



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

## **Modelação de sistemas de arrefecimento para climatização de edifícios**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente.

### **Modeling of cooling systems for buildings' air conditioning**

Autor:

**Vítor Hugo Machado Roriz**

Orientadores:

**Adélio M. R. Gaspar (Prof. Auxiliar, DEM, FCTUC)**

**Marco A. S. Fernandes (Investigador, ADAI-LAETA, FCTUC)**

Júri:

**Presidente: Professor Doutor Álvaro Filipe Peixoto Cardoso de  
Oliveira Gomes**  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

**Vogais: Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar**  
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra  
**Professor Doutor Gonçalo Jorge Vieira Nunes Brites**  
Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Coimbra

---

**Coimbra, setembro, 2018**

Este trabalho tem o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) via COMPETE - Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI), no âmbito do projeto Ren4EEnIEQ (PTDC/EMS-ENE/3238/2014 e POCI-01-0145-FEDER-016760, respetivamente).



“Never regard study as a duty but as an enviable opportunity to learn to know the liberating influence of beauty in the realm of the spirit for your own personal joy and to the profit of the community to which your later works belong.”

Albert Einstein.



## Agradecimentos

A concretização do presente trabalho não seria possível sem um conjunto de esforços e contributo de várias pessoas às quais devo um especial agradecimento e reconhecimento. Em primeiro lugar quero agradecer ao Professor Doutor Adélio Gaspar, meu orientador, pelos conselhos e opiniões prestadas. Sem o seu contributo esta dissertação não se tinha formulado.

Ao meu coorientador, Doutor Marco Fernandes, pelos conhecimentos e apoio prestados em todas as fases do trabalho, mesmo quando isso implicou perda de parte do seu tempo pessoal. Ao Doutor Eugénio Rodrigues e ao restante grupo que integra o projeto Ren4EEEnIEQ, pela oportunidade de contribuir para este projeto com o meu trabalho.

Aos amigos e colegas que conheci e me acompanharam no percurso académico nesta instituição, que para além dos bons momentos proporcionados sempre me inspiraram.

Àqueles que, na minha pequena mas orgulhosa cidade, me causam regozijo por os ter como amigos e com os quais poderei sempre contar.

Um especial agradecimento à minha família por todo o apoio incondicional prestado. Um agradecimento enorme aos meus pais por tudo o que me proporcionaram e nunca faltou, eles que frente a todas as dificuldades e obstáculos tiveram sempre o meu bem-estar e objetivos como um dos focos principais das suas vidas. À minha irmã por sempre me suportar, mesmo quando eu sou mais implicativo, como só uma irmã sabe fazer. E àquele que, certamente, em espírito sempre me acompanha e que levo no coração.

Por último, mas não menos importante, à Maria que se encontra sempre ao meu lado e do meu lado, que é a minha principal cúmplice nesta aventura da vida e a qual a sua simples presença me faz querer dar e ser mais.



## Resumo

A simulação dinâmica de edifícios assume, atualmente, um papel principal na previsão de consumos energéticos e desempenho térmico de edifícios. Feita com recurso a programas de computador e com uma correta implementação, demonstra, numa fase inicial de projeto, ter um impacto enorme e duradouro nos consumos e desempenho futuro do edificado.

Com o objetivo de auxiliar profissionais numa fase inicial de projeto com escolhas que levam a um melhor desempenho energético de edifícios, foi desenvolvida, através do projeto Ren4EEnIEQ, uma ferramenta protótipo de geração de plantas com otimização de geometrias, soluções construtivas e sistemas de energia com consequente simulação dinâmica, permitindo assim estimar futuros consumos dos edifícios.

Este trabalho tem como principal objetivo a modelação, parametrização e análise do funcionamento e desempenho do sistema de arrefecimento e respetivos equipamentos utilizados no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra, com recurso a simulação dinâmica. O trabalho a desenvolver servirá de apoio na futura integração de sistemas e equipamentos de arrefecimento na ferramenta de geração de plantas.

Para a formulação desta simulação dinâmica, foi necessário realizar a modelação geométrica do edifício, recorrendo ao programa *SketchUp*. A modelação dos sistemas energéticos e simulação dinâmica foram feitas utilizando o software *EnergyPlus*.

Após a simulação dinâmica, foram feitas análises ao desempenho dos sistemas instalados no edifício em estudo, tendo como principais parâmetros o número de horas em que não foram atingidas as temperaturas de *setpoint* nas zonas climatizadas, e os consumos energéticos totais do edifício.

Com este estudo foi também possível apontar as falhas nos sistemas instalados e estudar a viabilidade da implementação de algumas alterações e melhorias, de forma a promover uma melhor performance com o mínimo de consumos.

**Palavras-chave:** AVAC, Simulação dinâmica, EnergyPlus, sistemas de arrefecimento.



## Abstract

Nowadays, dynamic building simulation plays a major role in predicting energy consumption and thermal performance of buildings. Performed with computer programs and with a correct implementation, it proves, in an initial phase of the project, to have a huge and lasting impact on the consumptions and future performance of buildings.

With the aim of assisting professionals in an initial phase of design with choices that lead to a better energy performance of buildings, through the project Ren4EEInIEQ, a prototype tool was developed for the generation of building plants with optimization of geometries, constructive solutions and energy systems with consequent dynamic simulation, thus allowing an estimation on future consumption of buildings.

This work has as main objective the modeling, parameterization and analysis of the operation and performance of the cooling system and respective equipment used in the Department of Mechanical Engineering of the University of Coimbra, using dynamic simulation. The work developed will support the future integration of cooling systems and equipment in the plant generation tool.

For the formulation of this dynamic simulation, the building geometric modeling was performed using the SketchUp software. The modeling of energy systems and the dynamic simulation were performed using the EnergyPlus software.

After the dynamic simulations, analyzes were performed on the performance of the systems installed in the building under study, having as main parameters the number of hours in which the setpoint temperatures in the zones with air conditioning were not reached and the building total energy consumptions.

With this study, it was also possible to point out the flaws in the installed systems and to study the feasibility of implementing some changes and improvements, to promote a better performance with minimal consumptions.

**Keywords** HVAC, dynamic simulation, EnergyPlus, cooling systems.



## Índice

Índice de Figuras .....	xi
Índice de Tabelas .....	xiii
Simbologia e Siglas .....	xv
Simbologia.....	xv
Siglas e Acrónimos.....	xv
1. Introdução.....	17
1.1. Enquadramento .....	17
1.2. Objetivos.....	19
1.3. Estrutura da dissertação .....	20
2. Métodos e Programas de Simulação.....	23
2.1. Simulação Dinâmica .....	23
2.2. Modelação Geométrica .....	27
2.3. Ferramenta <i>SAPTool</i> .....	29
3. Caso de Estudo .....	31
3.1. Edifício em estudo .....	31
3.2. Características geométricas e soluções construtivas.....	32
3.3. Perfis de utilização.....	36
3.3.1. Ocupação .....	36
3.3.2. Equipamentos, Iluminação .....	36
3.3.3. Infiltrações.....	37
3.4. Sistemas de AVAC .....	37
4. Modelação .....	41
4.1. Modelação do Edifício.....	41
4.2. Modelação dos sistemas de AVAC .....	44
4.2.1. Modelação por <i>Template</i> .....	44
4.2.2. Modelação detalhada .....	45
4.2.3. Parametrização dos Equipamentos .....	48
5. Resultados e Discussão.....	51
5.1. Análise aos resultados.....	51
5.1.1. Análise de temperatura nas zonas climatizadas.....	51
5.1.2. Análise de potências exigidas aos equipamentos .....	53
5.1.3. Análise energética do sistema instalado .....	59
5.2. Possíveis alterações nos sistemas instalados .....	61
6. Conclusões.....	65
Referências Bibliográficas.....	69
A. Zonas Climatizadas .....	71
B. Esquemas de princípio.....	73
C. Equipamentos de AVAC .....	75



---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema da relação entre módulos do <i>EnergyPlus</i> , adaptado de Berkeley et al. (2017b) por (Bernardo, 2017) .....	24
Figura 2.2 - Esquema de soluções simultâneas na simulação dos sistemas de climatização, adaptado de Berkeley et al. (2017b).....	25
Figura 2.3 - Exemplo do esquema de montagem de um circuito de água <i>Chillers</i> -UTAs no <i>EnergyPlus</i> .....	26
Figura 2.4 - Representação da interface visual do <i>SketchUp</i> .....	28
Figura 2.5 - Representação dos algoritmos e funcionamento do <i>SAPTtool</i> .....	30
Figura 3.1 - Planta das zonas do edifício a climatizar.....	32
Figura 3.2 - Soluções construtivas dos espaços do DEM.....	33
Figura 3.3 - Perfis de ocupação diária dos espaços climatizados.....	36
Figura 3.4 - Exemplo de configuração das UTAs instaladas.....	39
Figura 4.1 - Ilustração simplificada das zonas a simular.....	42
Figura 4.2 - Esquema de modelação geométrica do DEM em <i>SketchUp</i> .....	43
Figura 4.3 - Esquema de modelação geométrica do DEM em <i>SketchUp</i> utilizando sombreamentos.....	43
Figura 4.4 - Esquema do circuito de água considerado.....	46
Figura 4.5 - Esquema do circuito do ar considerado para a UTA da biblioteca.....	48
Figura 5.1 - Variação da temperatura do ar nas várias zonas ao longo do ano.....	52
Figura 5.2 - Potência térmica em aquecimento e arrefecimento na biblioteca esquerda.....	55
Figura 5.3 - Potência térmica em aquecimento e arrefecimento na biblioteca direita.....	55
Figura 5.4 - Potência térmica em aquecimento e arrefecimento na biblioteca centro.....	56
Figura 5.5 - Potência térmica em aquecimento e arrefecimento na biblioteca hall.....	57
Figura 5.6 - Potência térmica em aquecimento e arrefecimento no auditório.....	58
Figura 5.7 - Potência térmica em aquecimento e arrefecimento no anfiteatro 1.....	59
Figura A.1 - Auditório.....	71
Figura A.2 - Anfiteatro 1.....	71
Figura A.3 - Biblioteca.....	72
Figura A.4 - Hall da biblioteca.....	72
Figura B.1 - Esquema de princípio do circuito de água fria.....	73
Figura B.2 - Esquema de princípio do circuito de água quente.....	74
Figura C.1 - <i>Chillers</i> .....	75

Figura C.2 - Caldeiras e queimadores. ....	75
Figura C.3 - Bomba de circulação dos <i>Chillers</i> . ....	75
Figura C.4 - Bomba de circulação de água fria das UTAs.....	75
Figura C.5 - Bomba de circulação das caldeiras. ....	76
Figura C.6 - Bombas de circulação de água quente das UTAs. ....	76
Figura C.7 – Exemplo de uma UTA instalada. ....	76

---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Soluções construtivas - Parede exterior em contacto com o exterior.....	34
Tabela 3.2 - Soluções construtivas - Parede exterior em contacto com o solo.....	34
Tabela 3.3 - Soluções construtivas - Parede divisória.....	34
Tabela 3.4 - Soluções Construtivas - Cobertura exterior.....	34
Tabela 3.5 - Soluções Construtivas - Cobertura exterior inclinada.....	35
Tabela 3.6 - Soluções Construtivas - Pavimento sobre o terreno.....	35
Tabela 3.7 - Soluções Construtivas - Pavimento sobre outras zonas.....	35
Tabela 3.8 - Soluções Construtivas - Pavimento sobre área não útil.....	35
Tabela 3.9 - Iluminação das zonas climatizadas.....	37
Tabela 4.1 - Parametização dos equipamentos de produção de água aquecida e refrigerada. .....	49
Tabela 4.2 - Parametização das bombas de circulação.....	50
Tabela 4.3 - Parametização das baterias das UTAs.....	50
Tabela 4.4 - Parametização dos caudais das UTAs.....	50
Tabela 5.1 - Temperaturas máximas e mínimas do ar interior das diferentes zonas climatizadas.....	53
Tabela 5.2 - Consumos totais anuais das simulações.....	60
Tabela 5.3 - Variação de consumos com a aplicação de economizadores e recuperadores de calor.....	62



## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$c_p$	<i>Calor específico</i>	[ J/kg. °C ]
$e$	<i>Espessura</i>	[ m ]
$g_v$	<i>Fator solar do vidro</i>	-
$R$	<i>Resistência térmica</i>	[ m <sup>2</sup> °C/W ]
$U$	<i>Coefficiente global de transmissão de calor</i>	[ W/m <sup>2</sup> . °C ]
$w$	<i>Humidade absoluta</i>	[ g/kg <sub>ar seco</sub> ]
$\lambda$	<i>Condutividade térmica</i>	[ W/m. °C ]
$\rho$	<i>Massa volúmica</i>	[ kg/m <sup>3</sup> ]

### Siglas e Acrónimos

<i>AVAC</i>	<i>Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado</i>
<i>BPS</i>	<i>Building Performance Simulation</i>
<i>COP</i>	<i>Coefficiente de Performance (Coefficient of Performance)</i>
<i>CSV</i>	<i>Comma-Separated Values</i>
<i>DEM</i>	<i>Departamento de Engenharia Mecânica</i>
<i>DOE</i>	<i>Department of Energy</i>
<i>EPSAP</i>	<i>Evolutionary Program for the Space Allocation Problem</i>
<i>EPW</i>	<i>EnergyPlus weather</i>
<i>FCTUC</i>	<i>Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra</i>
<i>FPOP</i>	<i>Floor Plan Performance Optimization Program</i>
<i>GUI</i>	<i>Graphical User Interface</i>
<i>HTML</i>	<i>Hypertext Markup Language</i>
<i>IDF</i>	<i>Input Data File</i>
<i>RAD</i>	<i>Radiance Input File</i>
<i>SAP</i>	<i>Space Allocation Problem</i>
<i>UPAR</i>	<i>Unidade Produtora de Água Refrigerada</i>
<i>UTA</i>	<i>Unidade de Tratamento de Ar</i>



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

Uma das necessidades básicas do ser humano é usufruir de abrigo. A construção de edifícios vem satisfazer esta necessidade, assegurando proteção e conforto face às condições meteorológicas. Ao longo da história, o ser humano tem demonstrado uma habilidade extraordinária no melhoramento contínuo das condições interiores, por exemplo, através do desenvolvimento de vários equipamentos e sistemas de climatização. Esta procura incessável leva a uma especial atenção aos consumos de energia destes equipamentos, tendo a simulação dinâmica de edifícios um papel importante na sua previsão.

Os sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado (AVAC) são utilizados para garantir conforto e qualidade do ar interior. Baseiam-se em princípios da Mecânica dos Fluidos, Termodinâmica e Transferência de Calor e promovem fenómenos de aquecimento, arrefecimento, humidificação, desumidificação, movimentação e limpeza do ar, fazendo uso de vários sistemas mecânicos ou naturais.

Segundo Shi *et al.* (2017), os sistemas de AVAC são responsáveis por cerca de 50% da energia consumida por um edifício, que por sua vez contribuem em aproximadamente 40% da energia consumida mundialmente. Para além disso, é esperado que os consumos aumentem em 28% até 2035 (Harish e Kumar, 2016). Sendo assim, de acordo com Balaras *et al.* (2005), como a vida útil de um edifício é longa e devido ao grande número de edifícios existentes, o potencial de melhoria nos desempenhos energéticos a nível global é elevado.

O conhecimento de exigências energéticas e características dos edifícios bem como a análise do desempenho dos equipamentos são cruciais para a obtenção de previsões energéticas e económicas que podem levar a uma fácil implementação de ações de redução de custos operativos (Fumo *et al.*, 2010; Harish e Kumar, 2016).

Para efetuar uma análise às exigências térmicas e energéticas é necessário estudar a interação de um elevado número de variáveis e interações entre o edifício, com as suas respetivas operações e equipamentos, e informações climáticas. Desta forma, processos de simulação dinâmica de edifícios são utilizados para esse estudo.

A simulação dinâmica de edifícios consiste num conjunto de cálculos de cargas térmicas, consumo de energia e evolução de vários parâmetros relevantes à utilização de um edifício para um dado intervalo de tempo, normalmente anual, de forma a simular o seu desempenho térmico e energético. Para estes cálculos é considerada a dinâmica do edifício, que engloba perfis de ocupação, equipamentos utilizados, soluções construtivas e informação climática. A simulação dinâmica de sistemas de climatização de ambientes interiores é uma técnica vastamente utilizada para projetar, controlar, diagnosticar e até melhorar sistemas de AVAC. Por esta razão, é de notar um constante aparecimento e aperfeiçoamento de programas e ferramentas com diferentes características e vários graus de complexidade para simulação dinâmica.

Devido às numerosas variáveis, torna-se quase impossível criar um modelo que tenha a capacidade de refletir a realidade sem falhas, sendo que estas são criadas maioritariamente por suposições ou distúrbios não mensuráveis. Afroz *et al.* (2018) refere que uma correta seleção de programa ou ferramenta, com total conhecimento das suas limitações e correspondente minimização destas, tem um enorme impacto na obtenção de melhores resultados de simulação, tornando-se então absolutamente necessário trabalhar com modelos matematicamente e fisicamente adequados, pois só assim obteremos resultados com um grau de precisão aceitável.

Al-homoud (2001) defende que decisões em pré-projecto, feitas de forma cuidada e vocacionadas para o futuro, sobre a construção, design e operação do edifício não só têm um custo mais baixo como têm um maior impacto na performance do edifício, podendo ainda baixar a necessidade de utilização de equipamentos mecânicos para atingir o conforto térmico.

Tendo em conta que os edifícios fazem, cada vez mais, uso de sistemas automáticos de climatização, Fasiuddin *et al.* (2011) refere que determinadas escolhas em pré-projecto, tais como a identificação, seleção e operação de sistemas de AVAC, podem levar a poupanças energéticas até 25%. No entanto, más escolhas podem levar a consumos energéticos excessivos.

Para edifícios que já possuem sistemas de climatização, é normalmente mais eficaz e economicamente viável melhorar os algoritmos de controlo dos equipamentos, de forma a conseguir uma maior eficiência, do que substituir estes por tecnologias mais modernas e eficientes que têm normalmente um custo elevado (Rahman *et al.*, 2010).

Apesar das vantagens do uso de ferramentas de simulação dinâmica numa fase inicial de projeto, a utilização destas nesta fase raramente acontece, sendo as principais razões a sua difícil implementação e a ausência de informação detalhada do edifício nesta fase (Rodrigues, 2014).

