

André Gonçalo Antunes Bernardo

Modelação de sistemas AVAC para software de avaliação de desempenho em contexto de pré-projeto

Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica
na Especialidade de Energia e Ambiente

Setembro/2017





• U • C •

FCTUC

FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA
DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Modelação de sistemas AVAC para software de avaliação de desempenho em contexto de pré-projeto

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

Modeling of HVAC Systems for performance evaluation software in pre-project context

Autor:

André Gonçalo Antunes Bernardo

Orientadores:

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

Eugénio M. S. Rodrigues (Investigador, ADAI-LAETA, FCTUC)

Júri:

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

Vogais Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Doutor António Manuel Mendes Raimundo
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Setembro 2017

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



Agradecimentos

O trabalho apresentado só foi possível graças ao apoio de várias pessoas. A todos os que de um modo ou de outro tornaram possível a realização da presente dissertação, quero demonstrar o meu agradecimento.

Agradeço em primeiro aos meus orientadores Professor Doutor Adélio Gaspar e Doutor Eugénio Rodrigues na discussão de ideias, pela motivação e apoio prestado ao longo de todo o trabalho. Agradeço também ao restante grupo que integra o projeto *Ren4EE_nIEQ* onde este trabalho se inclui por esta oportunidade e apoio, em particular ao Doutor Marco Fernandes e ao Mestre Bruno Cardoso.

Não esquecendo os meus colegas e amigos que fizeram parte do meu percurso académico e me apoiaram e com eles partilhei muito ao longo destes anos.

Por último agradeço aos meus pais e irmão, por acreditarem em mim e nas minhas capacidades, pelo apoio não só durante a elaboração da presente dissertação, mas também ao longo de toda a minha vida.

Resumo

A utilização generalizada de sistemas de climatização para atingir as condições de conforto tem fomentado um aumento de consumo energético nos edifícios. A preocupação generalizada com a eficiência energética e o impacto ambiental levam à necessidade de fazerem-se escolhas que sejam melhores do ponto de vista ambiental, com o objectivo da melhoria do desempenho energético.

Com vista a auxiliar as escolhas de melhoria do desempenho energético, encontra-se em desenvolvimento uma ferramenta protótipo dedicada ao desenho de plantas que integra a simulação dinâmica, permitindo assim estimar o consumo energético numa fase inicial do projeto.

O objectivo deste trabalho era implementar na referida ferramenta sistemas de climatização e avaliar o consumo energético e o conforto térmico oferecido por cada um deles. Os sistemas implementados foram o aquecimento por convetores, o aquecimento por piso radiante e o sistema de aquecimento e arrefecimento *multisplit*. Nesta dissertação é descrito a forma como foram implementados os sistemas, desde a seleção de objetos a modelar em simulação dinâmica, a parametrização dos sistemas na base de dados e programar no código da ferramenta as rotinas para inserir os sistemas de modo automático.

Após a implementação dos sistemas, e para demonstrar a sua aplicação, foram realizados casos de estudo. Estes foram efetuados para dois edifícios unifamiliares gerados pela ferramenta, um com uma geometria em "L" e outro em "T", e testados em vários locais de Portugal. Os resultados obtidos foram utilizados para avaliar o conforto térmico, comparar o funcionamento e consumo de energia primária dos sistemas implementados.

Palavras-chave: Modelação de sistemas AVAC, Simulação dinâmica, *Energy-Plus*, Aquecimento por convetor, Piso radiante, *Multisplit*.

Abstract

The widespread use of air conditioning systems to achieve the comfort conditions has encouraged an increase in energy consumption in buildings. The global concern about energy efficiency and environmental impacts lead judicious choices that are best economically and environmentally, with the aim of improving the building performance.

In order to assist building practitioners in the improvement of the energy performance of buildings, it was developed a prototype tool dedicated to floor plan design that integrates dynamic simulation, allowing to estimate the energy consumption at an early stage of project design.

The aim of this work is to implement HVAC systems in the tool and evaluate the energy consumption and the thermal comfort offered by each one of the systems. The systems implemented were the baseboard heating, the underfloor heating, and the multisplit system. In this dissertation is described how the systems were implemented, from the selection of objects to be modeled in dynamic simulation, parameterization of systems in the tool database, and the programming of routines in the tool for the automatic retrieval and implementation of the systems.

After the implementation of the systems, case studies were carried out. These were corresponded to two single-family houses generated by the tool, one having a L-shape and the other T-shape geometry, in different climatic locations in Portugal. The results obtained were used to evaluate the thermal comfort, to compare the operation and primary energy consumption of the implemented systems.

Keywords HVAC system modeling, Dynamic simulation, *EnergyPlus*, Baseboard heat, Radiant floor, Multisplit.

Conteúdo

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
Simbologia e Siglas	xiii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Estrutura da dissertação	4
2 Metodologia	5
2.1 Ferramenta SAPTool	5
2.2 Implementação dos sistemas de climatização	9
2.2.1 Objectos EnergyPlus definidos	9
2.2.2 Introdução da informação na base de dados	18
2.2.3 Implementação do código	19
3 Casos de Estudo	21
3.1 Localizações	21
3.2 Edifícios em estudo	22
3.2.1 Elementos construtivos	22
3.2.2 Ocupação e equipamentos	23
3.2.3 Modos de ventilação	23
3.2.4 Espaços a climatizar	24
3.3 Avaliação do conforto	24
4 Resultados e discussão	27
5 Conclusão	35
Referências Bibliográficas	37
A Elementos Construtivos	39

B Ocupação Iluminação e Equipamentos

41

Lista de Figuras

2.1	Representação do funcionamento do <i>SAPTool</i>	5
2.2	Fluxograma do algoritmo EPSAP (Rodrigues <i>et al.</i> , 2013b).	6
2.3	Fluxograma do algoritmo FPOP (Rodrigues <i>et al.</i> , 2014b).	8
2.4	Fases do processo de implementação dos sistemas de climatização.	9
2.5	Esquema da relação entre módulos do EnergyPlus, adaptado de Berkeley Lab (2016a).	10
2.6	Esquema das relações na simulação de sistemas de climatização, adaptado de Berkeley Lab (2016a).	11
2.7	Exemplo do esquema de montagem de um circuito de água.	11
2.8	Esquema da defenição do <i>HVACTemplate:ZoneBaseboardheat</i>	13
2.9	Esquema da defenição do <i>HVACTemplate:Plant:HotWaterLoop</i>	14
2.10	Esquema da definição do <i>HVACTemplate:Zone:Unitary</i>	15
2.11	Esquema da definição do <i>HVACTemplate:System:UnitarySystem</i>	15
2.12	Esquema da definição do termostato.	16
2.13	Esquema da definição do <i>SizingZone</i>	16
2.14	Esquema da definição dos equipamentos nas Zonas.	17
2.15	Esquema da definição do circuito de água.	18
2.16	Interface Gráfica	20
3.1	Apresentação 3D dos edifícios usados nos testes.	22
4.1	Graus hora de desconforto para os edifícios sem climatização.	27
4.2	Gráficos de temperatura e humidade absoluta exterior e temperaturas operativas no interior da zona n. ^o 6, para os edifícios sem climatização.	28
4.3	Gráficos da evolução das temperatura da zona n. ^o 6 num dia de Inverno para Bragança.	30
4.4	Gráficos com a energia libertada e removida pelos vários sistemas.	32

Lista de Tabelas

2.1	Parametrização dos circuitos de água.	18
2.2	Parametrização do sistema <i>multisplit</i>	19
2.3	<i>Outputs</i> da simulação dinâmica obtidos para cada sistema.	20
3.1	Coordenadas geográficas das simulações.	21
3.2	Áreas de pavimento para todas as divisões dos dois edifícios em estudo	22
3.3	Requisitos dos elementos construtivos.	23
3.4	Descrição da ocupação, iluminação e equipamentos.	23
4.1	Redução da sensação de frio com a aplicação dos sistemas de climatização.	30
4.2	Redução da sensação de calor com a aplicação dos sistemas de climatização.	31
4.3	Energia Primária consumida por cada °C.hora de desconforto reduzido, para todos os locais e edifícios em estudo.	33
A.1	Descrição da parede exterior.	39
A.2	Descrição da cobertura.	39
A.3	Descrição do piso em contacto com o solo.	39
B.1	Descrição da ocupação, iluminação e equipamentos.	41
B.2	Horários de ocupação, iluminação e de utilização de equipamentos.	42

Simbologia e Siglas

<i>AVAC</i>	Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado
<i>BPS</i>	<i>Building Performance Simulation</i>
<i>COP</i>	<i>Coefficient Of Performance</i>
<i>DOE</i>	<i>U. S. Department of Energy's</i>
<i>e+</i>	<i>EnergyPlus</i>
<i>EE</i>	Estratégia Evolucionária
<i>EER</i>	<i>Energy Efficiency Ratio</i>
<i>EPSAP</i>	<i>Evolutionary Program for the Space Allocation Problem</i>
<i>FPOP</i>	<i>Floor plan Performance Optimization Program</i>
<i>GUI</i>	<i>Graphical User Interface</i>
<i>IDF</i>	<i>Input Data File</i>
<i>IEA</i>	<i>International Energy Agency</i>
<i>LSP</i>	<i>Layout Specification Program</i>
<i>SHC</i>	<i>Stochastic Hill Climbing</i>

1. Introdução

1.1 Enquadramento

A construção de edifícios tem como objectivo a supressão de necessidades, como a proteção de elementos atmosféricos, de forma a oferecer conforto a quem as habita. A procura de melhores condições interiores levou a diferentes soluções, como a criação de vários sistemas de climatização. A introdução e aceitação generalizada do uso de meios mecânicos para satisfazer as condições de conforto, levou a um enorme aumento do consumo de energia (Taleghani *et al.* , 2013).

No relatório *Energy Efficiency Indicators* (IEA, 2016), o sector residencial é responsável por 21% da energia consumida a nível global, onde 52% dessa energia é usada no aquecimento dos espaços. No enquadramento nacional, segundo o mesmo relatório, o sector residencial representa 17% da energia total consumida em Portugal, e as necessidades de aquecimento são de 21% do total de energia consumida pelo sector residencial português (IEA, 2016).

Segundo Balaras *et al.* (2005), dada a longa vida útil dos edifícios e o elevado número de edifícios existentes, o potencial para melhorar o desempenho energético dos edifícios em curto e médio prazo é elevado. Isso também pode ter um forte impacto não só na diminuição do consumo energético, mas também nos esforços para reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

A previsão do comportamento energético de um edifício numa fase projeto permite ao projetista obter dados para fazer escolhas e tomar medidas de melhoria das soluções. Assim, as opções escolhidas e as medidas tomadas não dependem apenas das experiências das pessoas, que podem levar por vezes a escolhas ineficientes (Al-Homoud, 2001).

Prever o consumo energético de um edifício através da utilização de ferramentas de simulação dinâmica, auxilia o projetista a tomar decisões informadas que contribuem para minimizar as necessidades energéticas. Atualmente, este tipo de ferramentas ainda não é amplamente utilizada na fase inicial dos projetos, fruto da complexidade na modelação geométrica do edifício, falta de especificações para a parametrização na fase inicial, dificuldade em interpretar os resultados obtidos e o facto de o processo de otimização do edifício requerer a realização de várias simulações, tornando este processo demorado (Attia *et al.* , 2012).

Com o objectivo de facilitar a utilização da simulação dinâmica, foi criada a ferramenta *SAP-*

Tool, que permite gerar plantas utilizando o algoritmo *EPSAP* (Rodrigues *et al.* , 2013b,c,a), e otimizá-las através do *FPOP* (Rodrigues *et al.* , 2014b). Este programa simplifica o trabalho de modelação e caracterização do edifício para a realização da simulação dinâmica.

Segundo o Decreto-Lei n.º 118/2013 (Diário da República, 2013a), entende-se por simulação dinâmica a previsão de consumos de energia correspondentes ao funcionamento de um edifício e respetivos sistemas energéticos que tome em conta a evolução de todos os parâmetros relevantes com a precisão adequada, numa base de tempo pelo menos horária, para diferentes zonas térmicas e condições climáticas de um ano de referência.

Segundo Al-Homoud (2001), o comportamento energético de um edifício permite: a avaliação de sistemas e *designs* alternativos, o planeamento e previsão do consumo energético, a verificação e cumprimento de regulamentos, e a optimização energética do edifício.

A previsão do consumo energético de um edifício pode ser obtida por métodos simplificados ou por programas de simulação energética. Com a evolução tecnológica aumentou a capacidade de processamentos dos computadores, permitindo o aparecimento de programas mais complexos e eficazes de simulação dinâmica de edifícios. As várias ferramentas criadas têm diferentes características e funcionalidades o que leva a diferentes níveis de dificuldade de utilização.

Ferramentas de simulação dinâmica já são amplamente utilizadas por engenheiros no projeto e seleção de sistemas de climatização, na avaliação das necessidades térmicas do edifício e para analisar e avaliar o desempenho energético dos sistemas. No entanto, ainda não é comum a utilização destas ferramentas numa fase inicial de projetos (Attia *et al.* , 2012; Rodrigues *et al.* , 2014a).

