

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



**Ciências**  
**ULisboa**

**Simulação energética em edifícios: Método para automatizar os perfis de utilização e a calibração do modelo**

Cláudia Sofia Marques Gomes

**Mestrado Integrado Engenharia da Energia e do Ambiente**

Dissertação orientada por:  
Doutor Armando Teófilo dos Santos Pinto  
Professor Doutor Fernando Vítor Marques da Silva

2019

– PÁGINA EM BRANCO –

## **Agradecimentos**

Ao Doutor Armando Pinto, orientador desta dissertação, e ao Professor Doutor Fernando Marques da Silva, coorientador desta dissertação, pela oportunidade de desenvolver este desafiante e ambicioso trabalho e por toda a confiança, dedicação e disponibilidade demonstradas ao longo desta caminhada.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), nomeadamente aos Departamentos de Edifícios e Hidráulica, por todo o acolhimento e pela constante e sempre pronta colaboração no levantamento de informação do edifício em estudo. Um especial agradecimento à Mariana e ao António por toda a ajuda e trabalho de equipa.

À Faculdade de Ciências da Faculdade de Lisboa, pelos constantes desafios lançados, e a todos os docentes, investigadores e não docentes que enriqueceram o meu caminho e me transmitiram um grande amor pela Ciência.

A todos os amigos que me acompanharam, lado a lado, obrigada por todos os momentos. Em especial, um agradecimento ao Frederico, ao Jhon, à Ana, ao Rafael, ao Ricardo, à Inês e à Ana Sara pela amizade.

A toda a minha família, e em especial aos meus pais, por terem estado sempre tão presentes, todos estes anos. Obrigada por todo o suporte e amor incondicional.

À minha irmã, por todo o apoio, todos os dias.

Ao Carlos, por todas as certezas.

## Resumo

Os modelos de simulação energética em edifícios assumem um papel fundamental na previsão do consumo energético, na avaliação das poupanças de energia obtidas pela aplicação de medidas de melhoria e na certificação energética. Para se ter elevado grau de confiança, é essencial que o modelo represente de forma rigorosa o comportamento atual do edifício em estudo, sendo por isso necessário calibrá-lo de modo a reduzir as diferenças encontradas entre os resultados da simulação e da medição.

Estas diferenças são resultado do grande número de parâmetros que definem um edifício e da respetiva incerteza, como por exemplo as características da envolvente e dos sistemas técnicos instalados e sobretudo os perfis de utilização, que têm grande influência no resultado da simulação. A natureza estocástica dos ocupantes e a sua interação com o edifício é ainda tipicamente condensada em perfis homogêneos e pré-definidos, ignorando a diversidade e interdependência dos diversos comportamentos existentes ao longo do dia, levando por isso a consumos simulados bem distintos dos consumos reais.

A presente dissertação propõe uma metodologia para se obterem perfis de utilização, de iluminação e de equipamentos, para edifícios de escritórios, com o objetivo de minimizar as diferenças verificadas entre a medição e a simulação. Esta metodologia tem por base a variação horária e diária dos perfis sendo que através da utilização de um algoritmo de otimização (algoritmo genético - NSGA-II) definido por duas funções objetivo, que avaliam as diferenças registadas entre consumos simulados e medidos (MBE e CVRMSE), é possível selecionar os perfis que conduzem à calibração do modelo.

Apesar desta metodologia permitir reduzir os erros associados aos perfis de utilização, apenas é verificada a condição de calibração do modelo de simulação ( $|MBE| \leq 10\%$  e  $CVRMSE \leq 30\%$ ) quando esta é aliada a um conhecimento geral do comportamento dos ocupantes do edifício.

**Palavras-Chave:** Calibração, Simulação energética, Perfis de utilização, Edifícios de escritórios, Algoritmo Genético.

## Abstract

Building energy simulation models play a key role in predicting energy consumption as well as evaluating the extent to which improvement strategies contribute to energy savings. However, in order to be reliable, simulation models need to display the current behaviour of each building as accurately as possible. In other words, they need to be calibrated to reduce the gap between simulation and measurement outcomes.

The difference between simulation and measurement outcomes emerge from numerous parameters of buildings. These parameters include the features of buildings envelope, local operating systems and user profiles, with the latter contributing the most to simulation outcomes. The stochastic nature of its users and how they interact with the building tends to be shaped by homogenous and pre-determined profiles. These profiles overlook the diversity and complexity of how individuals behave in a building daily, leading to unrealistic estimated usage of energy.

The present thesis proposes a methodology that allows the development of user profiles, lighting and electrical devices, for office buildings, with the aim to reduce the gap between simulation and measurement outcomes. The methodology is based on hourly and daily variations of profiles according to an optimisation algorithm (the genetic algorithm NSGA-II). This algorithm comprises two objective functions which measure the differences between simulated and measured outcomes (MBE and CVRMSE) and which allow the selection of profiles that contribute to the calibration of the model.

Even though this methodology contributes to a significant reduction in the errors associated with user profiles, the simulation model can only be calibrated ( $|MBE| \leq 10\%$  e  $CVRMSE \leq 30\%$ ) when there is a general understanding of how individuals behave within the building.