De forma a ajudar arquitetos na tomada de decisões que possam ter forte impacto na performance futura de um edifício, foi criada a ferramenta *SAPTool*. Esta ferramenta promove a incorporação de simulações dinâmicas desde a fase inicial do projeto, fazendo uso do algoritmo EPSAP (Rodrigues, Gaspar, & Gomes, 2013a, b, c) para gerar plantas de acordo com várias preferências do utilizador e consequentemente otimiza-las utilizando o algoritmo FPOP (Rodrigues, 2014). Atualmente, esta ferramenta encontra-se em fase de extensão, no decurso do projeto Ren4EEnIEQ. Este projeto tem como objetivo desenvolver uma ferramenta alargada, que compreenda o levantamento do edificado, geração de desenho, otimização da geometria e dos sistemas de energias e de sistemas construtivos, numa ferramenta add-on BIM (Building Information Model) (Ren4EEnIEQ, 2018).

## 1.2. Objetivos

Este trabalho, integrado no projeto Ren4EEnIEQ, tem como objetivo primordial a caracterização e parametrização de sistemas de produção e distribuição de água refrigerada, utilizando o Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) como caso de estudo, através da simulação dinâmica deste. Pretende-se ainda que os sistemas e equipamentos modelados e a informação obtida decorrente das simulações sirva de apoio para a futura integração de sistemas e equipamentos de arrefecimento na biblioteca da ferramenta *SAPTool*. O conhecimento do funcionamento, características e consumos destes sistemas permitirá a sua aplicação em edifícios criados com recurso a esta ferramenta.

O edifício escolhido para o caso de estudo originou a escolha dos equipamentos a modelar, tendo sido estes os que já se encontram instalados no DEM.

Este trabalho irá descrever os processos necessários para se proceder à simulação dinâmica do edifício selecionado e à análise comparativa de diferentes técnicas utilizando o programa *EnergyPlus*.

Para a execução dos objetivos referidos procedeu-se aos seguintes passos:

- revisão literária e análise do estado da arte;
- levantamento de informação relativa ao edifício e sistemas a modelar, tais como listagem e características dos equipamentos de AVAC, área e tipologia das zonas, soluções construtivas, equipamentos elétricos e iluminação;
- familiarização com o programa *EnergyPlus* através da análise de exemplos de modelações;
- modelação 3D do edifício, áreas a simular e atribuição das soluções construtivas através do programa *SketchUp*, com recurso à extensão *Euclid*;
- modelação e parametrização dos sistemas de climatização através da utilização de *templates* do programa *EnergyPlus* e simulação dinâmica do edifício com os sistemas modelados;
- modelação e parametrização dos sistemas de climatização de forma detalhada através da utilização de objetos próprios do *EnergyPlus* e simulação dinâmica do edifício com estes sistemas modelados;
- análise da performance de ambos os sistemas e comparação entre as duas simulações;
- sugestão de otimização dos sistemas instalados.

### **1.3. Estrutura da dissertação**

Esta dissertação encontra-se organizada em 6 capítulos.

No presente capítulo, de carácter introdutório, é apresentada a problemática que incita a realização deste trabalho, traçam-se os objetivos e definem-se os passos necessários à sua execução.

No segundo capítulo descrevem-se os programas e ferramentas que permitem a simulação dinâmica, estabelece-se a conveniência e a função destes, as suas características e explica-se de uma forma geral o seu funcionamento.

No terceiro capítulo procede-se à apresentação do edifício sujeito ao caso de estudo, descrevem-se as suas características geométricas, localização, utilização e equipamentos.

Selecionam-se ainda as zonas sujeitas a simulação e descrevem-se as simplificações consideradas para estas.

No quarto capítulo é descrita a modelação da simulação dinâmica. Descreve-se a forma como foi feita a modelação 3D do edifício e a implementação dos equipamentos no programa de simulação.

O quinto capítulo é dedicado à análise e interpretação dos resultados, depreende-se a adequabilidade dos métodos utilizados, comparam-se os resultados obtidos para diferentes técnicas de modelação e são tecidas ainda algumas reflexões sobre o desempenho dos equipamentos instalados.

Por último, no sexto capítulo, de carácter conclusivo, são apresentadas as principais conclusões, são feitas algumas considerações finais e são lançados alguns desafios para o desenvolvimento de trabalhos futuros.



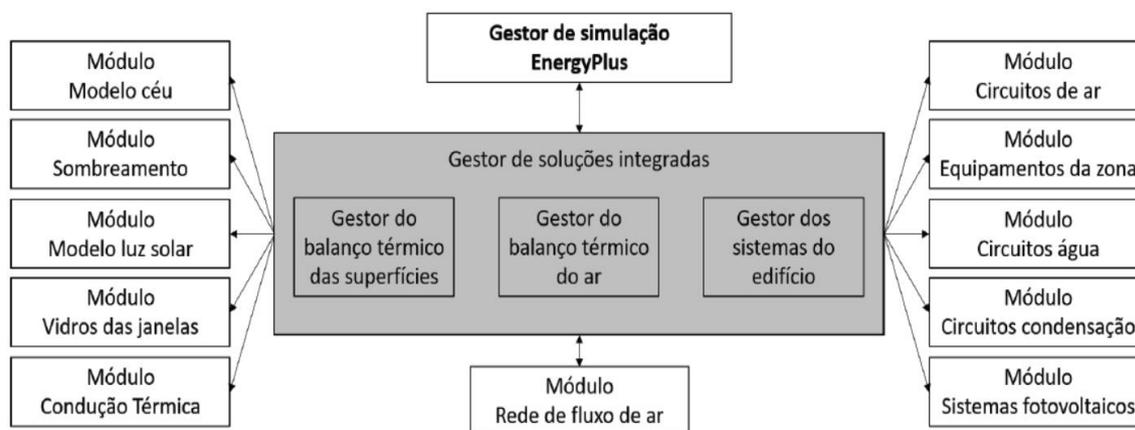
## 2. MÉTODOS E PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO

No presente capítulo são expostas as principais ferramentas e técnicas utilizadas neste trabalho. Faz-se referência ao propósito da sua utilização e descreve-se o seu funcionamento.

### 2.1. Simulação Dinâmica

A ferramenta utilizada neste trabalho para a simulação dinâmica das exigências térmicas e energéticas foi o *EnergyPlus*. É um programa amplamente utilizado como ferramenta de simulação energética em projetos de investigação e otimização de edifícios (Stadler *et al.*, 2006). Devido às capacidades desta ferramenta, simulações em *EnergyPlus* produzem resultados com elevada precisão que possibilitam um desempenho interessante na análise e otimização de sistemas de AVAC. A grande utilização desta ferramenta deve-se também ao facto de ser totalmente gratuita – é financiada pelo *U.S. Department of Energy (DOE)* –, podendo ser facilmente incorporada em qualquer estudo sem grande investimento de recursos por parte do projetista.

O *EnergyPlus* funciona de forma modular. Os diferentes módulos trabalham juntos para calcular a energia requerida para aquecimento e arrefecimento baseando-se nos princípios de transferência de calor. O cálculo é efetuado através da simulação de um edifício e de um conjunto de sistemas energéticos associados, sendo depois exposto a diferentes condições de operação para períodos diários ou para maiores períodos de tempo (Berkeley Lab, 2017c). A gestão dos diferentes módulos pelo *EnergyPlus* de forma a proceder aos cálculos necessários está representada na Figura 2.1.



**Figura 2.1 - Esquema da relação entre módulos do *EnergyPlus*, adaptado de Berkeley et al. (2017b) por (Bernardo, 2017)**

Como todos os programas de simulação, o *EnergyPlus* necessita de um conjunto de *inputs* que descrevem o edifício a ser modelado, produzindo assim um conjunto de *outputs* que necessitam de ser processados posteriormente. O facto dos *inputs* e *outputs* serem documentos de texto facilita a integração com outros programas. Estes *inputs* são criados recorrendo a um ficheiro de texto do tipo IDF. Nesse ficheiro há um conjunto de informação indispensável para a simulação dinâmica por parte do programa, tais como informação geométrica e de soluções construtivas do edifício, informação sobre ocupação e atividade, equipamentos utilizados nas instalações, iluminação, tipo de sistemas de AVAC, entre outros (Berkeley Lab, 2017d).

Para além deste ficheiro, é necessário um ficheiro climático relativo ao local geográfico onde se encontra o edifício a simular. Neste ficheiro consta informação sobre temperatura, velocidade do vento, humidade, precipitação, pressão atmosférica e radiação solar, à cadência selecionada e permitida pelo ficheiro, e encontra-se no formato EPW (*EnergyPlus weather*). A informação climática está no formato hora a hora (Berkeley Lab, 2017a).

Para realizar uma simulação fisicamente realista, os elementos da simulação têm de estar interligados num esquema de soluções simultâneas em que se procede a cálculos de balanços térmicos entre as zonas térmicas do edifício, os sistemas de climatização e os sistemas de produção de energia. Estes elementos encontram-se interligados por circuitos de fluido – ar,

na ligação sistema/zona, e água<sup>1</sup>, na ligação produção/sistema. Cada circuito está dividido entre a parte que fornece energia (*Supply Side*) e a parte que exige ou utiliza essa energia (*Demand Side*). A Figura 2.2 mostra a ligação entre esses elementos.

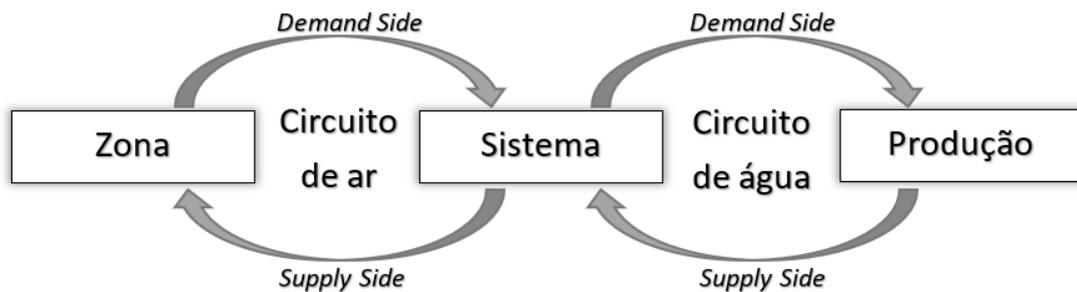


Figura 2.2 - Esquema de soluções simultâneas na simulação dos sistemas de climatização, adaptado de Berkeley et al. (2017b).

Durante a simulação, o programa faz uma estimativa da energia necessária para atingir a temperatura desejada na zona e faz essa exigência ao sistema. O sistema calcula a capacidade de resposta ou a quantidade de energia que consegue fornecer nesse momento, e essa energia é então fornecida à zona e utilizada para calcular a alteração de temperatura que desencadeou. A capacidade do sistema de ar vai ser uma resultante dos equipamentos ou sistema utilizados e os equipamentos de produção de energia, sendo que para atingir os valores necessários é feita uma exigência aos equipamentos de produção de energia por parte do sistema utilizado (Berkeley Lab, 2017b).

O *EnergyPlus* tem uma forma específica de formar e definir os circuitos de fluido (*Loops*). Essa forma e respetiva nomenclatura é descrita exhaustivamente em Berkeley *et al.* (2015). Na Figura 2.3 apresenta-se um exemplo de montagem de um circuito de água com dois *Chillers* e três Unidades de Tratamento de Ar (UTAs), sendo a construção e lógica do esquema igual para sistemas de arrefecimento e de aquecimento.

Como mencionado anteriormente, os circuitos estão divididos em duas partes, *Supply Side* e *Demand Side*. Cada parte é constituída por ramos (*branches*) (cada segmento de reta na figura), sendo cada ramo composto por um ou mais componentes que se interligam entre si

<sup>1</sup> Tipicamente a água, mas poderá tratar-se de qualquer outro fluido térmico.

através de nodos (*nodes*) de entrada e saída. Os nodos definem o início e o fim de cada componente e, conseqüentemente, dos ramos, representados na figura por círculos pretos. Os componentes são objetos físicos presentes na instalação, por exemplo, *chillers*, caldeiras, UTAs e bombas de circulação são considerados componentes ativos, e tubagens e condutas são componentes passivos.

Os ramos de *bypass* certificam-se que o fluido circula nesse ramo quando os componentes operativos não estão a funcionar. Todos os componentes ativos, exceto bombas de circulação, devem conter um ramo de *bypass*.

Os conectores são elementos utilizados para ligar vários ramos nos circuitos. Existem dois tipos de conectores: os *Splitters*, que dividem o caudal em vários ramos no circuito, e os *Mixers*, que juntam o caudal proveniente de vários ramos. Cada par de conectores consiste num *Splitter* e num *Mixer*. Na figura os *Splitters* são representados a laranja e os *Mixers* a azul.

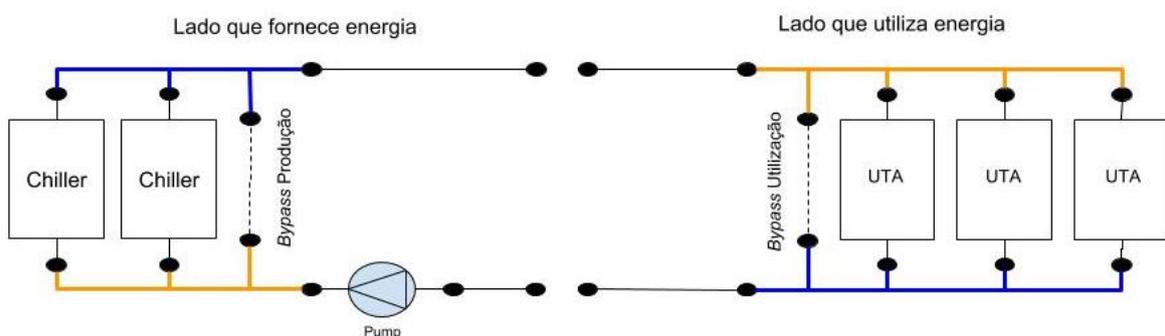


Figura 2.3 - Exemplo do esquema de montagem de um circuito de água *Chillers-UTAs* no EnergyPlus.

A cada circuito de água fria deve estar associado um ou mais elementos produtores de arrefecimento (*chiller* ou *district cooling*) e a cada circuito de água quente deve estar associado um ou mais elementos produtores de aquecimento (caldeira ou *district heating*).

Depois de correr uma simulação, o programa cria e apresenta um conjunto de resultados, e as variáveis e os *outputs* selecionados pelo utilizador são exportadas para ficheiros CSV. Além disso, é também criado um conjunto de tabelas que sumariza todos os resultados do sistema, em formato *HTML*. Em conjunto com estes ficheiros, é importante mencionar que

o programa também produz outros tipos de ficheiro, sendo o mais importante o ficheiro *ERR*, que contém e resume todos os erros que possam ter ocorrido durante a simulação, figurando-se assim como a principal ferramenta de diagnóstico pós-simulação.

No *EnergyPlus* há a possibilidade de utilizar objetos chamados *HVACTemplate*. Estes têm o objetivo de simplificar a definição dos sistemas a utilizar, requerendo menos informação por parte do utilizador. Esta simplificação acaba por comprometer a versatilidade dos sistemas, impossibilitando, por exemplo, a definição de sistemas e/ou equipamentos de AVAC mais complexos/detalhados. Contudo, são interessantes numa abordagem inicial, de forma a obter resultados mais rapidamente e sem ser necessário um conhecimento aprofundado sobre a forma de processamento do programa *EnergyPlus* ou dos sistemas em si.

Os objetos *HVACTemplate* não são diretamente processados pelo *EnergyPlus*; ao invés, são pré-processados automaticamente por um outro programa chamado *ExpandObjects*. O *ExpandObjects* lê o ficheiro IDF criado e converte automaticamente todos os objetos *HVACTemplate* em objetos detalhados do *EnergyPlus*, resultando num ficheiro *ExpandIDF* (com extensão “*expidf*”), que é utilizado como *input* do programa para a simulação. Desta forma, não é necessário definir mais objetos relacionados com AVAC para além dos *HVACTemplate* de forma a produzir um ficheiro IDF (Berkeley Lab, 2017d).

Neste trabalho, foram utilizados objetos *HVACTemplate* num primeiro contacto com a modelação do sistema completo. Numa segunda etapa, foram utilizados objetos detalhados do *EnergyPlus*, para os quais foi necessário definir cada componente individual, bem como criar uma listagem de *branches*, *connectors*, *nodes*, *mixers*, *splitters* e as ligações entre si. A abordagem, objetos criados e limitações de ambas as estratégias serão discutidas na secção 4.2.

## 2.2. Modelação Geométrica

Como foi referido anteriormente, o *EnergyPlus* permite interagir de forma prática com outros programas. Assim sendo, para geometrias de edifícios mais complexas torna-se

essencial utilizar um programa externo para desenho que facilite essa definição geométrica. No caso deste trabalho, foi utilizado o programa *SketchUp*, obtido no sítio oficial da internet deste (SketchUp, 2018), para a definição geométrica e seleção de soluções construtivas. O *SketchUp* é um programa de modelação tridimensional (3D) que permite desenhar edifícios de forma intuitiva com detalhes e precisão, criando uma apresentação mais realista. É uma ferramenta bastante utilizada em arquitetura e engenharia.

Para efetuar a ligação entre o *SketchUp* e o *EnergyPlus* foi utilizada a extensão *Euclid* (Big Ladder Software, 2018), que é uma extensão gratuita para o *SketchUp* que permite e facilita a criação e modificação da geometria de edifícios no formato IDF, depois utilizados para simulação no *EnergyPlus*. É principalmente eficaz na rápida criação de zonas térmicas, sombreamentos e atribuição de soluções construtivas, encurtando significativamente o tempo normalmente requerido de definição de forma textual por parte do *EnergyPlus*. Para além disso, permite fazer rápidas simulações dentro do *SketchUp*, sendo que qualquer alteração pode ser gravada diretamente no ficheiro IDF. Apresenta-se também como uma ferramenta de diagnóstico rápido de problemas geométricos devido à sua interface visual simples (Figura 2.4).

