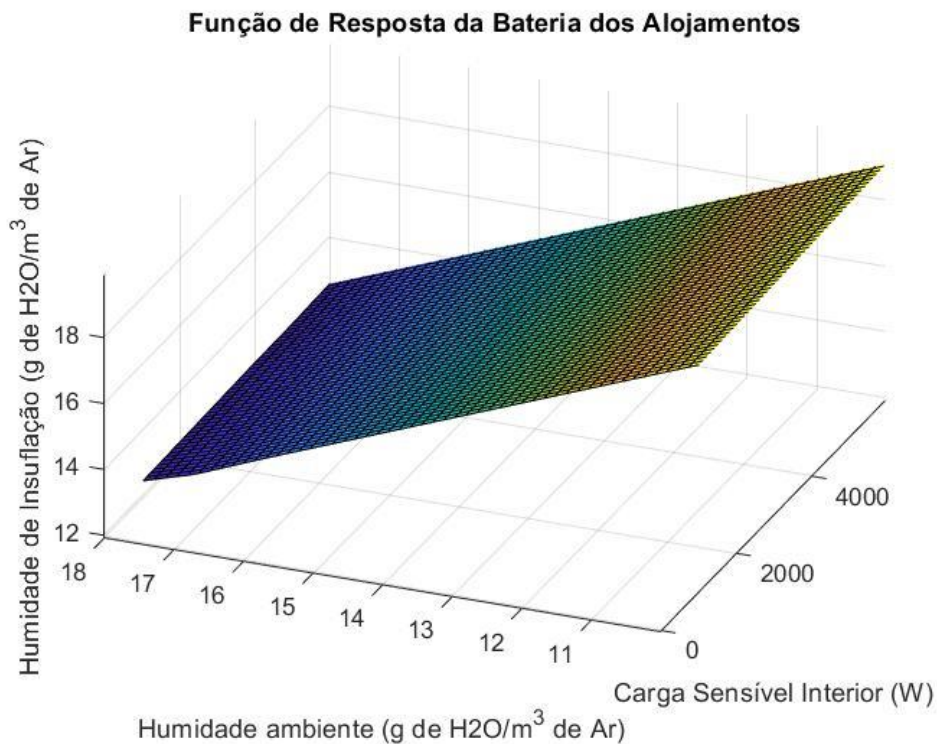
```
hinsfcic=hinsfcic*1.2; %Passar para gH2O/m3ar (considerando densidade do ar 1,2 kg/m3)
```

```
Pcic=[qsencic' hambcic']; %Passar os vectores para colunas
```

```
hinsfcic=hinsfcic';
```

```
Fcic=scatteredInterpolant(Pcic,hinsfcic); %Superfície interpoladora
```

```
Hinsfcic=Fcic(Qs,Wamb);
```



Função *Wbattcc*

%Superfície interpoladora que relaciona o calor sensível no espaço e a humidade absoluta no ambiente com a humidade absoluta insuflada

%BATERIA DO TCC

```
function Hinsftcc = Wbattcc(Qs,Wamb)
```

```
qsentcc=[11720 11400 10810 8290 11220 10760 9980 7380 10770 10130 9170 6620 10220  
9480 8540 5700]; % vector do calor sensível
```

```
hambtcc=[9.3 9.3 9.3 9.3 11.2 11.2 11.2 11.2 13.2 13.2 13.2 13.2 15.1 15.1 15.1 15.1]; % vector  
da humidade no ambiente
```

```
hambtcc=hambtcc*1.2; %Passar para gH2O/m3ar (considerando densidade do ar 1,2 kg/m3)
```

```
hinsftcc=[7.57 7.79 8.20 9.17 7.89 8.26 8.81 10.43 8.24 8.70 9.33 11.43 8.26 9.12 9.89 12.29];
```

```
% vector da humidade insuflada
```