Vários autores, como Al-Homoud (2001), Attia *et al.* (2012) e Soares *et al.* (2017), concordam que a integração da simulação dinâmica, na fase inicial dos projetos permite ao utilizador a tomada de decisões informadas e, quando acopladas a outras ferramentas, otimizar o desempenho dos edifícios e encontrar soluções alternativas. A revisão literária feita por Nguyen *et al.* (2014) mostra que existe um aumento do interesse por estudos sobre a optimização de edifícios, dividindo o autor os processos de optimização em três fases:

- O primeiro chamado "pré-processamento" onde se define o modelo em estudo, as variáveis para a optimização e a função objectivo;
- A segunda fase, a "fase de optimização", onde se deve verificar e analisar a convergência e se os critérios para finalizar o processo são realistas;

- Na última fase, "pós-processamento", avaliam-se os resultados.

Apesar das vantagens na utilização da simulação numa fase inicial, permitindo a optimização do edifício, este processo ainda se debate com algumas barreiras: falta de informação disponível numa fase inicial (Attia *et al.* , 2012); modelação e simplificação dos edifícios e a determinação da função custo (Nguyen *et al.* , 2014); linguagem usada nos programas são normalmente vocacionadas para engenheiros e não para arquitetos, o que cria uma barreira para a utilização e interpretação de resultados por parte de quem concebe os edifícios (Attia *et al.* , 2012; Rodrigues *et al.* , 2014a).

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como propósito a modelação, integração e parametrização de sistemas de climatização para que sejam utilizados na ferramenta protótipo *SAPTool* e assim antecipar o consumo desses sistemas para que se possa decidir qual o sistema mais adequado a um edifício numa determinada localização.

Serão implementados sistemas de climatização utilizados com frequência em edifícios habitacionais:

- Aquecimento por convetores.
- Aquecimento por piso radiante.
- Aquecimento e arrefecimento utilizando um sistema *multisplit*.

Após a implementação o objectivo é aplicar os sistemas a casos de estudo em oito localizações em Portugal a fim de comparar a sua eficácia em diminuir o desconforto e o consumo energético associado ao funcionamento.

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos. O presente capítulo descreve a importância deste trabalho, o enquadramento, os objetivos a atingir e explicita a estrutura da dissertação.

O segundo capítulo, metodologia, descreve a ferramenta *SAPTtool* que é utilizada neste trabalho, explicando de forma sumária o funcionamento da mesma e dos algoritmos para a geração e otimização de plantas dos edifícios. Na metodologia é explicada a forma como todos os sistemas foram implementados, desde a seleção dos objetos a definir para a simulação dinâmica, a parametrização, integração no código da ferramenta e a implementação dos relatórios de desempenho a apresentar ao utilizador.

No capítulo casos de estudo são descritas as condições dos edifícios em estudo e como são conduzidas as simulações, as localizações, as características dos edifícios e a forma como é avaliado o desconforto térmico.

No quarto capítulo são apresentados resultados da aplicação dos sistemas implementados para oito localizações em Portugal. Inicialmente são descrito e comparados os vários climas, necessidades de energia para climatização e discutido o nível de conforto térmico.

O quinto e último capítulo contém as conclusões do trabalho desenvolvido.

2. Metodologia

Neste capítulo irá ser exposto a forma como o trabalho foi desenvolvido, os programas utilizados e o processo para implementar os sistemas de climatização na ferramenta *SAPTtool*.

2.1 Ferramenta SAPTool

O *SAPTtool* é um ferramenta protótipo que gera plantas de arquitetura, tendo em conta especificações dadas pelo utilizador e também permite a otimização do seu desempenho energético, que visa facilitar a utilização de ferramentas de otimização e simulação dinâmica na fase inicial de um projeto de edifícios.

O funcionamento do *SAPTtool*, apresentado na Figura 2.1, inicia-se com a especificação dos requisitos do utilizador bem como a parametrização dos elementos construtivos, cargas internas, ocupação e equipamentos na base de dados.

O carregamento dos dados para o programa é feito pelo modulo *Layout Specifications Program (LSP)*. Seguidamente, as geometrias alternativas dos edifícios são geradas utilizando o algoritmo *Evolutionary Program for the Space Allocation Problem (EPSAP)* (Rodrigues *et al.*, 2013b,c,a). O algoritmo combina uma estratégia evolucionária (*EE*) com uma técnica de pesquisa local *Stochastic Hill Climbing (SHC)*, de forma a minimizar uma função custo que corresponde a uma soma ponderada de diferentes objetivos. Os avaliadores verificam a integridade e especificações em relação ao edifício como: a existência espaços sobrepostos, a conectividade e adjacência entre espaços, se as dimensões dos espaços e do edifício estão de acordo com os limites definidos nos requisitos, posição relativa e absoluta de cada divisão na planta; e, em relação às janelas e portas, se as aberturas verificam as dimensões, as orientações, posição, e critérios de acessibilidade.

A estrutura de funcionamento do algoritmo *EPSAP* está ilustrada na Figura 2.2. O pro-

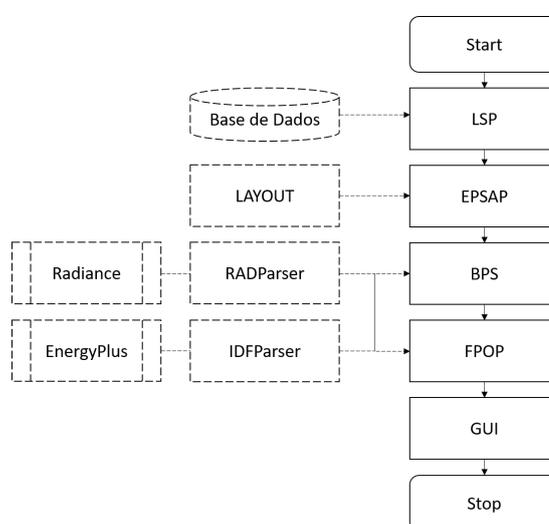


Figura 2.1: Representação do funcionamento do *SAPTtool*.

cesso funciona em duas etapas. A primeira etapa corresponde ao *EE* e a segunda ao *SHC*. Na primeira geração da *EE*, a população de soluções aleatórias é gerada e cada indivíduo da mesma é avaliado de acordo com a função custo. Como o *SHC* substitui o tradicional operador de mutação, a segunda etapa inicia-se, deixando o *EE* suspenso. O *SHC* aplica transformações aleatórias nos indivíduos, aceitando a nova solução se for melhorada, caso contrário a transformação é descartada. As transformações são aplicadas aos diferentes elementos nas plantas, podendo realizar translações, rotações, reflexões e alteração das dimensões dos vários elementos. Estas ações podem ser aplicadas à planta como um todo, a um conjunto de espaços, a um piso, a um espaço, ou a uma abertura (janela ou porta). Quando este método faz convergir a função custo, a etapa *SHC* termina e a etapa *EE* é retomada. De seguida, os operadores *EE* são aplicados e apenas as soluções com a função custo inferior à média da função custo da população são preservadas para a próxima geração, sendo as restantes substituídas por soluções aleatórias e o ciclo recomeça. Após algumas gerações a função custo converge, as soluções são apresentadas e o *ESAP* termina.

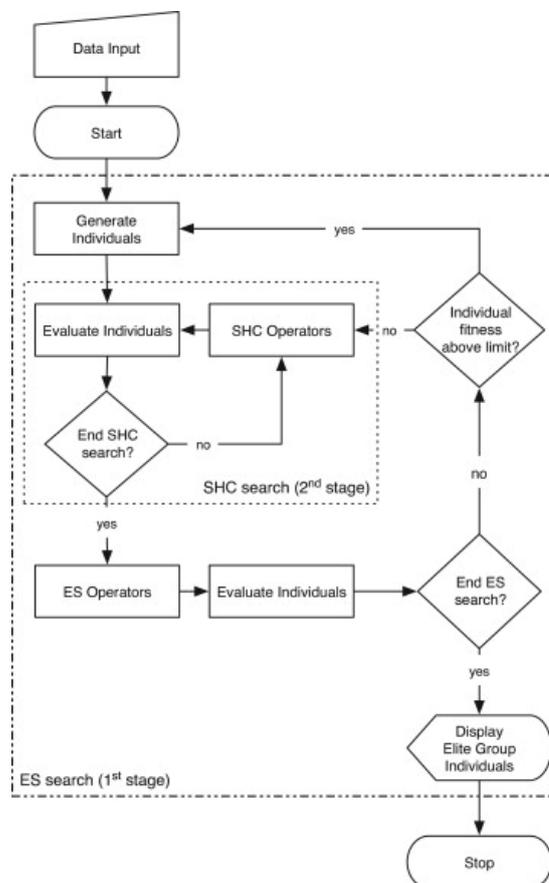


Figura 2.2: Fluxograma do algoritmo EPSAP (Rodrigues *et al.*, 2013b).

Após a geração de plantas, o programa permite avaliar o comportamento energético do edifício com o módulo *Building Performance Simulation (BPS)* que executa a primeira avaliação da planta gerada, de acordo com o critério selecionado (consumo de energia, conforto visual ou conforto térmico), com os equipamentos, ocupação e sistemas definidos pelo utilizador no *LSP* e pré-estabelecidos na base de dados. No caso do critério consumo de energia ou conforto térmico, a simulação dinâmica é realizada com o programa acoplado *EnergyPlus (e+)* e a biblioteca *IDFParser* converte a estrutura das plantas geradas e seus requisitos na estrutura e linguagem do *EnergyPlus*. No caso do critério selecionado ser o conforto visual, o programa de simulação é o *Radiance*, em que a informação do edifício gerado é convertida utilizando a biblioteca *RADParser*.

Caso o utilizador opte por otimizar as plantas, nesse caso é chamado o algoritmo *Floor plan Performance Optimization Program (FPOP)* (Rodrigues *et al.*, 2014b,a). O algoritmo aplica transformações geométricas a cada planta de acordo com a estratégia definida pelo utilizador. O desempenho da transformação é calculado através de simulação dinâmica e é avaliada a alteração de acordo com uma função custo relativa ao critério de desempenho selecionado. Procurando minimizar a função custo, se a transformação melhorar o desempenho a transformação é adotada e inicia a nova iteração.

Quando o objetivo é minimizar o consumo energético, as alterações procuram favorecer a da luz natural para minimizar o uso das luzes artificiais, reduzir o consumo de energia para aquecimento e arrefecimento (Pereira, 2015). Caso o utilizador pretenda minimizar o desconforto térmico, o algoritmo irá procurar minimizar os graus hora de desconforto do edifício. O desconforto térmico é avaliado a cada hora e verificada a diferença entre a temperatura do espaço e os limites do conforto térmico. A função custo é a soma dessas diferenças multiplicadas pelo coeficiente de ocupação para todas as horas do ano e para todos os espaços.

O *FPOP* utiliza operadores que alteram geometricamente o edifício, como a translação de paredes ou a rotação do edifício. O algoritmo modifica também a posição e dimensionamento das portas e janelas e tem a capacidade de aplicar e dimensionar palas verticais e horizontais. Na Figura 2.3 está representada a forma como este algoritmo funciona. Inicialmente o algoritmo carrega toda a informação sobre as plantas, elementos construtivos, ocupação, iluminação e equipamentos.

Após obter todas as especificações necessárias à simulação dinâmica é avaliado o desempenho

do edifício recorrendo ao EnergyPlus. De seguida são aplicados os operadores e é verificada a integridade geométrica com os requisitos do utilizador. Caso a alteração efetuada não seja de acordo com as especificações, esta é descartada e os operadores voltam a ser chamados para efetuar outra transformação até obter uma mudança satisfatória ou atingir um número máximo de iterações. Quando as alterações passam a verificação geométrica, é feita uma nova simulação dinâmica e é verificado se existe uma melhoria do desempenho energético do edifício. Caso exista, a alteração proposta pelo operador é aceite.

O processo termina quando nenhum dos operadores consegue aplicar uma alteração que seja geometricamente coerente e que melhor o desempenho do edifício.

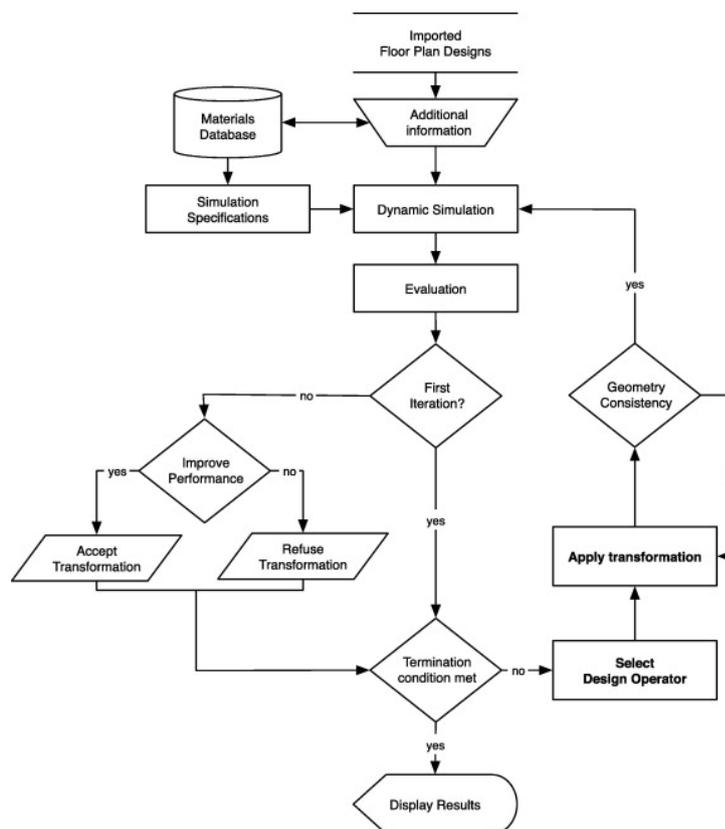


Figura 2.3: Fluxograma do algoritmo FPOP (Rodrigues *et al.*, 2014b).