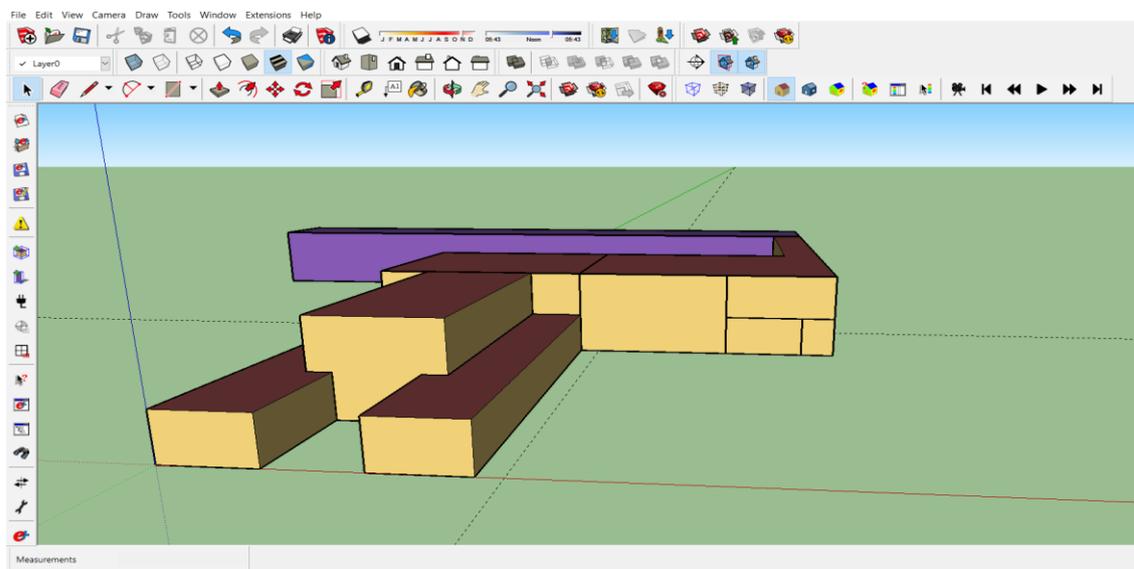


Figura 2.4 - Representação da interface visual do SketchUp.

### 2.3. Ferramenta *SAPTool*

O problema de alocação de espaço em arquitetura pode ser definido pelo processo de determinação da melhor posição e tamanho de vários espaços interiores e aberturas de acordo com as condições impostas pelo projetista no que toca a constrangimentos geométricos e topologia para um espaço bidimensional (Rodrigues *et al.*, 2013a, 2013b).

O programa *SAPTool* é um programa protótipo criado para ajudar o utilizador numa fase inicial do projeto com o problema de alocação de espaço. Este programa gera plantas automaticamente de acordo com as preferências do projetista e permite ainda a otimização do seu desempenho energético fazendo uso de dois motores de simulação. O programa *EnergyPlus* é utilizado para análise térmica do edifício e o programa *Radiance* para conforto visual do utilizador do edifício gerado ( Rodrigues *et al.*, 2013b, 2014).

O funcionamento do *SAPTool* segue a ordem apresentada na Figura 2.5. O módulo LSP é encarregado de gravar os requisitos e especificações selecionados pelo utilizador e carregar os dados para o programa. Na base de dados encontra-se informação sobre os sistemas de climatização, de produção de energia, sistema construtivo, etc. O módulo EPSAP vai gerar e armazenar plantas de edifícios alternativas de acordo com as especificações. No módulo BPS define-se o critério de avaliação dos edifícios armazenados e faz-se uma primeira simulação fazendo uso das bibliotecas *IDFParser* e *RADParser* que permitem uma conversão do layout para objetos IDF do programa *EnergyPlus* ou RAD do programa *Radiance*. Caso seja necessária uma otimização das plantas, o módulo FPOP otimiza a geometria dos edifícios tendo em conta as estratégias do utilizador. O desempenho dessa otimização é calculado através de simulações dinâmicas. Por fim, o utilizador pode visualizar a geometria do edifício e analisar os relatórios de desempenho deste na interface gráfica GUI. Rodrigues *et al.* (2013a, 2013b, 2013c, 2014) fornece uma explicação mais exhaustiva sobre o funcionamento desta ferramenta e dos seus constituintes.

Assim, um dos objetivos deste trabalho passa também por servir de apoio para a futura implementação de sistemas e equipamentos de arrefecimento a modelar e simular na ferramenta *SAPTool*, de forma a aumentar o tipo de sistemas de AVAC disponíveis na ferramenta.

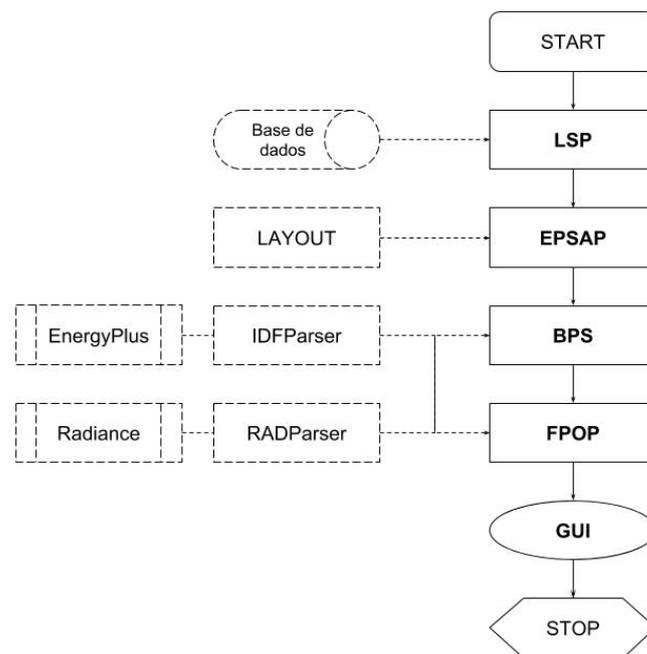


Figura 2.5 - Representação dos algoritmos e funcionamento do SAPTool.

### 3. CASO DE ESTUDO

No presente capítulo é descrita a seleção e descrição do caso de estudo. É proposto e caracterizado o edifício, os seus componentes e materiais constituintes. Indicam-se também os perfis de utilização e os equipamentos instalados através de uma breve descrição do seu funcionamento.

#### 3.1. Edifício em estudo

No enquadramento principal de “modelação de sistemas de arrefecimento para climatização de edifícios” surgiu o desafio de modelar e simular esses mesmos sistemas para um edifício existente. Devido a uma maior facilidade informativa e proximidade pessoal foi escolhido o Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Universidade de Coimbra como caso de estudo.

O DEM encontra-se localizado em Coimbra nas coordenadas 40° 11' 04'' N / 8° 24' 49'', numa zona climática I2 e V2.

O ficheiro climático para a cidade de Coimbra utilizado nesta simulação foi obtido a partir do sítio oficial da internet do programa *EnergyPlus* (EnergyPlus, 2018).

Como objetivo de simulação ficou decidido simular apenas as áreas que têm instaladas unidades de tratamento de ar (UTAs). Assim, as zonas consideradas e estudadas na simulação são a Biblioteca, o Auditório e o Anfiteatro 1 do DEM. Além disso, com o objetivo de se obter um maior realismo na simulação desses espaços, foram também criadas todas as zonas acessórias às zonas climatizadas, de modo a se considerar as interações que ocorrem entre os diferentes espaços, sem, contudo, se proceder à monitorização da evolução das cargas térmicas dentro destas zonas acessórias. No anexo A encontram-se fotografias dos espaços considerados nesta simulação.

### 3.2. Características geométricas e soluções construtivas

A informação geométrica detalhada das zonas do DEM em análise foi obtida com recurso ao ficheiro DWG das plantas do DEM, utilizando o programa *AutoCad*. A planta de forma esquematizada dos espaços climatizados do DEM está ilustrada na Figura 3.1.

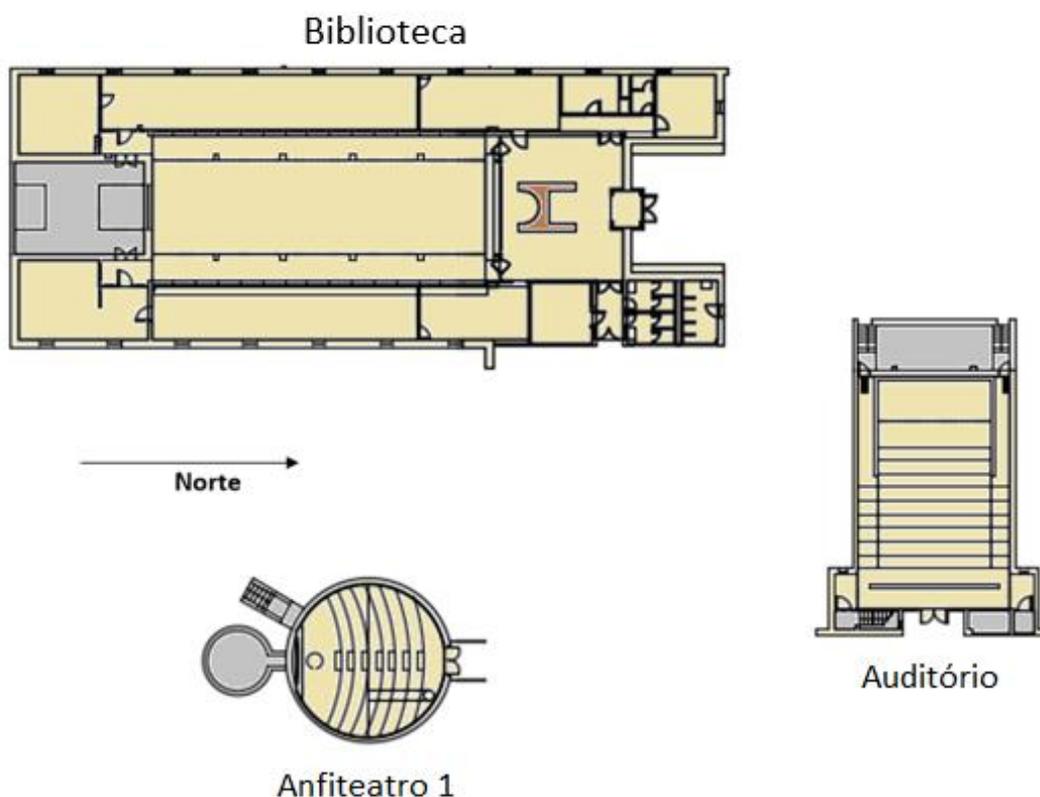


Figura 3.1 - Planta das zonas do edifício a climatizar.

Com recurso às plantas do edifício foi possível obter as áreas detalhadas das zonas a criar. Do que diz respeito ao pé-direito dos espaços, foi consultado o estudo desenvolvido por Bettencourt (2012) que visou fazer uma análise a um conjunto de instalações de ensino superior, entre elas o DEM.

As soluções construtivas utilizadas na modelação dos espaços a simular estão de acordo com os elementos construtivos presentes no DEM. Na Figura 3.2 encontra-se a representação das soluções construtivas utilizadas.

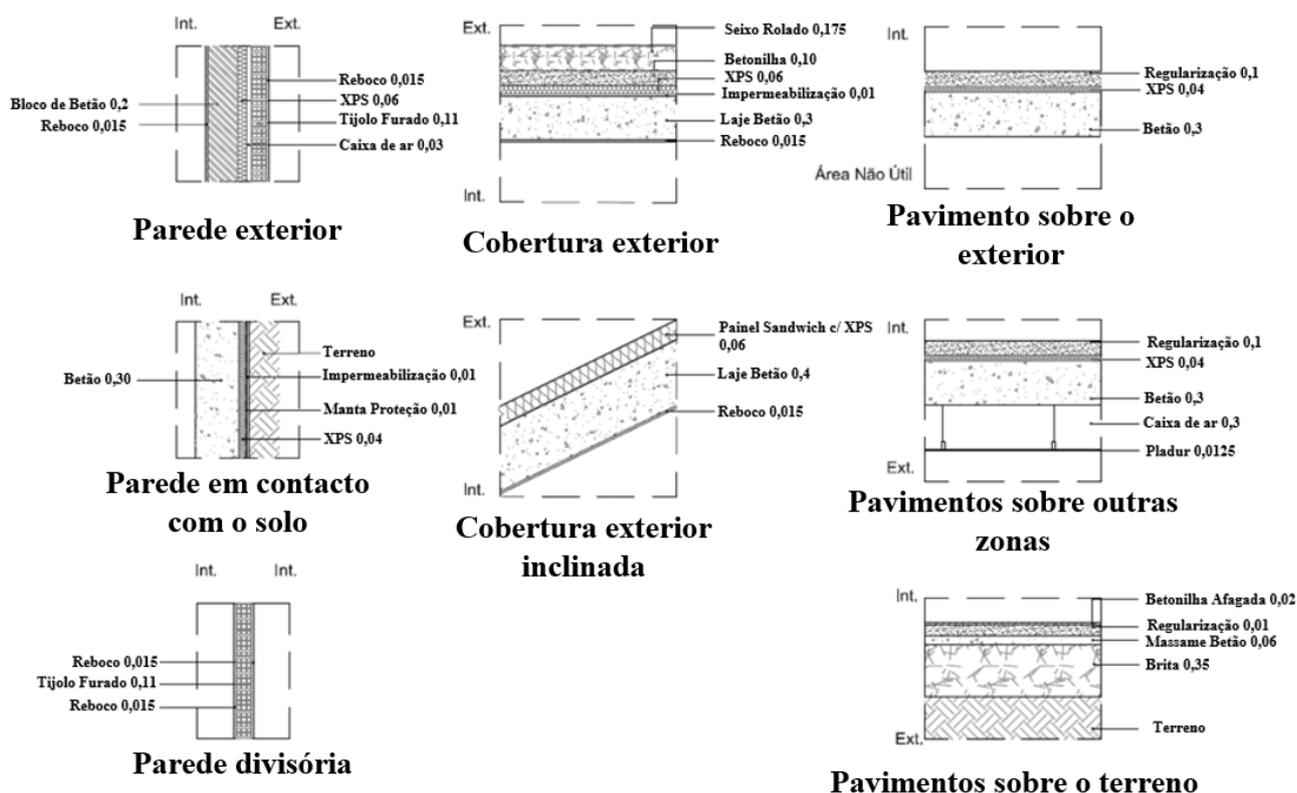


Figura 3.2 - Soluções construtivas dos espaços do DEM.

Todas as paredes em contacto com o exterior usam a solução indicada na Tabela 3.1. Das zonas consideradas apenas no Auditório existem paredes em contacto com o solo, encontrando-se esta solução construtiva descrita na Tabela 3.2. Todas as paredes interiores, separação de zonas ou em contacto com outra parte do edifício utilizam a solução construtiva descrita na Tabela 3.3.

Quase todas as coberturas em contacto com o ar exterior usam a solução detalhada na Tabela 3.4. A exceção encontra-se na cobertura inclinada do Auditório que utiliza a solução construtiva da Tabela 3.5.

Todo o pavimento em contacto com o solo faz uso da solução construtiva indicada na Tabela 3.6. Pavimentos sobre outras zonas utilizam a solução construtiva indicada na Tabela 3.7.

Parte da cobertura da biblioteca faz também uso desta solução pois existem salas por cima de algumas partes da biblioteca. O pavimento que se encontra em contacto com o espaço exterior faz uso da solução indicada na Tabela 3.8.

**Tabela 3.1 - Soluções construtivas - Parede exterior em contacto com o exterior.**

Parede exterior					
Camada	Material	$e$ [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/m. °C]	$c_p$ [J/kg. °C]
Exterior	Reboco	0,015	1900	1,3	1000
2	Tijolo furado	0,11	873	0,41	936
3	Caixa de ar*	0,03	-	-	-
4	Isolamento XPS	0,06	32	0,037	1450
5	Betão	0,2	2246	1,73	837
Interior	Reboco	0,015	1900	1,3	1000

\*  $R_{ar} = 0,18 \text{ m}^2\text{°C/W}$

**Tabela 3.2 - Soluções construtivas - Parede exterior em contacto com o solo.**

Parede em contacto com o solo					
Camada	Material	$e$ [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/m. °C]	$c_p$ [J/kg. °C]
Exterior	Impermeabilização	0,01	1121	0,19	1674
2	Isolamento XPS	0,04	32	0,037	1450
3	Betão	0,3	2246	1,73	837
Interior	Madeira	0,02	825	0,2	2385

**Tabela 3.3 - Soluções construtivas - Parede divisória.**

Parede divisória					
Camada	Material	$e$ [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/m. °C]	$c_p$ [J/kg. °C]
1	Reboco	0,015	1900	1,3	1000
2	Tijolo furado	0,11	873	0,41	936
3	Reboco	0,015	1900	1,3	1000

**Tabela 3.4 - Soluções Construtivas - Cobertura exterior.**

Cobertura exterior plana					
Camada	Material	$e$ [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/m. °C]	$c_p$ [J/kg. °C]
Exterior	Seixo rolado	0,175	881	1,44	1674
2	Betonilha	0,1	1800	1,3	1000
3	Isolamento XPS	0,06	32	0,037	1450
4	Impermeabilização	0,01	1121	0,19	1674
5	Betão	0,3	2246	1,73	837
Interior	Reboco	0,015	1900	1,3	1000

Tabela 3.5 - Soluções Construtivas - Cobertura exterior inclinada.

Cobertura exterior inclinada					
Camada	Material	$e$ [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/m.°C]	$c_p$ [J/kg.°C]
Exterior	Painel Sandwich com XPS	0,06	20	0,042	1450
2	Betão	0,4	2246	1,73	837
Interior	Reboco	0,015	1900	1,3	1000

Tabela 3.6 - Soluções Construtivas - Pavimento sobre o terreno.

Pavimento sobre o terreno					
Camada	Material	$e$ [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/m.°C]	$c_p$ [J/kg.°C]
Exterior	Brita	0,35	1950	2	1000
2	Massame de betão	0,06	2246	1,73	837
4	Regularização	0,01	950	0,22	840
5	Betonilha Afagada	0,02	1800	1,3	1000
Interior	Madeira	0,02	825	0,2	2385

Tabela 3.7 - Soluções Construtivas - Pavimento sobre outras zonas.

Pavimento sobre outras zonas					
Camada	Material	$e$ [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/m.°C]	$c_p$ [J/kg.°C]
Exterior	Pladur	0,0125	700	0,21	1000
2	Caixa de ar*	0,3	-	-	-
3	Betão	0,3	2246	1,73	837
4	Isolamento XPS	0,04	32	0,037	1450
5	Regularização	0,1	950	0,22	840
Interior	Madeira	0,02	825	0,2	2385

\*  $R_{ar} = 0,16 \text{ m}^2\text{C}/\text{W}$ 

Tabela 3.8 - Soluções Construtivas - Pavimento sobre área não útil.