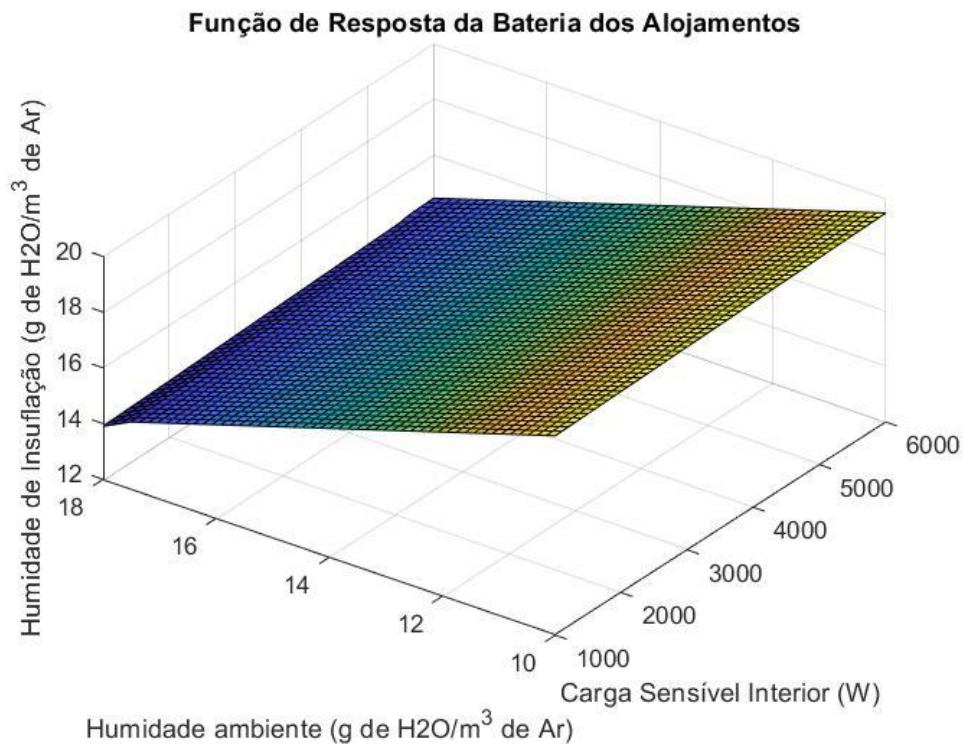
```
hinsftcc=hinsftcc*1.2; %Passar para gH2O/m3ar (considerando densidade do ar 1,2 kg/m3)
```

```
Ptcc=[qsentcc' hambtcc']; %Passar os vectores para colunas
```

```
hinsftcc=hinsftcc';
```

```
Ftcc=scatteredInterpolant(Ptcc,hinsftcc); %Superfície interpoladora
```

```
Hinsftcc=Ftcc(Qs,Wamb);
```



Função *Tbatacc*

```
%Superfície interpoladora que relaciona o calor sensível no espaço e a humidade absoluta no ambiente com a temperatura insuflada
%BATERIA DOS ALOJAMENTOS
function Tinsf=Tbatacc(Qs,Wamb)
qsen=[8320 8100 7710 6200 7730 7410 7100 5850 7070 6830 6400 5200 6520 6190 5720
4420]; % vector do calor sensível
hamb=[9.3 9.3 9.3 9.3 11.2 11.2 11.2 11.2 13.2 13.2 13.2 13.2 15.1 15.1 15.1 15.1]; % vector da humidade no ambiente
hamb=hamb*1.2; %Passar para gH2O/m3ar (considerando densidade do ar 1,2 kg/m3)
tinsf=[13.07 13.37 13.87 15.97 13.96 14.27 14.77 16.35 14.78 15.10 15.65 17.24 15.58 15.93
16.54 18.24]; % vector da temperatura insuflada
P=[qsen' hamb']; %Passar os vectores para colunas
tinsf=tinsf';
F=scatteredInterpolant(P,tinsf); %Superfície interpoladora
Tinsf=F(Qs,Wamb);
```

