



Instituto Politécnico
de Castelo Branco
Escola Superior
de Tecnologia

Aplicação de ferramenta de simulação dinâmica para o estudo das cargas térmicas e consumos energéticos de um edifício

David José Navalho João

Orientador

Prof. Adjunto Luís P. C. Neto, PhD

Trabalho de Projeto apresentado à Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco, no âmbito da unidade curricular de Estágio / Projeto do 3º ano do curso de licenciatura em Engenharia e Gestão Industrial, para cumprimento dos requisitos obrigatórios de avaliação.

Setembro 2024

Composição do júri

Presidente do júri:

Luís Paulo Coelho Neto

Professor Adjunto, Escola Superior de Tecnologia de Castelo Branco

Arguentes:

Telma Marques e Antunes

Eng^a Industrial, CIVILCHECK, Atividades de Engenharia, Lda.

Paulo Jorge Sequeira Gonçalves

Professor Coordenador, Escola Superior de Tecnologia de Castelo Branco

Arguente Suplente:

Flávio Rodrigues Fernandes Chaves

Professor Adjunto, Escola Superior de Tecnologia de Abrantes, Instituto Politécnico de Tomar

Agradecimentos

Primeiramente quero agradecer à minha família e amigos, por todo o apoio incondicional que sempre me transmitiram, para que eu pudesse atingir os meus objetivos e concretizar os meus sonhos.

Ao Professor Orientador Luís Paulo Coelho Neto, gostaria de dirigir os meus sinceros agradecimentos pela sabedoria e conhecimentos partilhados, assim como, todo o apoio e constante disponibilidade que me prestou durante a realização e elaboração do presente projeto.

Por fim, um agradecimento especial ao Eng. José Luis Moura Prescription Manager da Carrier Portugal, pela cedência gratuita da licença do HAP versão 5.1.1.

Resumo

Esta dissertação aborda detalhadamente o comportamento térmico dos edifícios, com um foco especial na utilização de simulação dinâmica para otimizar o desempenho dos sistemas de climatização.

Inicialmente o projeto é contextualizado, identificando-se a motivação que o impulsionou e definindo-se os objetivos principais a alcançar, além de se fornecer uma visão geral da organização do trabalho.

São explorados os processos de transferência de calor, como condução, convecção e radiação, destacando-se a importância do coeficiente de transmissão térmica e da inércia térmica na avaliação do desempenho energético dos edifícios. Adicionalmente, são discutidos os ganhos térmicos e o conforto térmico, estabelecendo uma base teórica robusta para a aplicação da simulação dinâmica.

O edifício em estudo é caracterizado de forma minuciosa, com uma análise dos seus ganhos internos e dos perfis de utilização. Este estudo é implementado utilizando o Hourly Analysis Program (HAP), um software especializado que permite efetuar o cálculo de cargas térmicas e simulações de consumos de energia detalhadas.

As diferentes etapas da simulação, desde a consideração das condições climáticas até à definição dos sistemas e das propriedades da instalação, são descritas e configuradas com precisão. Estas análises proporcionam uma visão comparativa do desempenho térmico em diferentes cenários, permitindo uma avaliação precisa das necessidades de climatização.

A conclusão do estudo sintetiza os principais resultados, avaliando o desenvolvimento do projeto em relação aos objetivos estabelecidos inicialmente. São discutidas as dificuldades e limitações encontradas ao longo do estudo.

Este trabalho constitui uma contribuição significativa para a compreensão do comportamento térmico nos edifícios e para a aplicação da simulação dinâmica como ferramenta de otimização energética.

Palavras-chave

Cargas Térmicas, Simulação Dinâmica Detalhada, HAP

Abstract

This dissertation provides a detailed analysis of the thermal behavior of buildings, with a particular focus on the use of dynamic simulation to optimize the performance of HVAC systems.

Initially, the project is contextualized by identifying the motivation behind it and defining the main objectives to be achieved, as well as offering an overview of the structure of the work.

The heat transfer processes, such as conduction, convection, and radiation, are explored, with an emphasis on the importance of thermal transmittance and thermal inertia in the evaluation of a building's energy performance. Additionally, thermal gains and thermal comfort are discussed, providing a robust theoretical foundation for the application of dynamic simulation.

The building under study is meticulously characterized, with an analysis of its internal gains and usage profiles. This study is implemented using the Hourly Analysis Program (HAP), a specialized software that enables detailed thermal load calculations and energy consumption simulations.

The different stages of the simulation, from consideration of climatic conditions to the definition of systems and properties of the installation, are described and configured with precision. These analyses provide a comparative view of thermal performance in different scenarios, allowing for an accurate assessment of HVAC requirements.

The study's conclusion synthesizes the main results, evaluating the project's development in relation to the initially established objectives. The difficulties and limitations encountered throughout the study are also discussed.

This work represents a significant contribution to the understanding of thermal behavior in buildings and the application of dynamic simulation as an energy optimization tool.

Keywords

Thermal Loads, Detailed Dynamic Simulation, HAP

Índice geral

1. Introdução	2
1.1. Introdução ao projeto	2
1.2. Contexto e motivação.....	2
1.3. Objetivos	3
1.4. Estrutura do Relatório.....	4
2. Comportamento Térmico e Energético nos Edifícios	6
2.1. Processos de transferência de calor	6
Condução	6
Convecção.....	7
Radiação.....	10
2.2. Coeficiente de transmissão térmica	12
Resistência térmica.....	12
Coeficiente global de transmissão de calor de uma parede.....	15
Inércia térmica.....	19
2.3. Ganhos térmicos nos edifícios	19
2.4. Conforto térmico.....	20
2.5. Simulação dinâmica de edifícios.....	22
2.6. HAP – Hourly Analysis Program	24
WEATHER	26
PROJECT LIBRARIES	27
SPACES	28
SYSTEMS.....	30
PLANT PROPERTIES	31
BUILDINGS	32
3. Caso de Estudo.....	35
3.1. Caracterização do Edifício.....	36
3.2. Ganhos internos	42
3.3. Perfis de utilização	42
3.4. Aplicação do estudo no Hourly Analysis Program	43
WEATHER.....	43

PROJECT LIBRARIES	45
SPACES.....	55
SYSTEMS	59
4. Simulações	63
4.1. Primeira simulação - Gabinete C3	63
4.2. Segunda simulação - Laboratório C4.....	66
4.3. Terceira simulação - Laboratório C7.....	68
4.4. Quarta simulação - Laboratório C11/C12/C13.....	70
4.5. Comparação das Simulações	73
5. Conclusão	77
5.1. Resumo do trabalho realizado.....	77
5.2. Evolução temporal do trabalho.....	77
5.3. Apreciação do trabalho desenvolvido face aos objetivos previamente definidos.....	78
5.4. Dificuldades e Limitações.....	78
5.5. Melhorias e perspetivas futuras.....	78
Referências bibliográficas	79

Índice de Figuras

Figura 1: Transmissão de calor por condução em um paralelepípedo com espessura L e diferentes temperaturas entre as duas faces.	6
Figura 2: Transmissão de calor por convecção: esq.) $T_p > T_\infty$; dir.) $T_\infty > T_p$	8
Figura 3: Transmissão de calor por convecção natural em componentes quentes.	8
Figura 4: Transmissão de calor por convecção forçada pela ventoinha em componentes quentes.....	8
Figura 5: Casos especiais de convecção: a) Ebulição, b) Condensação.....	9
Figura 6: Troca de calor por radiação.	11
Figura 7: Resistência térmica por condução.....	12
Figura 8: Resistência térmica por convecção	13
Figura 9: Ecrã inicial do software HAP versão 5.11.....	25
Figura 10: Estrutura de menus do software HAP.....	25
Figura 11: Menu Weather do software HAP.....	26
Figura 12: Menu Project Libraries do software HAP.....	27
Figura 13: Menu Spaces do software HAP.....	29
Figura 14: Menu SYSTEMS do software HAP.....	30
Figura 15: Menu PLANT PROPERTIES do software HAP.....	31
Figura 16: Tipos de centrais de água gelada, água quente e vapor disponíveis no software HAP.....	32
Figura 17: Menu Buildings do software HAP.....	32
Figura 18: NUTS III - Unidades territoriais para fins estatísticos de Portugal.	36
Figura 19: Enquadramento geográfico do município de Castelo Branco.	36
Figura 20 - Bloco C da Escola Superior de Tecnologia de Castelo Branco.....	37
Figura 21: Orientação e identificação dos edifícios da ESTCB.....	37
Figura 22: Planta do piso 0 do Bloco C da ESTCB.	38
Figura 23: Planta do piso 1 do Bloco C da ESTCB.	38
Figura 24: Alguns dos equipamentos existentes no Laboratório C1.....	39
Figura 25: Alguns dos equipamentos existentes no Laboratório C2.....	39
Figura 26: Exemplos de equipamentos existentes no Laboratório C3.	39
Figura 27: Equipamentos existentes no Laboratório C4.....	40

Figura 28: Equipamentos existentes nos laboratórios do Piso 1.....	40
Figura 29: Características gerais de arquitetura do Piso 0.....	41
Figura 30: Características gerais de arquitetura do Piso 1.....	41
Figura 31: Estrutura de menus do PROJETO no software HAP.	43
Figura 32: Menu WEATHER do PROJETO no software HAP.	44
Figura 33: Folha i016522.xlsx da Direção-Geral de Energia e Geologia.....	44
Figura 34: Aba SIMULATION weather do software HAP.	45
Figura 35: Submenus do menu PROJECT LIBRARIES.....	46
Figura 36: Horário fracionário criado no software HAP.	46
Figura 37: Horário criado para ventilador/termostato no software HAP.....	47
Figura 38: Trocas de energia sob a forma de calor entre o interior e o exterior no Piso 0.....	47
Figura 39: Trocas de energia sob a forma de calor entre o interior e o exterior no Piso 1.....	48
Figura 40: Dados construtivos das paredes exteriores.....	48
Figura 41: Dados construtivos das paredes interiores.	49
Figura 42: Dados construtivos da cobertura.....	49
Figura 43: Dados construtivos da laje entre pisos.....	50
Figura 44: Dados construtivos da laje térrea.....	50
Figura 45: Janela quadrada criada no software HAP.	51
Figura 46: Janela simples criada no software HAP.....	51
Figura 47: Janela dupla criada no software HAP.	52
Figura 48: Tipo de porta criada no software HAP.....	52
Figura 49: Palas sombreadoras criadas no software HAP.....	53
Figura 50: Sombra criada no software HAP.	53
Figura 51: Chiller que produz água refrigerada para o Bloco C e Bloco D.....	54
Figura 52: Caldeiras que produzem água quente para o Bloco C e Bloco D.....	54
Figura 53: Spaces criados no software HAP.....	55
Figura 54: Spaces Properties, aba General no software HAP.	56
Figura 55: Spaces Properties, aba Internals no software HAP.....	56
Figura 56: Spaces Properties, aba Walls, Windows, Doors no software HAP.	57
Figura 57: Spaces Properties, aba Walls, Windows, Doors no software HAP.	58

Figura 58: Spaces Properties, aba Floors no software HAP.....	58
Figura 59: Spaces Properties, aba Partitions no software HAP.....	59
Figura 60: Systems criados no software HAP.....	59
Figura 61: Planta do Piso 0 com localização do Gabinete C3 destacada.....	64
Figura 62: Resultados do consumo energético do ventiloinvetor do Gab. C3 em janeiro.	64
Figura 63: Resultados do consumo energético do ventiloinvetor do Gab. C3 em julho.	65
Figura 64: Planta do Piso 0 com localização do Laboratório C4 destacada.....	66
Figura 65: Resultados do consumo energético da unidade de termoventilação do Lab. C4 em janeiro.	67
Figura 66: Resultados do consumo energético da unidade de termoventilação do Lab. C4 em julho.	68
Figura 67: Planta do Piso 1 com localização do Laboratório C7 destacada.....	69
Figura 68: Resultados do consumo energético da unidade de termoventilação do Lab. C7 em janeiro.	69
Figura 69: Resultados do consumo energético da unidade de termoventilação do Laboratório C7 em julho.	70
Figura 70: Planta do Piso 1 com a localização do Laboratório C11/C12/C13 destacada.....	71
Figura 71: Resultados do consumo energético da Unidade de Termoventilação do Laboratório C11/C12/C13 em janeiro.....	71
Figura 72: Resultados do consumo energético da unidade de termoventilação do Laboratório C11/C12/C13 em julho.	72

Índice de Tabelas

Tabela 1: Valores representativos do coeficiente de transmissão de calor por convecção.....	10
Tabela 2: Alguns valores típicos de ϵ para os materiais comuns.....	11
Tabela 3: Valores tabelados no ITE 50 para a resistência térmica das paredes simples.....	14
Tabela 4: Valores tabelados no ITE 50 para a resistência térmica das paredes Duplas.....	15
Tabela 5: Valores tabelados no ITE 50 para o coeficiente de transmissão térmica das paredes simples.....	16
Tabela 6: Valores tabelados no ITE 50 para o coeficiente de transmissão térmica das paredes duplas.....	17
Tabela 7: Valores tabelados no ITE 50 para o coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados.....	18
Tabela 8: Valores tabelados no ITE 50 para resistências térmicas superficiais.....	18
Tabela 9: Classe de Inércia Térmica.....	19
Tabela 10: Descrição e comparação dos resultados detalhados das simulações energéticas do edifício no mês de janeiro em diferentes zonas.....	73
Tabela 11: Descrição e comparação dos resultados detalhados das simulações energéticas do edifício no mês de julho em diferentes zonas.....	74

Capítulo 1

Introdução

1. Introdução

1.1. Introdução ao projeto

No âmbito da unidade curricular Estágio/Projeto Final da Licenciatura em Engenharia e Gestão Industrial, foi proposto pelo docente Luís P. C. Neto a realização de um projeto com o objetivo de aplicar ferramentas de simulação dinâmica para determinar as cargas térmicas de um edifício.

A simulação dinâmica emerge como uma ferramenta imprescindível neste contexto, proporcionando uma visão detalhada e precisa do comportamento térmico ao longo do tempo.

Neste projeto é explicado, de forma rigorosa, o comportamento térmico dos edifícios, com um foco especial na aplicação da simulação dinâmica. A investigação inclui uma análise detalhada dos processos de transferência de calor, abordando especificamente os mecanismos de condução, convecção e radiação, que são cruciais para compreender as transferências térmicas nos edifícios. A importância do coeficiente de transmissão térmica e da inércia térmica é destacada, devido ao seu papel central na avaliação da eficiência energética das construções. Estes conceitos são fundamentais para quantificar as perdas e ganhos de calor, influenciando diretamente o consumo energético necessário para a climatização.

Adicionalmente, o estudo explora os ganhos térmicos internos e o conforto térmico, estabelecendo as bases teóricas necessárias para a aplicação das metodologias de simulação dinâmica.

Com o uso de ferramentas de simulação dinâmica, como o Hourly Analysis Program (HAP), é possível realizar análises detalhadas das condições de conforto do edifício. No decorrer do projeto é desenvolvido um modelo representativo de diferentes zonas de um edifício para as quais se realizaram simulações das cargas térmicas em diferentes condições operacionais. A análise destas simulações permite identificar as principais fontes de ganhos térmicos, bem como os desafios associados ao controlo do conforto térmico em ambientes interiores.

Através deste trabalho, pretende-se ganhar o máximo conhecimento para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes e sustentáveis na conceção e operação de sistemas de climatização em edifícios, alinhando a prática da engenharia com os objetivos globais de redução de emissões.

1.2. Contexto e motivação

A aplicação de ferramentas de simulação dinâmica no estudo térmico e energético de um edifício emergem da necessidade crescente de otimização energética e sustentabilidade no sector da construção. À medida que as normas e regulamentações de eficiência energética se tornam mais rigorosas, torna-se imperativo adotar métodos precisos e avançados para a análise do desempenho energético dos edifícios.

A simulação dinâmica oferece uma compreensão detalhada das interações térmicas entre os diversos elementos do edifício e as variáveis ambientais externas. Estas ferramentas permitem a modelação precisa do comportamento térmico ao longo do tempo, considerando fatores como a variação das condições meteorológicas, a ocupação, os ganhos internos e a inércia térmica dos materiais de construção. Com estas simulações, é possível prever o consumo energético, identificar potenciais problemas de conforto térmico e avaliar o impacto de diferentes estratégias de eficiência energética.

Além disso as ferramentas de simulação dinâmica facilitam a tomada de decisões informadas durante a fase de projeto e operação dos edifícios. Elas permitem testar virtualmente diferentes soluções de design, sistemas de AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado) e materiais de construção, ajudando a selecionar as opções mais eficientes e economicamente viáveis. Desta forma, não só se consegue uma redução nos custos operacionais e nas emissões de gases de efeito estufa, como também se melhora o conforto dos ocupantes. Ferramentas de simulação, como HAP, EnergyPlus, TRNSYS e CYPE, possibilitam modelar cenários complexos e a avaliação do impacto de diferentes estratégias de projeto.

A motivação principal reside, portanto, na capacidade destas ferramentas de fornecer uma análise detalhada e precisa que apoie a criação de edifícios mais eficientes, sustentáveis e confortáveis. A aplicação de simulações dinâmicas no estudo térmico e energético de um edifício é uma abordagem essencial para responder aos desafios atuais da eficiência energética e da sustentabilidade no sector da construção.

1.3. Objetivos

O principal objetivo deste projeto é abordar a investigação técnica, a modelação e a simulação do comportamento térmico de um edifício.

Para alcançar estes objetivos será necessário percorrer várias etapas, das quais se destacam:

- Efetuar uma pesquisa abrangente sobre os fatores que influenciam o comportamento térmico de um edifício, explorando métodos para caracterizar o desempenho energético e o conforto dos ocupantes, analisar várias ferramentas de simulação, com uma seleção criteriosa e aprofundamento do conhecimento das ferramentas escolhidas;
- Introduzir os dados no software de simulação para criar um modelo simplificado com uma representação detalhada do edifício, representação essa que o representa em termos de localização e envolvente;
- Fazer simulações e análises dos resultados dos modelos criados que servem para caracterizar o comportamento térmico do edifício;
- Analisar os resultados das diferentes zonas de simulação, comparando-os para identificar as diferenças;

- Efetuar comparações das análises detalhadas do comportamento térmico e energético de um edifício, com a aplicação de diferentes ferramentas de simulação dinâmica para prever o desempenho energético, e a caracterização dos sistemas de climatização.

1.4. Estrutura do Relatório

O presente relatório encontra-se dividido em cinco capítulos.

No Capítulo 1 é feita uma introdução e enquadramento ao tema, são apresentados os objetivos específicos da dissertação e a estrutura do trabalho.

No Capítulo 2 apresenta-se um resumo da pesquisa do comportamento térmico e energético nos edifícios, nomeadamente processos de transferência de calor, coeficiente de transmissão térmica, ganhos térmicos nos edifícios, conforto térmico e simulação dinâmica de edifícios.

No Capítulo 3 faz-se uma descrição do edifício em estudo, com a apresentação dos dados climáticos da sua localização. São apresentadas as características psicrométricas do ambiente exterior e interior, bem como os ganhos internos de calor devido à ocupação e equipamentos. São também descritos os perfis de utilização para melhor se compreender os padrões de uso.

A secção sobre o Hourly Analysis Program (HAP) detalha a configuração do projeto no referido software, incluindo as condições climáticas (Weather), bibliotecas de projeto (Project Libraries), definições dos espaços internos (Spaces) e os sistemas de climatização (Systems). Cada subsecção aborda a parametrização e as entradas necessárias para a simulação térmica.

No Capítulo 4, utilizando a ferramenta de simulação dinâmica de edifícios Hourly Analysis Program (HAP), simulam-se, a partir do edifício no seu estado atual, as cargas térmicas de diversas zonas, consideradas mais críticas.

No capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões retiradas da elaboração deste trabalho. São também destacadas as dificuldades e limitações enfrentadas, e sugerem-se melhorias e perspetivas futuras.

Capítulo 2

Comportamento Térmico e Energético nos Edifícios

2. Comportamento Térmico e Energético nos Edifícios

O comportamento térmico e energético dos edifícios é um fator determinante para alcançar elevados níveis de eficiência e sustentabilidade nos edifícios. Este capítulo estuda os processos de transferência de calor, abrangendo os três modos de transmissão de calor – condução, convecção e radiação – bem como a formulação do coeficiente de transmissão térmica. Este coeficiente inclui a análise detalhada da resistência térmica dos materiais constituintes, do coeficiente global de transmissão de calor e da inércia térmica. São analisados também, os ganhos térmicos, tanto de fontes internas como externas, que influenciam diretamente o conforto térmico dos ocupantes. A avaliação destes ganhos permite compreender as dinâmicas térmicas que ocorrem no interior dos edifícios, proporcionando uma base sólida para intervenções de melhoria.

2.1. Processos de transferência de calor

A transmissão de calor é a ciência que trata a transferência de energia que ocorre entre dois corpos materiais como resultado de uma diferença de temperaturas [1].

Há três modos de transmissão de calor:

- Condução
- Convecção
- Radiação

Condução

A condução é o modo de transmissão de calor que ocorre num meio estacionário (sólido, líquido ou gasoso). É um processo que pode ser visto como a transferência de energia das partículas mais energéticas de uma substância para as menos energéticas através das interações (moleculares e atômicas) entre as partículas. As temperaturas mais elevadas estão associadas a uma energia molecular mais alta, e quando em contato com outras moléculas de energia molecular mais baixa, resultará em uma transferência de energia da região de temperatura mais alta para a região de temperatura mais baixa.

Sempre que existir uma diferença de temperaturas num corpo, a experiência mostra que existirá uma transferência de energia da região de mais alta temperatura para a região de temperatura mais baixa, como é exemplificado na Figura 1.

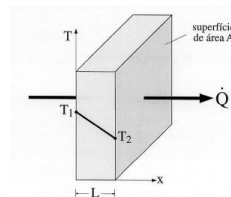


Figura 1: Transmissão de calor por condução em um paralelepípedo com espessura L e diferentes temperaturas entre as duas faces.

Figura copiada de [1].

A lei fundamental da condução de calor é a **Lei de Fourier**, expressa na equação (1), a qual estabelece que:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{L} \quad (1)$$

onde:

\dot{Q}	Taxa de transmissão de calor	W
K	Condutibilidade térmica do material	W/(m.K)
A	Área perpendicular ao fluxo de calor	m ²
ΔT	Variação de temperatura entre as faces do solido	K
L	Espessura	m

Cada uma dessas expressões relaciona o fluxo térmico através de uma superfície ao gradiente de temperatura em uma direção perpendicular à superfície. A lei de Fourier é a pedra fundamental da transferência de calor, não é uma expressão que possa ser derivada a partir de princípios fundamentais, é o oposto. Ela é uma generalização baseada em evidências experimentais. Ela é uma expressão que define uma importante propriedade dos materiais, a condutividade térmica. Além disso, a lei de Fourier é uma expressão vetorial, indicando que o fluxo térmico é no sentido da diminuição das temperaturas. Importa realçar que a lei de Fourier aplica-se a toda matéria, independentemente do seu estado físico (sólido, líquido ou gás).