**Keywords:** Calibration, Building energy simulation, User profiles, Office buildings, Genetic Algorithm

# Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	ii
Abstract .....	iii
Índice de Figuras .....	vi
Índice de Tabelas.....	vii
Siglas e Acrónimos.....	viii
Simbologia e Notações.....	viii
Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1. Enquadramento e motivação .....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.3. Organização da dissertação .....	3
Capítulo 2 – Estado da Arte .....	4
2.1. RECS – Indicadores de Eficiência Energética .....	4
2.2. Calibração de modelos de simulação em edifícios.....	5
2.2.1. Critérios de validação dos modelos.....	6
2.3. Metodologias de calibração.....	8
2.3.1. Métodos manuais.....	8
2.3.2. Métodos automáticos.....	9
2.4. Perfis de utilização .....	10
Capítulo 3 – Metodologia de otimização.....	14
3.1. Aspetos gerais .....	14
3.2. Simulação energética: <i>EnergyPlus</i> .....	15
3.3. Parametrização: <i>jEPlus</i> .....	16
3.4. Otimização: <i>jEPlus+EA</i> .....	18
3.5. Metodologia geral da dissertação .....	21
Capítulo 4 – Testes de parametrização dos perfis de utilização .....	25
4.1. Aspetos gerais .....	25
4.2. Variação horária .....	26
4.3. Variação diária .....	30
4.3.1. Perfis pré-definidos .....	30
4.3.2. Relação entre perfil de iluminação e de equipamentos .....	32
4.3.3. Otimização dos perfis, com $K = 1$ e $Kd = 0.2$ .....	36
4.4. Notas conclusivas.....	39

Capítulo 5 – Caso de estudo .....	41
5.1. Aspectos gerais .....	41
5.2. Localização.....	41
5.3. Descrição do edifício.....	42
5.4. Modelo de simulação.....	44
5.4.1. Zonas Térmicas .....	44
5.4.2. Parâmetros da simulação .....	46
5.5. Medições .....	49
5.6. Calibração do modelo.....	52
5.6.1. Aspectos gerais.....	52
5.6.2. Simulação com perfis pré-definidos .....	52
5.6.3. Otimização dos perfis no jEPlus+EA .....	54
5.7. Notas conclusivas.....	59
Capítulo 6 – Conclusões e Desenvolvimentos Futuros .....	62
Referências Bibliográficas .....	64
ANEXOS.....	66
A.1 – Características construtivas da envolvente.....	66

# Índice de Figuras

Figura 2-1: Perfis de utilização pré-definidos para edifícios de escritórios, segundo ASHRAE Standard 90.1, para dias úteis, sábados e domingos, feriados e outros [22].	11
Figura 3-1: Fluxograma da metodologia de calibração utilizada neste estudo.	14
Figura 3-2: Esquema do funcionamento interno da ferramenta <i>jEPlus</i> . Adaptado de [31].	17
Figura 3-3: Esquemática do funcionamento do algoritmo genético	19
Figura 3-4: Metodologia geral adotada	21
Figura 3-5: Ambiente de trabalho do <i>jEPlus+EA</i> . Gráfico que mostra a evolução dos valores das funções objetivo ao longo do processo da sua otimização.	23
Figura 4-1: Modelo em 3D do edifício TESTE, desenhado em <i>Sketchup</i> .	25
Figura 4-2: Representação horária (exemplo aplicado para as 7h, 8h e 9h) da probabilidade de seleção de cada valor de perfil de utilização para cada tipo de distribuição aplicada.	28
Figura 4-3: Resultados obtidos para a otimização dos perfis de iluminação para cada tipo de distribuição horária aplicada	29
Figura 4-4: Perfis de equipamentos para Edifícios de escritórios relativamente aos dias úteis	31
Figura 4-5: Perfis de equipamentos para Edifícios de escritórios relativamente aos fins-de-semana	31
Figura 4-6: Perfis de iluminação para Edifícios de escritórios relativamente aos dias úteis	32
Figura 4-7: Perfis de iluminação para Edifícios de escritórios relativamente aos fins-de-semana	32
Figura 4-8: Influência do <i>standby</i> (consumo energético no período de não ocupação do edifício) nos resultados na calibração do modelo.	35
Figura 4-9: Comparação do perfil de iluminação ISO para dias úteis com o obtido através do 2º cenário e do <i>jEPlus+EA</i>	37
Figura 4-10: Perfil Novo de iluminação e equipamentos para dias úteis e não uteis.	38
Figura 4-11: Otimização dos perfis de equipamentos para dias úteis para cada perfil horário base, tendo sido utilizado como perfil Real o perfil Novo.	38
Figura 4-12: Otimização dos perfis de iluminação para dias úteis para cada perfil horário base, tendo sido utilizado como perfil Real o perfil Novo.	39
Figura 5-1: Localização do edifício em estudo. Imagem de satélite retirada do Google Earth Pro.	41
Figura 5-2: Características climáticas do município de Lisboa. Informação retirada de [41].	42
Figura 5-3: Divisão da planta do edifício de Componentes nas suas três zonas principais.	43
Figura 5-4: Modelo em 3D do edifício de Componentes. Imagem da fachada Sul (principal) e fachada Este.	44
Figura 5-5: Modelo em 3D do edifício de Componentes. Imagem da fachada Norte (com as janelas) e fachada Oeste.	45
Figura 5-6: Identificação, em planta, das zonas térmicas definidas no programa de simulação	45
Figura 5-7: Perfis de iluminação e equipamentos para as Zonas de Laboratórios e de Ensaios. Estão representados os perfis para os dias úteis, sendo que o perfil para dias não úteis é constante e igual ao valor de <i>standby</i> dos dias úteis.	48
Figura 5-8: Consumo energético diário [kWh] medido para o Aquecimento	49
Figura 5-9: Perfil de carga diário para o Aquecimento	50
Figura 5-10: Consumo energético diário [kWh] medido para o consumo Geral.	50
Figura 5-11: Perfil de carga para um dia do consumo Geral.	51
Figura 5-12: Perfil de carga diário para Iluminação+equipamentos	51
Figura 5-13: Índices estatísticos obtidos para cada perfil pré-definido.	53