Função *Tsat*

```
function Ts=Tsat(wmed)
T=[-22.5 -15.2 -10.8 -7.5 -4.9 -2.8 -0.9 0.8 2.4 3.9 5.2 6.5 7.6 8.7 9.7 10.6 11.5 12.4 13.2 14.0
14.7 15.4 16.1 16.8 17.4 18.0 18.6 19.2 19.7 20.3 20.8 21.3 21.8 22.3 22.7 23.2 23.6 24.0 24.5
24.9];
H=(0.5:0.5:20);
F=griddedInterpolant(H,T);
Ts=F(wmed);
```

Função *Qperdaalaj*

```
%Cálculo do calor perdido no isolamento para os alojamentos
function Qradalaj=Qperdaalaj(Tambint,Lalaj,Tdeep,ri,hi,rint,kisol,re,kcasco)
%
Rrad=(1/(ri*hi))+(log(rint/ri)/kisol)+(log(re/rint)/kcasco);
Urad=1/Rrad;
Qradalaj=pi*Lalaj*Urad*(Tambint-Tdeep); % Cilindro inteiro de comprimento Ltot
```

Função *Qperdatot*

```
%Cálculo do calor perdido no isolamento para o submarino todo
function Qradtot=Qperdatot(Tambint,Ltot,Tdeep,ri,hi,rint,kisol,re,kcasco)
%
Rrad=(1/(ri*hi))+log(rint/ri)/kisol+log(re/rint)/kcasco);
Urad=1/Rrad;
Qradtot=2*pi*Ltot*Urad*(Tambint-Tdeep); %Cilindro inteiro de comprimento Ltot
```

Função *Tintaloj*

```
%Cálculo da temperatura no lado de dentro do isolamento
function Ti=Tintaloj(Tambint,L,ri,hi,Q)
%Cálculo da temperatura considerando um cilindro
Rrad=(1/(ri*hi));%+(log(rint/ri)/kisol)+log(re/rint)/kcasco);
Urad=1/Rrad;
Ti = Tambint-(Q/(pi*L*Urad));
```

Função *Tinttot*

```
%Cálculo da temperatura no lado de dentro do isolamento
function Ti=Tinttot(Tambint,L,ri,hi,Q)
%Cálculo da temperatura considerando um cilindro
Rrad=(1/(ri*hi));%+(log(rint/ri)/kisol)+log(re/rint)/kcasco);
Urad=1/Rrad;
Ti = Tambint-(Q/(2*pi*L*Urad));
```

Função *Toutaløj*

```
%Cálculo da temperatura no lado de fora do isolamento
function To=Toutaløj(Tdeep,L,re,rint,kcasco,Q)
%Cálculo da temperatura considerando um cilindro
Rrad=(log(re/rint))/kcasco;
Urad=1/Rrad;
To = Tdeep+(Q/(pi*L*Urad));
```

Função *Touttot*

```
%Cálculo da temperatura no lado de fora do isolamento
function To=Touttot(Tdeep,L,re,rint,kcasco,Q)
%Cálculo da temperatura considerando um cilindro
Rrad=(log(re/rint))/kcasco;
Urad=1/Rrad;
To = Tdeep+(Q/(2*pi*L*Urad));
```

Função *Tprof*

```
function Tdeep=Tprof(Tsup,D)
Tdeep = fT(Tsup,D);
```

Função *fT*

```
function T=fT(Ts,D)
S=Ts+.338;
T=-.338 + ( S*(fD(D)) / (.0001485*(S)*D + (fD(D))) );
```