Na equação (2) apresenta-se outra forma de escrever a lei de Fourier sob a forma diferencial.

$$\dot{q}_x = -k \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

onde:

\dot{q}_x	Fluxo de calor na direção x, por unidade de área	W/m ²
$\frac{dT}{dx}$	Gradiente de temperatura na direção x	K/m

O fluxo de calor (\dot{q}_x) é a taxa de transferência de calor na direção x por unidade de área perpendicular à direção da transferência. Este fluxo é proporcional ao gradiente de temperatura ($\frac{dT}{dx}$). O sinal negativo é uma consequência do facto do calor ser transferido na direção da temperatura decrescente.

Convecção

A convecção é um modo de transmissão de calor que ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento, como é visível nos dois exemplos apresentados na Figura 2.

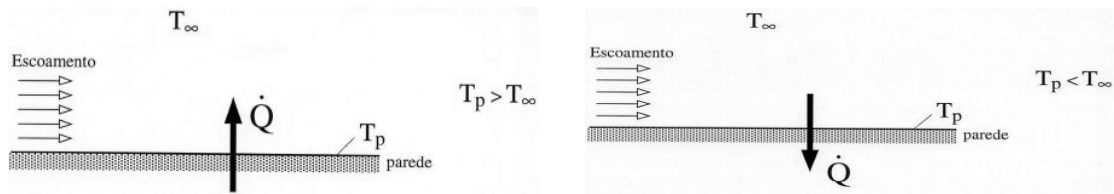


Figura 2: Transmissão de calor por convecção: esq.) $T_p > T_\infty$; dir.) $T_\infty > T_p$.

Figura copiada de [1].

O modo de transferência de calor por convecção abrange dois mecanismos:

- Difusão;
- Transporte.

O primeiro consiste na transferência de energia devido ao movimento molecular aleatório (difusão), enquanto no segundo a energia é transmitida através do movimento global, ou macroscópico, do fluido (advecção).

A transferência de calor por convecção pode ser classificada em dois tipos:

- Convecção natural;
- Convecção forçada.

Na convecção natural o movimento é induzido pela diferença de densidade causada por variações de temperatura no fluido. Um exemplo disso é a transferência de calor por convecção livre que ocorre a partir de componentes quentes, como ocorre na Figura 3.

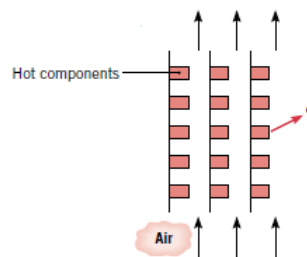


Figura 3: Transmissão de calor por convecção natural em componentes quentes.

Figura copiada de [2].

Falamos de convecção forçada quando o movimento é causado por meios externos, como uma ventoinha, uma bomba ou ventos atmosféricos. Como exemplo, considere-se o uso de um ventilador para fornecer arrefecimento de ar por convecção forçada de componentes elétricos quentes em uma placa, como é visível na Figura 4.

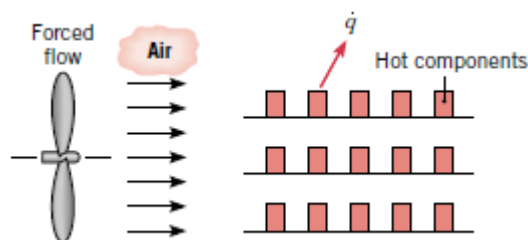


Figura 4: Transmissão de calor por convecção forçada pela ventoinha em componentes quentes.

Figura copiada de [2].

Embora tenhamos presumido uma convecção forçada pura na Figura 4 e uma convecção natural pura na Figura 3, podem existir condições correspondentes a uma convecção mista combinada (forçada e natural). Por exemplo, se as velocidades associadas ao fluxo de ar da Figura 4 são pequenas e/ou as forças de flutuação são grandes, pode ser induzido um fluxo de ar secundário comparável ao escoamento forçado imposto. Neste caso, o fluxo induzido pela flutuação seria normal ao fluxo forçado e poderia ter um efeito significativo na transferência de calor por convecção dos componentes. Na Figura 3, a convecção mista resultaria se um ventilador fosse usado para forçar o ar para cima entre as placas de circuito, ajudando assim o fluxo de flutuação, ou para baixo, opondo-se assim ao fluxo de flutuação.

Dois casos especiais de interesse são a ebulição e a condensação. Por exemplo, a transferência de calor por convecção resulta do movimento do fluido induzido por bolhas de vapor geradas no fundo de uma panela de água a ferver (Figura 5a) ou pela condensação de vapor de água na superfície exterior de um tubo de água fria (Figura 5b).

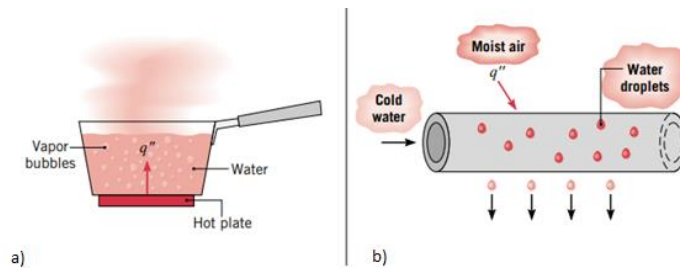


Figura 5: Casos especiais de convecção: a) Ebulição, b) Condensação

Figura copiada de [2].

A lei fundamental da convecção é a Lei de Newton expressa na equação (3):

$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (3)$$

onde:

\dot{Q}	Taxa de transmissão de calor	W
h	Coefficiente de transmissão de calor por convecção	W/(m ² .K)
A	Área da superfície	m ²
ΔT	Diferença de temperatura entre a superfície e o fluido	K

Independentemente da natureza particular do processo de transferência de calor por convecção, o fluxo de calor convectivo é expresso pela equação (4):

$$\dot{q} = h \cdot \Delta T \quad (4)$$

onde:

\dot{q}	Fluxo de calor por unidade de área	W/m ²
-----------	------------------------------------	------------------

Na Tabela 1 são apresentados alguns valores representativos do coeficiente de transmissão de calor por convecção para diferentes situações. Esses valores são utilizados para estimar a transferência de calor por convecção em diversas condições

operacionais, ajudando a garantir um projeto eficiente e adequado às necessidades térmicas específicas.

Tabela 1: Valores representativos do coeficiente de transmissão de calor por convecção.

Tabela adaptada de [1].

Coeficiente de transmissão de calor:	W/(m².K)
Convecção natural	5 - 25
Convecção forçada:	
Gases	25 - 250
Líquidos	50 - 20 000
Convecção com mudança de fase:	
Ebulição ou condensação	2 500 - 100 000

Radiação

A radiação térmica é a energia emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura absoluta diferente de 0 K. Embora nos concentremos na radiação de superfícies sólidas, a emissão também pode ocorrer de líquidos e gases. Independentemente da forma da matéria, a emissão pode ser atribuída a alterações nas configurações eletrónicas dos átomos ou moléculas constituintes. A energia do campo de radiação é transportada por ondas eletromagnéticas (ou, em alternativa, fótons). Enquanto a transferência de energia por condução ou convecção requer a presença de um meio material, a radiação não o faz. De facto, a transferência de energia por radiação ocorre mais eficientemente no vácuo.

A potência calorífica por unidade de área emitida por um corpo negro \dot{q} – também designada por poder emissivo – é dada pela lei de Stefan-Boltzmann:

$$\dot{q} = (\sigma \cdot T^4) \quad (5)$$

onde:

\dot{q}	Fluxo de calor por unidade de área	W/m ²
T	Temperatura	K
σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,6704 \times 10^8$ W/(m ² .K ⁴))	W/(m ² .K ⁴)

Na Tabela 2 são apresentados alguns valores típicos de emissividade térmica para materiais comuns usados nos edifícios. Esses valores são utilizados em simulações térmicas para avaliar o comportamento energético dos edifícios e para garantir o cumprimento das normas de eficiência energética.

Tabela 2: Alguns valores típicos de ϵ para os materiais comuns.

Tabela adaptada de [1] e [3].

Material	Emissividade (ϵ)
Aço polido	0,07
Aço oxidado	0,80
Aço inoxidável	0,59
Madeira	0,86
Tijolo	0,93
Vidro	0,95
Areia	0,90
Água	0,95
Alumínio anodizado	0,77
Alumínio polido	0,05
Cimento	0,54
Borracha	0,95
Gesso	0,86 - 0,90
PVC	0,91 - 0,93
Plástico preto	0,95
Plástico branco	0,84
Argamassa	0,87

O fluxo de calor emitido por uma superfície real é menor do que o fluxo de calor emitido por um corpo negro à mesma temperatura e é dado por:

$$\dot{q} = \epsilon \cdot (\sigma \cdot T^4) \quad (6)$$

onde:

ϵ Emissividade térmica (adimensional)

Com valores entre $0 < \epsilon \leq 1$, a emissividade fornece uma medida da eficiência com que uma superfície emite energia relativamente a um corpo negro.

Um caso de tratamento simples é o que diz respeito à troca de calor entre uma placa pequena e uma superfície que é muito maior, a "envolvente", representada na Figura 6.

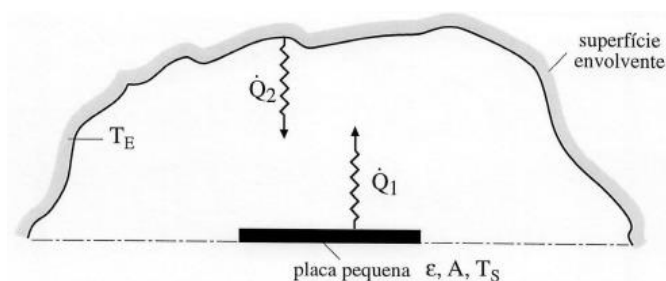


Figura 6: Troca de calor por radiação.

Figura copiada de [1].

Se dissermos que a superfície envolvente pode ser aproximada a um corpo negro, podemos escrever que a energia por ela emitida é:

$$\dot{Q}_2 = A. (\sigma. T_E^4) \quad (7)$$

onde:

\dot{Q}_2	Taxa de transmissão de calor da superfície envolvente.	W
T_E	Temperatura da superfície envolvente	K
A	Área da placa pequena	m ²

Contudo, a radiação emitida pela placa pequena, atendendo a que se trata de um corpo real com uma emissividade ε , será obtida através da equação (8):

$$\dot{Q}_1 = \varepsilon. A. (\sigma. T_S^4) \quad (8)$$

onde:

\dot{Q}_1	Taxa de transmissão de calor da placa pequena	W
T_S	Temperatura superficial da placa pequena	K

Repare-se que a totalidade da radiação emitida pela vizinhança incidirá na placa pequena de área A. Contudo, esta placa só absorverá parte dessa radiação:

$$\alpha. A. (\sigma. T_E^4) \quad (9)$$

em que α (adimensional) representa o poder de absorção desta placa ($0 < \alpha \leq 1$).

Se quisermos calcular a perda líquida de radiação sofrida pela placa pequena, teremos de calcular a diferença entre a energia por ela emitida e a energia por ela absorvida:

$$\dot{Q}_1 = \varepsilon. A. (\sigma. T_S^4) - \alpha. A. (\sigma. T_E^4) \quad (10)$$

Considerando que $\alpha = \varepsilon$ (corpo cinzento), este resultado reduz-se a:

$$\dot{Q} = \varepsilon. A. \sigma. (T_S^4 - T_E^4) \quad (11)$$

2.2. Coeficiente de transmissão térmica

Resistência térmica

O conceito de resistência térmica foi obtido por analogia ao conceito de resistência elétrica da lei de Ohm.

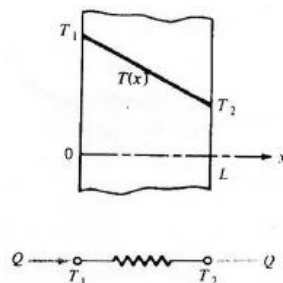


Figura 7: Resistência térmica por condução

Figura copiada de [1].

Analisando a Figura 7, a resistência térmica por condução da placa expressa-se por (12):

$$R_{t,cond} = \frac{T_1 - T_2}{\dot{Q}} = \frac{L}{k \cdot A} \quad (12)$$

onde:

$R_{t,cond}$	Resistência térmica por condução	$m^2.K/W$
T_1, T_2	Temperaturas nas faces 1 e 2	K ou °C
\dot{Q}	Taxa de transmissão de calor	W
k	Condutibilidade térmica do material	$W/(m.K)$
A	Área	m^2
L	Espessura	m

O conceito de resistência térmica também é extensível aos fenómenos de transferência de calor por convecção numa superfície.

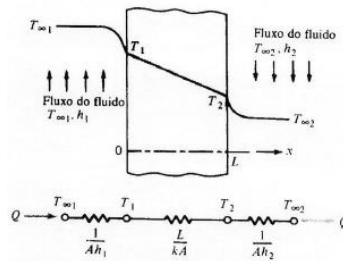


Figura 8: Resistência térmica por convecção

Figura copiada de [1].

Na Figura 8 há uma parede plana sujeita a convecção em ambas as faces. A resistência térmica por convecção da placa expressa-se pela equação (13):

$$R_{t,conv} = \frac{T_S - T_{\infty}}{\dot{Q}} = \frac{1}{h \cdot A} \quad (13)$$

onde:

$R_{t,conv}$	Resistência térmica por convecção	m^2K/W
T_S	Temperaturas na superfície	K
T_{∞}	Temperaturas do fluido	K
h	Coefficiente de transmissão de calor por convecção	$W/(m^2.K)$

Contudo, não podemos esquecer que o fluxo de calor será constante ao longo de cada uma das camadas, pelo que:

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_1}{\frac{1}{h_1 \cdot A}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L}{k \cdot A}} = \frac{T_2 - T_{\infty 2}}{\frac{1}{h_2 \cdot A}} \quad (14)$$

onde:

$T_{\infty 1}$	Temperatura do fluido da face 1	K
$T_{\infty 2}$	Temperatura do fluido da face 2	K

Se somarmos os numeradores e denominadores desta igualdade e simplificarmos, obtemos:

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{\text{tot}}} \quad (15)$$

em que R_{total} é a **resistência térmica total** ao fluxo de calor:

$$R_{\text{tot}} = \frac{1}{h_1 \cdot A} + \frac{L}{k \cdot A} + \frac{1}{h_2 \cdot A} \quad (16)$$

Ao fazer simulações dinâmicas para estudar o desempenho térmico e energético de um edifício, a resistência térmica das paredes é fundamental para avaliar a capacidade de resistir ao fluxo de calor, uma vez que este parâmetro impacta diretamente o conforto térmico e a eficiência energética.

Do ponto de vista prático, utilizam-se valores do ITE 50 – Coeficiente de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios [4]. Estas tabelas fornecem uma referência essencial para a seleção de materiais e técnicas construtivas, com o objetivo de otimizar a eficiência térmica dos edifícios. A resistência térmica adequada das paredes contribui significativamente para a redução das perdas de calor no inverno e do ganho de calor no verão, promovendo um ambiente interno confortável e energeticamente eficiente.

Na Tabela 3 e na Tabela 4 apresentam-se valores para a resistência térmica das paredes simples e das paredes duplas.

Paredes Simples

Tabela 3: Valores tabelados no ITE 50 para a resistência térmica das paredes simples.

Tabela copiada de [4].

Tipo de elemento		RESISTÊNCIAS TÉRMICAS PAREDES SIMPLES DE ALVENARIA								
		Espessura da alvenaria [m]								
		0,03	0,04	0,07	0,09	0,10 0,11	0,15	0,19 0,20 0,22	0,24 0,25	0,30
tijolos cerâmicos	furado (normal)	0,07	0,10	0,19	0,23	0,27	0,39	0,52	0,56	—
	maciço	—	—	0,08	—	0,13	—	—	—	—
blocos de betão	normal	—	—	—	—	0,16	0,20	0,30	0,33	0,37
	leve	—	—	—	—	0,27	0,31	0,49	0,54	0,59

NOTA:

- As resistências térmicas indicadas no QUADRO I.5 correspondem a panos simples de alvenaria simples, sem quaisquer revestimentos, e não incluem resistências térmicas superficiais (exterior e interior).

Paredes Duplas

Tabela 4: Valores tabelados no ITE 50 para a resistência térmica das paredes Duplas.

Tabela copiada de [4].

QUADRO I.6 **RESISTÊNCIAS TÉRMICAS**
PAREDES DUPLAS
 $R [(m^2 \cdot ^\circ C)/W]$

Tipos de elementos	Espessuras das alvenarias [m]		
	0,11 0,11	0,11 0,15	0,15 0,15
tijolo furado tijolo furado	0,72	0,84	0,96
tijolo maciço tijolo furado	0,58	0,70	—
bloco de betão normal bloco de betão normal	0,50	0,54	0,58
bloco de betão leve bloco de betão leve	0,72	0,76	0,80

Pano de betão ou de pedra	Espessura [m]	Pano de alvenaria	Espessura [m]	
			0,11	0,15
betão normal	0,10 a 0,20	tijolo furado	0,53	0,65
		tijolo maciço	0,39	—
		bloco de betão normal	0,42	0,46
		bloco de betão leve	0,53	0,57
pedra	0,40 a 0,60	tijolo furado	0,63	0,75
		tijolo maciço	0,49	—
		bloco de betão normal	0,52	0,56
		bloco de betão leve	0,63	0,67

Coefficiente global de transmissão de calor de uma parede

O coeficiente global de transmissão (U), pode ser calculado através de uma expressão generalizada, num sistema que possua i elementos, cada um possuindo uma espessura L_i e uma condutibilidade térmica k_i , calculando-se o correspondente coeficiente de troca de calor mediante a expressão (17):

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{\infty,1}} + \sum_i \frac{L_i}{k_i} + \frac{1}{h_{\infty,i+1}}} \quad (17)$$

onde:

U	Coeficiente global de transmissão de calor	W/(m ² .K)
$h_{\infty,1}$	Coeficiente de transmissão de calor por convecção	W/(m ² .K)
k	Condutibilidade térmica do material	W/(m.K)
L	Espessura	m

Em termos práticos, mais uma vez, pode-se recorrer ao ITE 50 [4] para se conhecerem os coeficientes de transmissão térmica de paredes simples, de paredes duplas e vãos envidraçados, bem como as resistências térmicas convectivas interior e exterior. Esses

valores são cruciais para avaliar a condução de calor através das paredes, impactando a eficiência energética e o conforto térmico do edifício.

Abaixo são apresentadas as tabelas do ITE 50 [4] para os coeficientes de transmissão térmica de:

- Paredes simples: Tabela 5;
- Paredes duplas: Tabela 6;
- Vãos envidraçados: Tabela 7.

bem como para as resistências térmicas superficiais que serão apresentadas na Tabela 8.

Paredes Simples

Tabela 5: Valores tabelados no ITE 50 para o coeficiente de transmissão térmica das paredes simples.

Tabela copiada de [4].

QUADRO II.1

COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA PAREDES SIMPLS DE FACHADA SEM ISOLAMENTO TÉRMICO U [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$]

Ⓐ – Paredes simples com revestimentos aderentes em ambas as faces

Pano de alvenaria				Parede de betão
tijolo furado	blocos de betão normal	blocos de betão leve	pedra	
Espessura da alvenaria [m]				
0,20 a 0,24	0,20 a 0,30	0,20 a 0,30	0,40 a 0,60	0,10 a 0,20
1,3	1,9	1,3	2,9	3,6

NOTA:

- Os valores de U apresentados podem ser utilizados para soluções de paredes sem revestimento numa ou em ambas as faces.

Paredes Duplas

Tabela 6: Valores tabelados no ITE 50 para o coeficiente de transmissão térmica das paredes duplas.

Tabela copiada de [4].

QUADRO II.4 **COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA**
PAREDES DUPLAS DE FACHADA
SEM ISOLAMENTO TÉRMICO
U [W/(m². °C)]

Constituição dos panos		Espessura dos panos [m]	U [W/(m ² . °C)]
Tijolo furado	Tijolo furado	0,11 + 0,11	1,1
		0,11 + 0,15	0,96
		0,15 + 0,15	0,86
	Tijolo maciço	0,11 + 0,11	1,3
		0,15 + 0,11	1,1
Blocos de betão normal	Blocos de betão normal	0,11 + 0,11	1,4
		0,11 + 0,15	1,3
		0,15 + 0,15	1,3
Blocos de betão leve	Blocos de betão leve	0,11 + 0,11	1,1
		0,11 + 0,15	1,0
		0,15 + 0,15	0,99
Alvenaria de pedra	Tijolo furado	(0,40 a 0,60) + 0,11	1,2
		(0,40 a 0,60) + 0,15	1,1
	Tijolo maciço	(0,40 a 0,60) + 0,11	1,5
	Blocos de betão normal	(0,40 a 0,60) + 0,11	1,4
		(0,40 a 0,60) + 0,15	1,3
	Blocos de betão leve	(0,40 a 0,60) + 0,11	1,2
(0,40 a 0,60) + 0,15		1,2	
Parede de betão	Tijolo furado	(0,10 a 0,20) + 0,11	1,4
		(0,10 a 0,20) + 0,15	1,2
	Tijolo maciço	(0,10 a 0,20) + 0,11	1,7
	Blocos de betão normal	(0,10 a 0,20) + 0,11	1,6
		(0,10 a 0,20) + 0,15	1,5
	Blocos de betão leve	(0,10 a 0,20) + 0,11	1,4
(0,10 a 0,20) + 0,15		1,3	

NOTAS:

- 1 - Os valores do quadro aplicam-se independentemente da ordem (exterior / interior) dos panos constituintes.
- 2 - Os valores de **U** apresentados podem ser utilizados para soluções de paredes sem revestimento numa ou em ambas as faces.

Inércia térmica

A inércia térmica dos edifícios desempenha um papel crucial no equilíbrio térmico das construções, atenuando as variações térmicas causadas por condições exteriores e interiores, resultando numa menor flutuação da temperatura interna, proporcionando conforto térmico aos ocupantes.

Dado que as condições externas, como a temperatura ambiente e a radiação solar, variam ao longo do tempo, o efeito da inércia térmica é fundamental.

A inércia térmica (I_t) interior de um espaço representa a capacidade desse espaço para reter calor, influenciada pela capacidade de armazenamento e condução de calor dos seus elementos construtivos. Este parâmetro é determinado pela área útil do espaço, pela massa superficial útil dos materiais utilizados na construção e da capacidade de condução de calor dos elementos de revestimento traduzida no fator de redução da massa superficial útil [5].

$$I_t = \frac{\sum_i M_{si} \cdot r_i \cdot S_i}{A_p} \quad (18)$$

onde:

M_{si}	Massa superficial útil do elemento construtivo i	kg/m ²
r_i	Fator de redução de M_{si} (depende da resistência térmica do elemento de revestimento R (m ² .°C)/W)	(---)
S_i	Área da superfície interior do elemento	m ²
A_p	Área útil de pavimento	m ²

A Inércia Térmica divide-se em três classes, conforme se detalha na Tabela 9.

Tabela 9: Classe de Inércia Térmica.

Tabela copiada de [5].