Os resultados da geração, da avaliação e da otimização podem ser visualizados através *Graphical User Interface (GUI)*, que permite consultar a geometria do edifício na forma de plantas e os relatórios de desempenho do edifício e de cada espaço individualmente.

2.2 Implementação dos sistemas de climatização

A implementação dos sistemas de climatização na ferramenta *SAPTtool* incorpora um processo de quatro passos (Figura 2.4). Nesta secção é descrita a forma como, no decorrer deste trabalho, foram determinado os objetos do *e+* a definir, a introdução e parametrização dos sistemas na base de dados e como o programa escreve o ficheiro de entrada para a simulação dinâmica e lê os resultados da simulação dinâmica para integrar na interface gráfica.

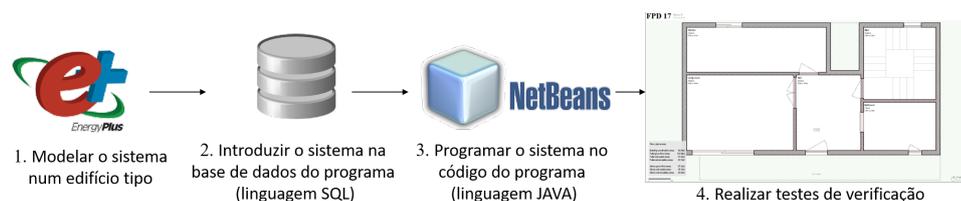


Figura 2.4: Fases do processo de implementação dos sistemas de climatização.

2.2.1 Objectos EnergyPlus definidos

Neste trabalho foi utilizada a ferramenta *e+* para a previsão dos consumos energéticos dos edifícios. É um programa gratuito com uma elevada taxa de utilização por parte da comunidade científica, sendo o mais utilizado na investigação sobre otimização de edifícios com 37,2%, seguido pelo *TRNSYS* com uma taxa de utilização de 35,3% (Nguyen *et al.*, 2014). Esta ferramenta é desenvolvida e financiada pelo *U.S. Department of Energy's (DOE)*, tendo resultado da combinação de dois programas de simulação mais antigos, o *BLAST* e o *DOE – 2.1*.

O *e+* é um programa modelar que permite o cálculo de cargas térmicas em espaços através de balanços térmicos com intervalos de tempo definidos pelo utilizador (intervalos de tempo mais pequenos melhora a precisão dos resultados mas torna a simulação mais demorada); a simulação de vários sistemas de climatização, ventilação e iluminação, tem uma grande diversidade de objetos e controlos que podem ser definidos; o dimensionamento de sistemas AVAC combina a transferência de calor e massa entre espaços e o seu *input* e *output* são documentos de texto, facilitando a integração com outros programas (Crawley *et al.*, 2008).

A informação de entrada do *e+* é um ficheiro de texto do tipo *Input Data File (IDF)* que contém toda a informação necessária para a simulação dinâmica, como a geometria do edifício, descrição dos elementos construtivos, equipamentos, ocupação, sistemas de iluminação

e climatização. Neste ficheiro é necessário especificar os *outputs* que se deseja obter da simulação (Berkeley Lab, 2016c).

Além do ficheiro que caracteriza o edifício, para correr a simulação é necessário o ficheiro climático. Este contém dados hora a hora, para conjunto de anos, da temperatura, humidade, velocidade do vento, precipitação, pressão atmosférica e radiação solar.

Como descrito anteriormente o *e+* é um programa modelar, ou seja, tem vários módulos que trabalham em conjunto para realizar a simulação dinâmica. Na Figura 2.5 mostra como são geridos os diferentes os módulos para fazer os cálculos.

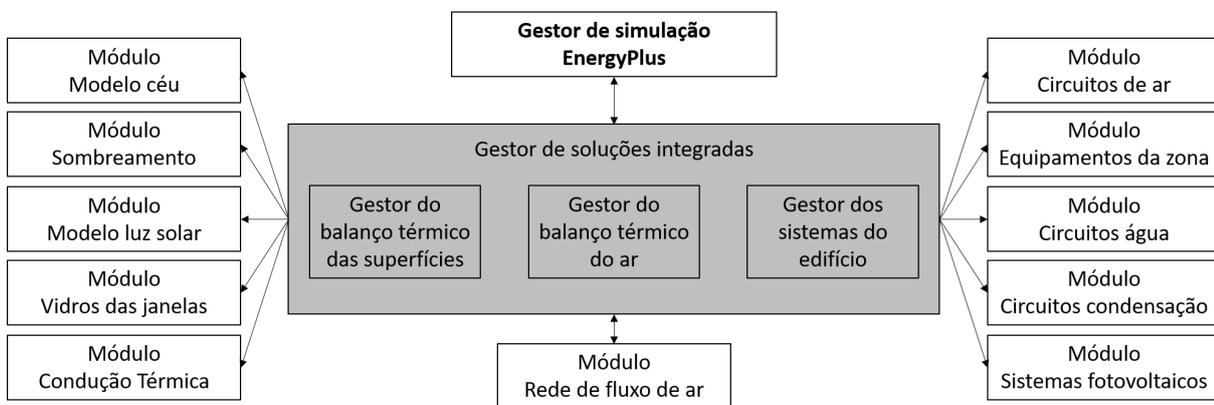


Figura 2.5: Esquema da relação entre módulos do EnergyPlus, adaptado de Berkeley Lab (2016a).

Após a simulação dinâmica no *e+* os resultados são exportados para ficheiros de valores separados por ponto-e-virgulas. Para além dos resultados, são ainda criados outros ficheiros, destacando-se:

- Ficheiro de erro *ERR*, onde resume todos os erros que possam ter ocorrido durante a simulação.
- Ficheiro *RDD* (*Report Data Dictionary*), que contém a listagem de todos os outputs possíveis de obter para uma determinada simulação.
- Ficheiro *EIO* que apresenta os resultados e a informação sobre os elementos construtivos, clima e as cargas térmicas das zonas.
- Ficheiro de valores das as vareáveis de *output* especificadas pelo utilizador no *IDF*.

Utilizando alguns exemplos de edifícios e consultando o *EnergyPlus-Input Output Reference*, (Berkeley Lab, 2016a), foram determinados os objetos necessários para definir os sistemas a implementar e os critérios de interação durante a simulação dinâmica.

O *e+* é um programa que se baseia em cálculo de balanços térmicos entre espaços, equipa-

mentos e sistemas de climatização. A Figura 2.6 mostra como os elementos estão interligados. A zona e o equipamento da zona estão relacionados através de um circuito de ar enquanto o equipamento de climatização e a produção de energia térmica estão interligados por um outro circuito, como por exemplo de água.



Figura 2.6: Esquema das relações na simulação de sistemas de climatização, adaptado de Berkeley Lab (2016a).

O *e+* tem uma forma específica de definir os circuitos (Berkeley Lab, 2016b). O programa divide os circuitos em dois: a parte que fornece a energia e a parte que utiliza a energia. As partes são constituídas por ramos (*Branches*) e um par de conectores. Cada ramo contém pelo menos um equipamento, um nó de entrada e um nó de saída. Os nós são importantes para a identificação das ligações entre os vários ramos. Um par de conectores é formado por um *Splitter* e um *Mixer*, o *Splitter* faz a ligação de um ramo para vários e o *Mixer* faz a ligação de vários ramos para um ramo. A Figura 2.7 mostra um exemplo de como é montado um circuito de água, sendo a lógica da divisão dos circuitos aplicada tanto para a definição de circuitos de aquecimento como de arrefecimento. Na figura, os *Splitters* estão representados a laranja, os *Mixers* a azul e os *Branches* a preto.

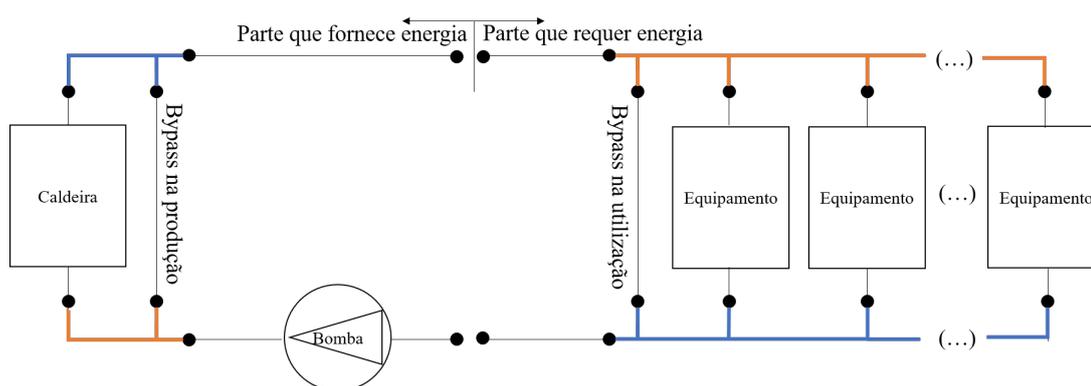


Figura 2.7: Exemplo do esquema de montagem de um circuito de água.

A fim de simplificar o processo de definição dos sistemas de climatização, o *e+* tem objetos chamados *HVACTemplate*, que facilitam a parametrização dos sistemas pelos utilizadores, mas não são utilizados na simulação dinâmica. Primeiro são convertidos num programa auxiliar do *e+*, o *ExpandObjects*, que lê o ficheiro *IDF* e converte os objetos *HVACTemplate* em objetos

do *e+*, dando origem a um ficheiro *ExpandIDF* que contém os circuitos totalmente definidos.

A utilização de objetos *HVACTemplate* requer menos informação do utilizador e simplifica a definição dos sistemas. Contudo, esta simplificação leva a uma redução na versatilidade dos sistemas a definir. Impede a implementação de vários circuitos de água já que, o programa liga todos os equipamentos a um único circuito. A combinação de alguns equipamentos é impossível, como um sistema solar térmico para o aquecimento ou utilizar o piso radiante. Esta forma restringe também a utilização de um sistema de climatização por zona.

Neste trabalho foram utilizados os objetos *HVACTemplate* para a definição dos sistemas de aquecimento por convetores e para o *multisplit*. Como o sistema de aquecimento por piso radiante não é possível caracterizar via *HVACTemplate*, foi necessário recorrer à definição completa do sistema e dos circuitos.

Nas subsecções seguintes serão expostos os objetos do *e+* definidos para cada um dos sistemas, bem como qual a relação que existe entre esses objetos. Nos esquemas apresentados, todos os objetos assinalados a cinzento foram implementados no decorrer deste trabalho e os restantes já se encontravam integrados na ferramenta.

Parâmetros para o autodimensionamento

Uma das características deste trabalho é que os processos implementados têm de ser versáteis ao ponto de funcionar em qualquer edifício e para qualquer clima, não sendo assim possível prever as potências dos equipamentos de climatização.

O *e+* calcula as capacidades dos equipamentos se no objeto *SimulationControl* for permitido o autodimensionamento e se definirmos os parâmetros para o dimensionamento.

Quando o autodimensionamento está ativo, o *e+* faz o balanço térmico e mássico para um período definido pelo utilizador onde determina as necessidades térmicas dos espaços e dimensiona os equipamentos. De seguida, o programa faz a simulação dinâmica do edifício já com as características do sistema de climatização dimensionadas.

O autodimensionamento dos sistemas só é possível se definirmos os objetos *Sizing:Parameters* e *SizingPeriod:WeatherFilesDays*. No objeto *Sizing:Parameters* é possível colocar fatores que são aplicados às cargas de aquecimento ou arrefecimento durante o dimensionamento e também é definido os intervalos de tempo utilizado para o cálculo.

O objeto *SizingPeriod:WeatherFilesDays* indica o período para o qual é feito o cálculo das cargas térmicas. As condições exteriores são as descritas no ficheiro de informação meteorológica.

Aquecimento por convetores

A definição deste sistema tem três objetos principais:

HVACTemplate:ZoneBaseboardheat Define os convetores nas zonas a climatizar.

HVACTemplate:Plant:HotWaterLoop Caracteriza o circuito de água.

HVACTemplate:Plant:Boiler Parametrização da caldeira.

Na Figura 2.8 está esquematizado a interdependência dos vários objetos do e+ para a definição do *HVACTemplate:ZoneBaseboardheat*.