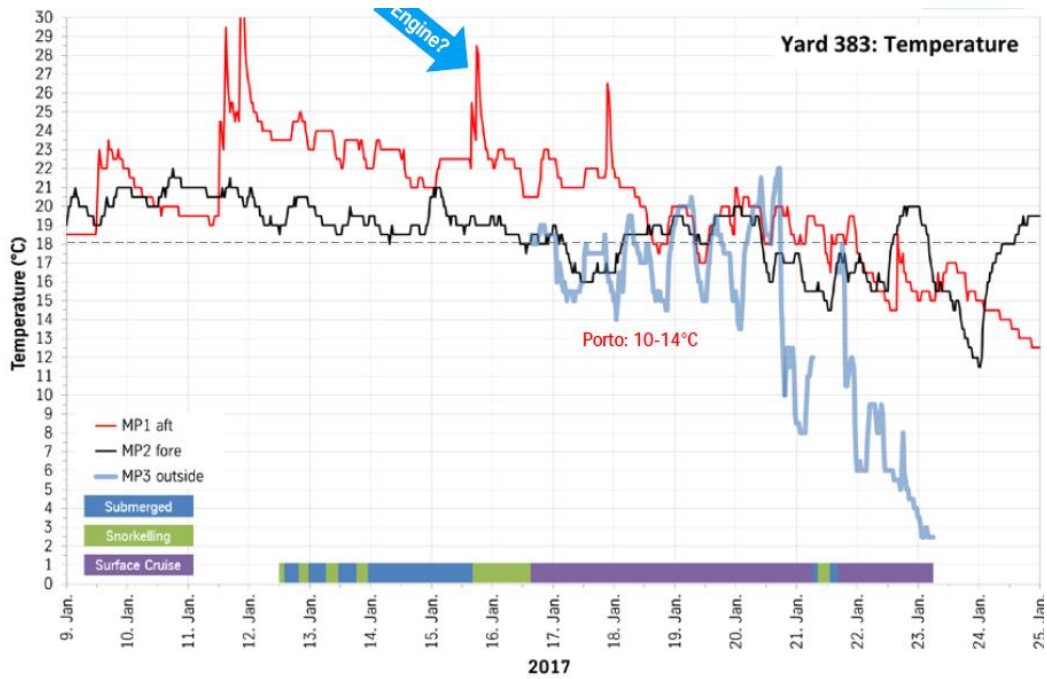
Função *fD*

```
function F=fD(D)
F=1+exp(-.016*D + 1.244);
```