Classe de Inércia Térmica	I_t [kg/m ²]
Fraca	$I_t < 150$
Média	$150 \leq I_t \leq 400$
Forte	$I_t < 400$

Um corpo de maior massa e/ou com maior calor específico, acumula ou liberta a mesma quantidade de energia com menor variação de temperatura. Para a maioria dos materiais dos edifícios o calor específico está situado entre 0,85 e 0,95 kJ/kg.°C, o que explica o facto de apenas se mencionar a massa. Uma importante exceção é a madeira, cujo calor específico está situado entre 1,7 e 3,0 kJ/(kg. °C) [6].

2.3. Ganhos térmicos nos edifícios

O calor produzido dentro de um edifício que contribui para a temperatura interna, pode ser proveniente de várias fontes:

- **Pessoas:** Este calor, conhecido como calor metabólico, é produzido pelo corpo humano através de atividades como digestão, respiração e movimento muscular. A quantidade de calor gerada varia conforme a atividade praticada, durante atividades leves, como trabalho de escritório, geram menos calor, mas em atividades intensas, como o exercício físico geram mais calor. O número de ocupantes do espaço também é muito importante para obter os ganhos térmicos das pessoas.
- **Aparelhos e Equipamentos:** O calor produzido pelo funcionamento de aparelhos eletrônicos, como computadores, e eletrodomésticos.
- **Iluminação:** O calor produzido pelas lâmpadas, especialmente se forem incandescentes.
- **Processos Internos:** Em ambientes industriais ou de escritórios, processos específicos como cozinhar, imprimir ou outros equipamentos industriais podem produzir calor. Este calor pode ser dividido em duas formas principais, o calor sensível que causa um aumento direto na temperatura do ar e dos materiais ao redor, como o produzido por equipamentos eletrônicos, máquinas industriais e fogões, e também o calor latente, que provoca mudanças no estado físico das substâncias, como durante a evaporação de líquidos ou na operação de sistemas de ar condicionado que removem humidade do ar.
- **Ventilação e Infiltração:** O ar quente que entra através de aberturas, portas, janelas e sistemas de ventilação.

Esses ganhos de calor podem afetar significativamente o conforto térmico dentro de um espaço e são importantes a considerar no projeto de sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado. Durante o verão, os ganhos internos podem aumentar a necessidade de arrefecimento, enquanto no inverno, podem reduzir a necessidade de aquecimento.

2.4. Conforto térmico

O conforto térmico é reconhecido como não sendo um conceito exato, sem uma temperatura específica que o defina. O conforto térmico é uma condição mental onde uma pessoa se sente satisfeita com a temperatura do ambiente onde está. É um estado de equilíbrio na temperatura do ambiente gerado pela arquitetura do edifício, não sentindo, nem frio, nem calor. Essa sensação não está apenas relacionada com a temperatura do ar, está também associada a outros fatores, tais como a humidade, a ventilação, o isolamento, entre outros. Alcançar uma temperatura interior equilibrada é fundamental para proporcionar o bem-estar e produtividade, além de promover a saúde e a segurança. É fundamental abordar diversos parâmetros que influenciam diretamente o conforto térmico em ambientes interiores.

Os principais parâmetros que devem ser considerados são os seguintes [7]:

- Temperatura do Ar: A temperatura do ar interior é um dos fatores mais críticos para o conforto térmico. Deve ser mantida dentro de uma faixa aceitável, geralmente entre 20°C e 24°C no inverno e entre 24°C e 27°C no verão, para garantir o conforto da maioria dos ocupantes.
- Temperatura Radiante Média: Este parâmetro refere-se à média das temperaturas das superfícies que circundam os ocupantes, tais como paredes, pisos, tetos e móveis. Superfícies frias ou quentes podem influenciar significativamente a sensação de conforto térmico, independentemente da temperatura do ar.
- Humidade Relativa: A humidade do ar é crucial para o conforto térmico. A faixa ideal de humidade relativa varia entre 30% e 60%. Níveis de humidade muito baixos podem causar secura da pele, enquanto níveis elevados podem aumentar a sensação de calor e desconforto.
- Velocidade do Ar: A movimentação do ar pode influenciar a percepção térmica. Uma ligeira brisa pode ajudar a refrescar o ambiente, melhorando o conforto, enquanto correntes de ar excessivas podem causar desconforto. A velocidade ideal do ar para conforto térmico é geralmente inferior a 0,2 m/s.
- Isolamento Térmico das Roupas: O nível de isolamento proporcionado pelas roupas dos ocupantes afeta a percepção da temperatura ambiente.
- Taxa Metabólica: A taxa metabólica dos ocupantes, que depende do nível de atividade física, influencia a percepção de conforto térmico. Atividades sedentárias têm taxas metabólicas mais baixas em comparação com atividades físicas intensas.
- Carga Térmica Interna: Inclui o calor gerado por ocupantes, equipamentos e iluminação. A gestão eficiente da carga térmica interna é essencial para manter um ambiente confortável.
- Qualidade do Ar Interior: Embora não seja diretamente um parâmetro de conforto térmico, a qualidade do ar influencia a percepção do conforto. Poluentes, odores e concentração de CO₂ devem ser controlados para garantir um ambiente saudável e confortável.

Para garantir um ambiente interno confortável do ponto de vista térmico para os ocupantes dos edifícios, as normas sobre conforto térmico são fundamentais. Inicialmente, essas normas focavam-se principalmente em estabelecer as condições necessárias para o conforto térmico, sem considerar os consumos energéticos necessários para alcançá-lo. No entanto, devido à crescente conscientização sobre problemas ambientais e à necessidade de desenvolvimento sustentável, essas normas agora devem incluir formas de atingir o conforto térmico com o menor consumo de energia possível.

Por outro lado, o aumento do uso de equipamentos de arrefecimento de espaços na Europa é preocupante em termos ambientais, pois causa um grande aumento no consumo de energia, contribuindo para o excesso de emissões de CO₂ e o consequente aquecimento global. Portanto, até que a energia provenha totalmente de fontes renováveis, a climatização de espaços deve ser reservada para necessidades especiais em climas extremos e não para compensar um design climático inadequado dos edifícios. A solução está em um bom design climático, utilizando dados realistas de conforto térmico [6].

2.5. Simulação dinâmica de edifícios

A simulação dinâmica é um método de análise computacional detalhado que examina o perfil e os consumos energéticos de um edifício. Este processo pressupõe uma análise preliminar abrangente, que inclui a avaliação da envolvente do edifício, dos equipamentos, da iluminação, dos sistemas de climatização e de tratamento de ar. Além disso, considera a ocupação, os horários de funcionamento e realiza várias medições, como a quantidade de ar novo introduzido e a eficiência dos sistemas de climatização, entre outros fatores.

A simulação dinâmica pode ser dividida em:

- Simulação em condições reais;
- Simulação em condições nominais.

A simulação em condições reais tem como objetivo calibrar o modelo computacional através da comparação entre os consumos energéticos reais, obtidos a partir de faturas ou medições locais, e os consumos calculados numericamente. O modelo é considerado validado quando a diferença entre os consumos reais e os calculados é inferior a 10%.

Após esta validação procede-se à simulação em condições nominais, onde se mantêm algumas características reais do edifício, como a envolvente, os sistemas de climatização e a iluminação. No entanto, todos os horários, a ocupação, as temperaturas de conforto, as densidades de equipamento e os caudais de ar novo são ajustados de acordo com as exigências regulamentares para cada tipo de espaço.

Nesta fase é também necessário escolher um software de simulação que esteja acreditado conforme a norma ASHRAE¹ 140-2004² [8], conforme exigido pela legislação. Esta norma estabeleceu um programa rigoroso de testes e validação de vários softwares, com o objetivo de avaliar a precisão de cada um. Este processo envolve a identificação das diferenças nos resultados produzidos por diferentes algoritmos, bem como a deteção de limitações e erros de codificação [9].

¹ American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (USA)

² ASHRAE 140-2004, também conhecido como "Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs", é uma norma desenvolvida pela ASHRAE para padronizar os métodos de teste e avaliação de programas de análise de energia de edifícios.

O termo “ASHRAE Hourly Analysis” refere-se ao uso de ferramentas e métodos recomendados pela ASHRAE para analisar o desempenho de sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) em intervalos horários. Esta abordagem é fundamental no projeto, operação e otimização de sistemas AVAC para garantir eficiência energética, conforto dos ocupantes e conformidade com os padrões de sustentabilidade.

Ferramentas e Métodos

A ASHRAE disponibiliza várias ferramentas e padrões que auxiliam na análise horária dos sistemas AVAC. Alguns dos mais importantes incluem:

- **ASHRAE Standard 90.1:** Este padrão define os requisitos mínimos para o projeto energético eficiente de novos edifícios e de renovações significativas. Inclui recomendações para simulações horárias de energia para verificar a conformidade.
- **EnergyPlus:** Uma das ferramentas de simulação de energia mais utilizadas, desenvolvida pelo Departamento de Energia dos EUA (DOE). Permite simulações horárias e sub-horárias de desempenho energético de edifícios e sistemas AVAC.
- **TRACE™ 700:** Um software da TRANE™, que realiza simulações de desempenho energético de edifícios, permitindo análise detalhada de carga térmica e desempenho dos sistemas AVAC em intervalos horários.
- **TRNSYS:** Um ambiente de simulação flexível que permite a modelagem detalhada de sistemas de energia renovável, sistemas de aquecimento, refrigeração e ar condicionado. É usado para análises de ciclo completo de sistemas energéticos complexos e integrados.
- **CYPETHERM LOADS:** É utilizado por engenheiros e projetistas para projetar sistemas AVAC eficientes e para cumprir normas e regulamentos relacionados ao conforto térmico e eficiência energética em edifícios. Ele é parte integrante da plataforma CYPE, que oferece uma ampla gama de ferramentas para o projeto e análise de estruturas, instalações e eficiência energética em construções.
- **Hourly Analysis Program (HAP):** Desenvolvido pela CARRIER™, o HAP é uma ferramenta de simulação e cálculo de carga de AVAC que permite análises horárias detalhadas para projeto e otimização de sistemas AVAC.

Aplicações da Análise Horária em AVAC

- **Dimensionamento de Equipamentos:** análises horárias ajudam a dimensionar corretamente os equipamentos AVAC, garantindo que sejam eficientes o suficiente para lidar com as variações de carga ao longo do dia.

- Eficiência Energética: permite a identificação de oportunidades para melhorar a eficiência energética, ajustando operações dos sistemas AVAC conforme as necessidades reais dos ocupantes e as condições climáticas.
- Conforto Térmico: assegura que os sistemas AVAC mantenham condições confortáveis de temperatura e de humidade durante todo o dia, respondendo rapidamente a mudanças nas condições internas e externas.
- Modelação de Cenários: facilita a modelagem de diferentes cenários operacionais e de projeto, permitindo prever como os sistemas AVAC responderão a variações sazonais, mudanças no uso do edifício ou implementações de novas tecnologias.
- Conformidade Regulamentar: as simulações horárias são frequentemente exigidas para demonstrar a conformidade com os padrões e códigos de construção, como o ASHRAE Standard 90.1.

Benefícios da Análise Horária em AVAC

- Precisão e Detalhe: oferece uma visão detalhada do desempenho dos sistemas, permitindo ajustes precisos.
- Otimização de Custos: ajuda a reduzir custos operacionais identificando ineficiências e oportunidades de economia de energia.
- Melhoria do Desempenho: facilita a implementação de estratégias de controle avançadas para melhorar o desempenho dos sistemas AVAC.
- Sustentabilidade: contribui para a sustentabilidade ambiental ao promover práticas de design e operação mais eficientes energeticamente.

A análise horária recomendada pela ASHRAE é essencial para profissionais de AVAC e engenheiros de construção que tem como objetivo otimizar o desempenho energético, melhorar o conforto dos ocupantes e garantir a conformidade com os padrões de eficiência energética.

Uma vez que o caso de estudo que vai ser realizado neste trabalho envolve a utilização do HAP – HOURLY ANALYSIS PROGRAM, faz-se, já de seguida, um breve resumo das suas potencialidades.

2.6. HAP - Hourly Analysis Program

O HAP – HOURLY ANALYSIS PROGRAM é uma ferramenta de cálculo que permite, através da estimativa das necessidades térmicas para arrefecimento e aquecimento, auxiliar o planeamento, o dimensionamento dos componentes e dos sistemas de climatização e ventilação de edifícios, por meio de simulação horária anual e cálculo de potências.

A base de cálculo do programa para a determinação das cargas térmicas são as diretrizes e os padrões da ASHRAE e estes são detalhados hora a hora permitindo a análise de consumo de energia.

WEATHER

O menu WEATHER PROPERTIES é um menu que permite a seleção e configuração de dados climáticos específicos para a localização do edifício em estudo. Inicialmente este menu está configurado para a cidade de Chicago situada no estado de Illinois (USA), tal como se ilustra na Figura 11. Na mesma figura verifica-se a existência das abas:

- design parameters
- design temperatures
- design solar
- simulation

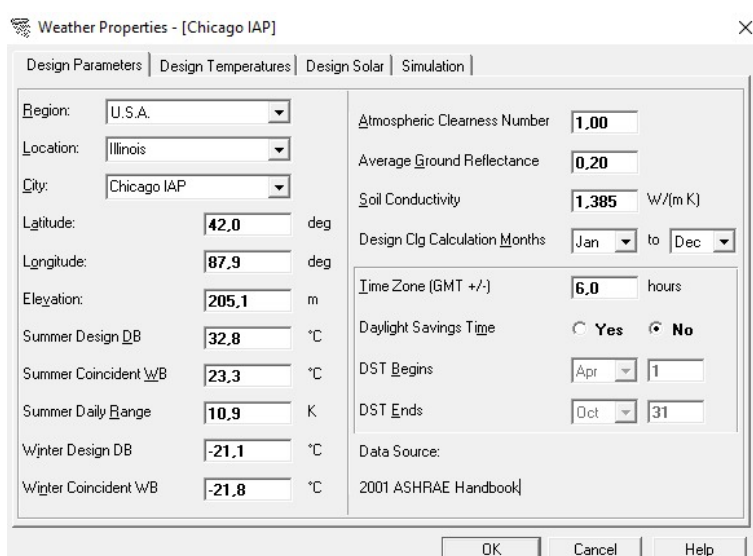


Figura 11: Menu Weather do software HAP.

As abas deste menu são resumidas de seguida:

- DESIGN PARAMETERS permite a configuração dos parâmetros climáticos gerais para a localização específica. Esses parâmetros são cruciais para definir as condições ambientais que o edifício enfrentará durante as simulações térmicas e energéticas.
- DESIGN TEMPERATURES contém informação sobre o dia mais quente e os perfis de humidade para a cidade selecionada. Com base nos parâmetros da cidade escolhida, o HAP cria perfis de 24 horas de temperatura e humidade para todos os 12 meses. Cada perfil representa condições mais quentes do que o normal e níveis típicos de humidade que coincidem com estas temperaturas. Estes perfis de temperatura e humidade são a base para cálculos de carga de refrigeração e cálculos de desempenho do sistema.
- DESIGN SOLAR abrange informações sobre os perfis de ganho de calor solar para a cidade selecionada. Com base nos parâmetros da cidade escolhida, o HAP constrói perfis de 24 horas de fluxo solar e ganho de calor solar para todos os 12 meses utilizando procedimentos da ASHRAE. Cada perfil representa

condições solares de céu claro. Os perfis solares são utilizados para cálculos de carga em paredes, telhados e janelas.

- SIMULATION permite configurar os parâmetros para executar a simulação dinâmica do comportamento térmico do edifício ao longo do tempo, além de definir o calendário operacional para a simulação energética. Existem também opções para selecionar um perfil climático a partir da biblioteca do HAP ou importar um ficheiro climático externo.

PROJECT LIBRARIES

Em PROJECT LIBRARIES são introduzidas as características existentes no edifício, ou seja, são definidas as soluções de paredes e coberturas, são identificados os perfis de funcionamento dos equipamentos de climatização, ventilação e iluminação e também o perfil de ocupação. São também definidos os tipos de vãos e as sombras existentes, os chillers, caldeiras, torres de arrefecimento e, por fim, identifica-se a fonte de energia utilizada, seja sob a forma de energia elétrica, seja sob a forma de combustível fóssil.

Dentro do menu PROJECT LIBRARIES temos os submenus (Figura 12):

- Schedules
- Walls
- Roofs
- Windows
- Doors
- Shades
- Chillers
- Cooling Towers
- Boillers
- Eletric Rates
- Fuel Rates

Library	Number of Entries
Schedules	none
Walls	none
Roofs	none
Windows	none
Doors	none
Shades	none
Chillers	none
Cooling Towers	none
Boilers	none
Electric Rates	none
Fuel Rates	none

Figura 12: Menu Project Libraries do software HAP.

O conjunto de submenus é resumido de seguida:

- SCHEDULES: Configurações de horários de operação e ocupação dos espaços. Estas entradas são cruciais para determinar os padrões de uso e os perfis de carga térmica.
- WALLS: Definições de tipos de paredes. Especifica as propriedades térmicas das paredes, como a resistência térmica que afetam a carga térmica do edifício.
- ROOFS: Tipos de coberturas. Estes dados são usados para calcular as cargas térmicas associadas às trocas de calor através das coberturas dos edifícios.
- WINDOWS: Tipos de janelas. As propriedades térmicas das janelas, como o coeficiente de transmissão térmica.
- DOORS: Definições de tipos de portas. Assim como as paredes e janelas, as portas influenciam a carga térmica através das suas propriedades de isolamento e transmitância térmica.
- SHADES: Tipos de sombreamento. Estes componentes são utilizados para modelar o efeito de dispositivos de sombreamento na redução de ganhos solares.
- CHILLERS: Um chiller de água é um equipamento utilizado para arrefecer água ou outros líquidos em diversas aplicações, utilizando um ciclo termodinâmico. Existem diversos tipos de chillers de água, sendo os mais comuns os chillers de absorção, centrífugos, de parafuso helicoidal e scroll. Além destes, também existem alguns chillers alternativos. Os chillers podem ser refrigerados tanto por ar como por água.
- COOLING TOWERS: Configurações de torres de arrefecimento. Estes dispositivos são usados para dissipar o calor removido pelos chillers e influenciam a eficiência do sistema de arrefecimento.
- BOILERS: Caldeiras são sistemas de aquecimento que fornecem energia térmica aos edifícios.
- ELECTRIC RATES: Estes dados são usados para calcular os custos operacionais associados ao consumo de energia elétrica pelos sistemas do edifício.
- FUEL RATES: As taxas de combustíveis são utilizadas para calcular os custos operacionais associados ao consumo de combustíveis pelos sistemas de aquecimento.

SPACES

No menu SPACES são introduzidas as diferentes zonas a analisar e é efetuada a caracterização das mesmas através da indicação da respetiva área, coeficiente de transmissão térmica, requisitos de ventilação, constituição das paredes, portas e vidros exteriores, pavimentos e coberturas. O menu tem as abas (Figura 13):

- General

- Internals
- Walls, Windows, Doors
- Roofs, Skylights
- Infiltration
- Floors
- Partitions

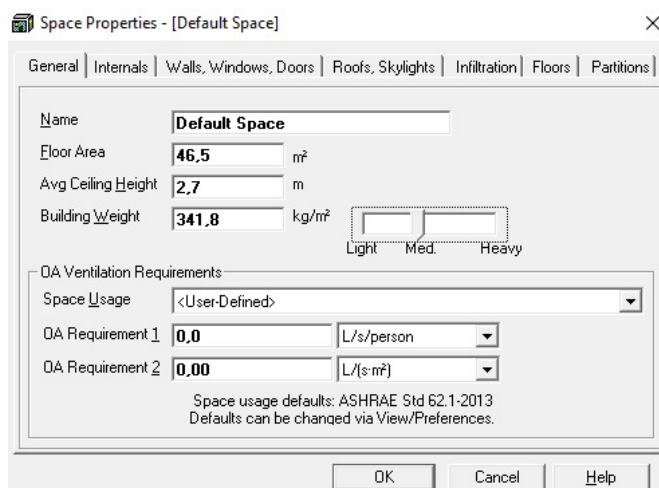


Figura 13: Menu Spaces do software HAP.

O conjunto de abas é resumido de seguida:

- GENERAL é utilizada para definir vários valores-chave que descrevem o espaço como um todo e os requisitos de ventilação para o espaço pretendido.
- INTERNALS permite a configuração de parâmetros internos que influenciam a carga térmica de um espaço. Estes parâmetros incluem o número de ocupantes, o ganho de calor sensível e latente por pessoa, a densidade de potência e o ganho de calor sensível da iluminação, a potência e os ganhos de calor sensível e latente dos equipamentos, e a taxa de fluxo de ar de infiltração com os respetivos ganhos de calor sensível e latente.
- WALLS, WINDOWS, DOORS contém informações sobre a orientação das paredes e as janelas, sombreamento externo e portas presentes.
- ROOFS, SKYLIGHTS abrange informações sobre a orientação de telhados horizontais e inclinados, assim como as claraboias presentes.
- INFILTRATION contém informações sobre o fluxo de ar de infiltração para o espaço. A infiltração resulta da entrada de ar exterior no espaço, geralmente devido a fugas em torno de janelas e portas, bem como pela abertura e fecho de portas no espaço.
- FLOORS engloba informações sobre a transferência de calor através dos pavimentos. Os dados nesta aba referem-se aos tipos de pavimento pelos quais

é analisado o fluxo de calor: pavimentos sobre regiões não condicionadas ou parcialmente condicionadas, pavimentos de laje sobre o solo e pavimentos de caves. O HAP assume que a transferência de calor através dos pavimentos sobre regiões condicionadas é insignificante.

- PARTITIONS inclui informações sobre a transferência de calor através de paredes e tetos que são adjacentes a regiões não condicionadas ou parcialmente condicionadas, ou adjacentes a regiões com temperaturas significativamente diferentes.

SYSTEMS

SYSTEMS é utilizado para introduzir e caracterizar os sistemas de climatização do edifício. A caracterização consiste na introdução dos perfis diários e mensais de funcionamento, as zonas climatizadas, as temperaturas e caudais de funcionamento e a caracterização das unidades interiores do sistema de climatização. Dentro do menu SYSTEMS temos as abas (Figura 14):

- General
- Components
- Zone Components
- Sizing Data
- Equipment

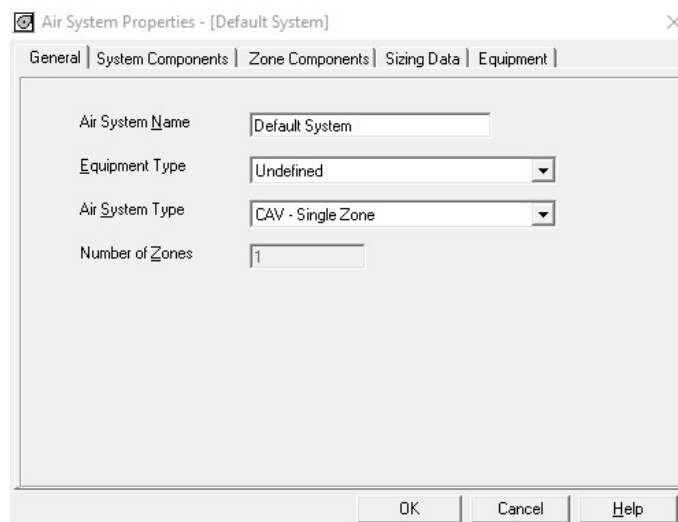


Figura 14: Menu SYSTEMS do software HAP.