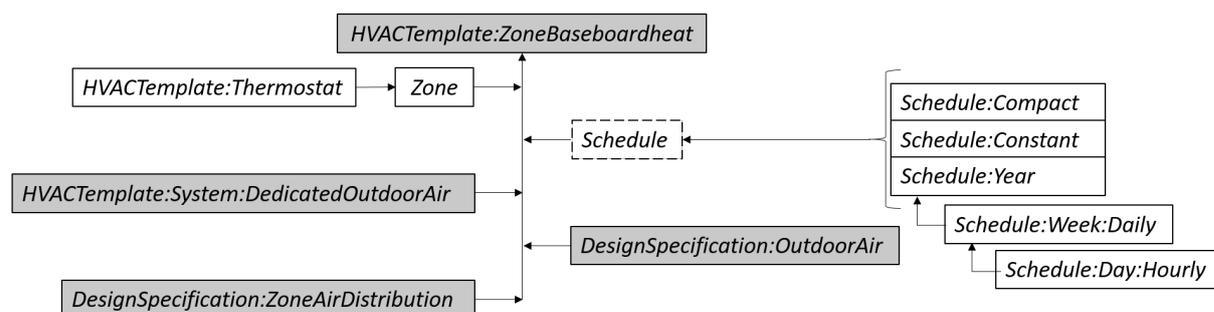


Figura 2.8: Esquema da defenição do *HVACTemplate:ZoneBaseboardheat*.

Os convetores (*HVACTemplate:ZoneBaseboardheat*) estão associados a uma zona, que por sua vez tem a informação sobre a temperatura de *setpoint* (*HVACTemplate:Thermostat*).

Opcionalmente poderá ser definido um perfil de utilização, associado um sistema dedicado ao ar exterior insuflado (*HVACTemplate:System:DedicatedOutdoorAir*), caudais de ar exterior definidos (*DesingSpecification:OutdoorAir*) e eficácias de ventilação (*DesingSpecification: ZoneAirDistribution*).

No circuito de água (*HVACTemplate:Plant:HotWaterLoop*) é parametrizado o tipo de bomba, a queda de pressão da rede, o seu rendimento e a temperatura da água do circuito. O objeto permite que o utilizador escolha um horário de funcionamento e um esquema de funcionamento diferente do que o e+ tem por defeito. Na Figura 2.9 está esquematizado a relação entre os vários objetos.

A utilização de esquemas de funcionamento diferentes, ou introdução de outros equipamen-

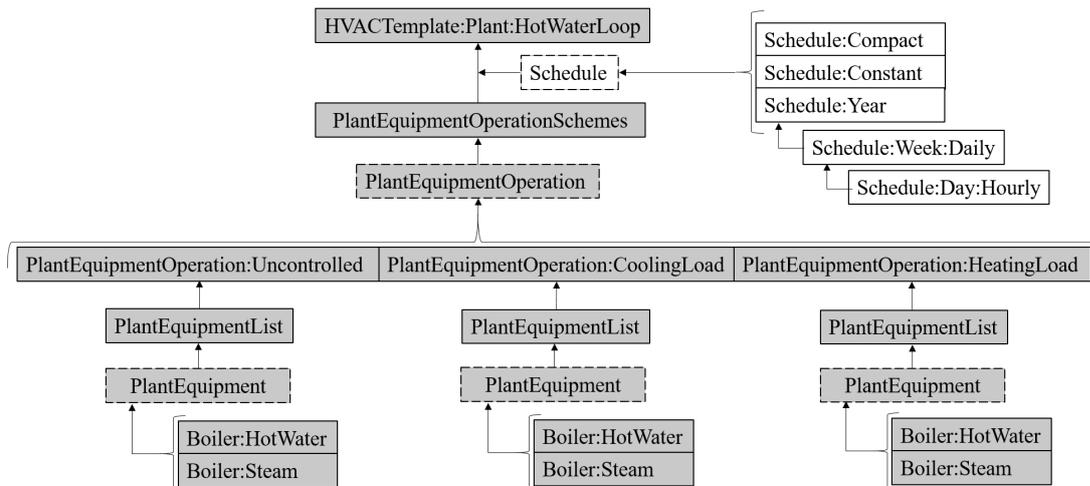


Figura 2.9: Esquema da definição do *HVACTemplate:Plant:HotWaterLoop*.

tos de produção implica a definição do objeto *PlantEquipmentOperationSchemes*. Tem até oito operações diferentes, que podem ser arrefecimento, aquecimento, não controladas, armazenamento de energia térmica ou outro definido pelo utilizador. Devido às várias hipóteses e tendo em conta que cada uma das operações se iria desdobrar em mais objetos, foram definidas apenas as operações arrefecimento (*CoolingLoad*), aquecimento (*HeatingLoad*) e não controlado (*Uncontrolled*). Cada tipo de operação tem até dez listas de equipamentos e cada lista pode conter dez equipamentos. Os equipamentos de produção permitidos são caldeiras (*Boilers*), chillers, bombas de calor, entre outros.

A definição da caldeira (*HVACTemplate:Plant:Boiler*) não depende de outros objetos, apenas é necessário parametrizar o rendimento, a temperatura de saída da água e os limites de funcionamento.

Sistema Multisplit

O sistema multisplit requer a definição de dois objetos principais:

HVACTemplate:Zone:Unitary define o funcionamento do equipamento interior (no espaço).

HVACTemplate:System:UnitarySystem caracteriza o equipamento exterior como condições e horários de funcionamento.

O objeto *HVACTemplate:Zone:Unitary* (Figura2.10) está associado a uma zona que por sua vez tem um termostato, além disso tem de estar associado a um equipamento exterior (*HVAC-*

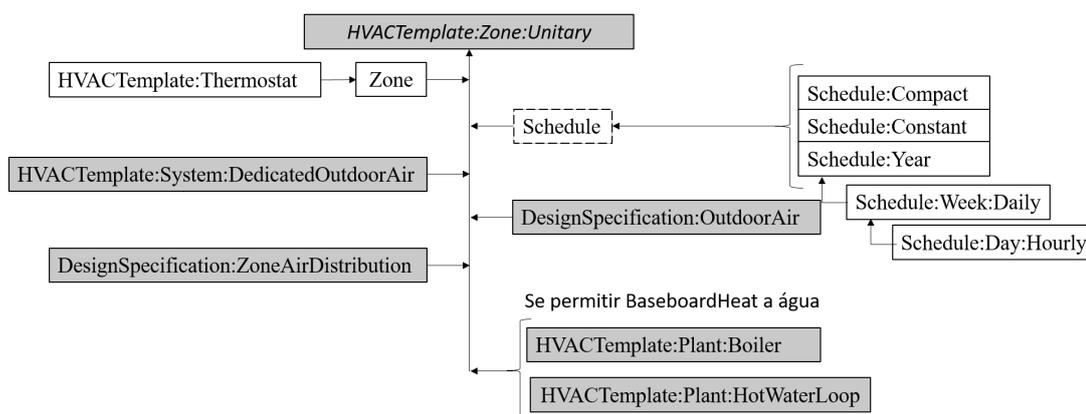


Figura 2.10: Esquema da definição do *HVACTemplate:Zone:Unitary*.

Template:System:UnitarySystem).

De forma semelhante aos convetores, o utilizador pode definir um sistema dedicado ao ar exterior, especificar o caudal de ar exterior e eficácia de ventilação para cada zona. Este sistema permite que seja usado em conjunto com um sistema de aquecimento por convetor a água quente, nesse caso a caldeira (*HVACTemplate:Plant:Boiler*) e o circuito de água (*HVACTemplate:Plant:HotWaterLoop*) têm de ser definidos.

A caracterização do equipamento exterior do *multisplit* (*HVACTemplate:System:UnitarySystem*), representado na Figura 2.11, requer pelo menos a indicação de uma zona, que irá servir de controlo da operação de aquecimento ou arrefecimento e necessita de um horário de funcionamento.

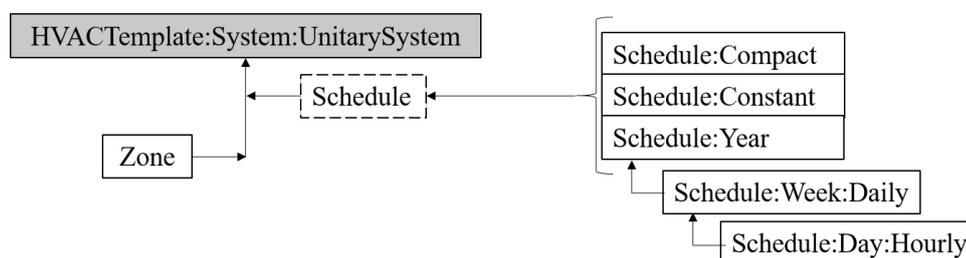


Figura 2.11: Esquema da definição do *HVACTemplate:System:UnitarySystem*.

HVACTemplate:System:UnitarySystem é onde se indica *COP* e *EER*, a temperatura limite para o funcionamento do sistema, permite a definição de sistemas de humificação, desumidificação e a seleção da estratégia de descongelamento do equipamento.

Aquecimento por Piso Radiante

Como referido anteriormente a definição deste sistema não pode ser feita através de um *HVACTemplate*. Assim, foi necessário definir os termostatos que irão servir a zona, *ZoneControl:Thermostat*. Enquanto o *HVACTemplate:Thermostat* necessitava apenas da definição das temperaturas de funcionamento, o *ZoneControl:Thermostat* oferece uma maior flexibilidade e mais opções de escolha (Figura 2.12). Este permite a utilização de vários tipos de controlo onde, para cada tipo de controlo, é definido o horário das temperaturas pretendidas.

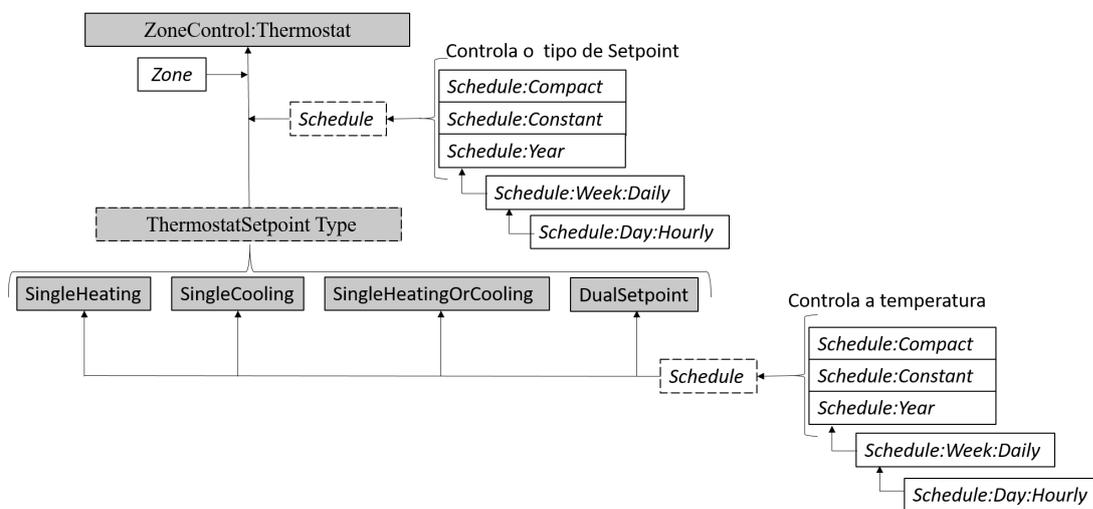


Figura 2.12: Esquema da definição do termostato.

Definidos os *setpoints* é necessário calcular as cargas térmicas de cada zona. Para isso é necessário o objeto *Sizing Zone*. Este objeto não foi definido para os outros sistemas porque a utilização do *HVACTemplate* já o cria automaticamente. O dimensionamento das cargas é feito para cada zona, e é necessário levar em conta os caudais de ar exterior (*DesignSpecification:OutdoorAir*) e eficácias de ventilação (*DesignSpecification:ZoneAirDistribution*).

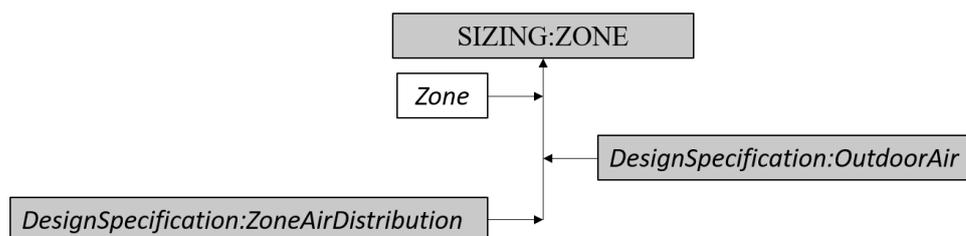


Figura 2.13: Esquema da definição do *SizingZone*.

O esquema dos equipamentos e circuito de ar nas zonas está representado na Figura 2.14. O

objeto *ZoneHVAC:LowTemperatureRadiant:VariableFlow* é a superfície radiante e está associada a um elemento construtivo (a um pavimento, a uma parede ou a um teto). Por sua vez a superfície radiante está associada a uma lista de equipamentos de climatização da zona que tem definido os nós de ar em contacto com a mesma, permitindo assim fazer o balanço térmico entre equipamentos e o espaço.

O aquecimento da água é feito por uma caldeira *Boiler:HotWater*, onde é necessário parametrizar as temperaturas e o seu rendimento, e a circulação por uma bomba de caudal constante *Pump:ConstantSpeed*, onde se indica o rendimento e se pode definir o horário de funcionamento.