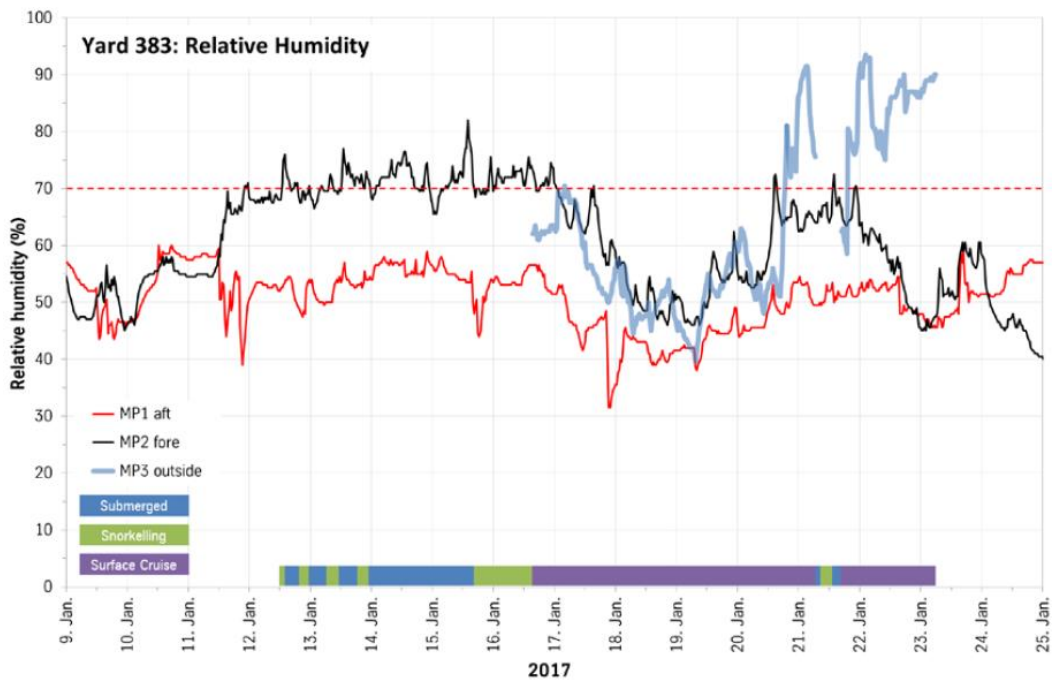

ANEXOS

Anexo 1 – Evoluções Medidas pela Thyssenkrupp

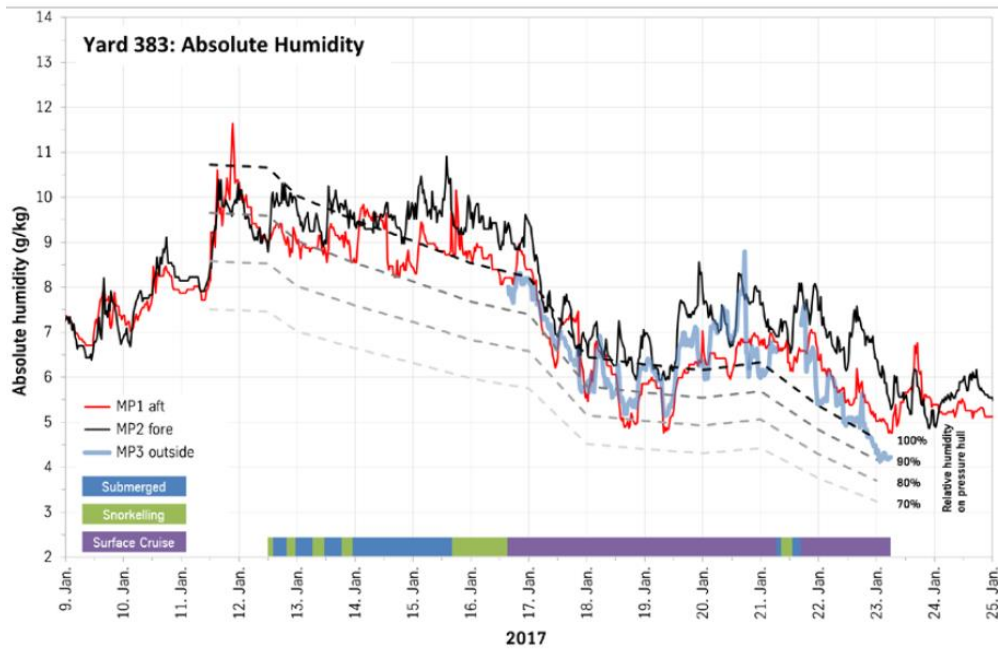
(Temperatura)



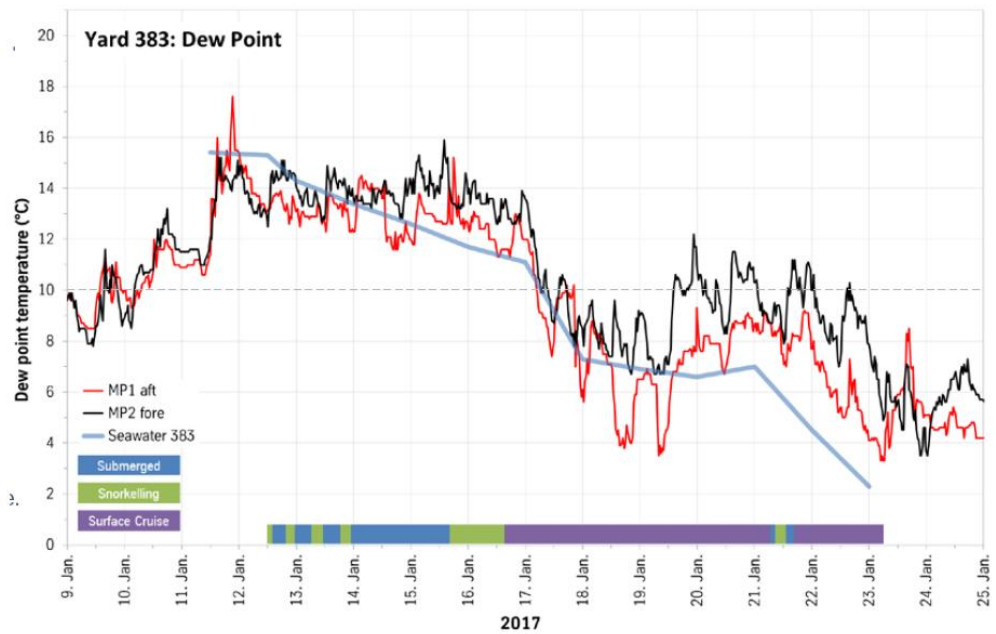
(Humidade relativa)