O conjunto de abas mencionadas, são resumidas de seguida:

- GENERAL no formulário do sistema engloba vários valores-chave que descrevem a natureza do sistema como um todo. Define a classificação do equipamento para o sistema de AVAC. A escolha de um tipo de equipamento determina os tipos de sistemas oferecidos nas próximas abas, os componentes e controles que

podem ser incluídos no sistema, as opções para fontes de arrefecimento e aquecimento, e se um sistema pode ser ligado a certos tipos de plantas.

- ZONE COMPONENTS inclui informações sobre os componentes localizados dentro ou adjacentes às zonas servidas pelo sistema. Isto inclui terminais de fornecimento, termostatos, unidades de aquecimento suplementar e os espaços incluídos na zona.
- SIZING DATA contém dois tipos de informação: especificações para como o sistema deve ser dimensionado e dados de dimensionamento do sistema e das zonas. As especificações de dimensionamento são sempre necessárias, mas os dados de dimensionamento do sistema e das zonas são geralmente calculados pelo HAP. No entanto, quando se estuda o desempenho de um sistema existente, os dados de dimensionamento podem ser inseridos diretamente.
- EQUIPMENT abrange informações sobre os elementos de arrefecimento e aquecimento. O aquecimento por resistência elétrica é simplesmente especificado como uma fonte de aquecimento numa aba anterior e não requer mais inputs, portanto, não está incluído aqui. Esta informação é relevante apenas para análises energéticas. Quando o programa é executado no modo de cálculo de carga do sistema, esta aba não aparece.

PLANT PROPERTIES

O menu PLANTS PROPERTIES (Figura 15) permite definir o tipo de central que está a ser especificada. A escolha do tipo de central determinará o tipo e a quantidade de dados necessários nas abas seguintes. É através deste menu que se introduzem e caracterizam os equipamentos de climatização, assim como a configuração de funcionamento, mais especificamente, os horários de funcionamento, características de distribuição, nomeadamente temperaturas dos fluidos, caudal, eficiência da bomba de circulação do fluido e o tipo de fluido.

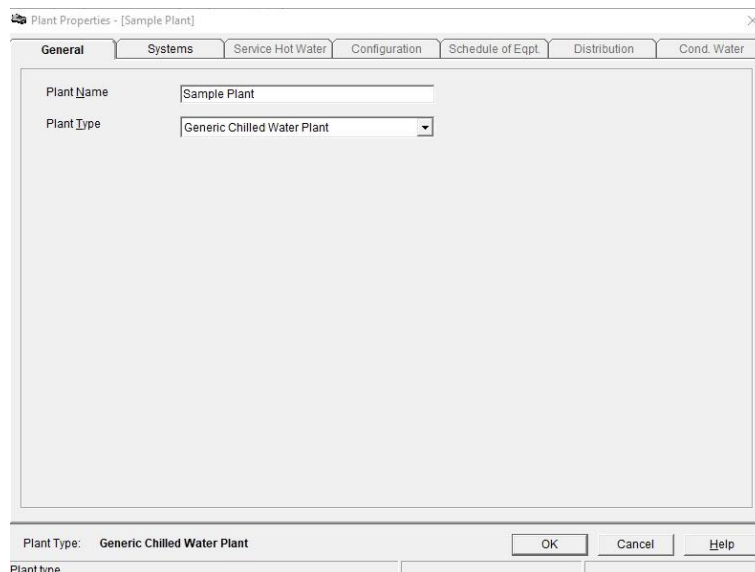


Figura 15: Menu PLANT PROPERTIES do software HAP.

O HAP oferece funcionalidades para analisar uma variedade de tipos comuns de centrais de água gelada, de água quente e de vapor, tal como se evidencia na Figura 16.

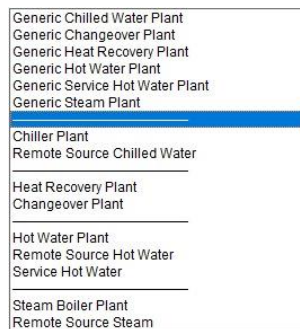


Figura 16: Tipos de centrais de água gelada, água quente e vapor disponíveis no software HAP.

BUILDINGS

BUILDINGS permite introduzir o edifício em análise no qual é indicado quais os sistemas que lhe estão associados, a fonte de energia associada, a energia elétrica e o gás natural, ou outro tipo de combustível fóssil. Dentro do menu BUILDINGS temos as abas (Figura 17):

- Plants
- Systems
- Misc. Energy
- Meters

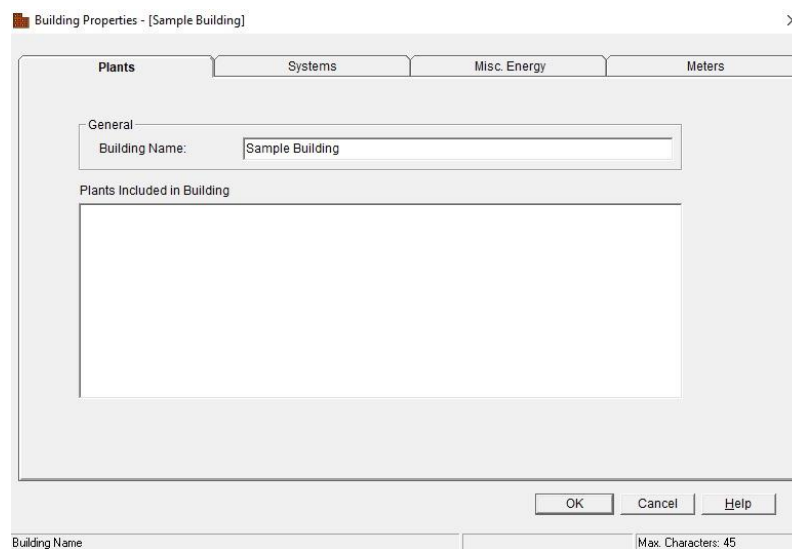


Figura 17: Menu Buildings do software HAP

O conjunto de abas é resumido de seguida:

- PLANTS permite a configuração dos sistemas de aquecimento e arrefecimento associados ao edifício.

- SYSTEMS é usada para definir os sistemas de distribuição de ar e água quente/fria dentro do edifício. Inclui detalhes sobre a configuração de AVAC, como sistemas de ventilação, tipos de unidades terminais e distribuição de água.
- MISC. ENERGY permite a inserção de dados adicionais de consumo energético que não estejam diretamente ligados aos sistemas principais de AVAC. Isto pode incluir consumos energéticos de equipamentos auxiliares, iluminação adicional, ou qualquer outro uso de energia que possa influenciar o balanço energético do edifício.
- METERS é dedicada à configuração e monitorização de medidores de energia. Permite definir medidores específicos para diferentes sistemas ou áreas do edifício, facilitando a gestão e análise do consumo energético.

Capítulo 3

Caso de Estudo

3. Caso de Estudo

Neste capítulo pretende-se caracterizar o caso de estudo deste projeto. Para esse efeito são apresentadas:

- As características do edifício e das suas envolventes;
- As características psicométricas interiores e exteriores,
- Os ganhos internos e externos;
- Os perfis de utilização;
- Todos os processos/passos realizados, desde o tratamento das plantas do edifício até à introdução dos dados no software para o cálculo das cargas térmicas.

Para a realização deste projeto foi escolhido o edifício comumente designado por “Bloco C”, o qual é um dos edifícios da Escola Superior de Tecnologia de Castelo Branco, uma das Unidades Orgânicas do Instituto Politécnico de Castelo Branco.

A Escola Superior de Tecnologia de Castelo Branco, adiante designada apenas por ESTCB, encontra-se localizada na cidade de Castelo Branco, mais precisamente no Campus da Talagueira, a uma cota de 328 metros (aproximadamente).

De acordo com [10], devido à sua localização geográfica, Castelo Branco caracteriza-se por:

- Temperatura média no verão acima dos 27,8°C, no qual agosto é o mês mais quente do ano com temperaturas médias de 31,1°C;
- Temperatura máxima de inverno geralmente inferior a 15,6°C, sendo que janeiro é o mês mais frio com temperaturas médias mínimas de 1,7°C e máximas de 11,7°C.

Com base nas NUTS³ – Unidades territoriais para fins estatísticos de Portugal, Castelo Branco está inserido nas NUTS III – Unidades de nível III naquilo a que se convencionou designar por Beiras e S. Estrela (Figura 18).

Nas NUTS III são definidas três zonas climáticas de inverno (I1, I2 e I3) e três zonas climáticas de verão (V1, V2 e V3) para aplicação de requisitos de qualidade térmica da envolvente.

As zonas climáticas de inverno são definidas a partir do número de graus-dias (GD)⁴ na base de 18 °C, correspondente à estação de aquecimento. Já as zonas climáticas de

³ As NUTS, acrónimo para Nomenclatura das Unidades Territoriais para fins Estatísticos, correspondem a uma nomenclatura comum, das unidades territoriais estatísticas, estabelecida pela União Europeia (UE) para permitir a recolha, o tratamento e a publicação de estatísticas regionais harmonizadas na União Europeia.

⁴ GD: Número de graus-dias, na base de 18 °C, correspondente à estação convencional de aquecimento.



Figura 20 - Bloco C da Escola Superior de Tecnologia de Castelo Branco.

O edifício apresenta fachadas orientadas a Norte, Sul, Este e Oeste e subdivide-se em dois pisos – Piso 0 e Piso 1 – sendo as suas entradas principais realizadas ao nível do Piso 0 na fachada a Este e a Oeste.

Na Figura 21 pode observar-se a orientação e identificação dos edifícios, nomeadamente os Blocos A, B, C e D.



Figura 21: Orientação e identificação dos edifícios da ESTCB.

O Piso 0 é constituído por:

- quatro laboratórios;
- três gabinetes;
- instalações sanitárias (uma masculina e outra feminina);
- duas divisões destinadas a arrumações.

A disposição destes espaços encontra-se esquematizada na Figura 22.

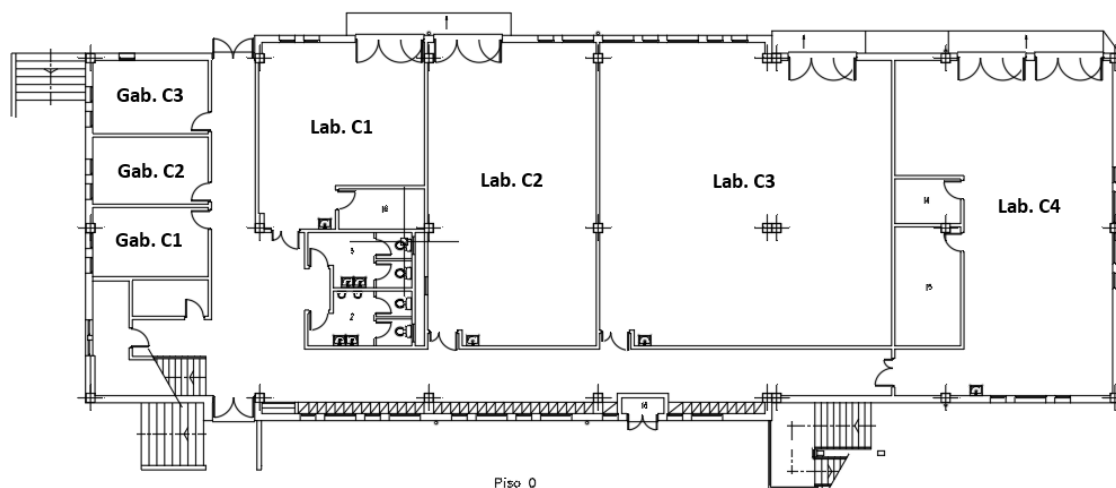


Figura 22: Planta do piso 0 do Bloco C da ESTCB.

Já o Piso 1 é constituído por:

- oito laboratórios;
- instalações sanitárias (uma masculina e outra feminina).

A disposição dos espaços é organizada conforme se pode ver na Figura 23.

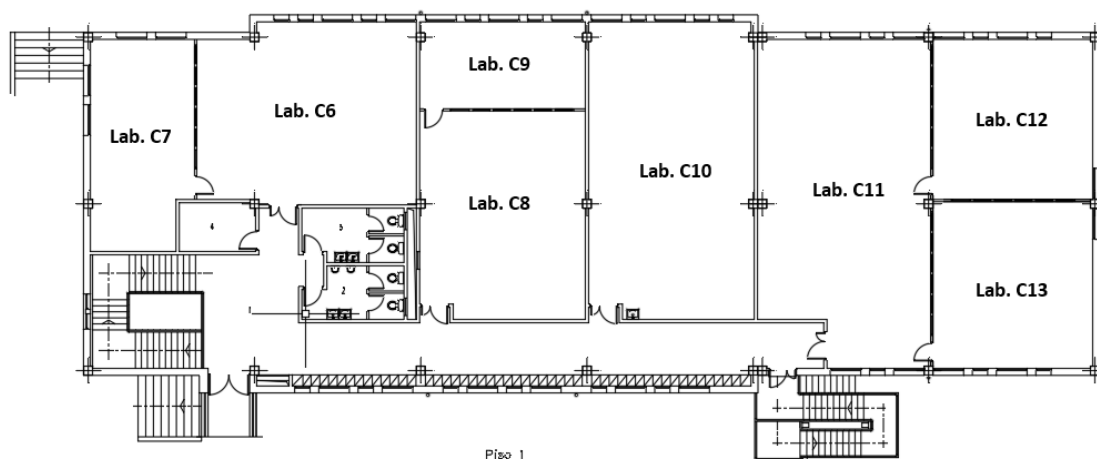


Figura 23: Planta do piso 1 do Bloco C da ESTCB.

Piso 0

Relativamente ao Piso 0, e analisando a Figura 22, encontram-se os Gabinetes C1, C2 e C3 destinado a docentes com uma ocupação prevista para 2 pessoas por gabinete. Estes gabinetes são equipados com mobiliário básico, como mesas, cadeiras, armários e computadores, adequados para a realização das tarefas dos docentes.

Os quatro laboratórios existentes são destinados aos cursos oferecidos pela instituição. O **Laboratório C1: Laboratório de Conceção e Projeto** está equipado com mesas, cadeiras, armários, computadores, projetor e equipamentos elétricos, visíveis na Figura 24, como uma polidora, um robot e uma impressora 3D. Este laboratório tem uma capacidade de 21 lugares sentados.

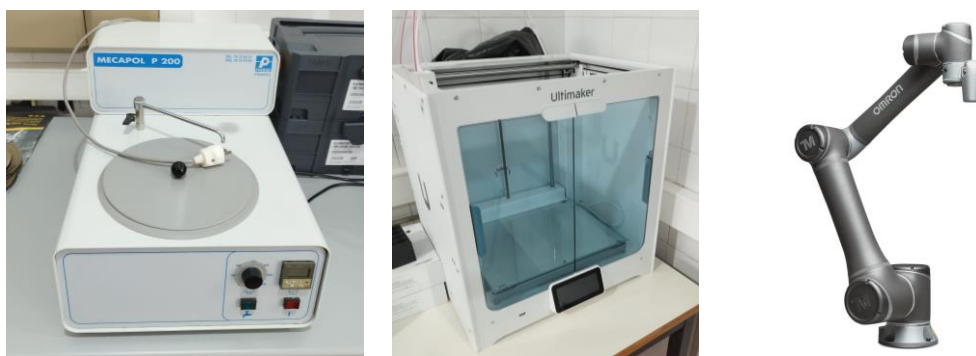


Figura 24: Alguns dos equipamentos existentes no Laboratório C1.

O **Laboratório C2: Laboratório de Fluidos e Calor** está equipado com o mobiliário básico mencionado no Laboratório C1, e também por alguns equipamentos elétricos visíveis na Figura 25, como uma bancada de condicionamento de ar, um banco hidráulico, um simulador de energia solar térmica e também uma bancada de medição e demonstração de bombas em série e/ou paralelo. Este laboratório tem uma capacidade de 23 lugares sentados.



Figura 25: Alguns dos equipamentos existentes no Laboratório C2.

O **Laboratório C3: Robótica e Equipamentos Inteligentes** está equipado com o mobiliário básico já mencionado e por bancadas elétricas equipadas com multímetros, osciloscópios, fontes de alimentação, etc. Também existem outros equipamentos elétricos de maior dimensão/consumo, tais como um engenho de furar, uma impressora 3D, uma esmeriladora, e também um robot, entre outros equipamentos (Figura 26). Este laboratório tem uma capacidade de 21 lugares sentados.



Figura 26: Exemplos de equipamentos existentes no Laboratório C3.

Figura copiada de [12].

O **Laboratório C4: Estruturas e Construção** está equipado com o mobiliário básico já mencionado e equipamentos elétricos de maior consumo, tais como uma estufa, uma máquina de ensaios de compressão, uma serra elétrica de blocos de cimento, entre outros (Figura 27). Este laboratório tem uma capacidade de 21 lugares sentados.



Figura 27: Equipamentos existentes no Laboratório C4.

Piso 1

Analisando a Figura 23, referente ao Piso 1, são visíveis os laboratórios que são equipados com o mobiliário básico já mencionado e equipamentos elétricos, alguns deles visíveis na Figura 28, tais como computadores, projetores, osciloscópios, geradores de sinal e multímetros. Ao contrário dos laboratórios do piso 0 os laboratórios do piso 1 são constituídos apenas por estes equipamentos mais simples e de menor potência elétrica nominal.



Figura 28: Equipamentos existentes nos laboratórios do Piso 1.

Como se iniciou este trabalho apenas com as plantas dos dois pisos do Bloco C, houve que proceder à recolha de informação complementar. Para o efeito foram efetuadas várias visitas ao edifício de modo a recolher:

- Altura e constituição das portas e portões, por recurso à utilização de uma fita métrica;
- Altura das janelas e dos respetivos parapeitos, por recurso à utilização de uma fita métrica;
- Pé-direito dos pisos, por recurso a medidor de distâncias a laser;
- Ocupação (baseado no nº de lugares sentados) e tipo de atividade exercida em cada gabinete/laboratório;

- Quantidade, tipo e potência das lâmpadas existentes nos tetos e nas paredes dos gabinetes/laboratórios;
- Quantidade e potência elétrica dos equipamentos elétricos/eletrônicos existentes em gabinetes/laboratórios;
- Tipo de sistema de climatização existente (UTV's, VC's, etc.).

A Figura 29 e a Figura 30 ilustram um resumo dos dados recolhidos e tabelados no decurso dessas visitas. A tabela contendo a informação completa pode ser consultada no Anexo I.

BLOCO C		Geral			
Piso	Local	Espaço			
		Pê Direito m	Larg. m	Comp. m	Área pavimento m ²
Piso 0	Gab. C3	3,00 m	3,28 m	5,19 m	= 17,01 m ²
Piso 0	Gab. C2	3,00 m	3,00 m	5,19 m	= 15,56 m ²
Piso 0	Gab. C1	3,00 m	3,09 m	5,19 m	= 16,02 m ²
Piso 0	Lab. C1	5,00 m	8,35 m	7,45 m	= 62,21 m ²
Piso 0	Lab. C2	5,00 m	13,57 m	7,58 m	= 102,79 m ²
Piso 0	Lab. C3	5,00 m	12,77 m 0,80 m	13,12 m 7,43 m	= 173,42 m ²
Piso 0	Lab. C4	5,00 m	15,00 m	9,78 m	= 146,70 m ²

Figura 29: Características gerais de arquitetura do Piso 0

BLOCO C		Geral			
Piso	Local	Espaço			
		Pê Direito m	Larg. m	Comp. m	Área pavimento m ²
Piso 1	Lab. C7	3,50 m	2,37 m 7,30 m	3,92 m 4,76 m	= 44,00 m ²
Piso 1	Lab. C6	3,50 m	0,80 m 7,30 m	7,30 m 10,04 m	= 79,15 m ²
Piso 1	Lab. C9	3,50 m	3,96 m	7,58 m	= 30,00 m ²
Piso 1	Lab. C8	3,50 m	9,51 m	7,58 m	= 72,03 m ²
Piso 1	Lab. C10	3,50 m	13,57 m	7,58 m	= 102,79 m ²
Piso 1	Lab. C11/C12/C	3,50 m	2,23 m 12,77 m	12,15 m 15,32 m	= 222,72 m ²

Figura 30: Características gerais de arquitetura do Piso 1

3.2. Ganhos internos

Os ganhos internos em edifícios são uma combinação complexa de calor produzido por atividades humanas e operação de equipamentos elétricos. Em áreas como laboratórios, por exemplo, onde são utilizados equipamentos especializados como estufas, microscópios, e outros dispositivos, há uma produção contínua de calor associada ao funcionamento desses equipamentos. Além disso, atividades experimentais e processos químicos podem também contribuir significativamente para a geração de calor.

Nos espaços de ensino e gabinetes de docentes, ganhos internos são principalmente derivados da presença de pessoas e do uso constante de equipamentos de escritório, como computadores, impressoras e dispositivos eletrônicos. A iluminação artificial também é uma fonte importante de ganho interno. O calor produzido dentro de um edifício, que contribui para a temperatura interna pode ser proveniente de várias fontes.

Esses ganhos de calor podem afetar significativamente o conforto térmico dentro de um espaço. Durante o verão, os ganhos internos podem aumentar a necessidade de arrefecimento, enquanto no inverno, podem reduzir a necessidade de aquecimento.

3.3. Perfis de utilização

Na simulação dinâmica de edifícios, definir perfis de utilização específicos para diferentes tipos de edifícios é crucial para prever com precisão o desempenho térmico e energético. O perfil de utilização de um edifício do ensino superior reflete a complexidade e a diversidade de atividades que ocorrem em um ambiente acadêmico.

O perfil de utilização de um edifício universitário é caracterizado por padrões de ocupação e uso que variam ao longo do dia, da semana e do ano. Durante o período letivo, a ocupação é alta durante as horas de aula, tipicamente das 8h30 às 18h30, com picos de atividade nas transições entre aulas e períodos de maior uso das instalações, como laboratórios, bibliotecas e salas de estudo.

Fora do horário das aulas e também durante os fins de semana, as áreas comuns, como a biblioteca e a cantina, têm uma ocupação nula.

Além disso, períodos de avaliações (exames) e períodos de férias apresentam uma redução drástica na ocupação e uso das instalações, com muitos espaços a terem uma utilização muito reduzida ou mesmo nula.

O perfil de utilização é essencial para modelar com precisão as necessidades de energia e conforto térmico em simulações de edifício, permitindo uma análise detalhada do desempenho energético ao longo de diferentes períodos do ano. Ao considerar o perfil de utilização de um edifício é possível otimizar o uso de sistemas AVAC, iluminação e outros recursos energéticos, contribuindo para a eficiência energética e o conforto dos ocupantes.

3.4. Aplicação do estudo no Hourly Analysis Program

Para determinar as cargas térmicas necessárias para o projeto dos sistemas de climatização, utiliza-se o HAP (Hourly Analysis Program) anteriormente descrito.

Seguindo a metodologia de introdução de dados solicitadas no HAP descrita no capítulo 2, foi desenvolvido o presente estudo como é ilustrado na Figura 31. Dentro do menu PROJETO/secção COMPONENT é possível ver um resumo dos elementos incluídos no projeto atual, visualizando-se o número de entradas para cada categoria.