Por último é definido o circuito de água e como este funciona. O *PlantLoop*, esquematizado na Figura 2.15, necessita da listagem de todos os ramos do lado da produção e do lado do uso, bem como a listagem dos conectores. Este objeto requer também a definição do *PlantEquipmentOperationSchemes* que controla o funcionamento do circuito, já explicado no aquecimento por convetores a quando da definição do *HVACTemplate:Plant:HotWaterLoop*. É importante referir que a listagem dos ramos têm de ser por ordem do ramo de entrada até ao ramo de saída. O dimensionamento dos equipamentos de produção e do caudal de água necessário para o transporte de calor é feito pelo objeto *SizingPlant* que tem de ter associado o *PlantLoop* que está a dimensionar.

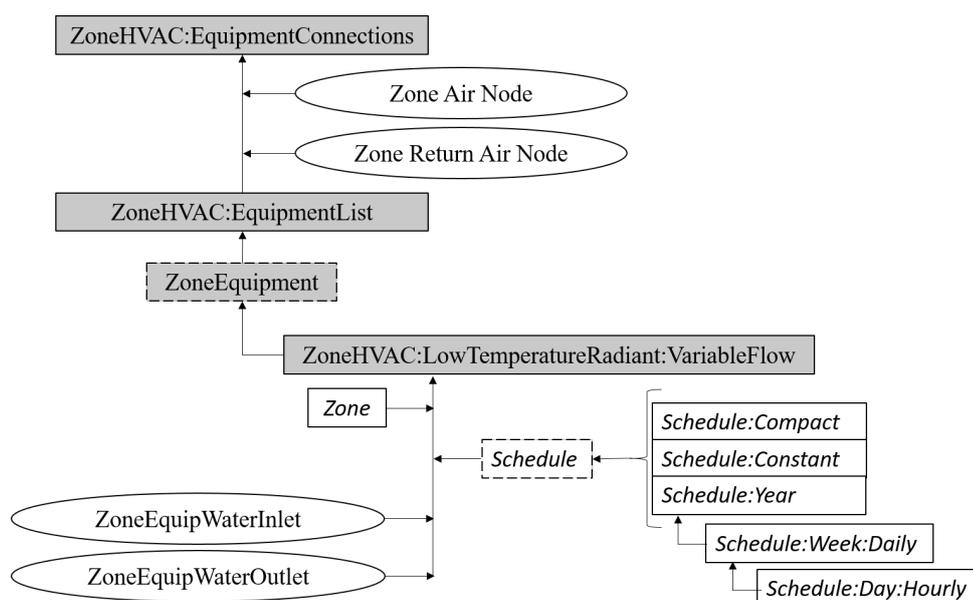


Figura 2.14: Esquema da definição dos equipamentos nas Zonas.

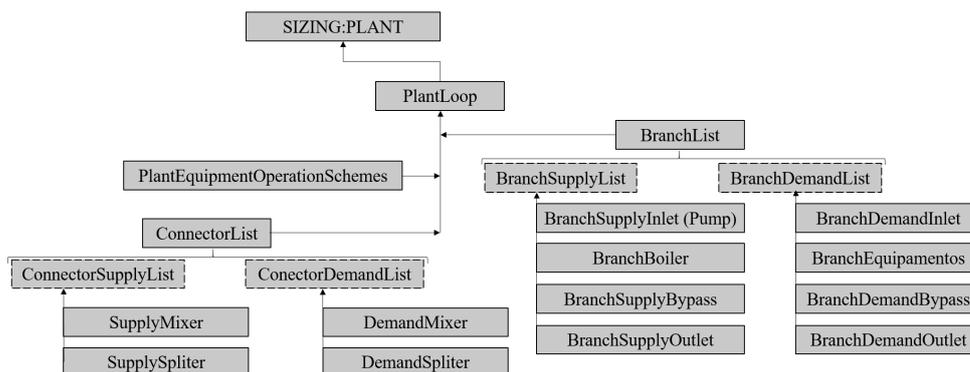


Figura 2.15: Esquema da definição do circuito de água.

2.2.2 Introdução da informação na base de dados

A segunda fase de implementação é a introdução dos objetos e a sua parametrização na base de dados para posterior utilização no programa. É criada uma tabela na base de dados para cada objeto, que contém toda a informação necessária para o caracterizar.

A ferramenta *SAPTool* visa a previsão do comportamento energético de um edifício numa fase inicial do projeto e, como tal, alguma da informação não está disponível sendo necessário recorrer a parametrização pré-definida para facilitar a definição o sistema.

As potências dos equipamentos, os caudais de água e ar foram definidos como *autosize*, desta forma permite ao programa fazer o dimensionamento do equipamento. Para todos os sistemas assumiu-se que as salas teriam termóstatos definidos para temperaturas do ar entre os 20 °C e 25 °C.

Nos sistemas de aquecimento por convetores e piso radiante a produção de energia térmica é feita por uma caldeira a gás natural com uma eficiência nominal de 90%. As parametrizações dos circuitos de água estão resumidas na Tabela 2.1 e a parametrização do *multisplit* está sintetizada na Tabela 2.2.

Tabela 2.1: Parametrização dos circuitos de água.

Sistema	Temperatura máxima	Diferença de temperatura	Tipo de bomba	Bypass na produção	Bypass no uso	Queda de pressão
Convetores	80 °C	10 °C	C. Constante	Sim	Sim	1.5 bar
Piso radiante	30 °C	10 °C	C. Constante	Sim	Sim	2.0 bar

Tabela 2.2: Parametrização do sistema *multisplit*.

	Temperatura max. insuflação	Temperatura min. insuflação	COP	EER
Multisplit	40 °C	14 °C	4	3.2

2.2.3 Implementação do código

Como a ferramenta *SAPTool* foi implementada em JAVA, todo o código foi desenvolvido na mesma linguagem. Recorreu-se ao programa *NetBeans* como interface de programação e gestão dos repositórios do código.

A presente subsecção explica quais os módulos que tiveram a contribuição deste trabalho e quais os repositórios que os utilizam. A implementação dos sistemas na ferramenta implicou a escrita de aproximadamente 5200 linhas de código.

Inicialmente foram indicados os sistemas a implementar, espaços a climatizar e foram criadas classes para o carregamento da parametrização dos equipamentos, guardada na base de dados. Todas estas adições foram feitas no módulo *Layout Specification Program (LSP)*.

O *BPS* e o *FPOP* dependem da simulação dinâmica, em específico do e+. Para realizar a simulação dinâmica é necessário criar o ficheiro IDF. Este ficheiro de entrada é gerado pelo módulo *FPOP EnergyPlus* utilizando os métodos de escrita da biblioteca *IDFParser*. Os dois módulos utilizam também os repositórios: *FPOP Performance* que lê e guarda o *output* da simulação dinâmica e *FPOP Evaluators* que calcula a função custo de acordo com o critério indicado pelo utilizador. O módulo *FPOP* faz uso do repositório *FPOP Operators*, que é o responsável pela aplicação das transformações geométricas nas plantas.

Para incluir os sistemas, foram adicionadas classes ao *FPOP EnergyPlus* para a escrita no IDF de cada componente dos sistemas de acordo com a parametrização feita na base de dados. Foi também introduzida a informação de quais as variáveis de *output* da simulação que se deseja obter. Estas variáveis foram introduzidas no *FPOP Performance* e *FPOP Evaluators* permitindo que a ferramenta leia os resultados obtidos e possa calcular as funções de custo.

Durante a implementação, o cálculo da energia consumida teve de ser alterado porque o consumo energético do edifício não é apenas elétrica. Foi necessário converter todos os tipos de energia consumida em energia primária¹ a fim de poder somar todos os diferentes consumos de

¹ A energia final é a energia disponibilizada para utilização direta por parte do consumidor. A energia primária

energia. Os fatores utilizados para a conversão da energia foram obtidos do Diário da República (2013b) no ponto um do Despacho n.º 15793-D/2013.

A apresentação de dados ao utilizador levou a alteração do módulo *Graphical User Interface* (*GUI*), aqui foram adicionados os relatórios com as variáveis de *output* associadas aos sistemas. Na Figura 2.16 ilustra os vários relatórios que podem ser apresentados. A Tabela 2.3 mostra qual a informação obtida para cada sistema. No caso do sistema Multisplit, se o utilizador decidir utilizar o aquecimento central por convetores, as variáveis de aquecimento são adicionadas.

Tabela 2.3: *Outputs* da simulação dinâmica obtidos para cada sistema.

Sistema	Output
Convetores	Energia utilizada na caldeira Energia elétrica consumida pela bomba Energia térmica libertada pelo convetor
Multisplit	Energia elétrica consumida Energia térmica de aquecimento da zona Energia térmica de arrefecimento da zona
Piso Radiante	Energia utilizada na caldeira Energia elétrica consumida pela bomba Energia térmica libertada pelo piso radiante

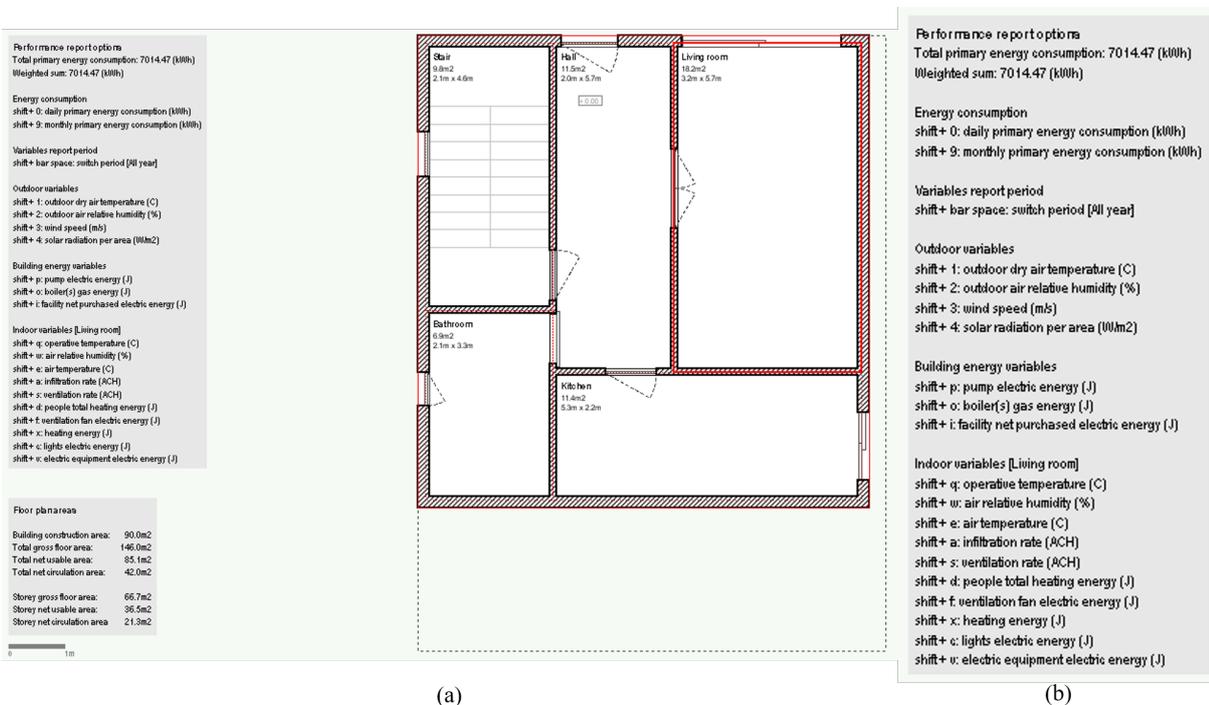


Figura 2.16: Interface Gráfica

(a) Janela apresentada ao utilizador (*GUI*), (b) Listagem dos relatórios gerados.

é a energia antes de ser extraída, transformada e transportada.

3. Casos de Estudo

Neste capítulo são descritos os testes de verificação dos sistemas implementados. Irão ser expostas as condições dos casos de estudo: as localizações, os edifícios e suas características, a ocupação e a forma de avaliar o desconforto térmico.

Os ficheiros *IDF* gerados pela ferramenta *SAPTtool* para a simulação dinâmica de todos os casos de estudo estão disponíveis na plataforma de acesso livre *figshare* (Bernardo *et al.*, 2017).

3.1 Localizações

As simulações foram feitas para vários locais em Portugal: Bragança, Porto, Coimbra Lisboa, Évora, Faro, Lajes e Funchal. Os ficheiros climáticos para estes testes foram obtidos do sítio oficial de internet do programa EnergyPlus (2017).

As regiões climáticas foram determinadas recorrendo ao Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013 do Diário da Republica N.º 234.

Na Tabela 3.1 mostra os locais, as suas coordenadas geográficas, regiões climáticas a que pertencem, a temperatura exterior média do mês mais frio da estação de aquecimento($T_{ext,i}$) e a temperatura exterior média para os meses de arrefecimento($T_{ext,v}$).

Tabela 3.1: Coordenadas geográficas das simulações.