Pavimento sobre área não útil					
Camada	Material	$e$ [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/m.°C]	$c_p$ [J/kg.°C]
Exterior	Betão	0,3	2246	1,73	837
2	Isolamento XPS	0,04	32	0,037	1450
3	Regularização	0,1	950	0,22	840
Interior	Madeira	0,02	825	0,2	2385

No que toca a envidraçados, considerou-se para todas as janelas vidro simples de 5 mm com um coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ) de  $5,1 \text{ W/m}^2\text{C}$  e um fator solar ( $g_v$ ) de 0,85.

### 3.3. Perfis de utilização

#### 3.3.1. Ocupação

A ocupação dos espaços foi feita de acordo com a ocupação em relação ao período de aulas do DEM. Para o Auditório e Anfiteatro 1, teve-se em consideração o horário normal de aulas, sendo privilegiada a ocupação no período da tarde, no qual se encontram as turmas com mais alunos inscritos. No caso da Biblioteca, também foi privilegiada a parte da tarde, sendo que é nessa altura que é mais utilizada. Durante o mês de agosto, nos fins-de-semana e nos feriados não há funcionamento dos espaços, logo não existe qualquer tipo de ocupação. Para o resto do ano a ocupação é como demonstrada na Figura 3.3.

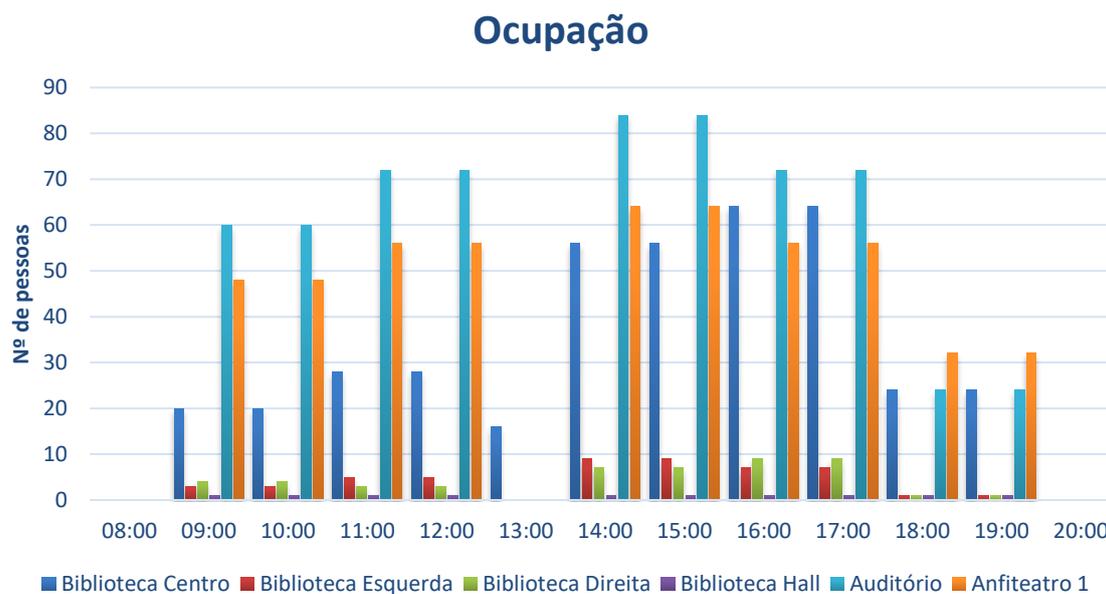


Figura 3.3 - Perfis de ocupação diária dos espaços climatizados.

#### 3.3.2. Equipamentos, Iluminação

A iluminação na biblioteca encontra-se ativa durante todo o seu período de funcionamento. Já a iluminação para o Auditório e para o Anfiteatro 1 apenas se encontra ativa durante o

período em que estes estão a ser utilizados. As características da iluminação utilizada nas zonas climatizadas encontram-se na Tabela 3.9.

**Tabela 3.9 - Iluminação das zonas climatizadas.**

Zona	nº de lâmpadas	Potência (W)	Potência Total (W)	Fração radiante	Fração visível
<b>Auditório</b>	6	36	216	0,42	0,18
	25	50	1250	0,37	0,18
	5	13	65	0,37	0,18
<b>Anfiteatro 1</b>	2	36	72	0,37	0,18
	10	50	500	0,37	0,18
	13	30	390	0,37	0,18
<b>Biblioteca Centro</b>	8	70	560	0,42	0,18
<b>Biblioteca Esquerda</b>	13	36	468	0,42	0,18
<b>Biblioteca Direita</b>	15	36	540	0,42	0,18
<b>Biblioteca Hall</b>	1	50	50	0,37	0,18

Os equipamentos elétricos utilizados no Auditório e Anfiteatro 1 consistem nos computadores e projetores utilizados pelos professores, que se consideram ter um consumo constante de 500 W durante a ocupação destes espaços. Na biblioteca, considera-se que os equipamentos elétricos são em função da ocupação do local e que cada utilizador faz uso de um computador portátil com uma potência de 65 W.

### 3.3.3. Infiltrações

Foi assumido que os espaços a climatizar têm infiltrações de ar a uma taxa de 0,1 renovações por hora nos períodos em que os equipamentos de climatização não se encontram em funcionamento (secção 4.2.3).

## 3.4. Sistemas de AVAC

O DEM faz recurso de sistemas de climatização para aquecimento e arrefecimento dos espaços. Os equipamentos instalados para a produção de água refrigerada são *chillers* e os equipamentos instalados para a produção de água quente são caldeiras. Um *Chiller* ou Unidade Produtora de Água Refrigerada (UPAR) é um equipamento de produção de energia térmica de arrefecimento. A sua função é remover energia térmica de um dado líquido, *i.e.*,

arrefecê-lo, tipicamente, através de um processo de compressão de vapor ou de sorção. No caso dos equipamentos instalados no DEM, os *chillers* arrefecem o fluido térmico (neste caso, a água) que promoverá o efeito de arrefecimento nas baterias dos equipamentos terminais (UTAs). A “eficiência” de refrigeração de um *chiller* é medida através de um Coeficiente de Performance (COP). Nesta instalação temos equipamentos que funcionam com Compressão de Vapor. Os *chillers* instalados são elétricos de parafuso da marca *Carrier*, modelo 30GY 020-035, com uma potência nominal de 101 kW e um COP de 2,698. Os equipamentos instalados no DEM para produção de energia para aquecimento são duas caldeiras a gás natural, que promovem o efeito de aquecimento nas baterias dos equipamentos terminais (UTAs), nos radiadores e no depósito de água quente. As caldeiras de aquecimento instaladas são da marca Roca, modelo NTD-300, atuam a gás natural e têm uma potência nominal de 348,8 kW.

A climatização dos espaços em análise neste trabalho (biblioteca, auditório e anfiteatro 1 do DEM) é feita com recurso a três UTAs, tanto para arrefecimento como para aquecimento (UTA 1 – Biblioteca, UTA 2 – Auditório, UTA 3 – Anfiteatro 1). As UTAs são dispositivos utilizados para, como o próprio nome indica, tratar o ar e fazê-lo circular nas zonas a climatizar. O tratamento do ar é feito através do controlo da temperatura, humidade e renovação deste. Estas unidades são normalmente constituídas por uma caixa que contém um ventilador mecânico, baterias de aquecimento e arrefecimento, filtros de ar, atenuadores acústicos, e grelhas de admissão e extração. Nesta instalação, o ar chega às zonas a climatizar por meio de condutas, sendo depois extraído também por condutas, sendo parte reaproveitado e misturado com ar novo e recirculado na zona. Nas baterias de aquecimento a água quente proveniente das caldeiras passa por uma serpentina, em contato com o ar a insuflar, aquecendo-o. Nas baterias de arrefecimento o processo é o inverso ao de aquecimento: a água fria proveniente dos *chillers* passa por uma serpentina em contato com o ar de insuflação, arrefecendo-o. As UTAs instaladas no DEM são da marca *Wolf Klimatechnik*, os modelos variam consoante a UTA e têm todas um filtro EU 3. A configuração e esquema de montagem das três UTAs encontra-se na Figura 3.4.

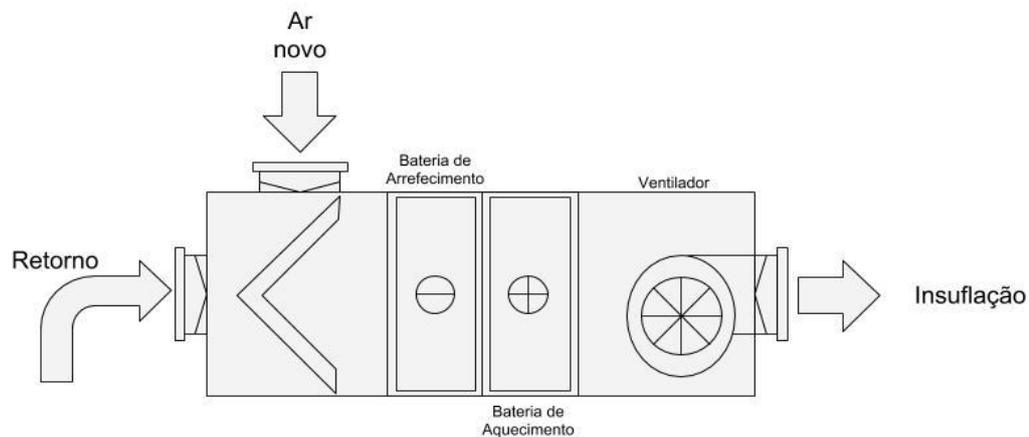


Figura 3.4 - Exemplo de configuração das UTAs instaladas.

O aquecimento feito a todas as outras zonas do edifício é com recurso a radiadores, no entanto, estas zonas não têm sistemas instalados para arrefecimento. O DEM tem também instalado um depósito de água quente que ajuda com as necessidades de águas quentes sanitárias.

A circulação do fluido térmico (água) entre os equipamentos produtores e os equipamentos instalados nas zonas é garantida com recurso a bombas de circulação. As bombas de circulação são dispositivos encarregados de fazer chegar a água, quente ou fria, aos dispositivos que dela necessitem. Neste caso, têm o papel de fazer chegar às baterias de aquecimento, radiadores e depósito de água quente a água proveniente dos dispositivos de produção de água quente (caldeiras) e de fazer chegar às baterias de arrefecimento a água proveniente dos dispositivos de produção de água fria (*chillers*). Nesta instalação faz-se uso de bombas de circulação de volume constante da marca *Grundfos*, sendo que os modelos variam de bomba para bomba.

De forma a estudar apenas a parte dos sistemas que alimentam as zonas em estudo, para o caso deste trabalho, procedeu-se a uma simplificação do sistema de água quente através da eliminação dos radiadores e do depósito de água quente, levando à consequente simplificação no caudal total do circuito.

Os esquemas de princípio dos sistemas em análise encontram-se no anexo B. No anexo C encontram-se fotografias dos equipamentos instalados no DEM e considerados neste trabalho.

---

## 4. MODELAÇÃO

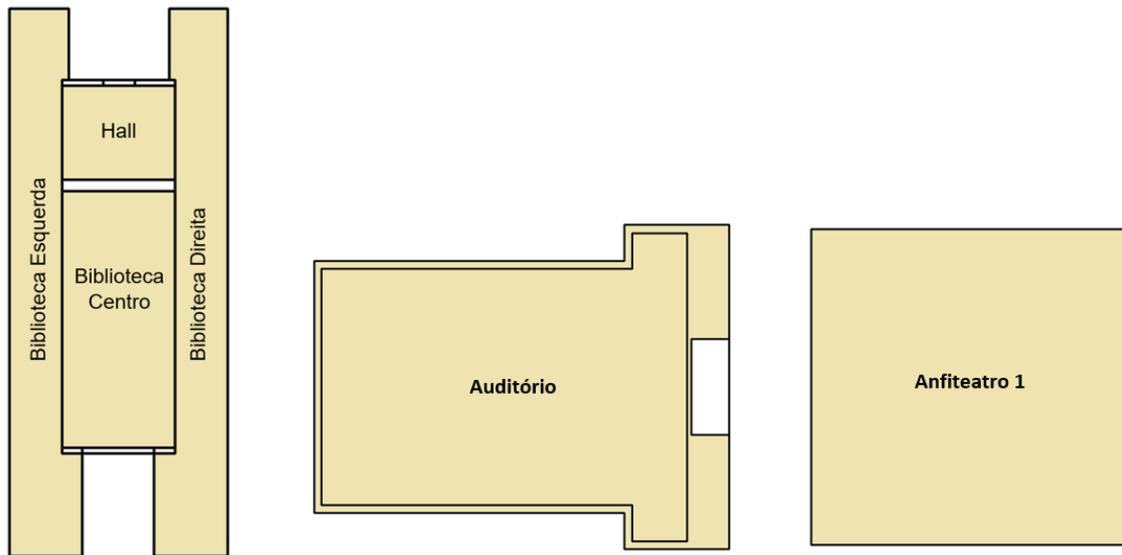
No presente capítulo é descrita a conceção e modelação do caso de estudo: é apresentado o modelo de simulação do edifício e dos seus sistemas, indicando-se os equipamentos e componentes a modelar e a forma de implementação destes no programa de simulação. É ainda descrita a campanha de simulações dinâmicas, as suas simplificações e suposições, bem como limitações encontradas.

### 4.1. Modelação do Edifício

Como foi referido na secção 2.2, o programa utilizado para modelar geometricamente o edifício foi o *SketchUp*, com recurso à extensão *Euclid*. No entanto, embora tivesse sido possível modelar no *SketchUp* uma réplica do edifício de forma realista, devido a algumas limitações do *EnergyPlus* e de forma a simplificar ao máximo os *inputs* utilizados por este para as simulações dinâmicas do edifício, procedeu-se a algumas simplificações geométricas nas plantas do edifício:

- A biblioteca é o edifício considerado na simulação com mais subzonas, sendo que algumas delas quase não são utilizadas. Neste trabalho, decidiu-se reduzir a biblioteca para um total de 4 zonas principais através da junção de várias subzonas, conservando assim a sua área total. A configuração das várias zonas resulta como se ilustra na Figura 4.1. A biblioteca ficou assim com uma área total de 1016 m<sup>2</sup> e um volume de 4111 m<sup>3</sup>.
- No Auditório não foi necessário proceder a grandes simplificações, tendo este ficado como ilustrado na Figura 4.1, com uma área total de 222 m<sup>2</sup> e um volume de 704 m<sup>3</sup>.
- O *EnergyPlus* não admite superfícies curvas, logo a forma cilíndrica do Anfiteatro 1 teve de sofrer algumas transformações. Nesse sentido, gerou-se uma zona de formato

paralelepédico com o volume equivalente ao espaço real, como ilustrado na Figura 4.1. O Anfiteatro 1 ficou com uma área de 81 m<sup>2</sup> e um volume de 370 m<sup>3</sup>.



**Figura 4.1 - Ilustração simplificada das zonas a simular.**

A modelação em *SketchUp* com todas as zonas contíguas às zonas climatizadas apresenta-se na Figura 4.2. Todavia, durante o processo de simulação, de forma a simplificar o cálculo numérico e para não sobrecarregar o programa, as zonas que não têm influência direta nos espaços a climatizar foram substituídas por simples elementos de sombreamento como verificado na Figura 4.3. Os estores laminados presentes nos espaços e utilizados como elementos de sombreamento de janelas não foram modelados nem utilizados na simulação.

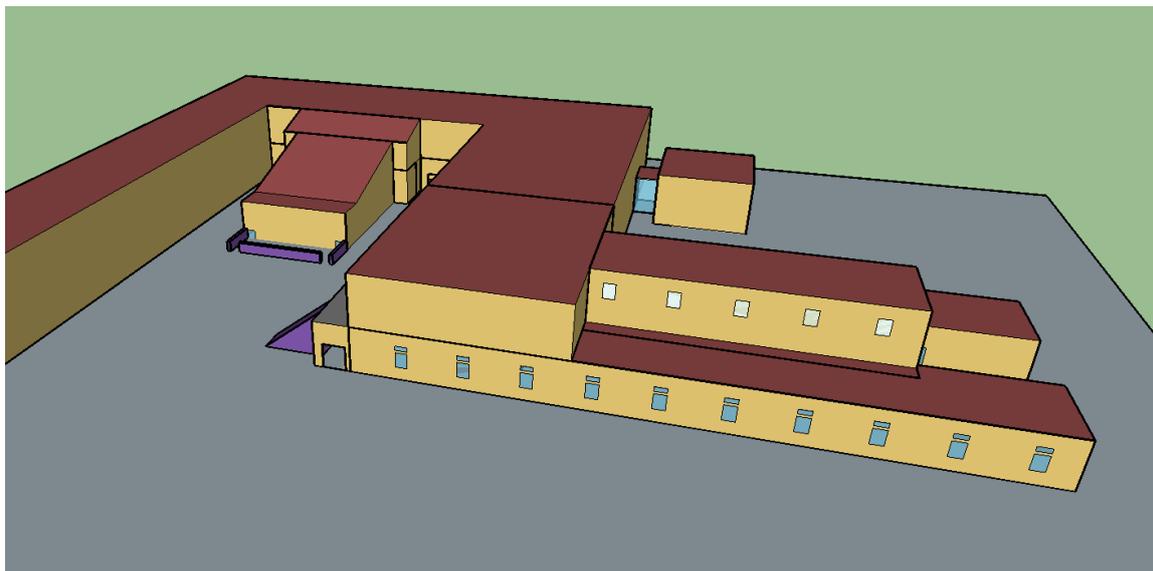


Figura 4.2 - Esquema de modelação geométrica do DEM em *SketchUp*.