Este projeto contém:

- 1 (uma) entrada para WEATHER, que corresponde às condições climáticas de Castelo Branco, Portugal;
- 13 (treze) entradas para SPACES, indicando os diferentes espaços ou zonas definidas no edifício;
- 12 (doze) entradas para SYSTEMS, correspondendo aos diversos sistemas de climatização;
- 2 (duas) entradas para PLANTS, referentes às centrais térmicas;
- 1 (uma) entrada para BUILDINGS, representando o edifício em si.

Component	Number of Entries
Weather: Castelo Branco, Portugal	1
Spaces	13
Systems	12
Plants	2
Buildings	1
Project Libraries	

Figura 31: Estrutura de menus do PROJETO no software HAP.

WEATHER

A Figura 32 mostra a janela WEATHER PROPERTIES, na aba DESIGN PARAMETERS onde é definida a configuração das propriedades climáticas no software HAP para a cidade de Castelo Branco, Portugal. As coordenadas geográficas são definidas com a latitude de 39,9°N e a longitude 7,3°W, com uma elevação média de 328 metros acima do nível do mar [13].

Para as condições de projeto de verão, a temperatura de bolbo seco é de 36,2°C e a temperatura de bolbo húmido coincidente é de 21,5°C, com uma variação diária de temperatura de 14,1 K.

No inverno a temperatura de bolbo seco de projeto é de 0,1°C e a temperatura de bolbo húmido coincidente é de -1,1°C.

Os cálculos de arrefecimento de projeto são realizados para todos os meses do ano, de janeiro a dezembro [14].

O fuso horário foi ajustado para GMT⁶ = 0 h e o Horário de Verão foi considerado como tendo início às 02h00 do último Domingo de Março (31 de março, em 2024) até às 02h00 do último Domingo de Outubro (27 de outubro, em 2024).

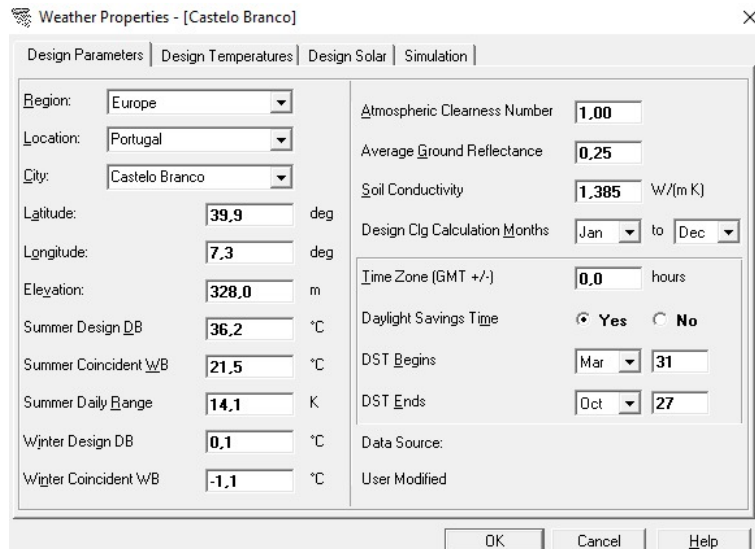


Figura 32: Menu WEATHER do PROJETO no software HAP.

Os dados climáticos de Castelo Branco são primeiro exportados, em formato “epw”, da folha i016522.xlsx (Figura 33) disponibilizada pela Direção-Geral de Energia e Geologia [13], sendo depois importados para a secção SIMULATION do HAP.

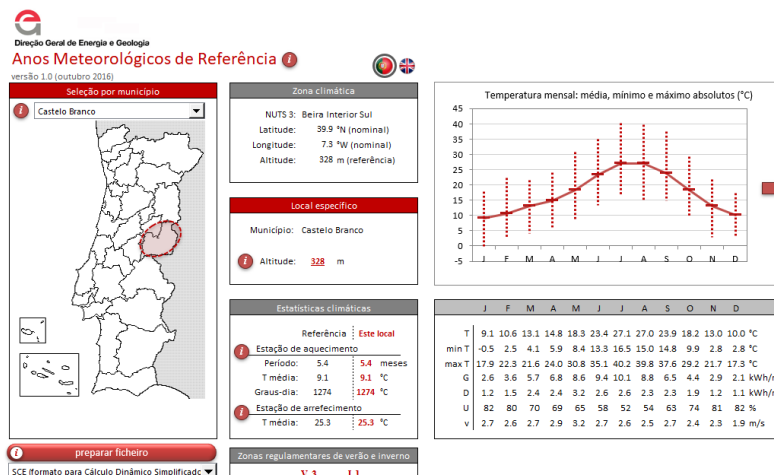


Figura 33: Folha i016522.xlsx da Direção-Geral de Energia e Geologia.

Esta interface permite a definição de condições climáticas para simulações térmicas detalhadas.

⁶ GMT é a sigla inglesa de Greenwich Mean Time cujo significado em português é Tempo Médio de Greenwich.

A Figura 34 exibe a aba SIMULATION já configurada para a cidade de Castelo Branco, indicando que as condições climáticas externas de Castelo Branco serão utilizadas nas simulações. Neste estudo foi definido que o primeiro dia de janeiro de 2024 é uma segunda-feira, o que é importante para o alinhamento correto do calendário semanal no software.

Na seção HOLIDAYS LIST foram adicionados todos os feriados nacionais bem como o dia 16 de abril que é feriado municipal em Castelo Branco. Estes feriados são considerados nos cálculos de carga térmica, pois influenciam os padrões de ocupação e uso do edifício, alterando assim as necessidades de climatização.

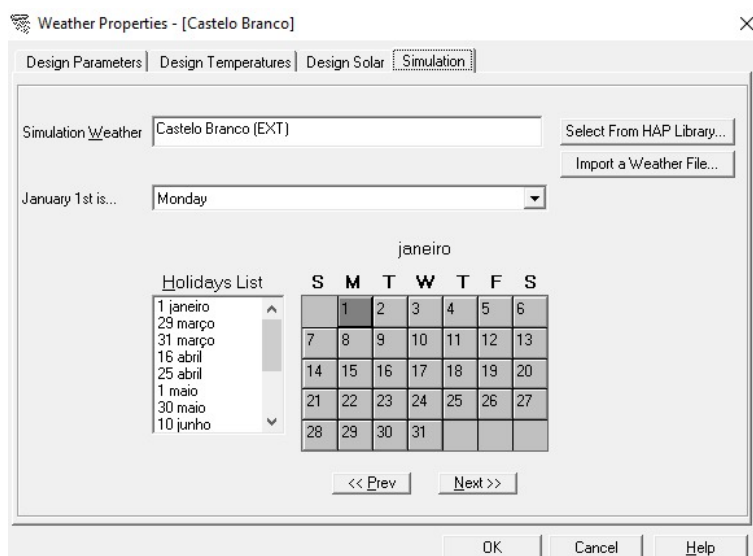


Figura 34: Aba SIMULATION weather do software HAP.

PROJECT LIBRARIES

Na Figura 35 ilustra-se a lista de submenus do menu PROJECT LIBRARIES. Cada entrada na coluna LIBRARY representa um tipo de componente utilizado no software, enquanto na coluna NUMBER OF ENTRIES se indicam quantos itens existem em cada categoria. As componentes incluem:

- Schedules
- Walls
- Roofs
- Windows
- Doors
- Shades
- Chillers
- Cooling Towers
- Boilers

- Electric Rates
- Fuel Rates

Library	Number of Entries
Schedules	2
Walls	2
Roofs	3
Windows	3
Doors	7
Shades	2
Chillers	1
Cooling Towers	1
Boilers	1
Electric Rates	1
Fuel Rates	1

Figura 35: Submenus do menu PROJECT LIBRARIES.

SCHEDULES

Neste estudo foram criados dois horários de operação e ocupação dos espaços:

- Horário do tipo fracionário, usado para iluminação de teto, iluminação de trabalho, equipamentos elétricos, ganhos de calor dos ocupantes e diversas cargas sensíveis ou latentes (Figura 36).

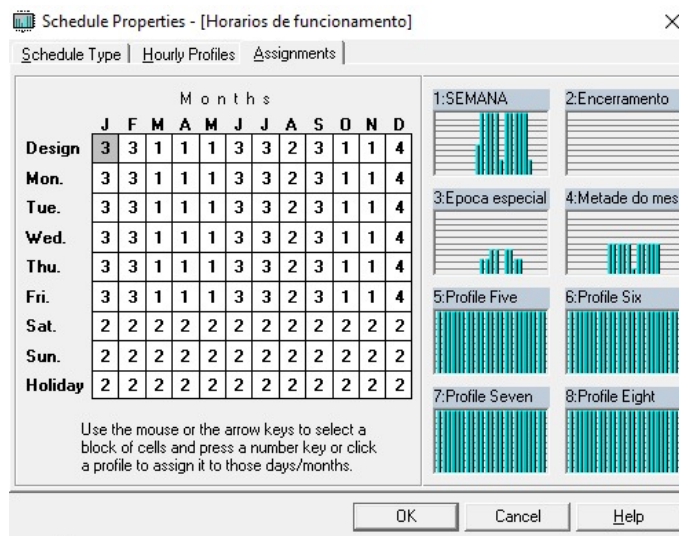


Figura 36: Horário fracionário criado no software HAP.

- Horário para Ventilador/Termostato, onde se definem as horas de funcionamento do equipamento AVAC (Figura 37).

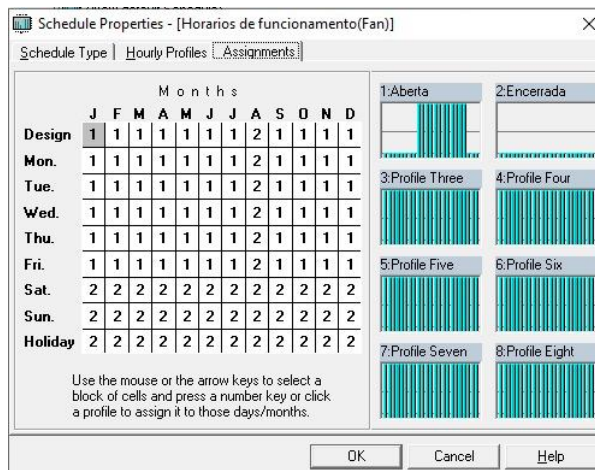


Figura 37: Horário criado para ventilador/termostato no software HAP.

WALLS

Na Figura 38 (relativa ao piso 0) e na Figura 39 (relativa ao piso 1) apresenta-se a envolvente do edifício, ou seja, as paredes exteriores e interiores por onde se processam as trocas de energia sob a forma de calor. As mesmas são identificadas de seguida:

- Paredes com fortes trocas de calor: são as paredes que separam um ambiente interior climatizado de um ambiente exterior;
- Paredes com pequenas trocas de calor: são as paredes que separam um ambiente climatizado interior de um ambiente não climatizado interior;
- Paredes onde não existe troca de calor: são as paredes interiores que separam dois ambientes climatizados.

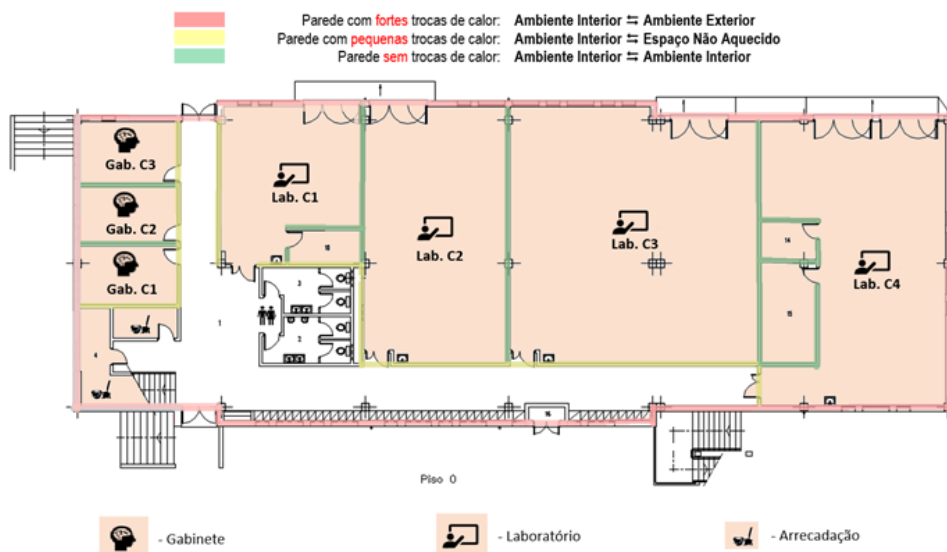


Figura 38: Trocas de energia sob a forma de calor entre o interior e o exterior no Piso 0.

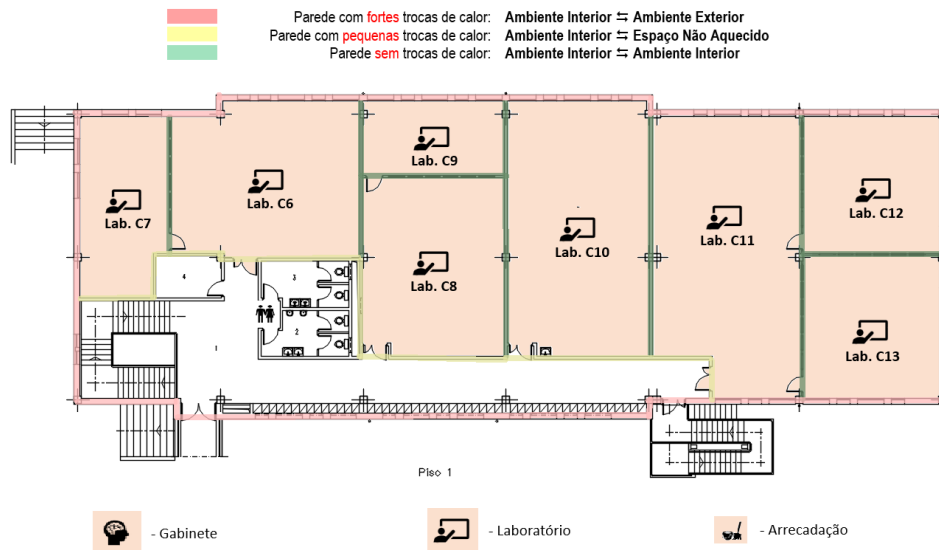


Figura 39: Trocas de energia sob a forma de calor entre o interior e o exterior no Piso 1. Na Figura 40 ilustra-se a constituição das paredes exteriores do Bloco C, em que:

- Espessura = 30 cm
- Coeficiente Global $U = 1,10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

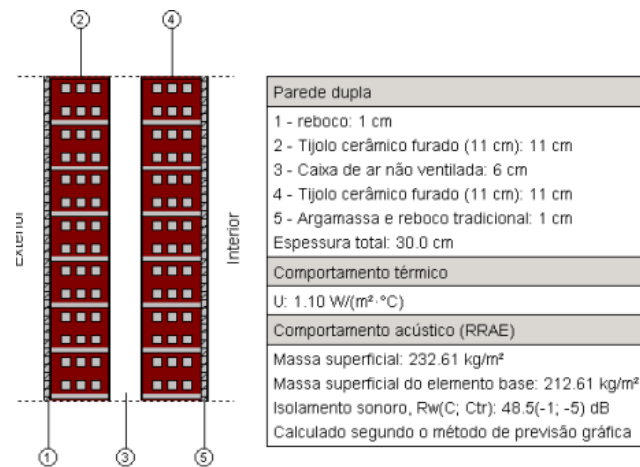


Figura 40: Dados construtivos das paredes exteriores.

Na Figura 41 ilustra-se a constituição das paredes interiores do Bloco C, em que:

- Espessura = 15 cm
- Coeficiente Global $U = 1,78 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$

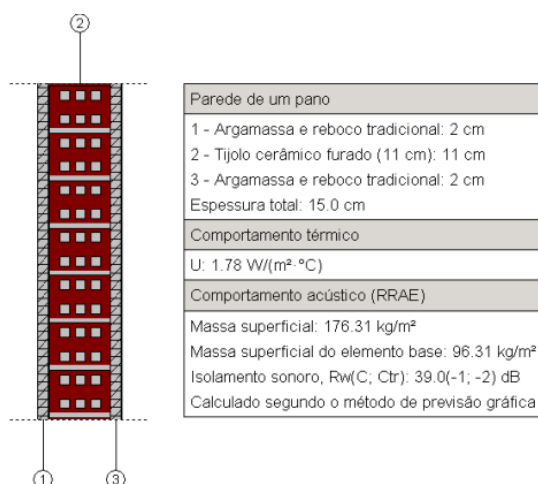


Figura 41: Dados construtivos das paredes interiores.

ROOFS

Na Figura 42 (relativa à cobertura), Figura 43 (relativa à laje entre pisos) e Figura 44 (relativa à laje térrea) ilustra-se a constituição dos três tipos de coberturas presentes no Bloco C, as mesmas são detalhadas de seguida:

Na Figura 42 ilustra-se a constituição da cobertura do Bloco C, em que:

- Espessura = 31 cm
- Coeficiente Global U arrefecimento = 2,30 W/(m².°C)
- Coeficiente Global U aquecimento = 2,74 W/(m².°C)

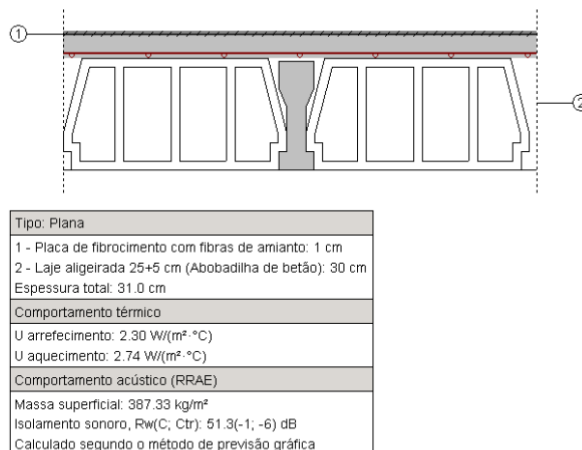
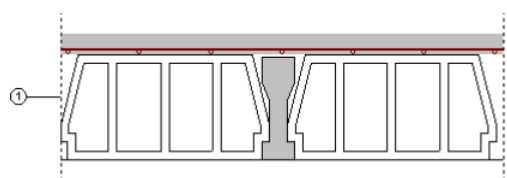


Figura 42: Dados construtivos da cobertura.

Na Figura 43 ilustra-se a constituição da laje entre o piso 0 e o piso 1 do Bloco C, em que:

- Espessura = 30 cm
- Coeficiente Global U arrefecimento (superior) = 1,82 W/(m².°C)
- Coeficiente Global U aquecimento (superior) = 2,44 W/(m².°C)
- Coeficiente Global U arrefecimento (inferior) = 2,44 W/(m².°C)

- Coeficiente Global U aquecimento (inferior) = 1,82 W/(m².°C)

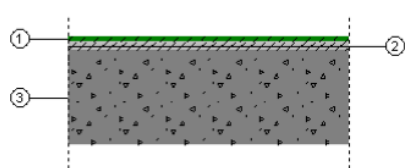


Laje aligeirada	
1 - Laje aligeirada 25+5 cm (Abobadilha de betão): 30 cm	
Espessura total: 30,0 cm	
Comportamento térmico (Superior)	
U arrefecimento:	1,82 W/(m ² .°C)
U aquecimento:	2,44 W/(m ² .°C)
Comportamento térmico (Inferior)	
U arrefecimento:	2,44 W/(m ² .°C)
U aquecimento:	1,82 W/(m ² .°C)
Comportamento térmico (Consola)	
U arrefecimento:	2,86 W/(m ² .°C)
U aquecimento:	2,38 W/(m ² .°C)
Comportamento acústico (RRAE)	
Massa superficial:	372,33 kg/m ²
Isolamento sonoro, R _w (C; C _{tr}):	50,9(-1; -6) dB
Calculado segundo o método de previsão gráfica	
Nível global de pressão sonora a sons de percussão normalizado, L _n :	84,1 dB
Calculado segundo o método do invariante (I = 140 dB)	

Figura 43: Dados construtivos da laje entre pisos.

Na Figura 44 ilustra-se a constituição da laje térrea do Bloco C, em que:

- Espessura = 23 cm
- Coeficiente Global U = 0,69 W/(m².°C)



Laje térrea	
1 - Cerâmica vidrada/grés cerâmico: 1 cm	
2 - Argamassa e reboco tradicional: 2 cm	
3 - Betão normal: 20 cm	
Espessura total: 23,0 cm	
Comportamento térmico	
U arrefecimento:	0,69 W/(m ² .°C)
(Para uma laje com comprimento característico B' = 5 m)	
Laje com banda de isolamento perimetral (largura 0,5 m e resistência térmica: 0,5 m ² C/W)	
Pormenor de cálculo (U arrefecimento)	
Superfície da laje, A:	100,00 m ²
Perímetro da laje, P:	40,00 m
Resistência térmica da laje, R _f :	0,14 m ² C/W
Resistência térmica do isolamento perimetral, R _f :	0,50 m ² C/W
Espessura do isolamento perimetral, d _n :	5,00 cm
Tipo de terreno:	Areia semi-densa
Comportamento acústico (RRAE)	
Massa superficial:	523,00 kg/m ²
Isolamento sonoro, R _w (C; C _{tr}):	54,0(-1; -7) dB
Calculado segundo o método de previsão gráfica	
Nível global de pressão sonora a sons de percussão normalizado, L _n :	68,9 dB
Calculado segundo o método simplificado da EN 12354	

Figura 44: Dados construtivos da laje térrea.

WINDOWS

Na Figura 45 (relativa à janela “quadrada”), Figura 46 (relativa à janela “simples”) e Figura 47 (relativa à “janela dupla”) ilustra-se a constituição dos três tipos de janelas presentes no Bloco C, sendo as mesmas detalhadas de seguida:

Na Figura 45 ilustra-se a constituição da janela “quadrada” do Bloco C, em que:

- Dimensões = 70x70 cm
- Coeficiente Global U = 4,532 W/(m².°C)

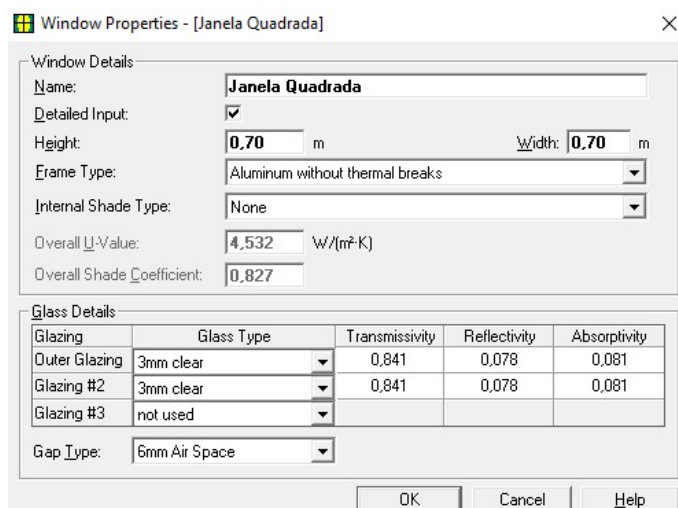


Figura 45: Janela quadrada criada no software HAP.