Nome	Localização			Clima		$T_{ext,i}$ (°C)	$T_{ext,v}$ (°C)
	Latitude (°)	Logitude (°)	Altitude(m)	Inverno	Verão		
Bragança	41.80	-6.73	692.00	I3	V2	5.45	21.42
Porto	41.23	-8.68	73.00	I1	V2	10.05	20.90
Coimbra	40.20	-8.42	140.00	I2	V2	9.34	20.90
Lisboa	38.73	-9.15	71.00	I1	V3	10.95	22.08
Évora	38.57	-7.90	321.00	I1	V3	9.60	24.30
Faro	37.02	-7.97	4.00	I1	V3	12.15	23.10
Lajes	38.77	-27.10	55.00	I1	V2	14.09	21.03
Funchal	32.65	-16.92	380.00	I1	V2	14.80	20.20

3.2 Edifícios em estudo

Os edifícios em estudo foram gerados pelo *EPSAP*. Os edifícios são casas unifamiliares de piso térreo composto por um hall de entrada, cozinha, sala de estar, uma casa de banho, um corredor, dois quartos duplos, um quarto simples e uma casa de banho privada.

Na Figura 3.1 são apresentados os dois edifícios gerados pelo *EPSAP* e a Tabela 3.2 mostra as áreas de pavimento das divisões. O tipo de edifício das duas plantas é o mesmo, sendo apenas diferenciados pela geometria. O edifício (a) é mais compacto e tem uma forma em “L”, enquanto o formato do edifício (b) é em “T”.

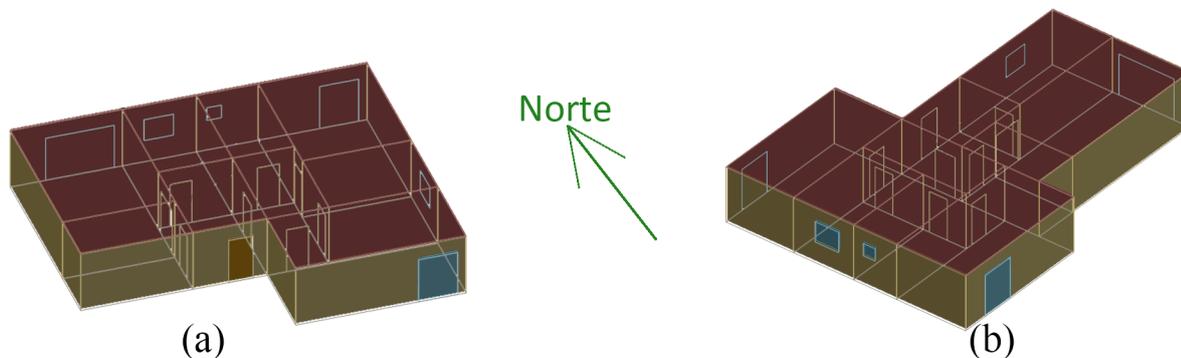


Figura 3.1: Apresentação 3D dos edifícios usados nos testes.

Tabela 3.2: Áreas de pavimento para todas as divisões dos dois edifícios em estudo

Nº	Espaço	Área chão (m ²)	
		Edifício (a)	Edifício (b)
0	Hall entrada	12.3	10.6
1	Sala de estar	28.6	28.2
2	Cozinha	12.6	17.1
3	Casa de banho	9.6	7.7
4	Corredor	10.1	12.1
5	Quarto duplo	23.2	22.6
6	Quarto duplo	23.4	23.2
7	Quarto simples	13.8	12.8
8	Casa de banho	10.4	9.0

3.2.1 Elementos construtivos

Os elementos construtivos dos edifícios foram criados de forma a satisfazer os valores de referência indicados na Portaria n.º 349-B/2013 (Diário da República, 2013c) sobre Regula-

mento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação, e das posteriores alterações a este regulamento.

Os requisitos para cada local estão expostos na Tabela 3.3 bem como os valores dos elementos para os edifícios em estudo. A descrição detalhada dos elementos construtivos estão no Anexo A.

Tabela 3.3: Requisitos dos elementos construtivos.

Localização Nome	Zona Climática		U_{ref} (W/m ² °C)			$g_{t\ max}$
	Inverno	Verão	Ele. verticais	Ele. horizontais	Envidraçados	Envidraçados
Bragança	I3	V2	0.35	0.30	2.20	0.56
Porto	I1	V2	0.50	0.40	2.80	0.56
Coimbra	I2	V2	0.40	0.35	2.40	0.56
Lisboa	I1	V3	0.50	0.40	2.80	0.50
Évora	I1	V3	0.50	0.40	2.80	0.50
Faro	I1	V3	0.50	0.40	2.80	0.50
Lajes	I1	V2	0.70	0.45	2.80	0.56
Funchal	I1	V2	0.70	0.45	2.80	0.56
Edifícios Estudo			0.31	0.29	2.20	0.50

3.2.2 Ocupação e equipamentos

Definiu-se para os espaços uma ocupação típica de um edifício residencial, estando desocupado durante o dia. Os valores da ocupação estão descritos na Tabela 3.4 e os horários da ocupação e equipamentos são apresentados na Tabela B.2 no Anexo B.

Tabela 3.4: Descrição da ocupação, iluminação e equipamentos.

N ^o	Espaço Designação	Ocupação N.º Pessoas	Potência Eq. Elétricos (W)	Iluminação (W/m ²)
0	Hall entrada	2	20	3.2
1	Sala de estar	5	350	7.5
2	Cozinha	2	1440.4	5.0
3	Casa de banho	1	100	0.5
4	Corredor	2	20	3.2
5	Quarto duplo	2	250	7.5
6	Quarto duplo	2	250	7.5
7	Quarto simples	1	250	7.5
8	Casa de banho	1	100	0.5

3.2.3 Modos de ventilação

Foi assumido que todos os espaços têm apenas infiltrações de ar a uma taxa de 0.2 renovações por hora. Foi simulado a abertura de janelas promovendo uma ventilação natural somando à ao

valor da infiltração 1.5 renovações por hora, quando a temperatura interior é superior a 20 °C e se a temperatura exterior for pelo menos 2 °C inferior.

3.2.4 Espaços a climatizar

Os sistemas de climatização são aplicados apenas às zonas com maior ocupação. Os dois quartos duplos, o quarto simples e a sala de estar serão climatizados, enquanto as restantes divisões como corredores, casas de banho e a cozinha não terão qualquer sistema de climatização.

3.3 Avaliação do conforto

Para avaliar o desempenho com base do nível de conforto térmico, foram adoptadas as recomendações da norma EN 15251 CEN (2007). Sobre o conforto térmico a norma estabelece duas formas de limitar as condições de conforto. Um é o método estático que limita a temperatura operativa mínima no Inverno e a temperatura operativa máxima no Verão. A segunda forma é um método adaptativo onde a banda de conforto depende da temperatura exterior, permitindo em dias mais quentes uma maior tolerância a temperaturas operativa mais elevadas no interior do edifício. O método adaptativo só é válido para edifícios sem sistemas mecânicos de arrefecimento.

Neste trabalho são comparados diferentes sistemas de climatização, por isso o desconforto térmico será avaliado utilizando o método estático, de forma semelhante ao algoritmo *FPOP*. Os graus hora de desconforto é o resultado da soma da diferença horária entre a temperaturas operativa nos espaços e o limiar da operativas de conforto. Este indicador de desconforto é calculado através das seguintes equações (Rodrigues *et al.* , 2014b):

$$Des = \sum_{i=1}^{N_d} \sum_{t=1}^{N_t} (f_{diff}(T_i(t), T_{max}, T_{min}) \times O_i(t)) \quad (3.1)$$

$$f_{diff}(T_i(t), T_{max}, T_{min}) = \begin{cases} T_i(t) - T_{max} & \text{se } T_i(t) > T_{max} \\ T_{min} - T_i(t) & \text{se } T_{min} > T_i(t) \\ 0 & \text{se } T_{max} > T_i(t) > T_{min} \end{cases} \quad (3.2)$$

$$T_i(t) = 0.5T_{ar} + 0.5T_{mr} \quad (3.3)$$

Na equação 3.1 é calculado os graus hora de desconforto como sendo a soma para todas as horas (t) e para todos os espaços (i) das diferenças de temperatura (f_{diff}) multiplicado pelo fator de ocupação ($O_i(t)$). As diferenças de temperatura são calculadas pela equação 3.2.

A temperatura operativa ($T_i(t)$) é obtida como *output* da simulação dinâmica. O *e+* calcula a temperatura operativa como sendo a média entre a temperatura do ar na zona (T_{ar}) e a temperatura média radiante do espaço (T_{mr}), como mostra a equação 3.3 de Berkeley Lab (2016c).

Neste trabalho a banda de temperaturas de conforto será entre os 20 °C (T_{min}) e 25 °C (T_{max}) e o fator de ocupação é igual a 1 quando o espaço está ocupado e 0 quando está desocupado.

4. Resultados e discussão

Inicialmente foram realizadas simulações dos edifícios sem climatização, a fim de permitir observar o desconforto térmico. A Figura 4.1 mostra os valores de graus hora de desconforto para os dois edifícios em todas as localizações.

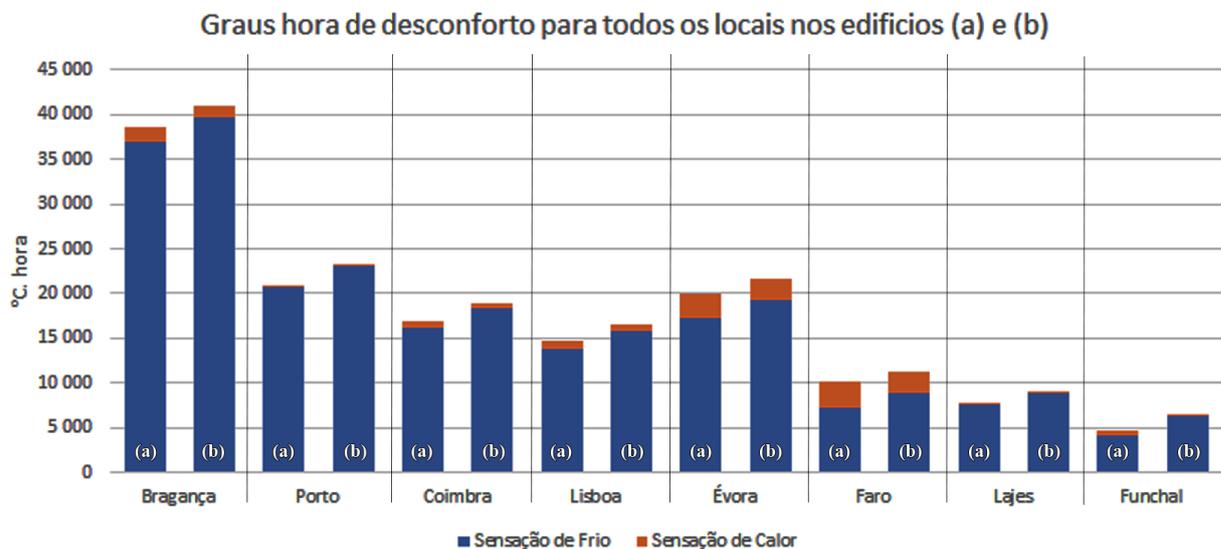


Figura 4.1: Graus hora de desconforto para os edifícios sem climatização.

Analisando a figura, conclui-se que para todos os locais estudados existe uma maior necessidade de aquecimento do que arrefecimento. O Porto é a região com os menores necessidades de arrefecimento com 138 graus hora de desconforto, seguida pelas Lajes com 226 graus hora. Observa-se também que localizações mais afastadas do litoral, Bragança e Évora, tem níveis de desconforto superior e que localizações mais a sul de Portugal tem necessidades de arrefecimento superiores. As regiões autónomas, Lajes nos Açores e Funchal na Madeira, são os locais com menos desconforto térmico.

O edifício (b), em forma de “T”, tem valores superiores de graus hora de desconforto do que o edifício (a) para todas as localizações. A diferença máxima e mínima são de 2423 e 1230 graus hora e ocorrem no Porto e Faro respetivamente. A diferença é justificada pelo facto do edifício (b) ter uma maior área de parede exterior.

Como exemplo, na Figura 4.2 apresenta-se para todas as localizações a temperatura exterior e a humidade absoluta do local e a temperatura operativa na zona n.º6 (quarto duplo). Esta figura mostra como varia a temperatura e humidade nos locais e como isso afeta a temperatura

operativa no interior dos edifícios.