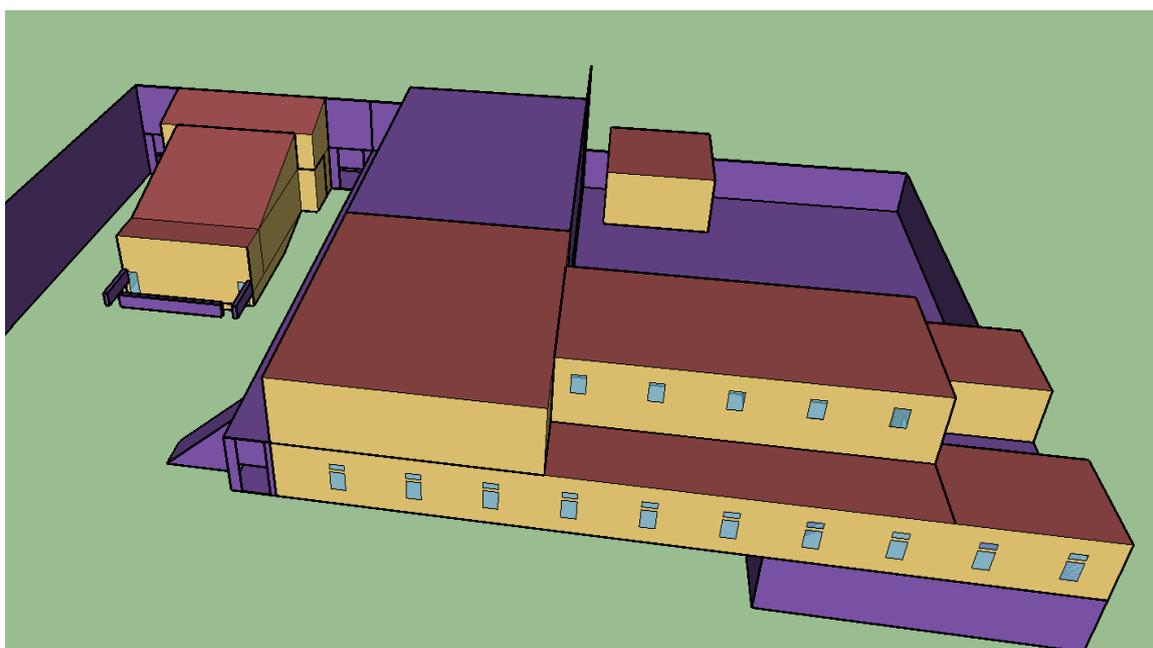


Figura 4.3 - Esquema de modelação geométrica do DEM em *SketchUp* utilizando sombreamentos.

As soluções construtivas foram implementadas diretamente no ficheiro IDF, de acordo com o que é apresentado na secção 3.2, e depois aplicadas às superfícies de cada zona através do *SketchUp*. Os perfis de ocupação, equipamentos elétricos, iluminação e infiltrações foram modelados no ficheiro IDF de acordo com as características mencionadas na secção 3.3.

## 4.2. Modelação dos sistemas de AVAC

O DEM tem um conjunto de soluções de climatização em funcionamento, pelo que a modelação foi feita de acordo com os sistemas existentes. Assim, e como é possível inferir pela breve explicação na secção 3.4, os principais equipamentos de AVAC a modelar são os *chillers*, as caldeiras, as UTAs, as bombas circuladoras e os circuitos hidráulicos.

Após a análise de alguns exemplos de base do *EnergyPlus* e análise do manual do programa [*EnergyPlus-Input Output Reference* (Berkeley Lab, 2017d)], foi possível determinar os objetos a utilizar, bem como as interações entre estes. Como mencionado anteriormente, neste trabalho fez-se uso de duas estratégias de modelação distintas no que se refere aos sistemas de AVAC. Essas estratégias são expostas de seguida, com a descrição dos objetos *EnergyPlus* utilizados, a sua definição e as suas interdependências.

### 4.2.1. Modelação por *Template*

A climatização dos espaços é efetuada com recurso às UTAs. Neste caso, as UTAs instaladas são de volume de ar constante, para os quais se definiu os seguintes dois objetos *template*:

- *HVACTemplate:System:ConstantVolume* – unidade de climatização que define cada UTA de uma forma geral, independentemente das zonas que alimenta. Assim, várias zonas podem estar associadas a uma mesma UTA. Define, simultaneamente, as condições e perfis de funcionamento dos vários constituintes das UTAs (*e.g.*, ventilador, baterias), caudais e temperaturas de *setpoint*.
- *HVACTemplate:Zone:ConstantVolume* – unidade terminal (fictícia) que define a insuflação de ar numa dada zona. Este objeto está associado a uma zona, sendo alimentado por um objeto *HVACTemplate:System:ConstantVolume*.

Logo, os objetos *HVACTemplate:Zone:ConstantVolume* estão diretamente associados às UTAs, definidas por objetos *HVACTemplate:System:ConstantVolume*, e às zonas a climatizar. Além disso, a cada zona está associado um objeto termostato (*HVACTemplate:Thermostat*) onde é definida a informação de temperatura de *setpoint*.

---

As baterias das UTAs são alimentadas através de circuitos de água fria e quente, para os quais são utilizados os seguintes objetos *template*, respetivamente: *HVACTemplate:Plant:ChilledWaterLoop* e *HVACTemplate:Plant:HotWaterLoop*. Estes objetos permitem alimentar todos os objetos *HVACTemplate* que necessitam de água fria e/ou quente, sendo apenas necessário especificar o tipo de bomba, o seu horário de funcionamento e características, a queda de pressão no circuito, os rendimentos e as temperaturas da água.

Para a modelação dos *chillers* e das caldeiras foram utilizados os objetos *HVACTemplate:Plant:Chiller* e *HVACTemplate:Plant:Boiler*, respetivamente. A definição destes não depende de mais objetos, sendo apenas necessário especificar as suas características, tais como a potência, temperaturas, limites de funcionamento e eficiências.

#### 4.2.2. Modelação detalhada

Após análise ao sistema real (Anexo B) e à metodologia de definição de circuitos hidráulicos detalhados no *EnergyPlus*, procederam-se a algumas simplificações. No sistema instalado, tem-se um circuito com uma bomba à saída dos equipamentos de produção, no *Supply Side*, e uma bomba à entrada de cada UTA, no *Demand Side*. No entanto, o *EnergyPlus*, apenas permite a colocação de uma bomba de circulação em cada circuito. Para tal, foi criado um circuito secundário que engloba todas as UTAs, no qual se considera uma bomba de circulação equivalente às bombas de cada UTA. Para fazer a ligação entre o circuito de água do circuito primário e o secundário foi utilizado um permutador de calor ideal de forma a não haver perdas na transição de um circuito para o outro. Consequentemente, no circuito primário, os equipamentos de produção (caldeiras e *chillers*) encontram-se no *Supply Side* e o permutador de calor no *Demand Side*, havendo ainda uma bomba de água (Bomba primária) à saída dos equipamentos de produção. No circuito secundário, o permutador de calor realiza o papel de equipamento de produção no *Supply Side* e as UTAs encontram-se no *Demand Side*, havendo uma bomba à saída do permutador (Bomba secundária) – equivalente ao somatório das três bombas individuais de cada UTA. O circuito de água considerado encontra-se representado na Figura 4.4. É utilizada a mesma lógica para o

circuito de água quente e fria. Nas figuras, os *Branches* estão representados por cada segmento de reta, os *Mixers* a azul e os *Splitters* a laranja.

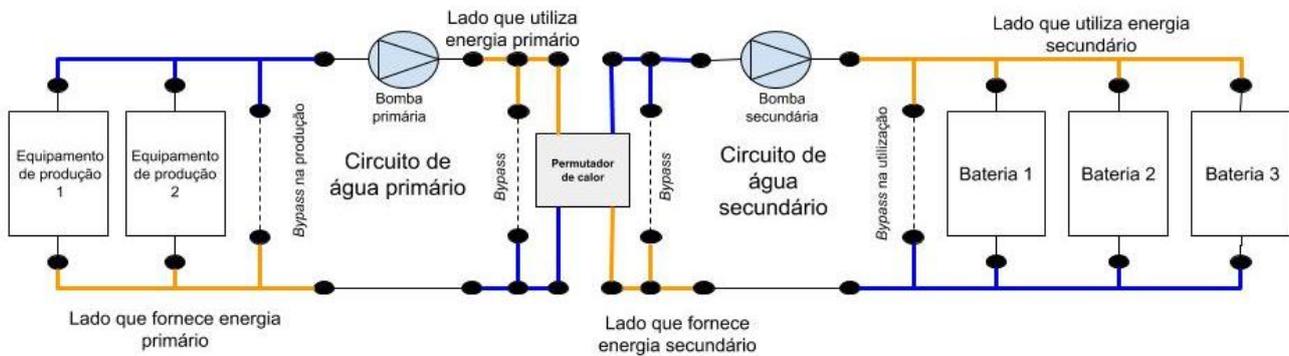


Figura 4.4 - Esquema do circuito de água considerado.

De seguida são indicados os objetos principais do *EnergyPlus* selecionados para a simulação. É de ter em atenção que para cada equipamento foi necessário indicar os respetivos nodos de entrada e saída, de água e/ou de ar, e tiveram de ser posteriormente organizados, seguindo a lógica do esquema da Figura 4.4, em listagens de equipamentos por ordem de ramo de entrada para ramo de saída.

Inicialmente, foi necessário criar termostatos para cada uma das zonas, utilizando-se o objeto *Zone:Control:Thermostat*. Este objeto permite um maior número de opções de controlo da temperatura para cada zona em relação à versão *template*, sempre recorrente de perfis de funcionamento e de temperatura. Neste trabalho, foi utilizado um termostato de *setpoint* duplo (*ThermostatSetpoint:DualSetpoint*) para definir as temperaturas pretendidas nas zonas, em aquecimento e em arrefecimento.

No que respeita aos equipamentos produtores, utilizou-se o objeto *Boiler:HotWater* para definir as caldeiras, onde se parametrizam as temperaturas, a potência e o rendimento e se definem os nodos de entrada e saída. Para o arrefecimento da água utilizou-se o objeto *Chiller:Electric:EIR* para definir os *chillers*, onde se parametrizam as temperaturas, potência e *COP* e se definem os nodos de entrada e saída. Relativamente à circulação da água nos circuitos, utilizou-se o objeto *Pump:ConstantSpeed* para definir as bombas de circulação de caudal constante, onde se parametriza caudais e se pode definir os horários de

---

funcionamento. E para simular a ligação entre os circuitos primários e secundários foram definidos permutadores de calor ideais, utilizando o objeto *HeatExchanger:FluidToFluid*. A utilização de um permutador possibilita a definição de dois circuitos (primário e secundário) em cada sistema, permitindo assim colocar uma bomba de circulação no lado da produção e outra no lado das UTAs (já que, no *EnergyPlus*, cada circuito apenas admite uma bomba de circulação).

Para definir os circuitos hidráulicos fez-se uso do objeto *Plant:Loop*. Para a definição deste, foi necessário listar todos os ramos, por ordem, do *Supply* e *Demand Side* do lado primário e do lado secundário, e listar todos os conetores de acordo com a Figura 4.4, para os casos de aquecimento e de arrefecimento. Estes circuitos vão ser ligados aos circuitos do ar através das baterias de aquecimento e arrefecimento.

Para a modelação de cada circuito de ar foi utilizado o objeto *AirLoopHVAC*, que engloba todos os equipamentos respeitantes ao lado aeráulicos dos sistemas. O objeto utilizado para definir a insuflação em cada zona foi o *AirTerminal:SingleDuct:Uncontrolled*. Este objeto simula uma unidade terminal de insuflação com volume de ar constante, possuindo apenas uma conduta por onde se faz a insuflação de ar quente e ar frio na zona. A unidade terminal opera de acordo com os caudais impostos pelo objeto *Fan:ConstantVolume*, utilizado para definir os ventiladores das UTAs, cuja temperatura do ar que o atravessa depende das temperaturas resultantes nos objetos *Coil:Cooling:Water* e *Coil:Heating:Water*, *i.e.*, os objetos que definem as baterias de arrefecimento e de aquecimento das UTAs, respetivamente. Além do ventilador e das baterias, cada UTA é também constituída por uma caixa misturadora de ar novo e recirculado, definida pelo objeto *OutdoorAir:Mixer*. Na Figura 4.5 apresenta-se de forma esquemática o circuito do ar (*AirLoopHVAC*) com objetos definidos para a UTA da biblioteca. De notar que os objetos que definem as baterias têm nodos para o circuito de ar e para o circuito de água.

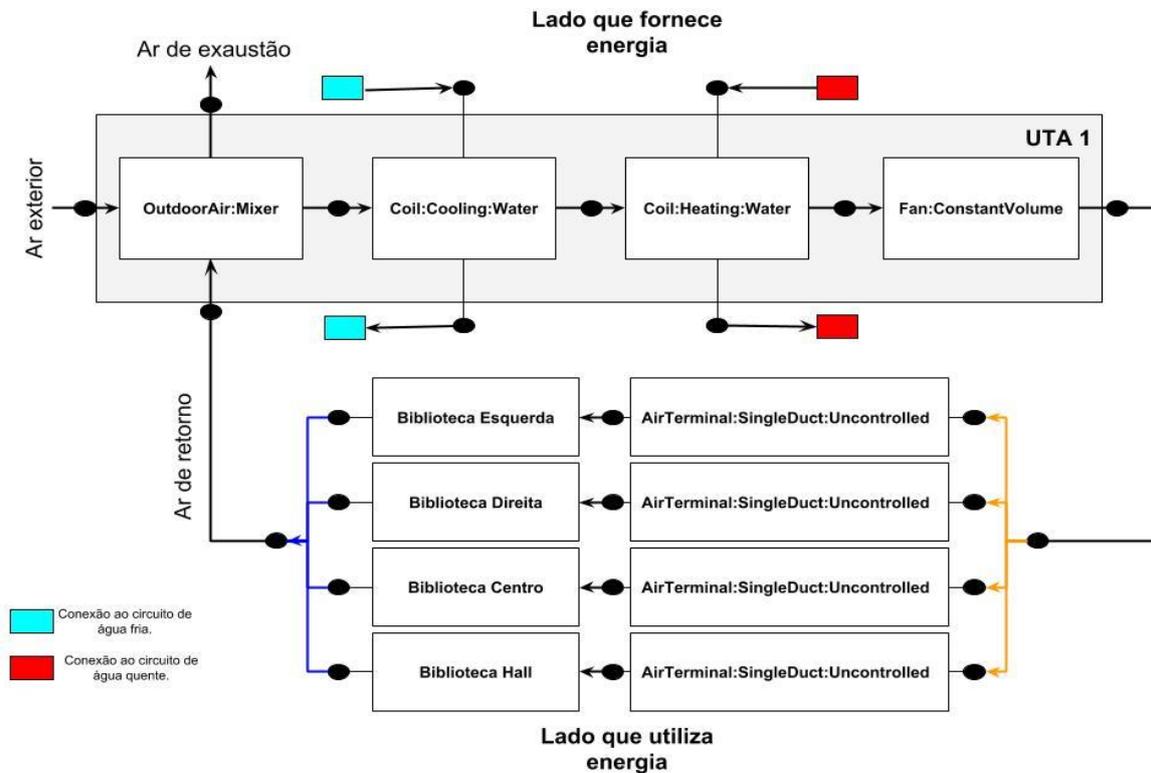


Figura 4.5 - Esquema do circuito do ar considerado para a UTA da biblioteca.

### 4.2.3. Parametrização dos Equipamentos

Foi considerado que os equipamentos estão disponíveis para operar durante todo o ano, exceto no mês de agosto e nos fins de semana. Os equipamentos começam a funcionar às 8h30 de cada dia e desligam às 20h00. Em todas as zonas considerou-se que os termóstatos funcionam para temperaturas de ar entre 20 °C e os 25 °C. Para a modelação por *template* considerou-se que o controlador do funcionamento das UTAs em arrefecimento é feito de acordo com a zona que estiver mais quente, ou seja, as UTAs trabalham conforme as zonas com maiores necessidades de arrefecimento, já para aquecimento a versão 8.8 do *EnergyPlus*, utilizada na simulação, através do objeto *HVACTemplate:System:ConstantVolume* não nos é permitido que o controlo seja feito de acordo com a zona com maior necessidade, logo no caso da UTA da biblioteca foi considerado que esta funcionaria de acordo com a biblioteca hall. Para a modelação detalhada através dos objetos *SetpointManager:Warmest* e *SetpointManager:Coldest*

conseguimos colocar as UTAs a funcionar de acordo com as zonas que tenham maiores necessidades.

A parametrização dos equipamentos foi feita tendo em conta os manuais dos equipamentos do sistema instalado no DEM. Os equipamentos de produção de água quente e fria têm as suas características necessárias à modelação indicadas na Tabela 4.1. A eficiência considerada para todas as bombas foi de 90% e, como já foi mencionado, considerou-se uma bomba com um caudal equivalente às bombas das várias UTAs. Os parâmetros de dimensionamento estão indicados na Tabela 4.2. Os parâmetros de dimensionamento das baterias e dos caudais das UTAs estão indicados na Tabela 4.3 e Tabela 4.4, respetivamente e foram retirados das fichas técnicas da instalação destas. Os ventiladores de circulação de ar têm os caudais de insuflação iguais aos indicados para as UTAs.

**Tabela 4.1 - Parametrização dos equipamentos de produção de água aquecida e refrigerada.**

Equipamento	Tipo de combustível	Potência (kW)	Eficiência térmica	Temperatura de saída da água (°C)	Temperatura máxima (°C)
Caldeira 1	Gás Natural	348,8	0,886	81	100
Caldeira 2	Gás Natural	348,8	0,886	81	100
	Tipo de <i>Chiller</i>	Potência (kW)	COP	Temperatura de saída da água (°C)	Temperatura de entrada no condensador (°C)
<i>Chiller 1</i>	Elétrico de parafuso	101	2,698	7	35
<i>Chiller 2</i>	Elétrico de parafuso	101	2,698	7	35

**Tabela 4.2 - Parametrização das bombas de circulação.**

<b>Circuito de água quente</b>				
<b>Bomba</b>	<b>Modelo</b>	<b>Caudal de água (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Somatório</b>	<b>Eficiência (%)</b>
<b>Caldeiras</b>	LMD 100-200 (dupla)	7,9	7,9	90
<b>UTA 1</b>	UPK 32-60	3,3		
<b>UTA 2</b>	UPK 32-60	3	7,9	90
<b>UTA 3</b>	LM 40-125	1,6		
<b>Circuito de água fria</b>				
<b>Bomba</b>	<b>Modelo</b>	<b>Caudal de água (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Somatório</b>	<b>Eficiência (%)</b>
<b>Chillers</b>	UPKD 65-120 (dupla)	17,6	17,6	90
<b>UTA 1</b>	UPK 40-60	7,2		
<b>UTA 2</b>	UPK 40-60	6,5	17,6	90
<b>UTA 3</b>	UPK 32-60	3,9		

**Tabela 4.3 - Parametrização das baterias das UTAs.**

<b>Equipamento</b>	<b>Bateria</b>	<b>Entrada de ar</b>		<b>Saída de ar</b>	
		<b>Temperatura (°C)</b>	<b>w [g/kg<sub>ar seco</sub>]</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>w [g/kg<sub>ar seco</sub>]</b>
<b>UTA 1</b>	Aquecimento	15,1	-	26,7	-
	Arrefecimento	26,6	9,616	12,1	8,824
<b>UTA 2</b>	Aquecimento	12	-	23,6	-
	Arrefecimento	28,4	9,864	14,1	9,125
<b>UTA 3</b>	Aquecimento	11,2	-	21,9	-
	Arrefecimento	28,8	9,872	14,6	9,157

**Tabela 4.4 - Parametrização dos caudais das UTAs.**

<b>Equipamento</b>	<b>Modelo</b>	<b>Insuflação/Ventilador</b>	<b>Caudais (m<sup>3</sup>/h)</b>	
			<b>Retorno</b>	<b>Ar Novo</b>
<b>UTA 1</b>	KG 160	9880*	7490	2390
<b>UTA 2</b>	KG 160	7970	4838	3132
<b>UTA 3</b>	KG 100	5400	3000	2400

\*biblioteca centro – 5800 m<sup>3</sup>/h; biblioteca hall – 460 m<sup>3</sup>/h; biblioteca direita – 1655 m<sup>3</sup>/h; biblioteca esquerda – 1965 m<sup>3</sup>/h

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados tanto para os sistemas *template* como detalhados. Faz-se uma análise comparativa para temperaturas, cargas térmicas e resposta dos sistemas. Tenta-se também promover melhorias aos sistemas instalados com consequentes alterações aos parâmetros de simulação.