Na Figura 46 ilustra-se a constituição da janela “simples” do Bloco C, em que:

- Dimensões = 160x70 cm
- Coeficiente Global U = 3,631 W/(m².°C)

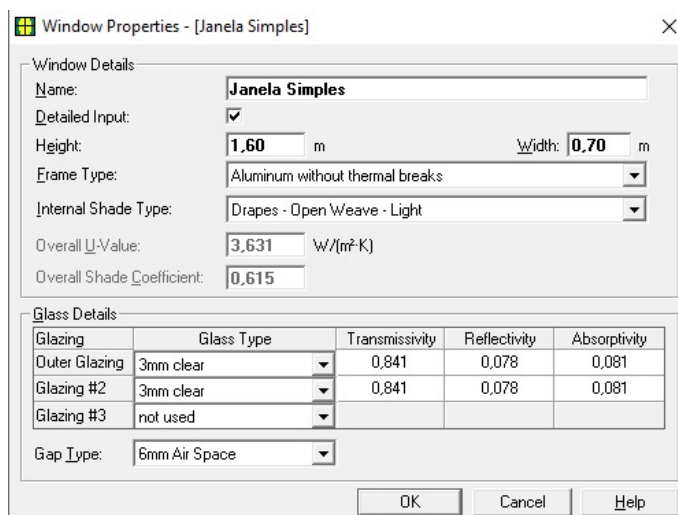


Figura 46: Janela simples criada no software HAP.

Na Figura 47 ilustra-se a constituição da janela “dupla” do Bloco C, em que:

- Dimensões = 160x140 cm
- Coeficiente Global U = 3,584 W/(m².°C)

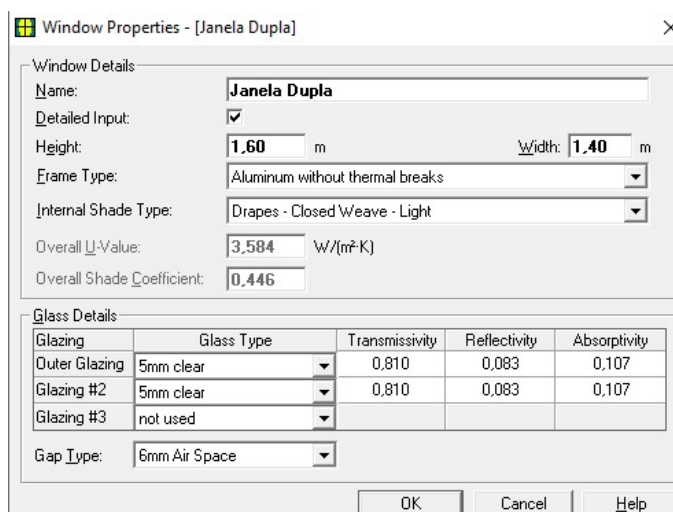


Figura 47: Janela dupla criada no software HAP.

DOORS

Na Figura 48 ilustra-se a constituição dos portões existentes nos laboratórios térreos do Bloco C, com os seguintes detalhes:

- Área do portão = 12 m²
- Coeficiente Global U = 1,703 W/(m².°C)

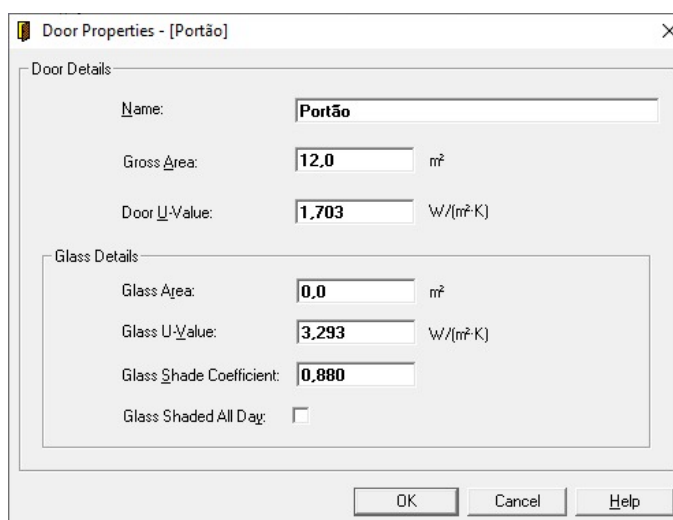


Figura 48: Tipo de porta criada no software HAP.

SHADES

Na Figura 49 e na Figura 50 ilustra-se a constituição das sombras de janelas presentes no Bloco C, as mesmas são detalhadas de seguida:

Na Figura 49 ilustra-se a estrutura das Palas sombreadoras das janelas do Bloco C, em que REVEAL DEPTH define a distância entre a superfície exterior da parede e a superfície exterior do vidro da janela e a PROJECTION FROM SURFACE é a saliência das palas em relação a superfície do edifício.

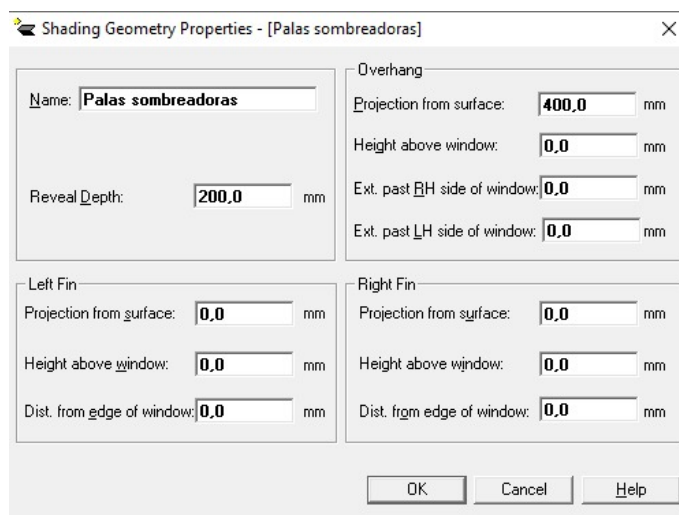


Figura 49: Palas sombreadoras criadas no software HAP.

Na Figura 50 ilustra-se a estrutura da sombra das janelas do Bloco C, mais concretamente na parede orientada a sul, onde é aplicada uma REVEAL DEPTH que define a distância entre a superfície exterior da parede e a superfície exterior do vidro da janela criando uma sombra.

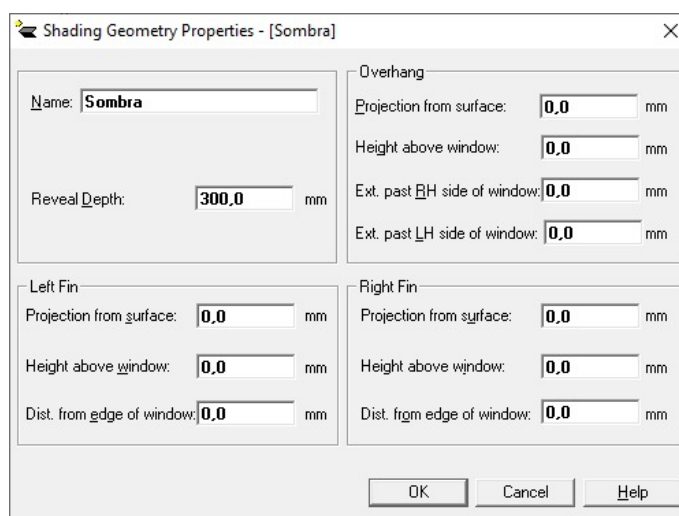


Figura 50: Sombra criada no software HAP.

CHILLERS⁷

De acordo com o documento “Especificações Técnicas da ESTCB – Parte 8: Instalações de Condicionamento de Ar e Ventilação” elaboradas pela HP – Hidrotécnica Portuguesa [15], tanto o Bloco C como o Bloco D são fornecidos com água refrigerada produzida por um Chiller Ar-Água do tipo “package” com condensador arrefecido por ar atmosférico (Figura 51).

A construção e acabamento deste Chiller é adequada para que a unidade funcione à intempérie, arrefecendo água durante todo o ano, quer com temperaturas atmosféricas baixas ou elevadas.

⁷ “Chiller” é a designação em inglês para Unidade Produtora de Água Refrigerada (UPAR).



Figura 51: Chiller que produz água refrigerada para o Bloco C e Bloco D.

As baterias de condensação a ar são constituídas por serpentinas com tubo de cobre sem costura, de alta qualidade, aos quais serão fixas por expansão mecânica conjuntos de alhetas em alumínio não planas e de grande eficiência de permuta. Para tal o espaçamento das alhetas é igual ou inferior a 2 mm. A passagem do ar através das baterias de condensação é forçada por meio de um conjunto de ventiladores instalados na parte superior das unidades. Os feixes tubulares são em tubo de cobre sem costura ligados por expansão mecânica às placas de apoio, as quais estão dispostas de forma a assegurar uma boa eficiência de permuta.

Em resumo:

- Temperatura de entrada12°C
- Temperatura da saída6°C
- Caudal50 m³/h
- Capacidade de arrefecimento300 kW

BOILERS⁸

De acordo com [15] a água quente destinada à climatização do Bloco C e do Bloco D é produzida por duas caldeiras iguais, com a potência unitária de aproximadamente 65% da potência total exigida pela instalação.



Figura 52: Caldeiras que produzem água quente para o Bloco C e Bloco D.

⁸ “Boiler” é a designação em inglês para Caldeira.

Estas caldeiras funcionam a baixa pressão e eram originalmente adequadas à queima de combustível gasoso, nomeadamente gás Propano. Mais tarde estas caldeiras foram adaptadas à queima de Gás Natural.

Ambas as caldeiras possuem um isolamento térmico em lã de basalto com espessura adequada de forma que a temperatura máxima da superfície exterior não ultrapasse 40°C para uma temperatura do ar envolvente de 15°C. Este isolamento será protegido por invólucro da chapa de aço com espessura mínima de 3 mm.

Em resumo:

- Potência calorífica unitária..... 400 000 kcal/h
- Temperaturas de funcionamento..... 90°C / 70°C

SPACES

Na Figura 53 ilustra-se a lista de SPACES criados, sendo apenas considerados os espaços interiores climatizados para efeitos de cálculo.

Space	Floor Area
<New default Space>	
Gab. C1	16,0
Gab. C2	15,5
Gab. C3	17,0
Lab. C1	62,2
Lab. C10	102,8
Lab. C11/C12/C13	222,7
Lab. C2	102,8
Lab. C3	173,4
Lab. C4	146,7
Lab. C5	7,7
Lab. C6	79,2
Lab. C7	44,0
Lab. C8/C9	102,0

Figura 53: Spaces criados no software HAP.

A Figura 54 ilustra o preenchimento do SPACES PROPERTIES relativo ao Laboratório C4. Os dados introduzidos são aqueles que se encontram resumidos na tabela existente no **Anexo 1**. De destacar:

- Área = 146,7 m²
- Pé-direito = 5,0 m
- Peso do edifício = 341,8 kg/m² (médio)
- Requisitos de ventilação de Ar Exterior (OA⁹) = Education: University/college laboratory (segundo os padrões da ASHRAE Std 62.1-2013).

⁹ OA = Outside Air

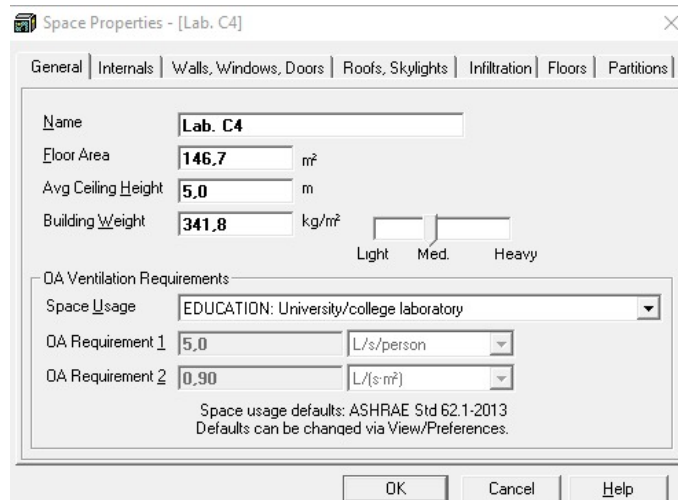


Figura 54: Spaces Properties, aba General no software HAP.

A Figura 55 mostra a aba INTERNALS, que se foca na configuração de parâmetros internos do espaço.

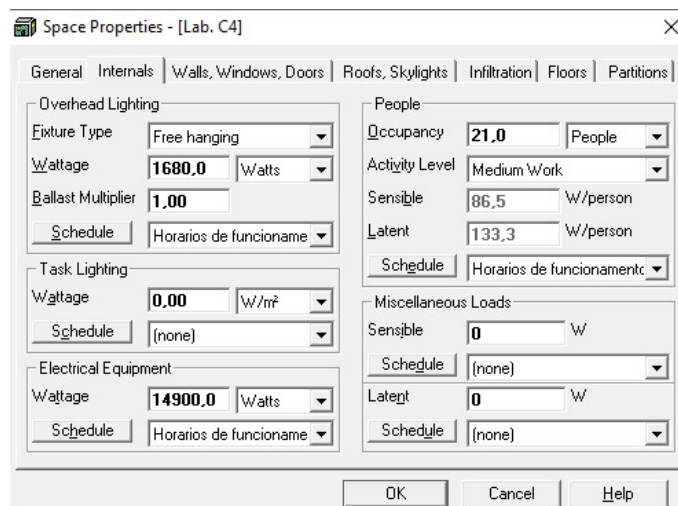


Figura 55: Spaces Properties, aba Internals no software HAP.

Aqui destaca-se a secção OVERHEAD LIGHTING onde se especifica que o tipo de luminária é Free hanging com uma potência total de 1 680 W e um multiplicador de balastro de 1. O horário de funcionamento das luzes está configurado para o perfil “Horários de funcionamento”.

Para TASK LIGHTING, a potência está configurada para 0,00 W/m² e não há um horário de funcionamento especificado, visto que, nenhuma luminária foi considerada nesta secção.

Na secção ELECTRICAL EQUIPMENT foi introduzido o valor 14 900 W, com o horário de funcionamento também definido como HORÁRIOS DE FUNCIONAMENTO.

Na secção PEOPLE inseriu-se uma ocupação de 21 pessoas sentadas, com um nível de atividade definido como MEDIUM WORK visto que é um laboratório com diversas máquinas industriais, com isto, as cargas sensíveis e latentes são definidas

automaticamente. O horário de funcionamento está definido como HORÁRIOS DE FUNCIONAMENTO.

A Figura 56 mostra a aba WALLS, WINDOWS, DOORS onde se definem as características das paredes, janelas e portas do respetivo espaço, conforme a sua exposição.

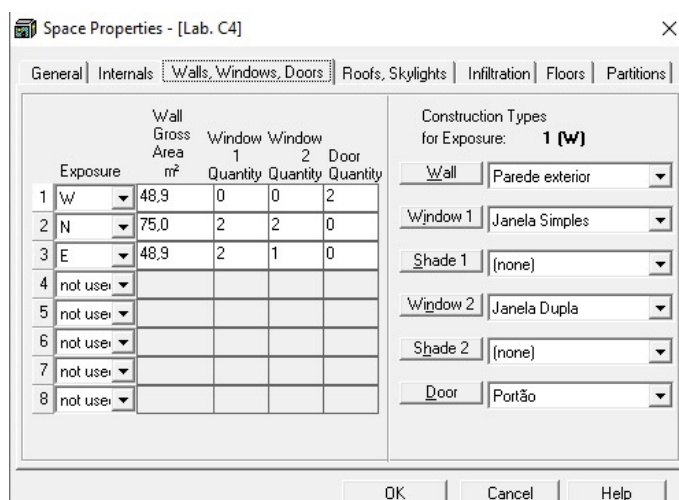


Figura 56: Spaces Properties, aba Walls, Windows, Doors no software HAP.

Do lado esquerdo são listadas as exposições das paredes (W, N, E) com as suas respetivas áreas brutas:

- Exposição W (Oeste), com 48,9 m² de área, sem janelas e com 2 portas.
- Exposição N (Norte) com 75,0 m² de área, com 2 janelas do tipo 1 e sem portas.
- Exposição E (Este) com 48,9 m² área, com 1 janela do “tipo 1”, 1 janela do “tipo 2”, sem portas.

Do lado direito são especificados os tipos de construção para cada elemento exposto, todos estes tipos de tipos de construção já foram criados e descritos anteriormente no subcapítulo PROJECT LIBRARIES.

A Figura 57 mostra a aba ROOFS, SKYLIGHTS onde se configuram os parâmetros relativos à cobertura e às eventuais claraboias existentes no espaço.

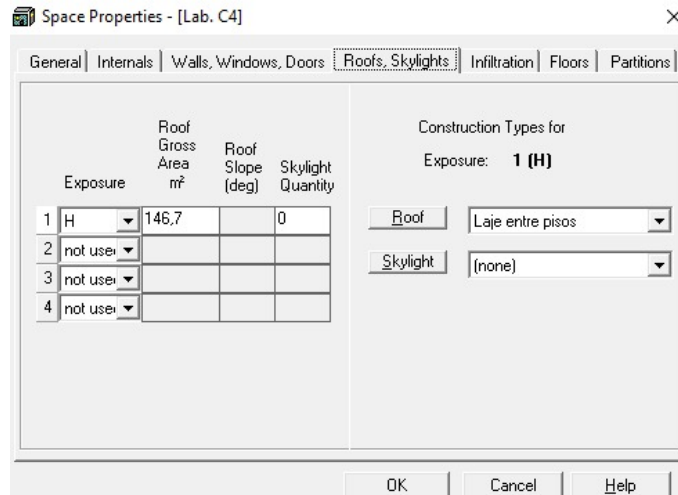


Figura 57: Spaces Properties, aba Walls, Windows, Doors no software HAP.

Na secção EXPOSURE, H indica uma exposição horizontal. O ROOF GROSS AREA é 146,7 m², o ROOF SLOPE está a 0 graus, e não possui qualquer tipo de claraboias (SKYLIGHT).

Na secção CONSTRUCTION TYPES FOR EXPOSURE: 1 (H), o campo ROOF está configurado para LAJE ENTRE PISOS, indicando o tipo de construção da cobertura criados e descritos anteriormente no subcapítulo PROJECT LIBRARIES.

A Figura 58 ilustra a aba FLOORS onde são configurados os parâmetros relativos ao tipo e características do pavimento. Na secção FLOOR TYPE a opção selecionada é SLAB FLOOR ON GRADE indicando que o pavimento do espaço está diretamente em contato com o solo. O FLOOR AREA é de 17,0 m² e o TOTAL FLOOR U-VALUE é de 0,690 W/(m²·K) representando a taxa de transferência de calor através do pavimento. O EXPOSED PERIMETER é de 0,0 m, indicando que não há perímetro exposto ao ar. O EDGE INSULATION R-VALUE é de 0,00 (m²·K)/W, referindo a ausência de isolamento térmico nas bordas do pavimento.

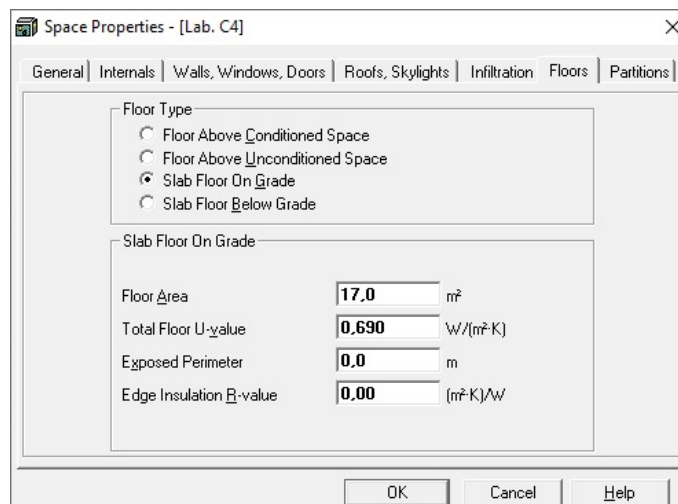


Figura 58: Spaces Properties, aba Floors no software HAP.

A Figura 59 exhibe a aba PARTITIONS utilizada para definir as propriedades das divisórias internas do espaço, divididas em duas secções principais: PARTITION 1 e PARTITION 2.

Para ambas as divisórias existem opções para seleccionar se a divisória é um teto CEILING PARTITION ou uma parede WALL PARTITION. No caso apresentado, ambas estão configuradas como CEILING PARTITION. Os parâmetros comuns a ambas as divisórias incluem a área com 0,0 m², visto que não existem PARTITIONS.

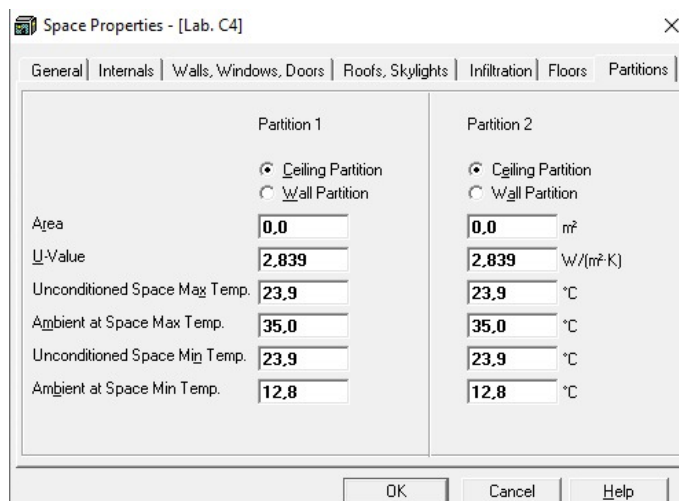


Figura 59: Spaces Properties, aba Partitions no software HAP.

SYSTEMS

Na [Figura 60](#) ilustra-se a lista dos SYSTEMS criados, sendo que foram criados sistemas para todos os espaços existentes uma vez que todos eles são espaços interiores climatizados. Neste trabalho foram criados dois tipos de sistemas:

- As Unidades de Termoventilação que estão instaladas nos laboratórios;
- Os Ventilador-Convectores que estão instalados nos gabinetes.

Air System	Type	Sizing Status	Simulation Status
<New default System>			
UTV_LAB_C1	Single Zone CAV	Sized	Simulated
UTV_LAB_C10	Single Zone CAV	Sized	Simulated
UTV_LAB_C11/C12/C13	Single Zone CAV	Sized	Simulated
UTV_LAB_C2	Single Zone CAV	Sized	Simulated
UTV_LAB_C3	Single Zone CAV	Sized	Simulated
UTV_LAB_C4	Single Zone CAV	Sized	Simulated
UTV_LAB_C6	Single Zone CAV	Sized	Simulated
UTV_LAB_C7	Single Zone CAV	Sized	Simulated
UTV_LAB_C8/C9	Single Zone CAV	Sized	Simulated
Ventiloconvectore_GAB_C1	2-Pipe Fan Coil	Sized	Simulated
Ventiloconvectore_GAB_C2	2-Pipe Fan Coil	Sized	Simulated
Ventiloconvectore_GAB_C3	2-Pipe Fan Coil	Sized	Simulated

Figura 60: Systems criados no software HAP.