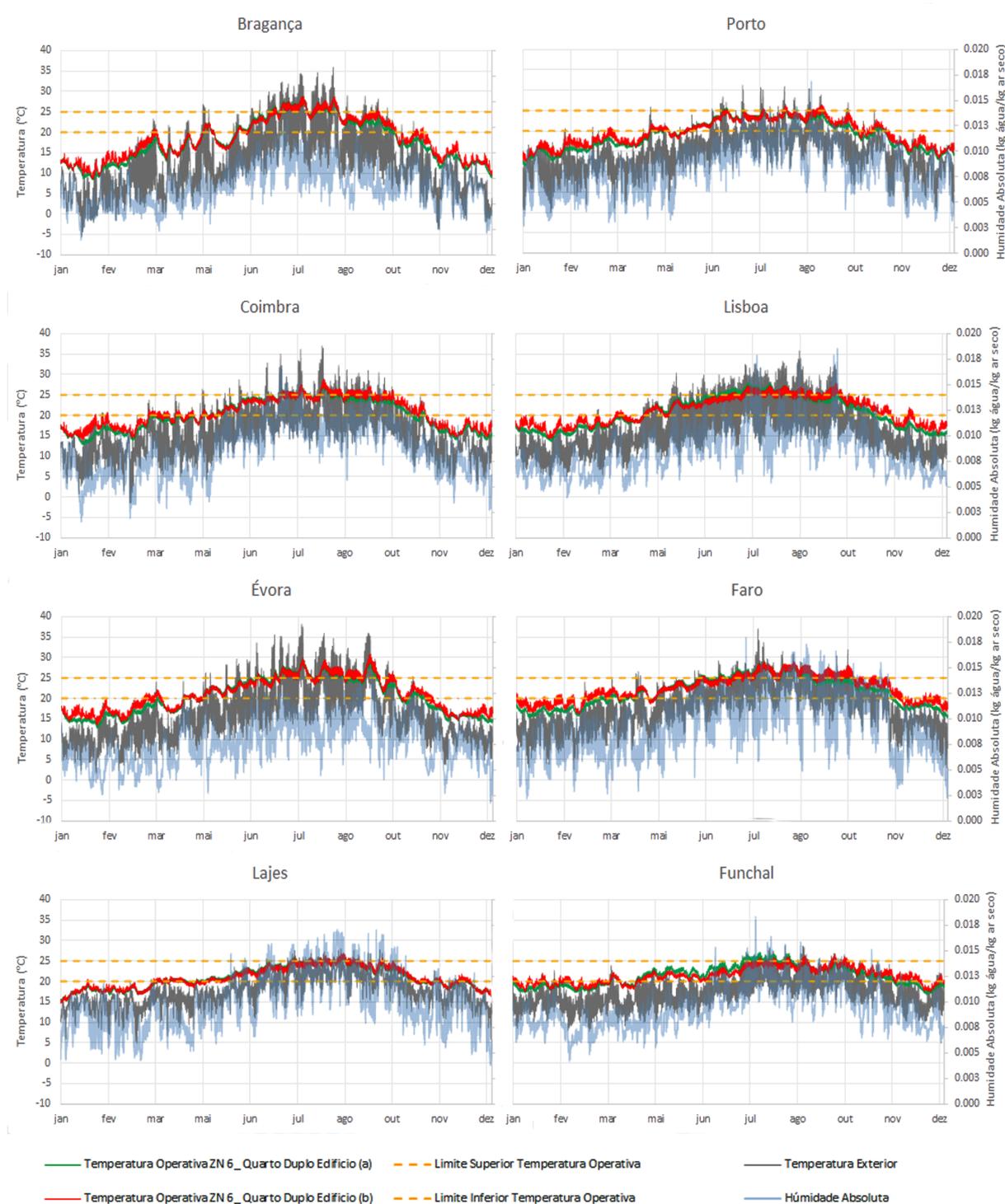


Figura 4.2: Gráficos de temperatura e humidade absoluta exterior e temperaturas operativas no interior da zona n.º 6, para os edifícios sem climatização.

Bragança e Évora são os locais onde as temperaturas exteriores variam mais ao longo do ano, caracterizando-os com invernos de temperaturas baixas e o verões de temperaturas elevadas. Lajes e Funchal são climas amenos, mas com humidade relativa mais elevada ao longo do ano. Nestas regiões as temperaturas operativas no interior mantem-se praticamente sempre nos limites de conforto definido.

Comparando o comportamento da temperatura operativa com a temperatura exterior verifica-se que a primeira é mais estável ao longo de todo o ano. A estabilidade da temperatura no interior dos edifícios é justificada pela inércia térmica do edifício que permite acumular energia nos elementos construtivos, durante o dia, e libertar essa energia quando a temperatura do ar diminui durante a noite.

Análise aos sistemas de climatização

Foram aplicados os sistemas de climatização para satisfazer as necessidades de conforto térmico. As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam uma comparação dos graus hora de desconforto para cada sistema.

A potência dos sistemas foram calculadas pelo $e+$ de acordo com as cargas térmicas dos edifícios, ou seja para cada edifício em cada localização os sistemas tem a mesma potência útil.

Observando a Tabela 4.1 verifica-se que a forma de climatização mais eficaz no aquecimento é o sistema *multisplit*.

De salientar também que a diferença entre o aquecimento por convetores e piso radiante é muito pequena. Num caso real, o piso radiante originaria um menor gradiente de temperaturas no espaço do que os convetores porque o calor seria libertado de uma forma uniforme em todo o espaço. O $e+$ faz os cálculos em termos de balanço térmico e simplifica o ar dos espaços a um bloco de mistura perfeita, considerando que no interior dos espaços todo o ar tem as mesmas propriedades.

Apesar dos sistemas de climatização diminuírem significativamente o desconforto, nos locais com climas mais frios os graus hora de desconforto para a sensação de frio são elevados. Estes valores de desconforto devem-se à forma como os sistemas são controlados e como é avaliado o desconforto. Os sistemas funcionam para que a temperatura média do ar seja superior a 20°C e o desconforto é avaliado com a temperatura operativa do espaço.

Tabela 4.1: Redução da sensação de frio com a aplicação dos sistemas de climatização.

Edifício (a) Localização	°C.hora Frio s/ Climatização	Redução do desconforto		
		Convetores	Piso Radiante	Multisplit
Bragança	36913.58	66.2%	66.9%	68.9%
Porto	20672.14	69.4%	70.3%	72.4%
Coimbra	16148.24	70.1%	70.6%	71.7%
Lisboa	13754.90	66.6%	67.0%	69.9%
Évora	17345.09	68.2%	69.9%	69.7%
Faro	7212.18	67.1%	69.8%	60.3%
Lajes	7520.94	66.9%	69.3%	73.1%
Funchal	4129.90	64.5%	64.3%	68.9%

Edifício (b) Localização	°C.hora Frio s/ Climatização	Redução do desconforto		
		Convetores	Piso Radiante	Multisplit
Bragança	39694.88	65.7%	65.8%	68.3%
Porto	23048.62	68.2%	69.0%	73.6%
Coimbra	18327.44	67.2%	69.2%	69.8%
Lisboa	15845.10	65.7%	66.4%	66.8%
Évora	19288.83	66.9%	67.9%	67.7%
Faro	8856.96	67.6%	68.0%	71.8%
Lajes	8836.66	66.0%	67.3%	69.6%
Funchal	6278.53	65.7%	66.8%	69.0%

A Figura 4.3 mostra a evolução da temperatura do ar, temperatura média radiante e da temperatura média do ar para a zona n.º 6 (quarto duplo), num dia de inverno em Bragança com o sistema de aquecimento por convetores ativo. Esta figura exemplifica que apesar do sistema funcionar, a temperatura do ar atingir os 20°C e a temperatura operativa do espaço não atinge os valores de conforto definidos porque a temperatura média radiante é muito baixa.

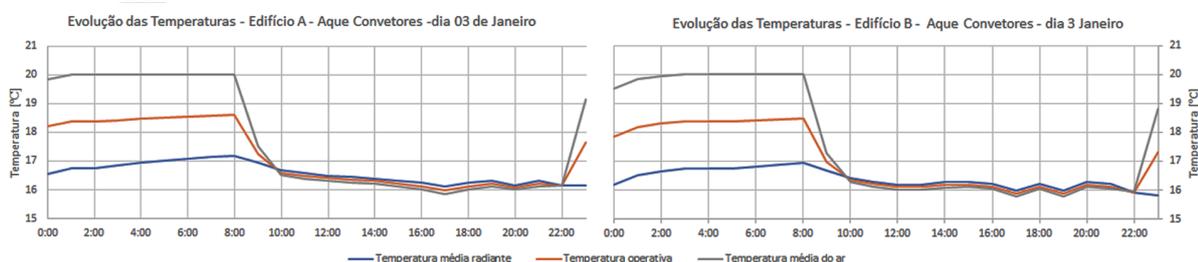


Figura 4.3: Gráficos da evolução das temperatura da zona n.º 6 num dia de Inverno para Bragança.

No *e+* os sistemas são controlados pela temperatura do ar, por isso a solução passaria por definir *setpoint* do sistema mais elevado para compensar a baixa temperatura radiante, o que implicaria ter diferentes *setpoints* para cada caso.

O sistema *multisplit* é o único modo de climatização com capacidade para arrefecer o espaço,

como tal é o único que diminui o desconforto causado pelo excesso de calor no espaço, Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Redução da sensação de calor com a aplicação dos sistemas de climatização.

Edifício (a) Localização	°C.hora Calor s/ Climatização	Redução do desconforto		
		Convetores	Piso Radiante	Multisplit
Bragança	1690.45	-2.8%	-2.9%	68.1%
Porto	85.43	-5.3%	-5.8%	71.5%
Coimbra	737.36	-12.5%	-12.6%	64.1%
Lisboa	1048.22	-0.2%	-0.4%	48.8%
Évora	2639.26	-3.8%	-4.2%	63.1%
Faro	2881.22	-3.9%	-3.9%	65.3%
Lajes	226.56	-13.4%	-13.4%	73.2%
Funchal	460.25	-11.3%	-11.4%	75.5%

Edifício (b) Localização	°C.hora Calor s/ Climatização	Redução do desconforto		
		Convetores	Piso Radiante	Multisplit
Bragança	1182.97	-4.4%	-4.7%	60.0%
Porto	134.53	-3.3%	-3.1%	85.6%
Coimbra	607.96	-15.1%	-15.2%	61.9%
Lisboa	575.27	-16.0%	-16.5%	47.4%
Évora	2246.47	-4.1%	-4.5%	57.4%
Faro	2466.63	-3.1%	-3.1%	59.5%
Lajes	202.15	-16.0%	-15.8%	70.3%
Funchal	173.80	-6.2%	-6.7%	65.2%

De notar que os sistemas de aquecimentos aumentam ligeiramente a sensação de calor em relação ao edifício sem climatização. Este efeito é provocado pela inércia térmica do edifício. Se existe necessidade de aquecimento os sistemas libertam calor nos espaços e quando essa necessidade termina os sistemas desligam. Apesar dos sistemas desligados, a inércia do edifício atenua a diminuição da temperatura.

Funcionamento dos Sistemas

Para avaliar o comportamento dos sistemas, na Figura 4.4 compara-se a energia libertada durante o aquecimento e a energia removida no arrefecimento entre os vários sistemas e o sistema ideal. Na comparação foi usada a mesma zona de estudo no clima mais desfavorável, Bragança.

O *e+* permite a definição de um sistema ideal (*HVACTemplate:Zone:IdealLoadsSystem*), um sistema sem limitação de potência nem rendimento, capaz de libertar ou remover a energia térmica necessária em cada instante.

Nos dois edifícios, os sistemas de climatização implementados acompanham a tendência do

sistema ideal. Durante os dias de maiores necessidades de aquecimento, dias em que o sistema ideal liberta mais energia, nenhum dos sistemas responde de uma forma perfeita. O piso radiante é o sistema que liberta maior quantidade de energia ao longo de todo o ano e o *Multisplit* é o que liberta menos. Durante o arrefecimento, o *Multisplit* também acompanha o sistema ideal, tal como no período de aquecimento não consegue acompanhar os picos de necessidade.

Durante os arranques o sistema ideal, não tem qualquer limitação em termos de potência máxima, permitindo o rápido aquecimento ou arrefecimento dos espaços. Os equipamentos reais necessitam de mais tempo para atingir os *setpoints*, pois têm equipamentos com uma potência definida.

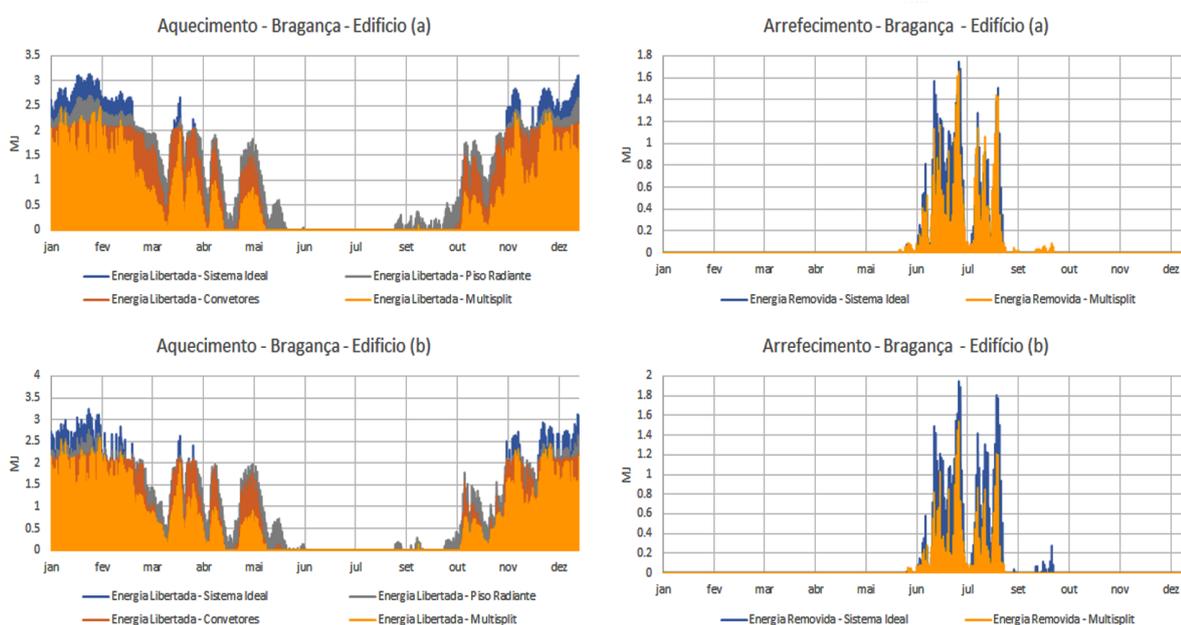


Figura 4.4: Gráficos com a energia libertada e removida pelos vários sistemas.