(Humidade absoluta)



(Temperatura no ponto de orvalho)



Anexo 2 – Diagrama Psicrométrico

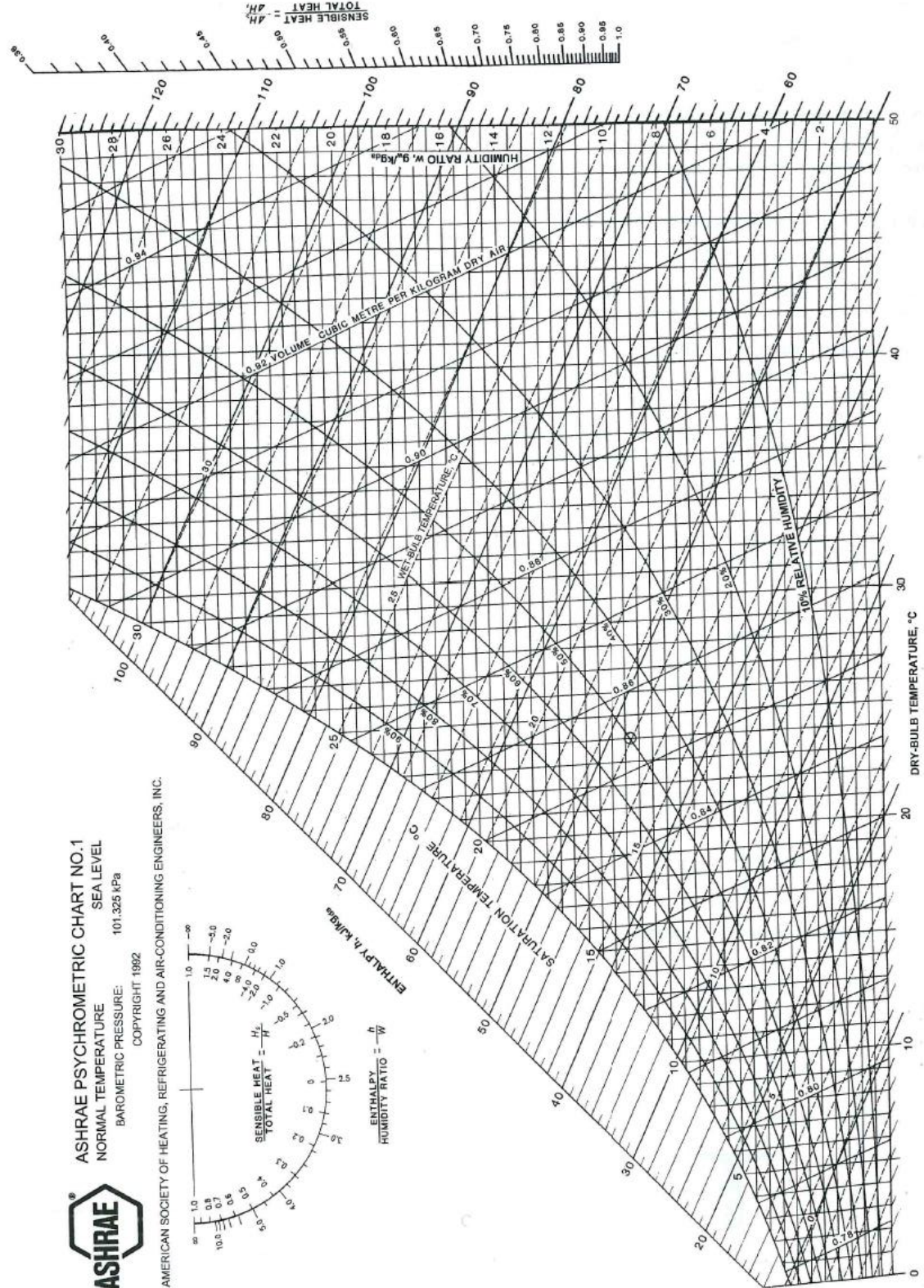


Fig. 1 ASHRAE Psychrometric Chart No. 1

Anexo 3 – Modelo de Resposta das Baterias de Arrefecimento

Bateria dos Alojamentos

(50% de humidade relativa no ambiente)

Caudal de água [l/s]	Temperatura da água à saída da bateria [°C]	Potência Total [kW]	Potência Sensível [kW]	Temperatura do ar à saída da bateria [°C]	Humidade relativa do ar à saída da bateria (%)	Humidade absoluta do ar à saída da bateria (g H ₂ O/kg Ar)
1,19	7,94	9,68	8,32	13,07	92,60	8,71
0,89	8,46	9,21	8,10	13,37	92,10	8,83
0,60	9,36	8,47	7,71	13,87	91,10	9,03
0,30	10,92	6,20	6,20	15,97	82,40	9,36

(60% de humidade relativa no ambiente)

Caudal de água [l/s]	Temperatura da água à saída da bateria [°C]	Potência Total [kW]	Potência Sensível [kW]	Temperatura do ar à saída da bateria [°C]	Humidade relativa do ar à saída da bateria	Humidade absoluta do ar à saída da bateria
1,19	8,24	11,21	7,73	13,96	94,80	9,46
0,89	8,83	10,58	7,41	14,27	94,90	9,66
0,60	9,80	9,59	7,10	14,77	94,90	9,99
0,30	11,33	6,72	5,85	16,35	93,00	10,84

(70% de humidade relativa no ambiente)