Unidades de Termoventilação

As Unidades de Termoventilação (UTV's) que estão instaladas nos laboratórios do Bloco C são de baixa pressão. Cada UTV compreende as seguintes componentes ou secções:

- Caixa de mistura incluindo filtragem;
- Bateria de aquecimento/arrefecimento;
- Secção do ventilador.

Estas UTV's são caracterizadas por um baixo nível de ruído e um acabamento de qualidade por estarem instaladas dentro do próprio espaço a tratar. As baterias de aquecimento são construídas em tubo de cobre sem costura, providos de alhetas de alumínio, inseridas nos tubos por expansão mecânica. As baterias estão montadas para funcionar em contracorrente. O ventilador é do tipo centrífugo, de dupla aspiração, sendo acionado por um motor montado no seu interior, através de correias trapezoidais.

As instalações de comando e controlo das UTV's é constituído por termostato de ambiente incorporado no aparelho, com comutador de velocidade e "change-over"¹⁰ atuando sobre válvula eletrónica de 3 vias "tudo/nada".

Ventilo-Convectores

De acordo com [15] os Ventilo-Convectores (VC's) que estão instalados nos gabinetes são equipamentos de funcionamento silencioso e para montagem à vista, assentes no chão com móvel. Destinam-se à climatização dos gabinetes, onde deverão aquecer, arrefecer e desumidificar uma mistura de ar novo pré-tratado com ar recirculado.

Basicamente cada unidade é constituída por:

- Uma bateria de aquecimento/arrefecimento por água;
- Tabuleiro de recolha de condensados;
- Ventilador acionado por motor elétrico;
- Filtro de poeiras;
- Sistema de comando e de controlo de temperatura.

Estes VC's dispõem de um interruptor tipo On-Off, seletor de 3 posições para comando do ventilador, termostato de ambiente com seletor aquecimento/arrefecimento.

A bateria é construída em tubo de cobre sem costura, com diâmetro exterior não inferior a 10 mm, dispondo de alhetas de alumínio fixas por expansão mecânica.

A alimentação de água refrigerada e de água quente é feita por um sistema a dois tubos.

As instalações de comando e controlo das UVC's é constituído por um termostato de ambiente incorporado no aparelho, com comutador de velocidade e "change-over".

Redes de água dos sistemas de arrefecimento/aquecimento

De acordo com [15] as redes dos sistemas de arrefecimento e aquecimento são baseadas em tubos de aço, sendo destinadas:

- À circulação forçada de água refrigerada (6°C/12°C) entre o Chiller e os equipamentos utilizadores, em circuito fechado;

¹⁰ Dispositivo para alternar manual ou automaticamente entre os modos de aquecimento e arrefecimento de um sistema AVAC, por vezes utilizando um ponto de regulação único ou comum em ambos os modos.

- À circulação forçada de água quente (90°C/70°C) entre as Caldeiras e os elementos utilizadores em circuito fechado.

Condutas de ar

De acordo com [15] as condutas destinadas às instalações de AVAC são construídas em chapa galvanizada construídas a partir de bobinas ou chapas de aço galvanizadas, com as seguintes características:

- As condutas, singularidades e acessórios são conforme Normas SMACNA (Sheet Metal and Air Conditioning Contractors National Association) para redes de baixa velocidade;
- As superfícies interiores das condutas são planas, lisas e isentas de obstrução ou materiais estranhos, sendo as uniões dos troços perfeitamente acabadas;
- O dimensionamento das condutas foi feito em geral de acordo com o que está indicado na publicação “HVAC SYSTEMS DUCT DESIGN – 1981 – 2nd Edition” da “Sheet Metal and Air Conditioning Contractors National Association, Inc. (SMACNA)” para condutas de baixa velocidade, tendo-se dado particular atenção aos critérios de ruído e às perdas de fuga.

Capítulo 4

Simulações

4. Simulações

O presente capítulo destina-se à realização e à análise de simulações térmicas e energéticas do edifício em estudo, não sendo, contudo, objetivo desta dissertação a classificação do desempenho energético do edifício em termos do sistema nacional de certificação energética.

Para a avaliação dos consumos energéticos recorreu-se à ferramenta de simulação dinâmica de edifícios HAP (Hourly Analysis Program) uma vez que seguindo a metodologia de introdução e implementação de dados das variáveis solicitadas no programa HAP, caracterizada anteriormente no capítulo 3, pode obter-se um conjunto de resultados do consumo energético do edifício no seu estado existente.

Foram identificadas e seleccionadas as zonas mais críticas do edifício, com base na sua relevância para a análise térmica e energética. Assim:

- No piso 0, optou-se por simular o caso mais crítico dos gabinetes, ou seja, o Gabinete C3, visto que, o mesmo tem duas fachadas (Sul e Oeste) e três janelas ao contrário dos restantes gabinetes, que têm apenas uma fachada e duas janelas. Foi também simulado o Laboratório C4, visto que é o mais crítico, devido aos seus ganhos internos e ao mesmo possuir três fachadas (Norte, Este e Oeste).
- No piso 1 a simulação ocorreu no Laboratório C7, visto que, o mesmo tem duas fachadas (Sul e Oeste). Foi também simulado o conjunto de laboratórios C11/C12/C13, visto que é o mais crítico, devido aos seus ganhos internos, ao mesmo ter uma grande área e ao mesmo possuir três fachadas (Norte, Este e Oeste).

4.1. Primeira simulação - Gabinete C3

Esta simulação foi realizada para o Gabinete C3 cuja localização pode ser vista na Figura 61. O Gabinete está localizado no piso térreo, com metade da sua fachada a sul em contacto com o solo e duas janelas voltadas para esta direção. A fachada a oeste é equipada com uma única janela. Além disso, uma das paredes do gabinete faz a separação com a zona de circulação.

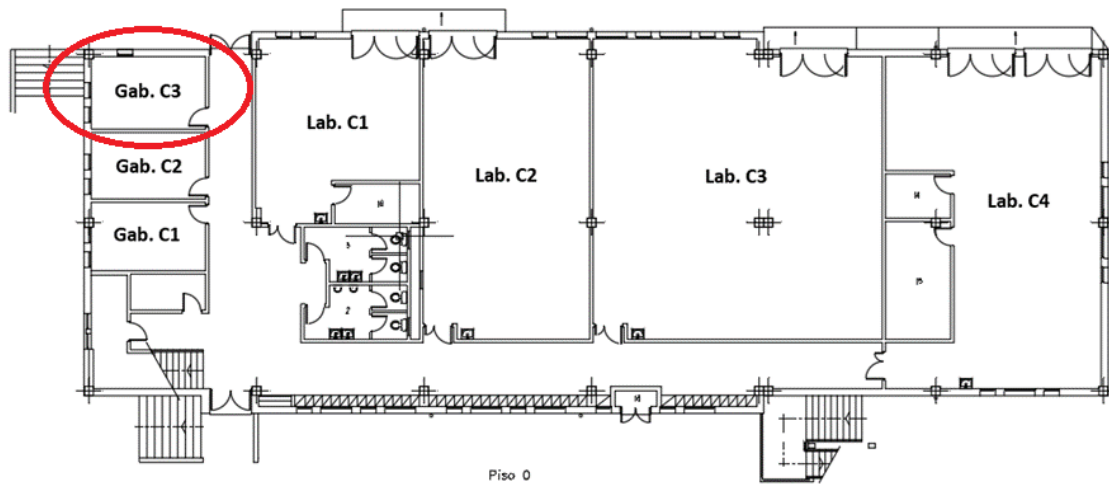


Figura 61: Planta do Piso 0 com localização do Gabinete C3 destacada.

A partir dos resultados da simulação, exibe-se um gráfico dos resultados diários do ventiloconvetor identificado como "GAB_C3" na Figura 62, relativo ao mês de janeiro (Inverno). No gráfico, estão representadas as cargas térmicas diárias de aquecimento (Terminal Heating Coil Load) e de arrefecimento (Terminal Cooling Coil Load), ambas medidas em kWh, ao longo dos dias do mês.

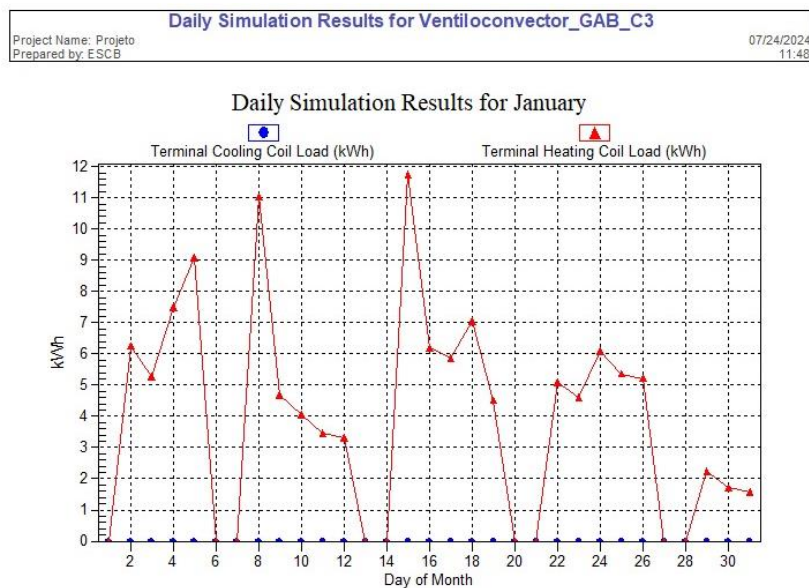


Figura 62: Resultados do consumo energético do ventiloconvetor do Gab. C3 em janeiro.

No gráfico apresentado na Figura 62 são perfeitamente identificados os fins de semana existentes ao longo do mês, onde a carga é de 0 kWh, visto que foi criado um perfil de utilização onde a ocupação é zero, a iluminação está desligada e os sistemas de climatização estão desligados aos fins-de-semana, em consequência disso o edifício aquece ou arrefece de acordo com a época do ano.

A curva correspondente à carga de aquecimento, indicada por triângulos vermelhos, revela variações significativas ao longo do mês, com mínimo perto dos 1,5 kWh no dia 31 de janeiro e com um pico que quase atinge os 12 kWh no dia 15 de janeiro. Estes picos refletem momentos de maior procura energética para manter as condições de

conforto térmico no espaço, o que era espectável, visto que, maioritariamente, estes picos ocorrem às segundas-feiras, consequência de nos fins de semana os sistemas de climatização não trabalharem e, por consequência, o edifício lentamente atingir temperaturas próximas do ambiente que o rodeia.

Em oposição às cargas diárias de aquecimento, não existe uma carga diária de arrefecimento (a qual seria representada por círculos azuis), indicando que não há necessidade de arrefecimento durante este período do ano, o que é expectável num mês de inverno como janeiro.

Na Figura 63 apresenta-se a carga de arrefecimento diária do ventiloconvetor do Gabinete C3 para o mês de julho (Verão).

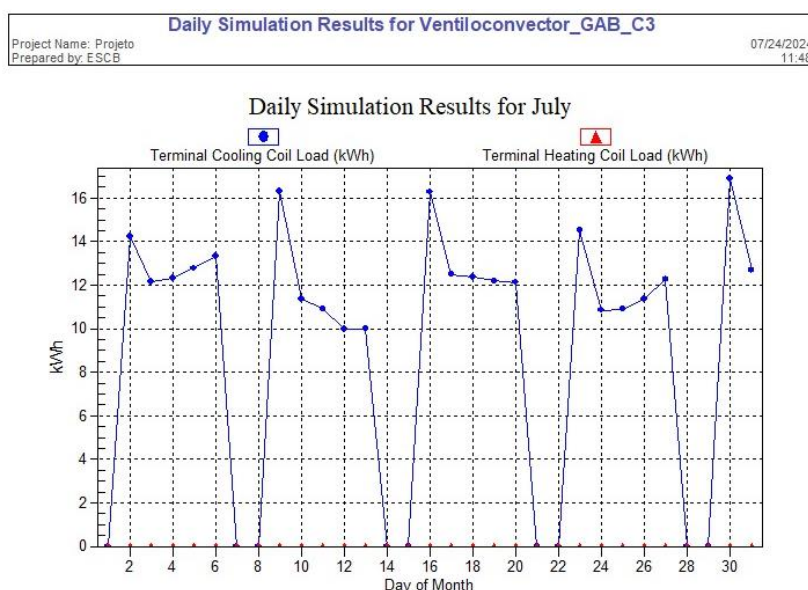


Figura 63: Resultados do consumo energético do ventiloconvetor do Gab. C3 em julho.

A curva correspondente à carga de arrefecimento, indicada por círculos azuis, revela variações significativas ao longo do mês, com mínimo de 10 kWh no dia 12 de julho e com um pico que atinge perto dos 17 kWh no dia 30 de julho. Estes picos refletem momentos de maior procura energética para manter as condições de conforto térmico no espaço, o que era espectável, visto que, maioritariamente estes picos ocorrem às segundas-feiras.

Também aqui não existe uma curva correspondente à carga de aquecimento (que seria representada por triângulos vermelhos), indicando que não há necessidade de aquecimento durante este período do ano, o que é expectável num mês de verão como julho.

A análise dos gráficos das Figura 62 e Figura 63 que representam, respetivamente, as cargas térmicas diárias para os meses de janeiro e de julho do Gabinete C3, revela que a necessidade de cargas térmicas é significativamente baixa ao longo de ambos os períodos, sendo estes resultados compreensíveis tendo em conta a área e os ganhos internos do Gabinete C3.

4.2. Segunda simulação - Laboratório C4

A simulação seguinte foi realizada para o Laboratório C4, cuja localização específica pode ser visualizada na Figura 64. O laboratório localiza-se no piso térreo e possui dois grandes portões metálicos na fachada oeste, o que pode influenciar as trocas térmicas devido à elevada condutividade do metal. A fachada leste beneficia de sombreamento proporcionado pelo Bloco B, reduzindo a incidência direta de radiação solar, especialmente nas horas da manhã. Além disso, uma das paredes do laboratório separa-o da zona de circulação, influenciando a transferência de calor entre os espaços.

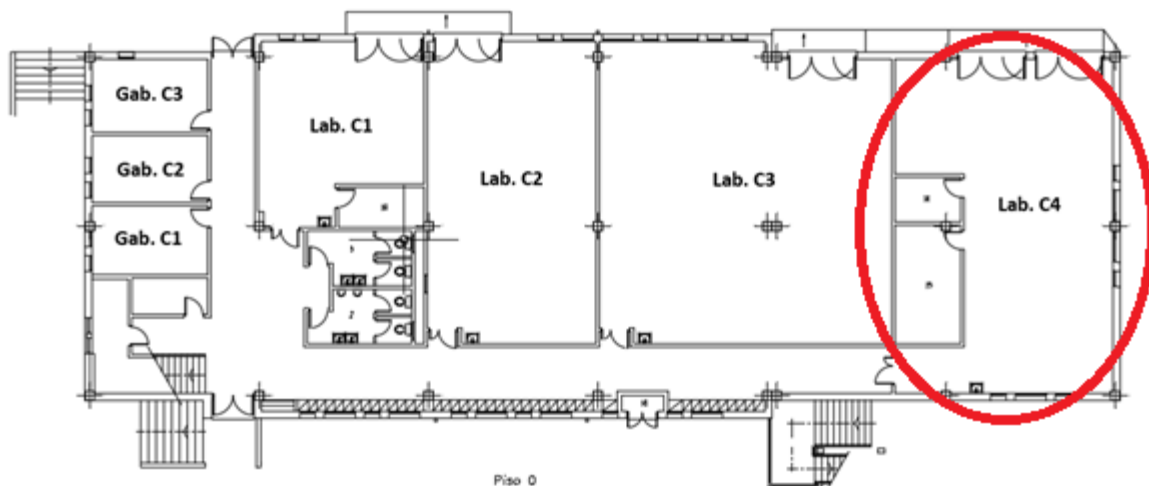


Figura 64: Planta do Piso 0 com localização do Laboratório C4 destacada.

Na tabela representada na Figura 65, são visíveis os dados mensais de consumo energético da unidade de termoventilação do Laboratório C4 para o mês de janeiro (Inverno). Na figura são apresentadas as cargas térmicas diárias de aquecimento (Central Heating Coil Load) e de arrefecimento (Central Cooling Coil Load), ambas expressas em kWh, ao longo dos dias do mês de janeiro.

Daily Simulation Results for UTV_LAB_C4					
Project Name: Projeto					
Prepared by: ESCB					
Daily Air System Simulation Results for January (Table 1):					
Day	Central Cooling Coil Load (kWh)	Central Heating Coil Load (kWh)	Supply Fan (kWh)	Lighting (kWh)	Electric Equipment (kWh)
1	0	0	0	0	0
2	0	267	0	9	77
3	0	262	0	9	77
4	0	271	0	9	77
5	0	269	0	9	77
6	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0
8	0	419	0	9	77
9	0	292	0	9	77
10	0	269	0	9	77
11	0	247	0	9	77
12	0	237	0	9	77
13	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0
15	0	407	0	9	77
16	0	301	0	9	77
17	0	253	0	9	77
18	0	248	0	9	77
19	0	213	0	9	77
20	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0
22	0	290	0	9	77
23	0	218	0	9	77
24	0	221	0	9	77
25	0	204	0	9	77
26	0	175	0	9	77
27	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0
29	0	215	0	9	77
30	0	139	0	9	77
31	0	104	0	9	77
Total	0	5560	0	192	1705

Figura 65: Resultados do consumo energético da unidade de termoventilação do Lab. C4 em janeiro.

A coluna correspondente à carga de aquecimento evidencia variações significativas ao longo do mês, com mínimo de 104 kWh no dia 31 de janeiro e com picos que atingem 419 kWh no dia 8 de janeiro. Estes picos indicam momentos de maior necessidade energética para manter as condições de conforto térmico no espaço em análise.

Na Figura 66 apresenta-se a carga térmica diária da unidade de termoventilação do Laboratório C4 para o mês de julho (Verão).

Daily Simulation Results for UTV_LAB_C4					
Project Name: Projeto					
Prepared by: ESCB					
Daily Air System Simulation Results for July (Table 1) :					
Day	Central Cooling Coil Load (kWh)	Central Heating Coil Load (kWh)	Supply Fan (kWh)	Lighting (kWh)	Electric Equipment (kWh)
1	0	0	0	0	0
2	415	0	0	9	77
3	401	0	0	9	77
4	400	0	0	9	77
5	413	0	0	9	77
6	449	0	0	9	77
7	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0
9	452	0	0	9	77
10	391	0	0	9	77
11	379	0	0	9	77
12	336	0	0	9	77
13	330	0	0	9	77
14	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0
16	461	0	0	9	77
17	417	0	0	9	77
18	419	0	0	9	77
19	411	0	0	9	77
20	396	0	0	9	77
21	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0
23	392	0	0	9	77
24	358	0	0	9	77
25	351	0	0	9	77
26	389	0	0	9	77
27	392	0	0	9	77
28	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0
30	448	0	0	9	77
31	407	0	0	9	77
Total	8786	0	0	192	1709

Figura 66: Resultados do consumo energético da unidade de termoventilação do Lab. C4 em julho.

A coluna correspondente à carga de arrefecimento revela variações significativas ao longo do mês, com mínimo de 330 kWh no dia 13 de julho e com picos que atingem os 461 kWh no dia 16 de julho. Estes picos refletem momentos de maior procura energética para manter as condições de conforto térmico no espaço.

A análise da Figura 65 e da Figura 66, que representam as cargas térmicas diárias para janeiro e julho do Laboratório C4, revela que a necessidade de cargas térmicas é significativamente alta ao longo de ambos os períodos, estes resultados são compreensíveis tendo em conta a área e os ganhos internos do Laboratório C4.

4.3. Terceira simulação - Laboratório C7

A terceira simulação envolveu o Laboratório C7, cuja localização exata é apresentada na Figura 67. O Laboratório está situado no primeiro piso, com uma laje de separação entre este e os gabinetes C1, C2 e C3, localizados no piso inferior. Uma das paredes do laboratório faz a divisão com a zona de circulação, enquanto as fachadas a sul e oeste são compostas por duas janelas cada.

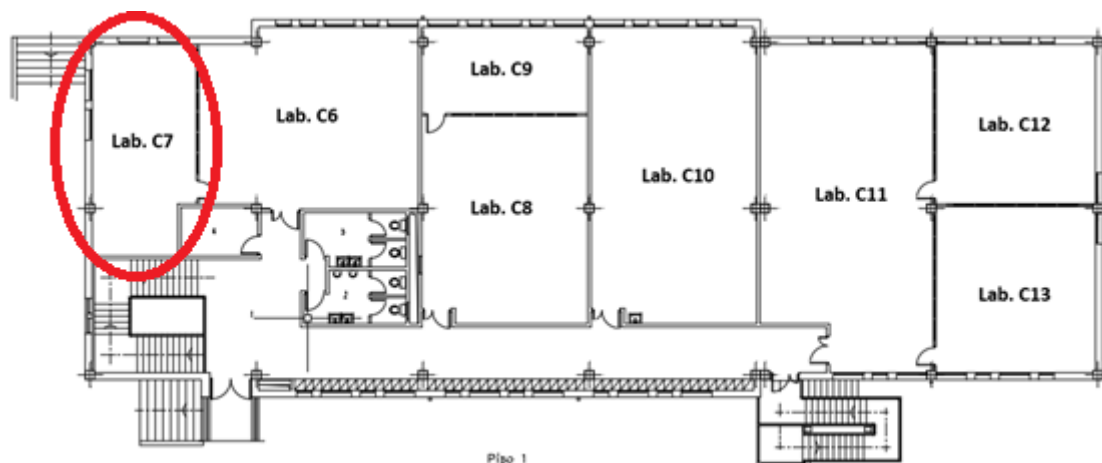


Figura 67: Planta do Piso 1 com localização do Laboratório C7 destacada.

Fruto da simulação realizada, obteve-se o gráfico representado na Figura 68, com o consumo energético diário da unidade de termoventilação do Laboratório C7 para o mês de janeiro (Inverno).

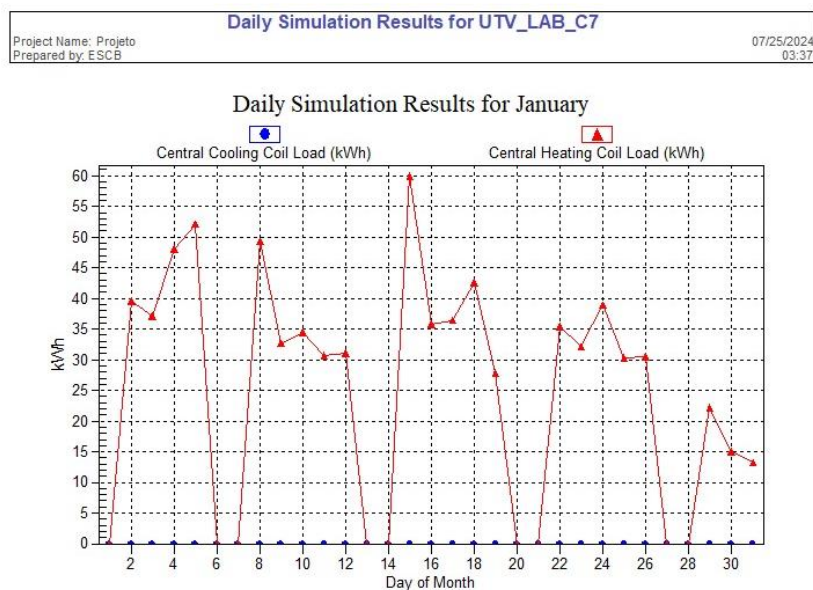


Figura 68: Resultados do consumo energético da unidade de termoventilação do Lab. C7 em janeiro.