Consumo de Energia Primária

A análise do consumo de energia dos sistemas foi necessário converter em energia primária permitindo somar e comparar valores da energia elétrica e de gás natural dos sistemas. Os fatores utilizados foram obtidos do despacho n.º 15793-D/2013, onde $1kWh$ de energia elétrica equivale a $2.5kWh$ de energia primária e o fator de conversão para combustíveis sólidos, gasoso e líquidos não renováveis é de 1.

A fim de facilitar a comparação entre os vários sistemas, na Tabela 4.3 é apresentada a

Energia Primária consumida por cada $^{\circ}\text{C}$.hora de redução de desconforto para cada sistema.

Analisando a tabela verifica-se que para locais com menores necessidades de arrefecimento o sistema multisplit é o que necessita de menos energia para diminuir o desconforto térmico. Nos locais onde há maiores necessidades de arrefecimento, este sistema deixa de ser o mais eficaz a reduzir o desconforto, necessitando de mais energia por $^{\circ}\text{C}$.hora de desconforto reduzido.

Tabela 4.3: Energia Primária consumida por cada $^{\circ}\text{C}$.hora de desconforto reduzido, para todos os locais e edifícios em estudo.

Edifício (a) Localização	kWh Energia Primária por $^{\circ}\text{C}$.hora desconforto reduzido		
	Convetores	Piso Radiante	<i>Multisplit</i>
Bragança	0.117	0.122	0.099
Porto	0.112	0.127	0.076
Coimbra	0.114	0.132	0.093
Lisboa	0.112	0.120	0.093
Évora	0.115	0.121	0.193
Faro	0.114	0.137	0.142
Lajes	0.114	0.187	0.084
Funchal	0.104	0.155	0.106

Edifício (b) Localização	kWh Energia Primária por $^{\circ}\text{C}$.hora desconforto reduzido		
	Convetores	Piso Radiante	<i>Multisplit</i>
Bragança	0.117	0.122	0.092
Porto	0.111	0.123	0.070
Coimbra	0.112	0.119	0.088
Lisboa	0.109	0.115	0.097
Évora	0.114	0.120	0.105
Faro	0.110	0.133	0.121
Lajes	0.119	0.194	0.075
Funchal	0.099	0.126	0.102

5. Conclusão

A literatura científica salienta que a importância do tema simulação dinâmica, para a avaliação do comportamento energético e desse modo importante para tomar decisões de melhoria energética de uma forma informada.

A realização deste trabalho cumpriu com os objetivos propostos: a integração dos sistemas de aquecimento por convetor, aquecimento por piso radiante e sistema *multisplit* na ferramenta *SAPTool*. Esta integração permite ao utilizador da ferramenta aplicar diferentes sistemas de climatização e assim avaliar a melhor opção.

Durante o processo de implementação dos sistemas o uso de objetos do tipo *HVACTemplate* facilita a integração porque requer menos informação, no entanto a utilização deste tipo de objetos leva a uma redução na versatilidade dos sistemas a definir.

Na realização dos casos de estudo verifica-se que os climas com maiores necessidades de climatização são os que estão mais afastados da costa, Bragança e Évora, e as regiões autónomas têm as menores necessidades. Observa-se também que as regiões do Porto e Lajes são as que têm a menor necessidade de arrefecimento. Comparando as necessidades dos edifícios (a) e (b), em forma de “L” e “T” respetivamente, verifica-se que o segundo tem maiores valores de graus hora de desconforto, porque o edifício (b) tem maior área de parede exterior.

A aplicação dos sistemas de climatização diminuiu o desconforto sentido nos edifícios. Em termos de sensação de frio o sistema *multisplit* é o sistema mais eficaz, seguido pelo piso radiante e, em último, o sistema por convetores. Visto que o EnergyPlus simplifica o ar da zona a climatizar como uma mistura perfeita, o conforto oferecido pelo sistema de piso radiante é muito semelhante ao do aquecimento por convetores.

O único sistema que diminui a sensação de calor é o sistema de *multisplit*, pois os outros sistemas só podem aquecer. Na realização dos casos com os sistemas de climatização aplicados verificou-se que nem sempre a temperatura operativa atinge a gama de conforto definida. Apesar dos sistemas de climatização funcionarem e a temperatura do ar atingir os 20°C, como definido no termostato, nos dias mais frios as paredes do edifício ficam a uma temperatura inferior, influenciando a temperatura média radiante dos espaços.

Comparando os sistemas em termos de energia libertada para o espaço verifica-se que nenhum

dos sistemas é capaz de acompanhar o sistema ideal quando existe picos de necessidade. O sistema ideal não tendo limite de potência, é capaz de libertar a energia necessária em qualquer momento enquanto os sistemas reais estão limitados à potência máxima do equipamento.

Em locais onde a necessidade de arrefecimento é baixa, o sistema de *multisplit* é o que consome menos energia primária para reduzir o desconforto. Em regiões que necessitam mais arrefecimento, o sistema *multisplit* consome mais. O arrefecimento consome mais energia primária por °C.hora de desconforto reduzido do que o aquecimento. Analisando os sistemas de aquecimento por convetores e por piso radiante, verifica-se que o segundo consome mais energia primária. O piso radiante liberta mais energia nos espaços e oferece maior redução de desconforto do que o sistema por convetores, por isso consome mais energia.

O sistema *multisplit* é o que oferece maior conforto dos três, salientado que é o único que tem capacidade para arrefecer os espaços. Além disso, este sistema é o que consome menos energia primária por °C.hora de desconforto reduzido. Apesar destas vantagens a escolha do sistema também terá de ter em conta o valor do investimento e o custo do funcionamento, que não foi avaliado neste trabalho.

Referências Bibliográficas

- Al-Homoud, Mohammad Saad. 2001. Computer-aided building energy analysis techniques. *Building and Environment*, **36**(4), 421–433.
- Attia, Shady, Gratia, Elisabeth, De Herde, André, & Hensen, Jan L.M. 2012. Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design. *Energy and Buildings*, **49**, 2–15.
- Balaras, Constantinos A., Drousa, Kalliopi, Dascalaki, Elena, & Kontoyiannidis, Simon. 2005. Heating energy consumption and resulting environmental impact of European apartment buildings. *Energy and Buildings*, **37**(5), 429–442.
- Berkeley Lab. 2016a. *EnergyPlus - Engineering Reference*.
- Berkeley Lab. 2016b. *EnergyPlus- Plant Application Guide*.
- Berkeley Lab. 2016c. *EnergyPlus Input Output Reference*.
- Bernardo, André, Rodrigues, Eugénio, & Gaspar, Adélio Rodrigues. 2017. *EnergyPlus Input Data Files used to test HVAC systems in two buildings in eight different climate regions of Portugal*.
- CEN. 2007. DS/EN 15251: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. *Geneva: International Standard Organization*, 54.
- Crawley, Drury B, Hand, Jon W, Kummert, Michaël, & Griffith, Brent T. 2008. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Part Special: Building Performance Simulation*, **43**(4), 661–673.
- Diário da República. 2013a. Decreto-Lei n.º.118/2013. *Diário da República N.º 159, 1.ª série*, 4988–5005.
- Diário da República. 2013b. Despacho n.º 15793/2013, de 3 de dezembro. *Diário da República*, **2.ª série**(234), 26–31.
- Diário da República. 2013c. Portaria n.º 349-B/2013 - Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH)—Requisitos de conceção para edifícios novos e intervenções. *Diário da República N.º 232, 1.ª série*, **11**(29), 18–29, Lisboa, Portugal (in Portuguese).
- EnergyPlus. 2017. *Weather Data—EnergyPlus*.
- IEA. 2016. Energy Efficiency Indicators - Highlights. *Energy Efficiency Indicators 2016*.
- Nguyen, Anh-Tuan, Reiter, Sigrid, & Rigo, Philippe. 2014. A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy*, **113**, 1043–1058.
- Pereira, M.F. 2015. *Otimização da geometria de plantas de edifícios para satisfação de requisitos de iluminação, conforto térmico e consumo energético*. Ph.D. thesis, Universidade de Coimbra.

- Rodrigues, Eugénio, Gaspar, Adélio Rodrigues, & Gomes, Álvaro. 2013a. An approach to the multi-level space allocation problem in architecture using a hybrid evolutionary technique. *Automation in Construction*, **35**, 482–498.
- Rodrigues, Eugénio, Gaspar, Adélio Rodrigues, & Gomes, Álvaro. 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.
- Rodrigues, Eugénio, Gaspar, Adélio Rodrigues, & Gomes, Álvaro. 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.
- Rodrigues, Eugénio, Gaspar, Adélio Rodrigues, & Gomes, Álvaro. 2014a. Automated approach for design generation and thermal assessment of alternative floor plans. *Energy and Buildings*, **81**, 170–181.
- Rodrigues, Eugénio, Gaspar, Adélio Rodrigues, & Gomes, Álvaro. 2014b. Improving thermal performance of automatically generated floor plans using a geometric variable sequential optimization procedure. *Applied Energy*, **132**, 200–215.
- Soares, N., Bastos, J., Pereira, L. Dias, Soares, A., Amaral, A.R., Asadi, E., Rodrigues, E., Lamas, F.B., Monteiro, H., Lopes, M.A.R., & Gaspar, A.R. 2017. A review on current advances in the energy and environmental performance of buildings towards a more sustainable built environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **77**(February 2016), 845–860.
- Taleghani, Mohammad, Tenpierik, Martin, Kurvers, Stanley, & Van Den Dobbelen, Andy. 2013. A review into thermal comfort in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **26**, 201–215.

A. Elementos Construtivos

Tabela A.1: Descrição da parede exterior.

i	Material	e_i (m)	ρ_i (kg/m ³)	λ_i (W/m ² °C)	Cp_i (J/kg°C)	R_i (m ² °C/W)
1	Aca. Cappoto	0.002	1700	0.700	1000	0.003
2	EPS - Cappoto	0.080	15	0.040	1400	2.000
3	Bloco térmico	0.250	680	0.268	1000	0.935
4	Placa de gesso	0.020	950	0.220	840	0.091
				Resistência Interna Rsi	Fluxo Horizontal	0.130
				Resistência Externa Rse	Fluxo Horizontal	0.040
Somatórios:		0.352				3.198
				U (W/m ² °C)		0.31

Tabela A.2: Descrição da cobertura.

i	Material	e_i (m)	ρ_i (kg/m ³)	λ_i (W/m ² °C)	Cp_i (J/kg°C)	R_i (m ² °C/W)
1	Seixo	0.015	881	1.440	1674	0.010
2	Tela imp.	0.010	1121	0.190	1674	0.053
3	Isolamento	0.120	91	0.040	837	3.000
4	Betão Denso	0.200	2246	1.730	837	0.116
5	Placa de gesso	0.020	950	0.220	840	0.091
				Resistência Interna Rsi	Fluxo Vertical Ascendente	0.100
				Resistência Externa Rse	Fluxo Vertical Ascendente	0.040
Somatórios:		0.352				3.410
				U (W/m ² °C)		0.29

Tabela A.3: Descrição do piso em contacto com o solo.

i	Material	e_i (m)	ρ_i (kg/m ³)	λ_i (W/m ² °C)	Cp_i (J/kg°C)	R_i (m ² °C/W)
1	Impermeabilização	0.001	1200	0.14	1000	0.007
2	Betão Denso	0.200	2246	1.730	837	0.116
3	Isolamento	0.080	32	0.040	836	2.000
4	Enchimento	0.020	1600	0.800	840	0.025
5	Regularização	0.010	950	0.220	840	0.045
6	Madeira	0.020	825	0.200	2385	0.100
				Resistência Interna Rsi	Fluxo Vertical Descendente	0.170
				Resistência Externa Rse	NA	0.000
Somatórios:		0.352				2.456
				U (W/m ² °C)		0.41

B. Ocupação Iluminação e Equipamentos

Tabela B.1: Descrição da ocupação, iluminação e equipamentos.

N. ^o	Espaço Designação	Ocupação N. ^o Pessoas	Potência Eq. Elétricos (W)	Iluminação (W/m ²)
0	Hall entrada	2	20	3.2
1	Sala de estar	5	350	7.5
2	Cozinha	2	1440.4	5.0
3	Casa de banho	1	100	0.5
4	Corredor	2	20	3.2
5	Quarto duplo	2	250	7.5
6	Quarto duplo	2	250	7.5
7	Quarto simples	1	250	7.5
8	Casa de banho	1	100	0.5

Tabela B.2: Horários de ocupação, iluminação e de utilização de equipamentos.

N.º	Espaço Designação	Horas de ocupação / utilização																									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24		
0	Hall entrada								T									T									
1	Sala de estar																										
2	Cozinha													T					T								
3	Casa de banho																										
4	Corredor													T					T								
5	Quarto duplo	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
6	Quarto duplo	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
7	Quarto simples	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
8	Casa de banho																										

Legenda:
 Apenas Ocupação P
 Pessoas, Ilu. e Eq T