### 5.1. Análise aos resultados

#### 5.1.1. Análise de temperatura nas zonas climatizadas

Inicialmente, avaliou-se as variações de temperatura das diferentes zonas em relação à temperatura exterior. Assim, foi elaborada a Figura 5.1 com base nos resultados da modelação detalhada. Pela análise desta figura, conseguimos perceber que a temperatura interior das zonas varia maioritariamente entre os valores de *setpoint* (entre 20 °C e 25 °C). Como seria de esperar, a temperatura interior nos períodos de ocupação sofre uma menor variação do que a temperatura exterior, o que se deve ao funcionamento dos sistemas de AVAC.

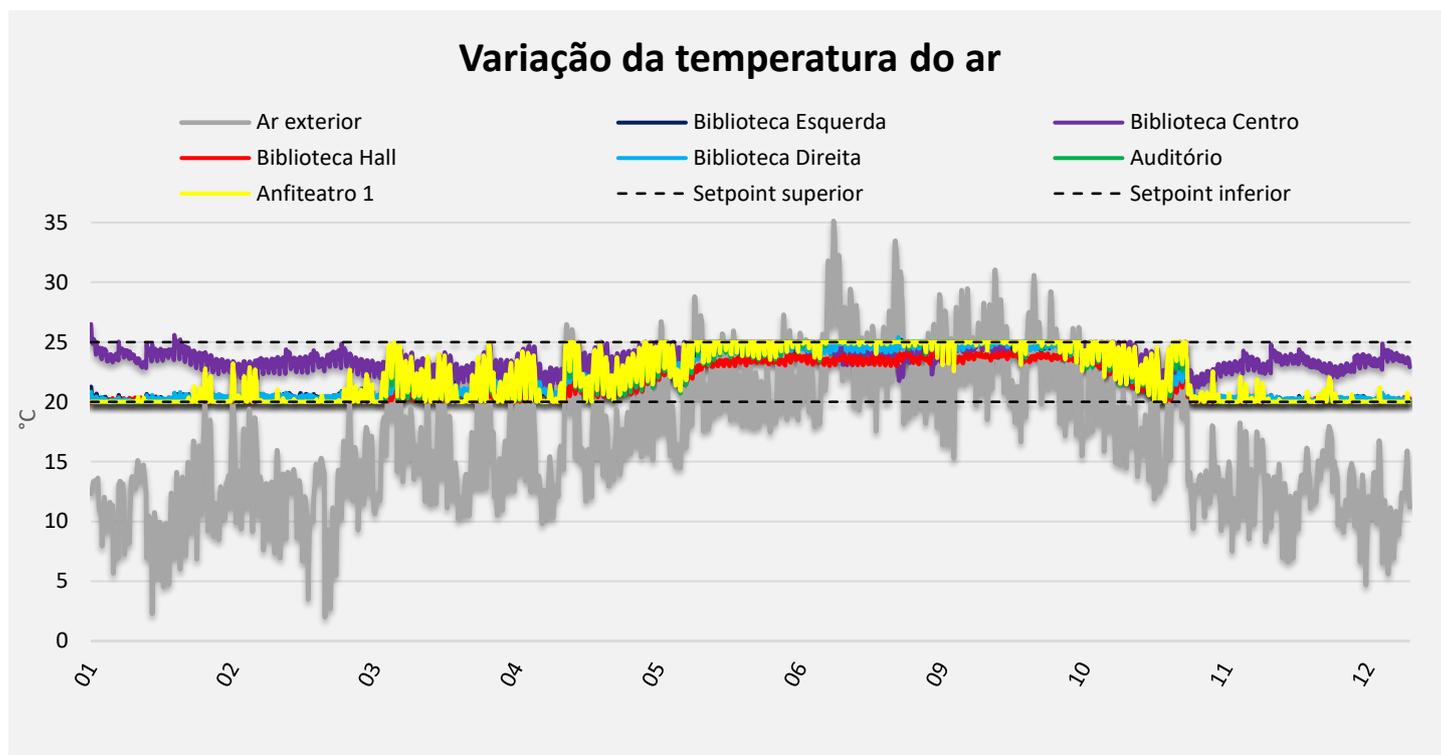


Figura 5.1 - Variação da temperatura do ar nas várias zonas ao longo do ano.

De forma a comparar a performance dos sistemas instalados em relação à situação ideal, utilizou-se o objeto *HVACTemplate:Zone:IdealLoadsAirSystem*. Este objeto representa um sistema de climatização ideal que fornece ar às zonas, atendendo a todos os requisitos de carga instantaneamente, sem consumo de energia e com capacidade ilimitada.

Para avaliar a efetividade dos sistemas e da modelação criada pode-se avaliar o número de horas nas quais a temperatura do ar interior nas zonas não atingiu os setpoints definidos – 20 °C para o período de aquecimento e 25 °C para o período de arrefecimento, assumindo uma tolerância de 0,5 °C (19,5 °C – 25,5 °C). Verificou-se assim, que não existiam horas fora das temperaturas de setpoint consideradas para as épocas consideradas, no entanto, a biblioteca centro atingiu uma temperatura superior à desejada por duas vezes, no dia 2 e no dia 23 de janeiro (época de aquecimento), a origem dessas temperaturas é devido à elevada potência térmica fornecida a esta zona no início desses dias. O valor da potência térmica disponibilizada no dia 2 de janeiro, onde se atingiu a temperatura máxima, poderá ser vista na Figura 5.4 mais à frente. A Tabela 5.1 apresenta as temperaturas máximas e mínimas atingidas por cada zona durante os períodos de ocupação na simulação anual. Por sua vez, o

sistema ideal leva a que as temperaturas nas zonas durante os períodos de ocupação se encontrem sempre na gama definida pelos seus termóstatos, não se verificando assim qualquer instante em que as temperaturas estão fora dos setpoint definidos.

**Tabela 5.1 - Temperaturas máximas e mínimas do ar interior das diferentes zonas climatizadas.**

Técnica	Temperatura	Temperaturas máxima e mínimas atingidas durante a ocupação (°C)					
		Biblioteca Esquerda	Biblioteca Centro	Biblioteca Hall	Biblioteca Direita	Auditório	Anfiteatro 1
<i>Template</i>	Máxima	25	26,7	24,3	25,2	25	25
	Mínima	19,5	20,5	19,9	19,7	20	20
	Média	22,1	23,6	21,4	22,1	22,1	22,3
<i>Detalhado</i>	Máxima	25,2	26,5	24,3	25,4	25	25
	Mínima	20	20,5	19,8	20	20	20
	Média	22,1	23,7	21,4	22,1	22,1	22,3

Pela Tabela 5.1, notamos que embora ambas as técnicas de modelação não tenham obtido horas fora das temperaturas de setpoint as temperaturas máximas e mínimas obtidas foram ligeiramente diferentes. Importa também mencionar que as temperaturas máximas e mínimas para cada zona foram registadas no mesmo dia para ambas as estratégias de simulação.

### 5.1.2. Análise de potências exigidas aos equipamentos

A potência máxima exigida aos equipamentos de produção de água fria é cerca de 90 kW para o sistema detalhado e de 84 kW para o sistema *template*. Ambos os valores foram obtidos para o dia mais quente do ano em que o edifício está a ser utilizado (6 de julho). Este valor encontra-se abaixo da potência instalada de 101 kW por *chiller*, tornando-se então possível a supressão de um deles.

A potência máxima exigida às caldeiras de produção de água quente é cerca de 69 kW para o sistema detalhado e de 67 kW para o sistema *template*, *i.e.*, valores bastante afastados dos 348,8 kW instalados. Contudo, neste caso, não é possível falar na supressão de uma das caldeiras, pois a diferença registada deve-se muito possivelmente ao facto de neste trabalho não serem considerados os radiadores e o depósito de água quente na simulação, sendo que estes utilizam grande parte da potência disponível.

Seguidamente, faz-se uma comparação entre o sistema ideal e os sistemas modelados por *template* e de forma detalhada em relação às cargas de aquecimento e de arrefecimento para as diversas zonas. Os valores obtidos para o sistema ideal são efetivamente os valores exigidos pelas zonas nesta simulação, sendo assim possível determinar quais as necessidades de aquecimento e de arrefecimento ideais das diferentes zonas em análise, para os *setpoints* definidos.

De forma a comparar a resposta dos sistemas, considerou-se as semanas que registaram maiores necessidades térmicas ao longo do ano no horário de ocupação (09:00h – 20:00h). Para a época de aquecimento, a semana que registou mais necessidades foi a semana do dia 2 de janeiro. Para a época de arrefecimento, a semana que registou mais necessidades foi a do dia 24 de julho.

A Figura 5.2 e a Figura 5.3 mostram-nos a potência térmica de aquecimento e arrefecimento do sistema de insuflação de ar para os casos ideal (necessidades das zonas), detalhado e *template*, para as zonas da Biblioteca Esquerda e Direita, respetivamente. É possível verificar que, tanto na época de aquecimento como na de arrefecimento, os valores de potência térmica obtidos pelos métodos detalhado e *template* acompanham de uma forma razoável os valores de potência obtidos com o sistema ideal (necessidades das zonas).

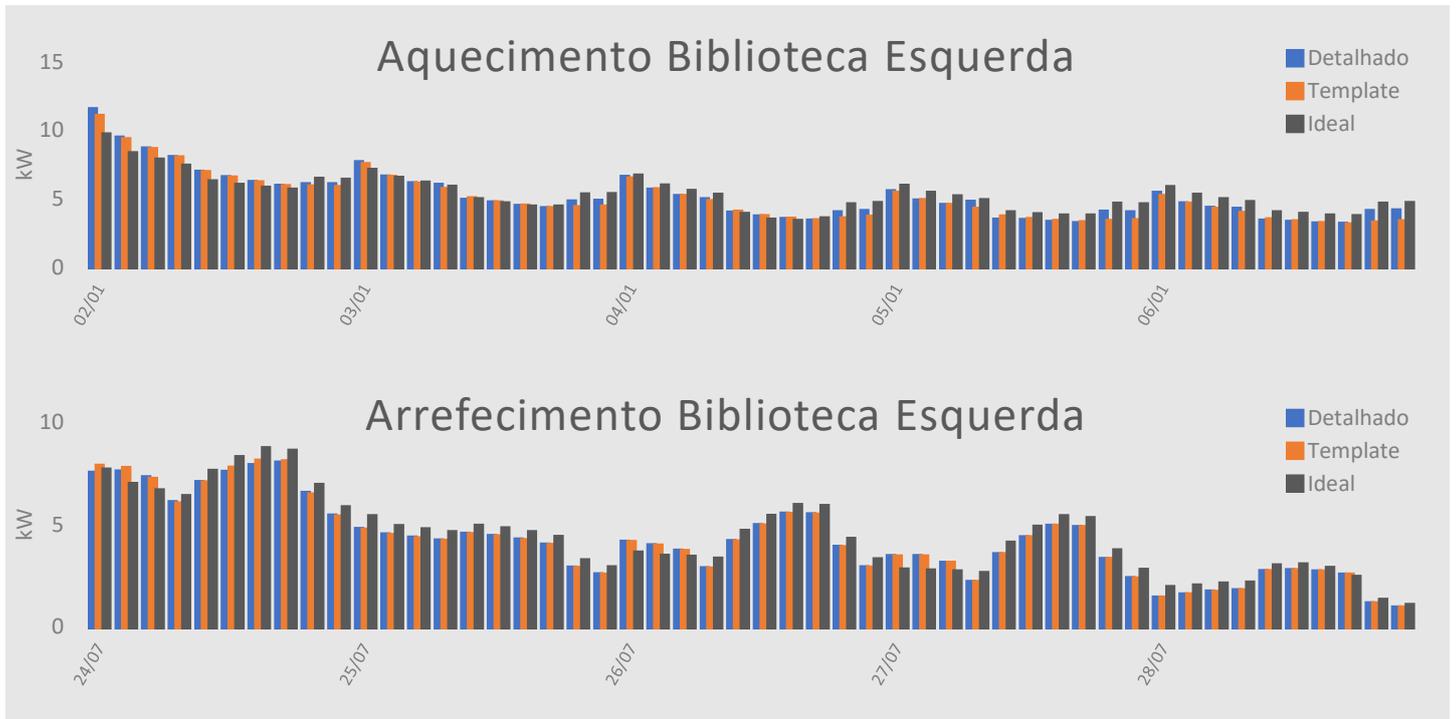


Figura 5.2 - Potência térmica em aquecimento e arrefecimento na biblioteca esquerda.

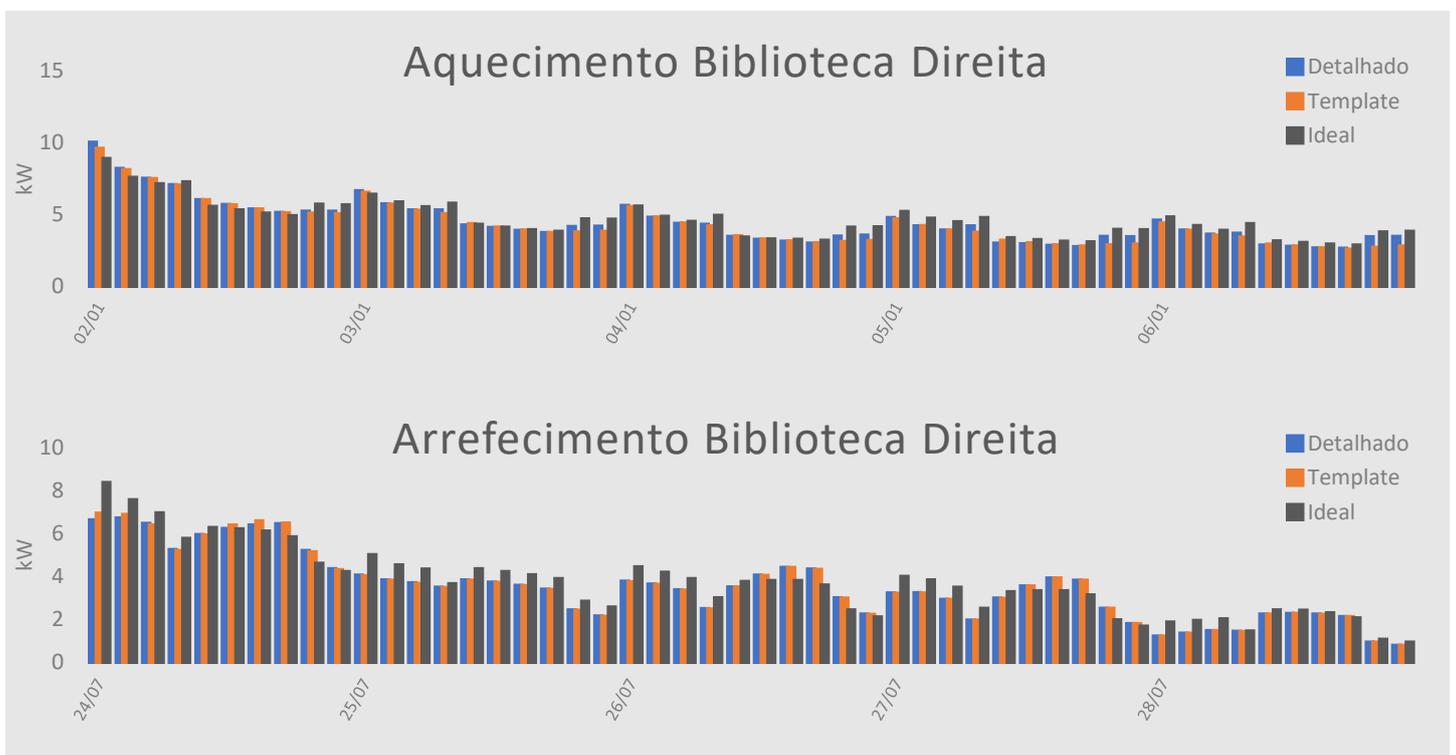


Figura 5.3 - Potência térmica em aquecimento e arrefecimento na biblioteca direita.

Para a Biblioteca Centro, na época de aquecimento, como podemos ver pela Figura 5.4, os valores de potência obtidos com os modelos são bastante superiores às necessidades da zona (valores de potência ideal). A disponibilização excessiva de potência despoletou uma temperatura máxima de 26,5 °C e 26,7 °C, como mencionado anteriormente. Já para a época de arrefecimento, os valores de potência dos modelos acompanham melhor o sistema ideal, no entanto ainda se verifica algum excesso de potência disponibilizada no início da semana, sendo que no final desta já se obtêm até valores inferiores ao sistema ideal.