A curva que representa a carga de aquecimento, indicada por triângulos vermelhos, revela flutuações consideráveis ao longo do mês, com mínimo de 13 kWh no dia 31 de janeiro e com picos que atingem 60 kWh no dia 15 de janeiro. Estes picos indicam períodos de maior procura energética para assegurar as condições de conforto térmico no espaço analisado.

A partir dos resultados da simulação representada na Figura 69, foi obtido o gráfico com os dados mensais de consumo energético da unidade de termoventilação do Laboratório C7 para o mês de julho (Verão).

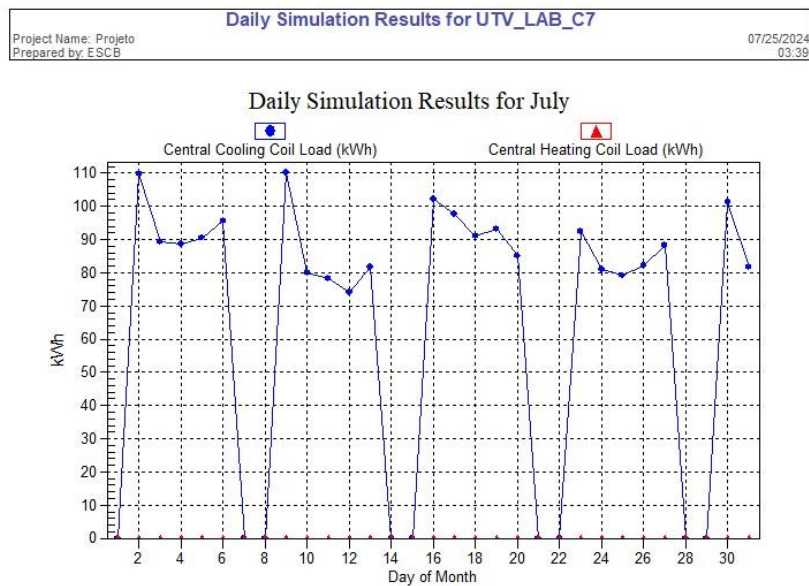


Figura 69: Resultados do consumo energético da unidade de termoventilação do Laboratório C7 em julho.

A curva referente à carga de arrefecimento, representada pelos círculos azuis, mostra variações significativas ao longo do mês, indicada por círculos azuis, revela flutuações consideráveis ao longo do mês, com mínimo de 75 kWh no dia 12 de julho e com picos que atingem aproximadamente 110 kWh nos dias 2 e 9 de julho. Estes picos indicam períodos de maior procura energética para assegurar as condições de conforto térmico no espaço analisado.

A análise da Figura 68 e Figura 69, que representam as cargas térmicas diárias para janeiro e julho do Laboratório C7, revela que a necessidade de cargas térmicas é significativamente alta ao longo de ambos os períodos. Estes resultados são compreensíveis tendo em conta a área e os ganhos internos do Laboratório C7.

4.4. Quarta simulação - Laboratório C11/C12/C13

Esta simulação corresponde ao Laboratório C11/C12/C13, cuja posição detalhada é ilustrada na Figura 70. O Laboratório C11/C12/C13 está situado no primeiro piso, com uma laje de separação que o isola termicamente do Laboratório C4 e parte do Gabinete C3, localizados no piso inferior. O espaço é constituído por três laboratórios adjacentes, sendo que as paredes internas que os separam são consideradas adiabáticas, ou seja, não há trocas térmicas significativas entre as zonas, uma vez que todas são climatizadas de forma uniforme. O espaço possui três fachadas distintas: a fachada oeste, equipada com oito janelas, a fachada norte, com duas janelas, e a fachada leste, que conta com sete janelas. A fachada leste beneficia de sombreamento proporcionado pelo Bloco B, o que limita a incidência direta de radiação solar, contribuindo para uma redução da carga térmica nesta zona.

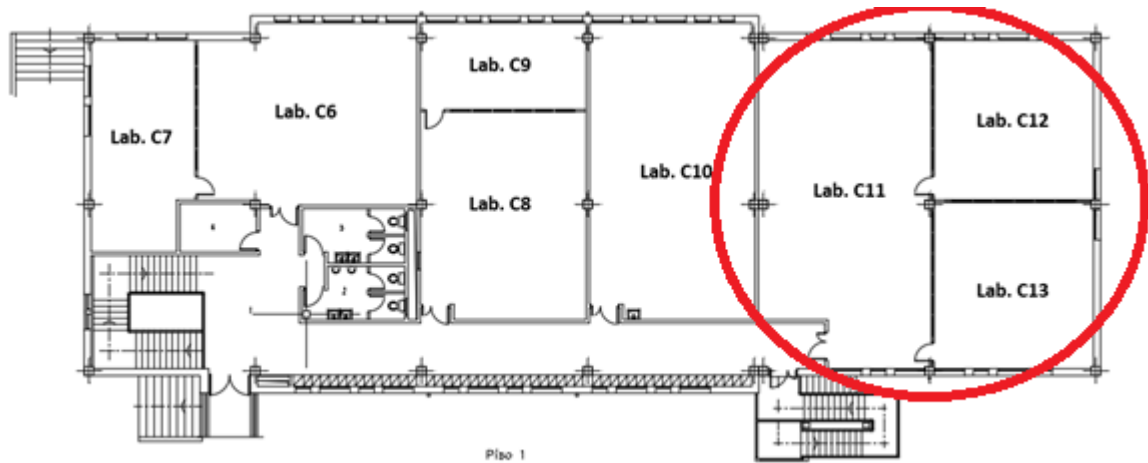


Figura 70: Planta do Piso 1 com a localização do Laboratório C11/C12/C13 destacada.

Na tabela representada na Figura 71, são visíveis os dados mensais de consumo energético diário da unidade de termoventilação do Laboratório C11/C12/C13 durante o mês de janeiro (Inverno).

Daily Simulation Results for UTV_LAB_C11/C12/C13

Project Name: Projeto
Prepared by: E.SCB

Daily Air System Simulation Results for January (Table 1) :

Day	Central Cooling Coil Load (kWh)	Central Heating Coil Load (kWh)	Supply Fan (kWh)	Lighting (kWh)	Electric Equipment (kWh)
1	0	0	0	0	0
2	0	437	0	1	100
3	0	406	0	1	100
4	0	480	0	1	100
5	0	518	0	1	100
6	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0
8	0	571	0	1	100
9	0	404	0	1	100
10	0	395	0	1	100
11	0	353	0	1	100
12	0	347	0	1	100
13	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0
15	0	634	0	1	100
16	0	420	0	1	100
17	0	408	0	1	100
18	0	431	0	1	100
19	0	298	0	1	100
20	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0
22	0	408	0	1	100
23	0	358	0	1	100
24	0	397	0	1	100
25	0	311	0	1	100
26	0	308	0	1	100
27	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0
29	0	252	0	1	100
30	0	186	0	1	100
31	0	180	0	1	100
Total	0	8480	0	28	2208

Figura 71: Resultados do consumo energético da Unidade de Termoventilação do Laboratório C11/C12/C13 em janeiro.

A coluna correspondente à carga de aquecimento evidencia variações significativas ao longo do mês, com mínimo de 160 kWh no dia 31 de janeiro e com picos que atingem 634 kWh no dia 15 de janeiro. Estes picos correspondem a momentos de maior exigência energética para assegurar as condições de conforto térmico no espaço em análise.

Fruto da simulação realizada, obteve-se o a tabela representada na Figura 72, com os dados mensais de consumo energético da unidade de termoventilação do Laboratório C11/C12/C13 para o mês de julho (verão).

Daily Simulation Results for UTV_LAB_C11/C12/C13					
Project Name: Projeto					
Prepared by: ESCB					
Daily Air System Simulation Results for July (Table 1):					
Day	Central Cooling Coil Load (kWh)	Central Heating Coil Load (kWh)	Supply Fan (kWh)	Lighting (kWh)	Electric Equipment (kWh)
1	0	0	0	0	0
2	1144	0	0	1	100
3	1012	0	0	1	100
4	972	0	0	1	100
5	978	0	0	1	100
6	1019	0	0	1	100
7	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0
9	1185	0	0	1	100
10	912	0	0	1	100
11	860	0	0	1	100
12	800	0	0	1	100
13	866	0	0	1	100
14	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0
16	1067	0	0	1	100
17	1100	0	0	1	100
18	988	0	0	1	100
19	990	0	0	1	100
20	911	0	0	1	100
21	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0
23	1006	0	0	1	100
24	934	0	0	1	100
25	869	0	0	1	100
26	875	0	0	1	100
27	932	0	0	1	100
28	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0
30	1080	0	0	1	100
31	935	0	0	1	100
Total	21434	0	0	28	2208

Figura 72: Resultados do consumo energético da unidade de termoventilação do Laboratório C11/C12/C13 em julho.

A coluna correspondente à carga de aquecimento evidencia variações significativas ao longo do mês, com mínimo de 800 kWh no dia 12 de julho e com picos que atingem os 1185 kWh no dia 9 de julho, indicando momentos de elevada necessidade energética para garantir as condições de conforto térmico no espaço em estudo.

A análise da Figura 71 e da Figura 72, que representam as cargas térmicas diárias para janeiro e julho do Laboratório C11/C12/C13, revela que a necessidade de cargas térmicas é significativamente alta ao longo de ambos os períodos. Estes resultados são compreensíveis tendo em conta a área e os ganhos internos do Laboratório.

4.5. Comparação das Simulações

Na Tabela 10 é feito um resumo dos valores mínimo, médio e máximo dos consumos energéticos no mês de janeiro dos espaços anteriormente analisados.

Tabela 10: Descrição e comparação dos resultados detalhados das simulações energéticas do edifício no mês de janeiro em diferentes zonas.

Zona	Área(m ²)	Nº Ocupantes	Ganhos internos (W)	Fachadas	Consumo(kWh):		Dia
Gab. C3	17,01	2	944	Sul e Oeste	Máximo	12	15
					Média	6	
					Mínimo	2	29, 30 e 31
Lab. C4	146,70	21	16 580	Norte, Este e Oeste	Máximo	419	8
					Média	253	
					Mínimo	104	31
Lab. C7	44	16	3132	Sul e Oeste	Máximo	60	15
					Média	35	
					Mínimo	13	31
Lab. C11/C12/C13	222,72	78	20 596	Norte, Este e Oeste	Máximo	634	15
					Média	385	
					Mínimo	160	31

A tabela mostra os resultados detalhados das simulações energéticas para diferentes zonas do edifício, estando listadas as características principais, incluindo a área em metros quadrados (m²), o número de ocupantes, os ganhos internos (iluminação e equipamentos elétricos) em watts (W) e a orientação das fachadas, o que influencia diretamente as cargas térmicas e o consumo energético. Os resultados de consumo energético são apresentados em termos de valores máximos, médios e mínimos em kilowatt-hora (kWh), bem como os dias em que esses consumos foram registados.

- O Gab. C3, com uma área de 17,01 m², dois ocupantes e ganhos internos de 944 W, o consumo energético máximo foi de 12 kWh no dia 15 de janeiro, com uma média de 6 kWh e um mínimo de 2 kWh nos dias 29, 30 e 31 de janeiro.
- O Laboratório C4, com uma área de 146,70 m² e 21 ocupantes, apresenta um dos maiores consumos energéticos. O consumo máximo registado foi de 419 kWh no dia 8 de janeiro, com um consumo médio de 253 kWh e um valor mínimo de 104 kWh no dia 31 de janeiro. Este elevado consumo é justificado pela sua grande área e pelos ganhos internos de 16 580 W.
- O Laboratório C7, com uma área significativamente menor de 44 m² e 16 ocupantes, apresenta consumos energéticos bastante mais baixos. O valor máximo registado foi de 60 kWh no dia 15 de janeiro, com um consumo médio de 35 kWh e um mínimo de 13 kWh no dia 31 de janeiro. A área mais reduzida e os ganhos internos de 3132 W justificam este consumo inferior.

- O Laboratório C11/C12/C13, com a maior área, 222,72 m² e 78 ocupantes, teve o maior consumo energético entre os três. O valor máximo atingiu 634 kWh no dia 15 de janeiro, sendo o mais elevado de todos os laboratórios, com uma média de 385 kWh e um mínimo de 160 kWh no dia 31 de janeiro. O maior número de ocupantes e os ganhos internos de 20 596 W explicam o elevado consumo registado.

Em resumo, tanto o Lab. C4 como o Lab. C11/C12/C13 destacam-se pelos consumos energéticos elevados, justificados pelas suas áreas mais amplas e maiores números de ocupantes, enquanto o Lab. C7 apresenta consumos mais baixos, de acordo com a sua menor dimensão e ocupação. Os consumos máximos ocorrem com mais tendência no dia 15 de janeiro para os laboratórios analisados, sugerindo uma possível coincidência de condições climáticas mais exigentes. Por outro lado, os consumos mínimos ocorrem no dia 31 para todos os laboratórios, com valores bastante reduzidos comparativamente aos máximos. Este padrão indica uma redução nas exigências térmicas do edifício nos últimos dias do mês

Em relação ao mês de julho, é feita a descrição e um resumo dos valores mínimo, médio e máximo dos consumos energéticos dos espaços anteriormente analisados, na Tabela 11.

Tabela 11: Descrição e comparação dos resultados detalhados das simulações energéticas do edifício no mês de julho em diferentes zonas.

Zona	Área(m ²)	Nº Ocupantes	Ganhos internos (W)	Fachadas	Consumo(kWh):		Dia
Gab. C3	17,01	2	944	Sul e Oeste	Máximo	17	30
					Média	12	
					Mínimo	10	12 e 13
Lab. C4	146,70	21	16 580	Norte, Este e Oeste	Máximo	461	16
					Média	399	
					Mínimo	330	13
Lab. C7	44	16	3132	Sul e Oeste	Máximo	110	2 e 9
					Média	90	
					Mínimo	74	12
Lab. C11/C12/C13	222,72	78	20 596	Norte, Este e Oeste	Máximo	1185	9
					Média	974	
					Mínimo	800	12

- No caso do Gabinete C3, o consumo energético máximo registado é de 17 kWh no dia 30 de julho, enquanto o consumo mínimo é de 10 kWh nos dias 12 e 13 de julho. A média de consumo diário nesta zona é de 12 kWh.
- O Laboratório C4 regista um consumo energético máximo de 461 kWh no dia 16 de julho, com uma média de 399 kWh e um mínimo de 330 kWh no dia 31 julho.

- Por outro lado, o Laboratório C7, apresenta também em julho, os consumos mais baixos entre os três laboratórios. O consumo máximo registado é de 110 kWh nos dias 2 e 9 de julho, com uma média de 90 kWh e um mínimo de 74 kWh no dia 31 de julho. Com ganhos internos de 3132 W e à sua menor área, os consumos energéticos deste laboratório são substancialmente menores.
- Finalmente, o Laboratório C11/C12/C13, apresenta os consumos energéticos mais elevados. O consumo máximo é de 1185 kWh no dia 9 de julho, com uma média de 974 kWh e um mínimo de 800 kWh no dia 12 de julho. Estes valores são significativamente superiores em comparação com os outros laboratórios, o que é justificável pela maior área e número de ocupantes, assim como pelos ganhos internos de 20 596 W.

Em suma, a comparação entre os três laboratórios revela que o Lab. C11/C12/C13 apresenta os maiores consumos energéticos, seguido pelo Lab. C4, enquanto o Lab. C7, devido à sua menor dimensão e ocupação, regista os consumos mais baixos. Verifica-se também que os consumos máximos ocorrem em diferentes dias para cada laboratório, sem uma correlação direta entre eles. No entanto, todos os laboratórios apresentam consumos mínimos concentrados mais para o meio do mês, o que indica condições climáticas menos exigentes nesses dias.

Capítulo 5

Conclusões

5. Conclusões

5.1. Resumo do trabalho realizado

Este trabalho aborda o comportamento térmico de edifícios, com foco na aplicação de simulação dinâmica. O estudo começa com uma análise dos processos de transferência de calor e dos fatores que influenciam a eficiência energética.

Como caso de estudo foi selecionado um edifício real – o Bloco C da EST/IPCB – o qual foi implementado com o máximo de detalhe no software Hourly Analysis Program (HAP).

O trabalho culmina com a realização de simulações dinâmicas abrangendo vários compartimentos, de diferentes tipologias, de forma a avaliar os respectivos comportamentos térmicos e energéticos e consequentes necessidades de climatização, tanto na estação de Inverno como na de Verão.

5.2. Evolução temporal do trabalho

Inicialmente foi realizada uma análise preliminar para definir o âmbito do projeto, identificar os principais objetivos e selecionar as ferramentas de simulação adequadas. Seguiu-se uma fase de pesquisa detalhada dos conceitos teóricos, sobre os processos de transferência de calor e comportamento térmico em edifícios.

Após essa fase inicial foi efetuada a caracterização do edifício, a qual foi conseguida depois de várias visitas ao edifício que serviu de caso de estudo. Para tal, para além das plantas dos dois pisos, foi necessário recorrer à utilização de uma fita métrica e de um medidor de distâncias a laser de forma a se recolherem dados imprescindíveis à perceção da arquitetura do edifício. Algumas das visitas realizadas serviram também para se perceber não só a ocupação de cada espaço, mas também para recolher dados sobre o tipo e quantidade de iluminação existente, quantidade e potência dos equipamentos instalados, perfis de utilização, etc. Todos os dados recolhidos foram colocados num ficheiro Excel de forma a se ter informação detalhada de cada compartimento.

Após a caracterização do edifício e a definição dos perfis de utilização, procedeu-se à implementação do modelo no Hourly Analysis Program (HAP), onde foram configuradas as condições climáticas, as bibliotecas de projeto, os espaços, e os sistemas de climatização. Esta etapa foi seguida pela realização de múltiplas simulações das zonas mais críticas, onde cada conjunto de simulações foi realizado sequencialmente, correspondendo a diferentes espaços do edifício (Gabinete C3, Laboratório C4, Laboratório C7 e Laboratórios C11/C12/C13).

Conforme as simulações eram concluídas, os respetivos resultados foram analisados de forma a serem detetados eventuais erros cometidos na introdução de dados.

5.3. Apreciação do trabalho desenvolvido face aos objetivos previamente definidos

A avaliação do trabalho desenvolvido em relação aos objetivos previamente definidos indica que nem todos foram alcançados. Inicialmente foram estabelecidas metas que incluíam a comparação das análises detalhadas do comportamento térmico e energético de um edifício, com a aplicação de diferentes ferramentas de simulação dinâmica para prever o desempenho energético, e a caracterização dos sistemas de climatização.

As simulações realizadas forneceram dados significativos e detalhados que permitiram uma compreensão das variáveis envolvidas, contribuindo para a validação dos modelos teóricos propostos. O uso do Hourly Analysis Program (HAP) foi eficaz para simular diferentes cenários e analisar as necessidades energéticas de cada espaço, validando assim as hipóteses iniciais sobre o desempenho térmico.

5.4. Dificuldades e Limitações

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foram enfrentadas várias dificuldades e limitações que impactaram, em diferentes graus, o progresso e os resultados obtidos.

No software HAP foram detetadas duas limitações em relação às palas sombreadoras existentes nas janelas existentes no edifício em estudo.

A primeira limitação é referente à construção que o software nos permite dar às palas, pois este apenas permite introduzir uma única pala horizontal, enquanto no Bloco C cada uma das janelas orientadas a Sul, Este e Oeste possuem cinco palas inclinadas a 45°.

A segunda limitação em relação às palas sombreadoras, deve-se ao facto de que ao se definir cada um dos compartimentos, não se conseguir criar, simultaneamente, a existência de janelas com e sem palas sombreadoras.

5.5. Melhorias e perspetivas futuras

Como sugestão de melhoria e de desenvolvimento deste trabalho, seria interessante comparar as análises detalhadas do comportamento térmico e energético do Bloco C da ESTCB efetuadas por diferentes ferramentas de simulação dinâmica. Embora tal não tenha sido possível de realizar no âmbito do presente trabalho, é de notar que um estudo similar decorreu em paralelo com o presente, desta feita envolvendo a utilização do CYPETHERM LOADS, desconhecendo-se, por agora, os resultados obtidos.

Referências bibliográficas

- [1] L. Neto, Apontamentos Teóricos de Transmissão de Calor.
- [2] F. P. Incropera, T. L. Bergman, A. S. Lavine e D. P. Dewitt, Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, Sétima edição ed.
- [3] “Termometro.pt,” [Online]. Available: <https://www.termometro.pt/blogs/guia-de-termometros-1/tabela-de-emissividade>. [Acedido em 27 06 2024].
- [4] C. A. P. d. Santos e L. Matias, Coeficientes de Transmissão Térmica de de Elementos da Envoltura dos Edifícios, 2007, p. 168.
- [5] adene, Guia SCE – Parâmetros de Cálculo, 2020.
- [6] P. C. P. d. Silva, Análise do Comportamento Térmico de Construções não Convencionais através de Simulação em VisualDOE, Dissertação de Mestrado: Universidade do Minho, 2006.
- [7] ASHRAE , Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, 2013.
- [8] ANSI/ASHRAE 140-2004, Standard Method of Test for THE Evaluation OF Building Energy Analysis Computer Program, 2004.
- [9] J. d. J. d. C. Gomes, “Simulação dinâmica detalhada de um grande edifício no âmbito do RSECE,” Minho, 2012.
- [10] Weatherspark. [Online]. Available: <https://weatherspark.com/y/32837/Average-Weather-in-Castelo-Branco-Portugal-Year-Round>.
- [11] “ESTRATÉGIA MUNICIPAL DE ADAPTAÇÃO ÀS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS,” Castelo Branco, 2016.
- [12] R. Bernardo, J. M. C. Sousa e P. J. S. Gonçalves, Planning robotic agent actions using semantic knowledge for a home environment, 15 12 2021.
- [13] “Direção-Geral de Energia e Geologia,” 10 2016. [Online].
- [14] G. D. B. CARVALHO, “Projeto de uma instalação de AVAC de um Edifício de Escritórios e Multi-Usos,” Lisboa, 2012.
- [15] Hidrotécnica Portuguesa (HP), Especificações Técnicas da ESTCB – Parte 8: Instalações de Condicionamento de Ar e Ventilação, 1996.
- [16] “topographic-map.com,” [Online]. Available: <https://pt-pt.topographic-map.com/map-6nmzs/Portugal/?center=39.81803%2C-7.51076&zoom=15&popup=39.81933%2C-7.51318>. [Acedido em 16 07 2024].

ANEXOS