Caudal de água [l/s]	Temperatura da água à saída da bateria [°C]	Potência Total [kW]	Potência Sensível [kW]	Temperatura do ar à saída da bateria [°C]	Humidade relativa do ar à saída da bateria	Humidade absoluta do ar à saída da bateria
1,19	8,57	12,85	7,07	14,78	96,70	10,18
0,89	9,26	12,20	6,83	15,10	96,70	10,40
0,60	10,38	11,04	6,40	15,65	96,70	10,78
0,30	12,07	7,64	5,20	17,24	96,40	11,91

(80% de humidade relativa no ambiente)

Caudal de água [l/s]	Temperatura da água à saída da bateria [°C]	Potência Total [kW]	Potência Sensível [kW]	Temperatura do ar à saída da bateria [°C]	Humidade relativa do ar à saída da bateria	Humidade absoluta do ar à saída da bateria
1,19	8,90	14,49	6,52	15,58	98,40	10,92
0,89	9,68	13,76	6,19	15,93	98,40	11,18
0,60	10,94	12,40	5,72	16,54	98,30	11,62
0,30	12,87	8,66	4,42	18,24	97,90	12,91

Bateria do TCC

(50% de humidade relativa no ambiente)

Caudal de água [l/s]	Temperatura da água à saída da bateria [°C]	Potência Total [kW]	Potência Sensível [kW]	Temperatura do ar à saída da bateria [°C]	Humidade relativa do ar à saída da bateria	Humidade absoluta do ar à saída da bateria
0,72	11,35	15,63	11,72	9,82	100,00	7,57
0,54	12,75	14,80	11,40	10,25	100,00	7,79
0,36	15,13	13,35	10,81	11,00	100,00	8,20
0,18	17,95	8,73	8,29	14,07	91,30	9,17

(60% de humidade relativa no ambiente)