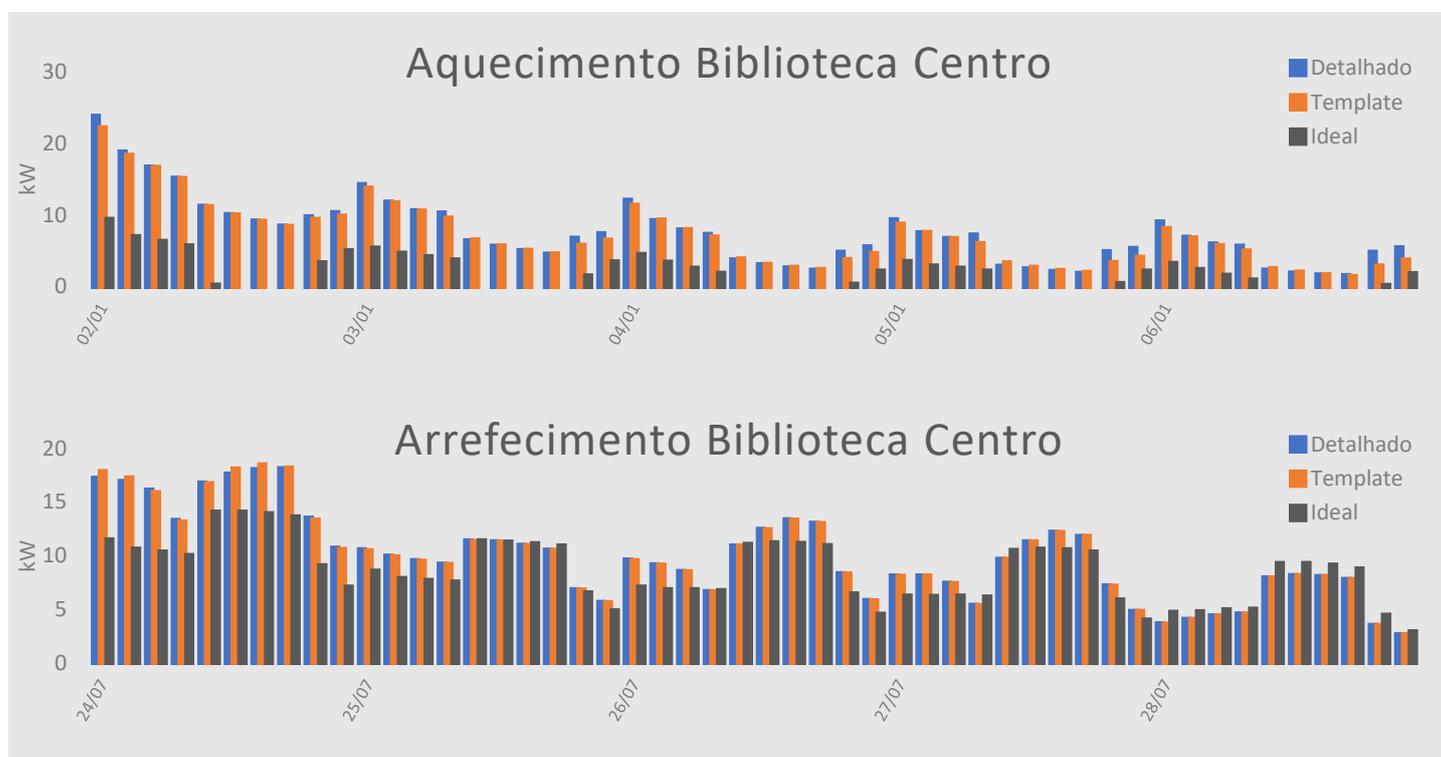
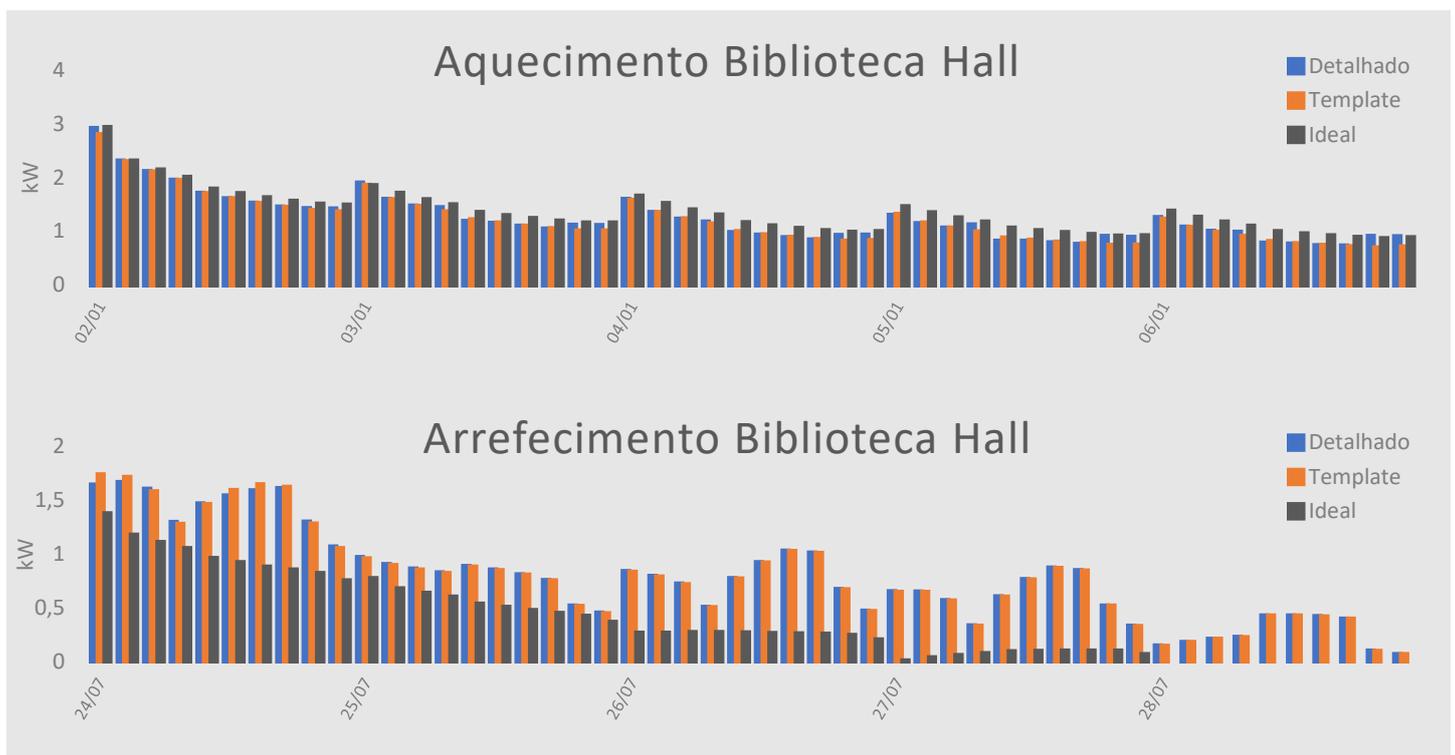


Figura 5.4 - Potência térmica em aquecimento e arrefecimento na biblioteca centro.

Para a biblioteca hall, através da análise da Figura 5.5, verifica-se que para aquecimento os modelos *template* e detalhado acompanharam de perto o sistema ideal. Para arrefecimento, verifica-se que durante toda a semana existe um excesso de potência disponibilizada. A disparidade entre os resultados dos sistemas detalhado e *template* e os do sistema ideal sugere que a estratégia de controlo para as diferentes zonas da biblioteca nesta simulação esteja errada. Ao se definir um único equipamento de caudal constante para as quatro zonas

da biblioteca, controlado apenas pelas condições de uma das zonas, poderá levar a que ocorram necessidades de arrefecimento em determinadas zonas e, simultaneamente, necessidades de aquecimento noutras, ou vice-versa, ou mesmo haver necessidades numas zonas e não noutras; estando assim a UTA a climatizar todas as zonas em função das necessidades de apenas uma delas, traduzindo-se no fornecimento de cargas de aquecimento ou arrefecimento diferentes das ideais (necessidades).



**Figura 5.5 - Potência térmica em aquecimento e arrefecimento na biblioteca hall.**

Para o auditório e o anfiteatro 1, segundo a Figura 5.6 e a Figura 5.7, verifica-se que o funcionamento dos sistemas simulados acompanha o do sistema ideal, seguindo sempre a tendência deste de perto. É importante também mencionar a pouca necessidade de aquecimento registada para estes dois espaços, tendo até os sistemas de arrefecimento funcionado durante quase todo o ano. Este fenómeno dá-se devido à grande taxa de ocupação e utilização destes espaços, promovendo assim elevadas cargas térmicas nestas zonas. As potências térmicas máximas obtidas para aquecimento de ambas as zonas foram inferiores a 2 kW. Além disso, verifica-se que o aquecimento apenas funciona durante algumas horas durante o ano nestes dois espaços: entre 78 h (detalhado) e 79 h (*template*) para o auditório

– em contraste com as 3h com o sistema ideal –, e 4 h (detalhado e *template*) para o anfiteatro 1 – próximo das 0 h do sistema ideal. Devido a não haver aquecimento na semana do dia 2 de janeiro no anfiteatro 1, utilizou-se a semana de 1 de maio na Figura 5.7.

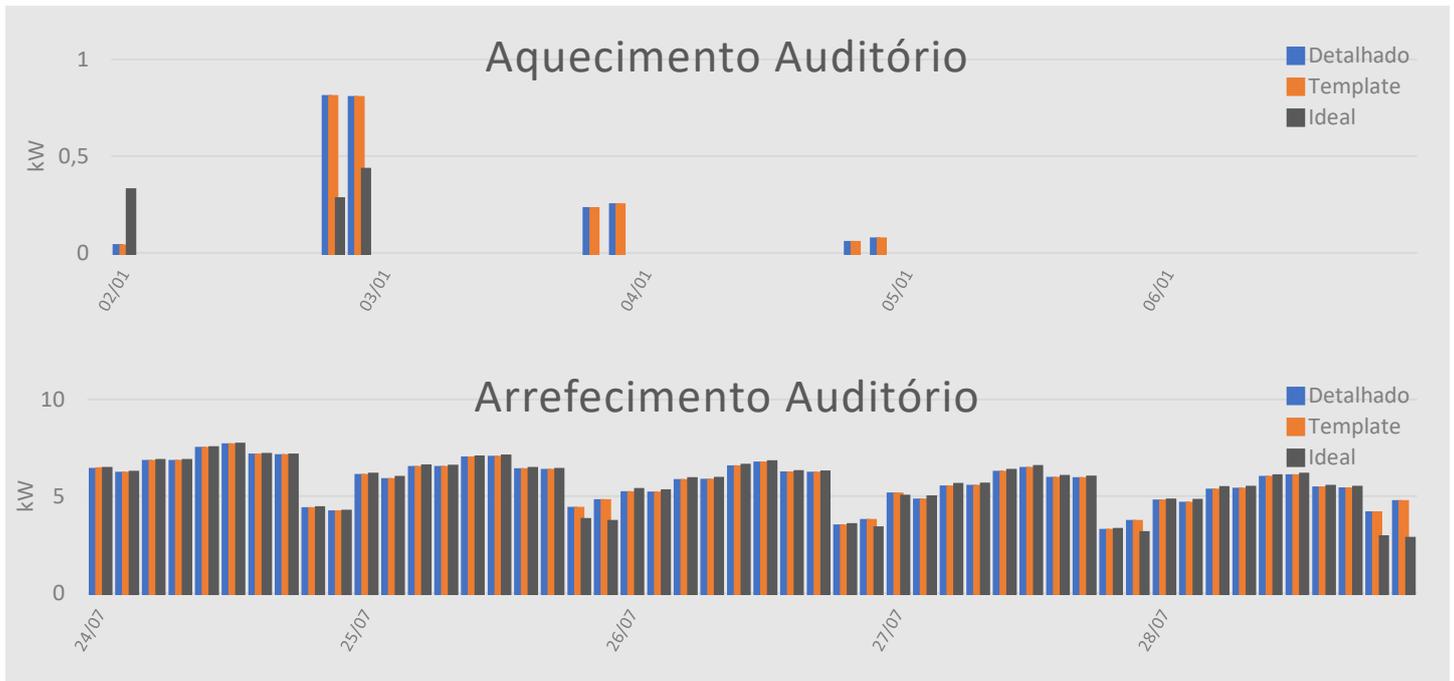


Figura 5.6 - Potência térmica em aquecimento e arrefecimento no auditório.

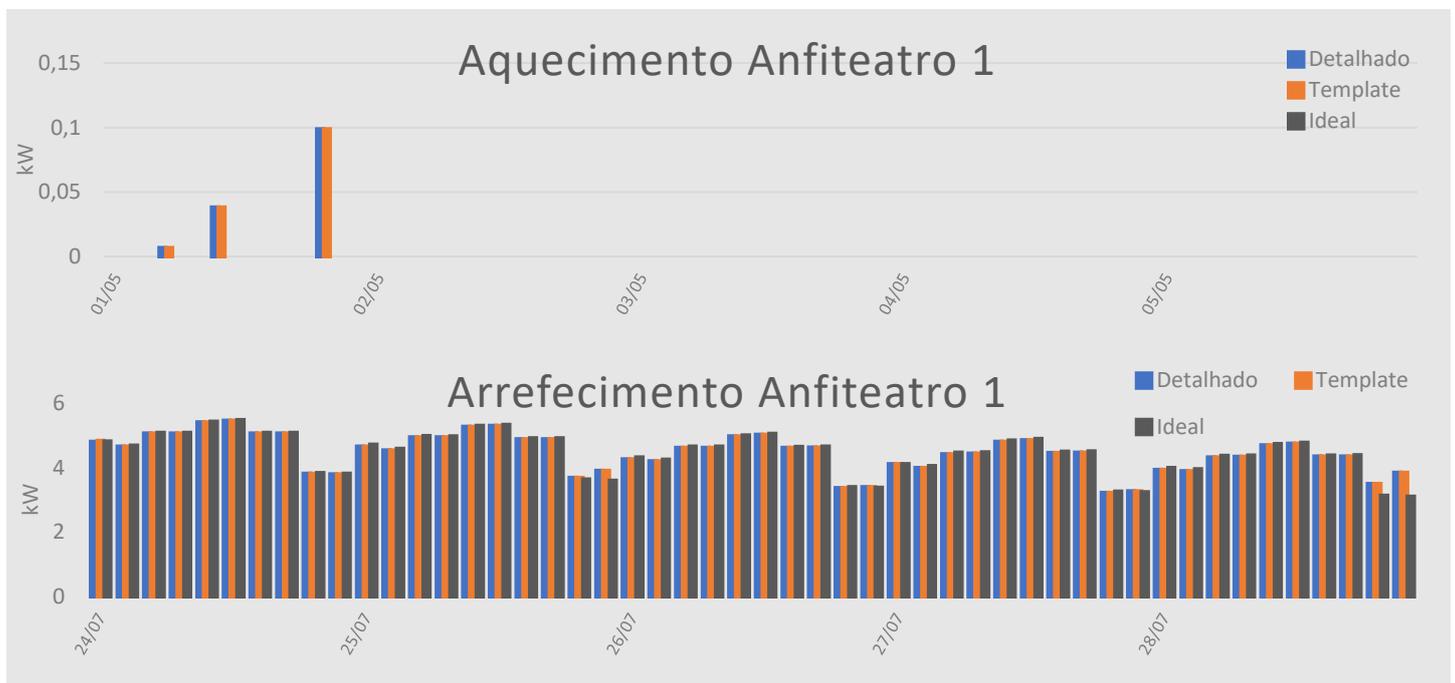


Figura 5.7 - Potência térmica em aquecimento e arrefecimento no anfiteatro 1.

As diferenças registadas para as zonas da biblioteca sugerem uma necessidade de alteração da estratégia de climatização na simulação, possivelmente para uma unidade com caudal variável.

Em relação ao auditório e anfiteatro 1, com base nos resultados obtidos, devido à grande ocupação e utilização dos espaços, poderá ser formulado o argumento de não ser necessário sistemas de aquecimento nestas zonas (valores inferiores a 0,8 kW).

### 5.1.3. Análise energética do sistema instalado

Em seguida apresentam-se os resultados obtidos relativamente a consumos de energia por parte dos sistemas instalados e faz-se a comparação da energia fornecida aos espaços com as suas necessidades energéticas (energia fornecida pelo sistema ideal).

Na Tabela 5.2 apresentam-se os consumos totais anuais do edifício no final da simulação e os valores da energia térmica sensível fornecida e retirada às zonas.

Tabela 5.2 - Consumos totais anuais das simulações.

	Detalhado			Template			Ideal		
	Eletricidade [GJ]	Gás Natural [GJ]	Energia térmica [GJ]	Eletricidade [GJ]	Gás Natural [GJ]	Energia térmica [GJ]	Eletricidade [GJ]	District Energy	Energia térmica [GJ]
<b>Aquecimento</b>	-	109,94	47,76		109,41	47,27	-	32,91	32,91
<b>Arrefecimento</b>	40,23	-	104,23	39,27	-	104,24	-	101,54	65,55
<b>Iluminação</b>	16,91	-	-	16,91	-	-	16,91	-	-
<b>Equipamentos elétricos</b>	36,72	-	-	36,72	-	-	36,72	-	-
<b>Ventiladores</b>	40,77	-	-	40,77	-	-	-	-	-
<b>Bombas de circulação</b>	12,95	-	-	10,63	-	-	-	-	-
<b>Totais</b>	147,58	109,94	151,99	144,31	109,41	151,51	53,63	134,45	98,46

Pela análise da tabela (com foco no modelo detalhado), verifica-se que os maiores consumos de energia para climatização se referem ao gás natural para aquecimento (109.94 GJ). No entanto, só cerca de 43% dessa energia é convertida em energia térmica sensível (47.76 GJ). Para o arrefecimento, verificamos que a energia consumida pelos equipamentos de produção (40.23 GJ) é convertida em cerca de 259 % do seu valor em energia térmica sensível (104.23 GJ). Embora os *chillers* apresentem um COP de 2,698, pelo que a energia útil devesse ser de 108,5 GJ, existem perdas nos outros equipamentos do sistema que podem levar a esta pequena diferença.

Entre as duas técnicas de modelação, verifica-se que as principais diferenças estão na energia consumida com as bombas de circulação. A diferença notada deve-se ao facto de no *template* não se definir as bombas em detalhe, nem se colocar bombas no *demand side*, sendo estas configuradas automaticamente pelo programa. Em relação ao sistema ideal, visto que os sistemas são ideais não gastam energia com os equipamentos de climatização, o consumo que é feito de energia para aquecimento e arrefecimento (*district heating* e *district cooling*) é exatamente igual às necessidades energéticas das zonas que são alimentadas pelo sistema (COP=1).

A energia térmica sensível fornecida (aquecimento) ou retirada (arrefecimento) dos espaços é muito semelhante para os modelos detalhado e *template*; no entanto, ambos apresentam valores distantes dos obtidos num sistema ideal (necessidades das zonas). A razão para esta

diferença de valores pode, mais uma vez, dever-se ao facto de a UTA da biblioteca estar a ser controlada apenas pelas condições das zonas com maiores necessidades, enquanto o sistema ideal tem uma resposta de acordo com as necessidades de cada zona individualmente.

De uma forma geral, a diferença dos resultados entre as duas técnicas de modelação não é substancial. Para uma abordagem inicial, com o sistema modelado por *template*, conseguimos resultados muito próximos da modelação detalhada com maior facilidade e com menor tempo empregue na definição dos objetos. Todavia, para instalações maiores e mais complexas, a diferença entre as duas técnicas poderá ser mais acentuada.

## 5.2. Possíveis alterações nos sistemas instalados

Com base nos consumos totais, podemos tentar formular várias possíveis alterações nos sistemas de AVAC em estudo. Nesta secção serão expostas estas alterações bem como os resultados obtidos. Os objetivos das alterações serão baixar o consumo total dos sistemas simulados.

Propõe-se baixar a potência instalada nos equipamentos de produção de água fria retirando o *chiller* 2, pois este aparenta não ser necessário. Esta alteração não promoveu qualquer alteração no número de horas fora do *setpoint* para as duas técnicas nem fez baixar os consumos de arrefecimento para o sistema *template*. Para o sistema detalhado, apenas alterou ligeiramente os consumos por parte dos equipamentos de arrefecimento, ficando pelos 39,51 GJ (redução de 1,79%) e não alterou as horas fora das temperaturas de *setpoint*. Esta alteração dos consumos ocorreu pois, embora se tenha definido prioridade nos *chillers*, estes funcionavam em simultâneo quando as necessidades eram maiores.

Fazendo-se uma alteração das potências dos equipamentos de produção de água fria para 95 kW, os consumos de arrefecimento reduzem para 37,47 GJ para o *template* e para 37,85 GJ no caso da modelação detalhada, isto é, sofrem uma redução de 4,6% e de 5,9% respetivamente.

Outra melhoria proposta seria a adição de um economizador e de um recuperador de calor nas UTAs. A Tabela 5.3 mostra-nos a variação dos consumos aquando da consideração destes dispositivos. Um economizador avalia as condições do ar de retorno, tais como a temperatura e a entalpia, e compara-as com as condições do ar exterior: se as condições do ar de retorno forem melhores que as do ar exterior este limita o caudal de ar exterior, e se as condições do ar exterior forem melhores que as do ar de retorno o inverso acontece. Um economizador de temperatura fixa minimiza o caudal de ar exterior se a temperatura deste for fora dos limites aplicados, e um economizador de diferencial de temperatura limita o caudal de ar exterior quando este tiver uma temperatura acima do caudal de ar de retorno. A utilização de um economizador promove poupanças nas baterias e nas bombas de circulação, que não têm de trabalhar tanto para atingir as condições desejadas. Um recuperador de calor é essencialmente um permutador de calor de fluxos cruzados que retira energia térmica ao ar de exaustão proveniente das zonas e aproveita essa energia para pré-aquecer ou pré-arrefecer o ar de insuflação, antes deste entrar nas baterias. Para o recuperador de calor considerou-se uma eficiência padrão de 70% na recuperação de calor sensível e de 65% na recuperação de calor latente.

**Tabela 5.3 - Variação de consumos com a aplicação de economizadores e recuperadores de calor.**

Dispositivo	Tipo	Temperaturas		Consumos			
		Limite Superior [°C]	Limite Inferior [°C]	Eletricidade [GJ]	Diferença [%]	Gás natural [GJ]	Diferença [%]
Sem dispositivos	-	-	-	144,31	-	109,41	-
Economizador	Temperatura fixa	30	10	133,42	- 7,6	109,39	- 0,02
		27	10	131,48	- 8,9	109,39	- 0,02
		27	15	131,63	- 8,8	109,39	- 0,02
		25	15	130,94	- 9,3	109,39	- 0,02
	Diferencial	-	-	130,88	- 9,3	109,41	0
Recuperador	Sensível	-	-	150,75	4,5	109,16	- 0,2
	Entálpico	-	-	143,30	- 0,7	109,16	- 0,2
Ambos	Sensível	30	10	144,58	0,2	104,49	- 4,5
	Entálpico	30	10	143,85	-0,3	104,49	- 4,5

Através da análise da tabela, podemos verificar que a adição de economizadores nas UTAs pode ser bastante benéfica do ponto de vista energético, no entanto, a sua aplicação deverá ser cuidada. A limitação de caudal de ar exterior (ar novo) pode prejudicar a qualidade do ar interior. Desta forma, a solução de colocar um economizador com as temperaturas fixas de 30 °C e 10 °C parece a mais sensata, pois nesta situação só se limita o caudal de ar novo para situações de temperatura muito quente ou muito fria. O economizador de temperatura diferencial foi o que obteve melhores resultados, no entanto, como a temperatura interior está quase sempre mais próxima das condições de conforto do que a exterior, também se estaria a pôr em causa a qualidade do ar. A aplicação de recuperadores de calor nesta instalação não provou ter um efeito positivo muito significativo.

Para terminar, é importante mencionar que, tendo em conta as horas dentro das temperaturas de *setpoint* durante a ocupação o dimensionamento feito aos equipamentos instalados é adequado.

Uma melhor estratégia de climatização da biblioteca poderia levar a menores consumos por parte dos sistemas de climatização instalados através da diminuição dos desperdícios de potência térmica fornecida. Uma estratégia possível seria a utilização de uma UTA de caudal variável, desta forma seria possível ajustar o caudal para cada zona de acordo com as necessidades de cada uma destas.



## 6. CONCLUSÕES

A revisão bibliográfica realça a importância da simulação dinâmica para a avaliação do desempenho energético de edifícios e, com base nos resultados desta, identificar e promover possíveis alterações ou melhoramentos.

No âmbito do projeto Ren4EEnIEQ, o principal contributo deste trabalho foi a modelação e parametrização de sistemas de climatização de edifícios, de forma a serem aproveitados para a biblioteca presente na ferramenta *SAPTool*. A inclusão futura dos sistemas nesta ferramenta permitirá uma análise de viabilidade quando for considerada a sua implementação em edificações futuramente criadas. Para cumprir este objetivo, procedeu-se à simulação dinâmica do DEM através da modelação dos equipamentos instalados e utilizados para a climatização das áreas da biblioteca, auditório e do anfiteatro 1.

As principais conclusões retiradas, de acordo com os objetivos traçados para este trabalho, foram:

- O recurso ao programa *SketchUp* para modelação 3D do edifício, e consequente integração deste por parte do *EnergyPlus*, provou ser uma técnica bastante útil, aumentando a facilidade de definição do edifício. A sua interface gráfica permitiu uma avaliação visual passo a passo que não seria possível utilizando apenas o programa *EnergyPlus*. Também para a atribuição de soluções construtivas demonstrou ser uma ferramenta rápida, sendo que qualquer alteração podia ser convertida para o ficheiro IDF e rapidamente avaliada no programa;
- A utilização de objetos *template* demonstrou ser bastante eficaz, devido à pouca necessidade de informação e de tempo para modelação. Contudo, a utilização destes objetos limita a versatilidade dos sistemas a definir, acabando por não ser recomendado para projetos muito detalhados. No entanto, parece ser a melhor opção para projetos mais pequenos ou para uma estimativa rápida de desempenho de edifícios;
- A utilização de objetos próprios do *EnergyPlus* de forma detalhada permite uma maior versatilidade. No entanto, a modelação desta forma requer uma maior informação e conhecimento do funcionamento dos sistemas. Esta modelação não

carece da necessidade de algumas simplificações, assim, o projetista deverá fazer uso de um forte conhecimento do programa e das suas limitações na tentativa de mitigar o efeito destas;

- Verificou-se que, de uma forma geral, os sistemas estão bem dimensionados para todas as zonas climatizadas em relação à temperatura do ar interior. Apenas se verificou duas horas fora da temperatura desejada devido a um aquecimento provocado por um excesso de potência na época de aquecimento;
- Comparando os sistemas instalados ao sistema ideal, verifica-se que estes, na época de aquecimento, acompanham de muito perto a potência térmica necessária para atingir a temperatura de *setpoint*, havendo inclusive alturas onde a potência térmica dos equipamentos instalados se sobrepõe à do sistema ideal. Na época de arrefecimento, os sistemas instalados sentiram apenas dificuldades no acompanhamento do sistema ideal para momentos onde há grandes picos de necessidade (julho e setembro);
- Os resultados sugerem que a estratégia de climatização para a biblioteca não é a mais adequada. Estando apenas definido um único equipamento de caudal constante para as quatro zonas da biblioteca, controlado apenas pelas condições de uma das zonas, acaba por levar ao fornecimento de cargas térmicas e energia útil muito diferente da situação ideal;
- Em termos de melhorias nos consumos, deve-se destacar duas alterações: a primeira, e de mais fácil aplicação, é a de suprimir um dos equipamentos de produção de água fria; e a segunda, com possíveis custos de investimento, é a de instalação de economizadores nas UTAs, sendo esta a alteração com mais potencial para baixar os consumos energéticos.

Embora os objetivos desta dissertação tenham sido cumpridos, a elaboração deste trabalho colocou novos desafios. Assim, o autor sugere os seguintes desenvolvimentos:

- Fazer uma análise à estratégia de climatização da biblioteca e conseqüentemente aplicação de uma estratégia mais adequada;
- Modelar as várias zonas da biblioteca simplificadas neste trabalho e conseqüente avaliação do desempenho dos equipamentos para estas;

- Adicionar os radiadores e o depósito de água não considerados e consequente avaliação dos sistemas de produção de água quente;
- Efetuar a modelação do DEM de forma completa, podendo mais tarde este modelo ser utilizado para o estudo de novas soluções de equipamentos de climatização.



---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afroz, Z., Shafiullah, G. M., Urmee, T., & Higgins, G. (2018). Modeling techniques used in building HVAC control systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 83(October 2017), 64–84. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.044>
- Al-homoud, M. S. (2001). Computer-aided building energy analysis techniques, 36, 421–433.
- Balaras, C. A., Droutsa, K., Dascalaki, E., & Kontoyiannidis, S. (2005). European apartment buildings Heating energy consumption and resulting environmental impact of European apartment buildings, (January 2018). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.08.003>
- Berkeley Lab. (2017a). Auxiliary Programs.
- Berkeley Lab. (2017b). Engineering Reference.
- Berkeley Lab. (2017c). Getting Started.
- Berkeley Lab. (2017d). Input Output Reference.
- BETTENCOURT, A. A. D. F. (2012). O processo de projecto como prenúncio de sustentabilidade análise de um conjunto de instalações do ensino superior da década de noventa do século xx, *III*.
- Big Ladder Software. (2018). Euclid Obtido de: <https://bigladdersoftware.com/projects/euclid/>
- EnergyPlus. (2018). Weather Data - EnergyPlus Obtido de: <https://energyplus.net/weather>
- Fasiuddin, M., & Budaiwi, I. (2011). HVAC system strategies for energy conservation in commercial buildings in Saudi Arabia. *Energy and Buildings*, 43(12), 3457–3466. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.004>
- Fumo, N., Mago, P., & Luck, R. (2010). Methodology to estimate building energy consumption using EnergyPlus Benchmark Models. *Energy and Buildings*, 42(12), 2331–2337. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.07.027>
- Harish, V. S. K. V., & Kumar, A. (2016). A review on modeling and simulation of building energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1272–1292. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.040>

- Lab, B. (2015). Plant Application Guide, (c), 4–5.
- Rahman, M. M., Rasul, M. G., & Khan, M. M. K. (2010). Energy conservation measures in an institutional building in sub-tropical climate in Australia. *Applied Energy*, 87(10), 2994–3004. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.04.005>
- Ren4EEnIEQ – Comprehensive BIM add-on tool for the improvement of energy efficiency and indoor environment quality in renovation of buildings, URL:<http://www.adai.pt/ren4eenieq/>, 2018
- Rodrigues, E. (2014). *Automated Floor Plan Design: Generation, Simulation, and Optimization*.
- Rodrigues, E., Gaspar, A. R., & Gomes, Á. (2013a). An approach to the multi-level space allocation problem in architecture using a hybrid evolutionary technique. *Automation in Construction*, 35, 482–498. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.06.005>
- Rodrigues, E., Gaspar, A. R., & Gomes, Á. (2013b). An evolutionary strategy enhanced with a local search technique for the space allocation problem in architecture, Part 1: Methodology. *CAD Computer Aided Design*, 45(5), 887–897. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2013.01.001>
- Rodrigues, E., Gaspar, A. R., & Gomes, Á. (2013c). An evolutionary strategy enhanced with a local search technique for the space allocation problem in architecture, Part 2: Validation and performance tests. *CAD Computer Aided Design*, 45(5), 898–910. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2013.01.003>
- Rodrigues, E., Gaspar, A. R., & Gomes, Á. (2014). Automated approach for design generation and thermal assessment of alternative floor plans. *Energy and Buildings*, 81, 170–181. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.016>
- Shi, J., Yu, N., & Yao, W. (2017). Energy Efficient Building HVAC Control Algorithm with Real-time Occupancy Prediction. *Energy Procedia*, 111(September 2016), 267–276. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.028>
- SketchUp. (2018). Obtido de: <https://www.sketchup.com>
- Stadler, M., Firestone, R., Curtil, D., Marnay, C., & Berkeley, L. (2006). On-Site Generation Simulation with EnergyPlus for Commercial Buildings. *Buildings*, (February 2014), 242–254.

## A. ZONAS CLIMATIZADAS



**Figura A.1 - Auditório.**



**Figura A.2 - Anfiteatro 1.**



**Figura A.3 - Biblioteca.**



**Figura A.4 - Hall da biblioteca.**

## B. ESQUEMAS DE PRINCÍPIO

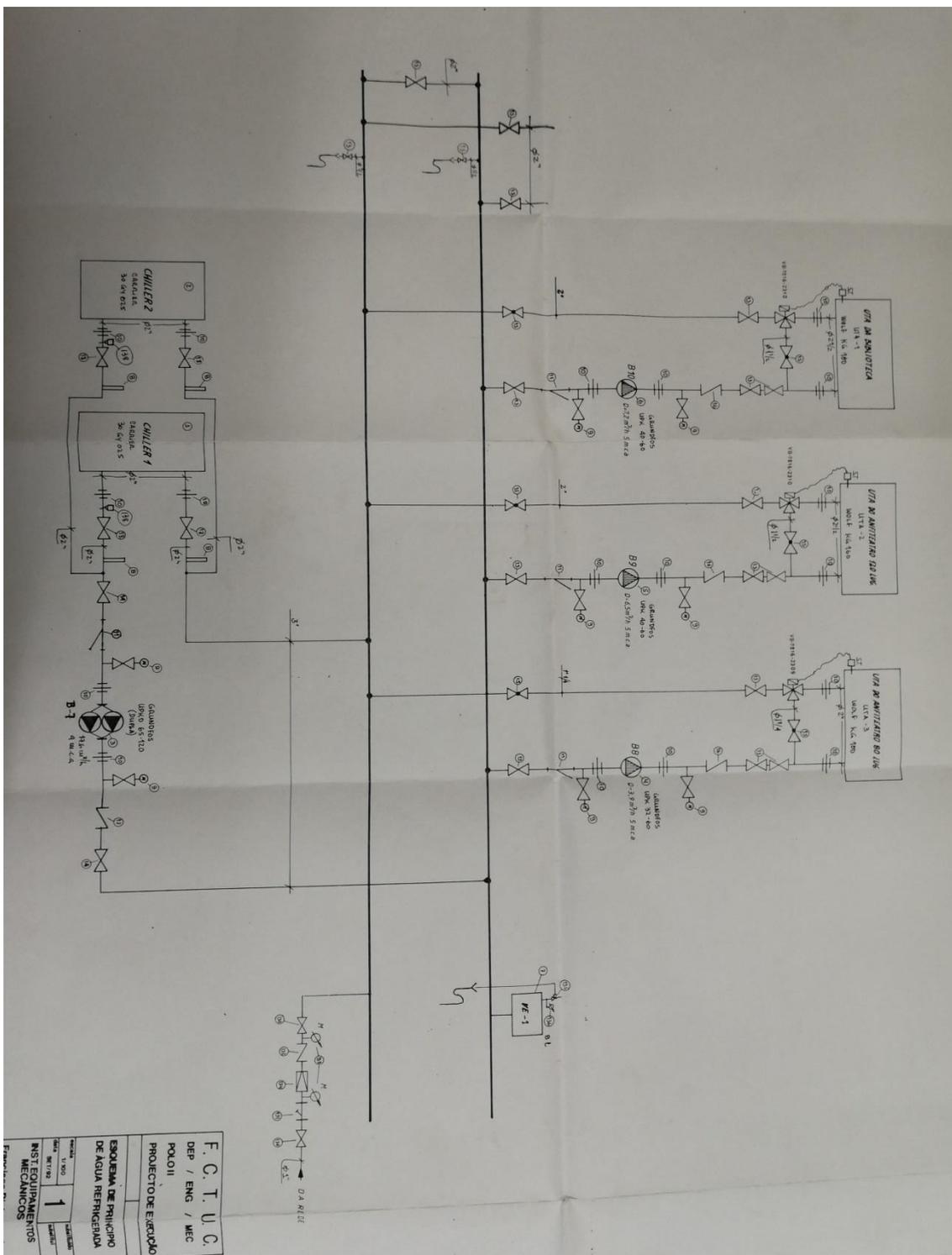


Figura B.1 - Esquema de princípio do circuito de água fria.



## C. EQUIPAMENTOS DE AVAC



Figura C.1 - Chillers.



Figura C.2 - Caldeiras e queimadores.



Figura C.3 - Bomba de circulação dos Chillers.



Figura C.4 - Bomba de circulação de água fria das UTAs.



Figura C.5 - Bomba de circulação das caldeiras.



Figura C.6 - Bombas de circulação de água quente das UTAs.



Figura C.7 – Exemplo de uma UTA instalada.