Caudal de água [l/s]	Temperatura da água à saída da bateria [°C]	Potência Total [kW]	Potência Sensível [kW]	Temperatura do ar à saída da bateria [°C]	Humidade relativa do ar à saída da bateria	Humidade absoluta do ar à saída da bateria
0,72	12,29	18,40	11,22	10,44	100,00	7,89
0,54	13,79	17,08	10,76	11,11	100,00	8,26
0,36	16,34	15,12	9,98	12,08	100,00	8,81
0,18	18,63	9,23	7,38	15,08	97,10	10,43

(70% de humidade relativa no ambiente)

Caudal de água [l/s]	Temperatura da água à saída da bateria [°C]	Potência Total [kW]	Potência Sensível [kW]	Temperatura do ar à saída da bateria [°C]	Humidade relativa do ar à saída da bateria	Humidade absoluta do ar à saída da bateria
0,72	13,22	21,11	10,77	11,08	100,00	8,24
0,54	14,89	19,49	10,13	11,89	100,00	8,70
0,36	17,84	17,30	9,17	12,94	100,00	9,33
0,18	20,16	10,35	6,62	16,03	100,00	11,43

(80% de humidade relativa no ambiente)

Caudal de água [l/s]	Temperatura da água à saída da bateria [°C]	Potência Total [kW]	Potência Sensível [kW]	Temperatura do ar à saída da bateria [°C]	Humidade relativa do ar à saída da bateria	Humidade absoluta do ar à saída da bateria
0,72	14,13	23,77	10,22	11,75	100,00	8,26
0,54	16,05	22,04	9,48	12,59	100,00	9,12
0,36	19,29	19,42	8,54	13,81	100,00	9,89
0,18	21,92	11,63	5,70	17,14	100,00	12,29

Bateria do CIC

(50% de humidade relativa no ambiente)

Caudal de água [l/s]	Temperatura da água à saída da bateria [°C]	Potência Total [kW]	Potência Sensível [kW]	Temperatura do ar à saída da bateria [°C]	Humidade relativa do ar à saída da bateria	Humidade absoluta à saída da bateria
0,75	10,33	13,19	9,63	9,04	100,00	7,18
0,56	11,58	12,68	9,38	9,40	100,00	7,36
0,38	13,42	11,45	8,82	10,24	100,00	7,79
0,19	15,99	7,70	7,16	12,82	98,20	9,09

(60% de humidade relativa no ambiente)

Caudal de água [l/s]	Temperatura da água à saída da bateria [°C]	Potência Total [kW]	Potência Sensível [kW]	Temperatura do ar à saída da bateria [°C]	Humidade relativa do ar à saída da bateria	Humidade absoluta à saída da bateria
0,75	11,09	15,50	9,30	9,56	100,00	7,44
0,56	12,44	14,65	8,94	10,14	100,00	7,73
0,38	14,39	12,94	8,15	11,27	100,00	8,35
0,19	16,84	8,36	6,35	14,09	100,00	10,07

(70% de humidade relativa no ambiente)

Caudal de água [l/s]	Temperatura da água à saída da bateria [°C]	Potência Total [kW]	Potência Sensível [kW]	Temperatura do ar à saída da bateria [°C]	Humidade relativa do ar à saída da bateria	Humidade absoluta à saída da bateria
0,75	11,85	17,81	8,90	10,08	100,00	7,70
0,56	13,38	16,79	8,56	10,77	100,00	8,07
0,38	15,59	14,80	7,70	12,05	100,00	8,80
0,19	18,01	9,26	5,56	15,33	100,00	10,92

(80% de humidade relativa no ambiente)

Caudal de água [l/s]	Temperatura da água à saída da bateria [°C]	Potência Total [kW]	Potência Sensível [kW]	Temperatura do ar à saída da bateria [°C]	Humidade relativa do ar à saída da bateria	Humidade absoluta à saída da bateria
0,75	12,63	20,18	8,68	10,57	100,00	7,96
0,56	14,33	18,95	8,15	11,38	100,00	8,41
0,38	16,82	16,69	7,18	12,79	100,00	9,24
0,19	19,67	10,54	4,95	16,32	100,00	11,65