Figura 5-14: Consumos medido e simulado referente ao consumo Geral quando aplicado no modelo o perfil de utilização RSECE à Zona de Gabinetes.....	53
Figura 5-15: Consumos medido e simulado referente ao consumo de Iluminação+equipamentos quando aplicado no modelo o perfil de utilização RSECE à Zona de Gabinetes.....	54
Figura 5-16: Índices estatísticos MBE e CVRMSE obtidos para cada simulação realizada durante as 250 gerações do processo de otimização.....	56
Figura 5-17: Perfis de utilização obtidos no processo de otimização para $K=1$ e $K_d=0.2$ .....	56
Figura 5-18: Índices estatísticos MBE e CVRMSE obtidos para cada simulação realizada durante as 250 gerações do processo de otimização para $k=0.5$ .....	57
Figura 5-19: Perfis de utilização obtidos fruto do processo de otimização para $K=0.5$ e $K_d=0.2$ .....	58

## Índice de Tabelas

Tabela 2-1: Intervalos de $R_{IEE}$ considerados para a determinação da classe energética dos edifícios de comércio e serviços. ....	5
Tabela 2-2: Limites para os critérios estatísticos considerado na calibração de modelos em edifícios ..	7
Tabela 3-1: Parâmetros considerados para realizar a otimização no <i>jEPlus+EA</i> . ....	23
Tabela 4-1: Resumo das características do edifício TESTE.....	26
Tabela 4-2: Tipos de distribuição e sua aplicação no <i>jEPlus</i> .....	27
Tabela 4-3: Valores de GOF para caracterizar a otimização obtida para cada distribuição utilizada ...	29
Tabela 4-4: Resumo das duas abordagens que relacionam os perfis de iluminação e de equipamentos	34
Tabela 4-5: Resultados dos três tipos de perfis pré-definidos tendo em conta a abordagem adotada. Valores de MBE, CVRMSE e GOF em percentagem (%).....	34
Tabela 4-6: Valores de GOF (%) para caracterizar a otimização obtida para cada cenário de simplificação .....	35
Tabela 4-7: Índices estatísticos que caracterizam a otimização no <i>jEPlus+EA</i> com o 2º cenário para os três perfis horários base estudados .....	36
Tabela 4-8: Índices estatísticos (%) para cada perfil horário base quando imposto no seu edifício Real o perfil Novo .....	39
Tabela 5-1: Resumo das características geométricas do edifício de Componentes.....	42
Tabela 5-2: Soluções construtivas adotadas no modelo do edifício de Componentes .....	46
Tabela 5-3: Potência instalada de iluminação e equipamentos e nº de ocupantes por zona térmica. ....	47
Tabela 5-4: Método de cálculo para obter o COP dinâmico para o aquecimento e arrefecimento [42]. Têm-se que $T_{out}$ corresponde à temperatura exterior. ....	48
Tabela 5-5: Índices estatísticos, em %, para o melhor perfil obtido através do processo de otimização para $K=1$ e $K_d=0.2$ , quando comparado com os consumos Geral e Iluminação+equipamentos .....	56
Tabela 5-6: Índices estatísticos, em %, para o melhor perfil obtido através do processo de otimização para $K=0.5$ e $K_d=0.2$ , quando comparado com os consumos Geral e Iluminação+equipamentos .....	57
Tabela 5-7: Resumos dos resultados obtidos para a calibração do modelo de simulação.....	59
Tabela A.1-1: Características dos materiais utilizados nas soluções construtivas (envolvente opaca a envidraçada) do edifício TESTE. (Elementos apresentados do exterior para o interior). Propriedades termofísicas retiradas de [43][44].....	66
Tabela A.1-2: Características termofísicas dos materiais que constituem a envolvente do edifício de Componentes. Valores retirados de [44][43].....	66

## Siglas e Acrónimos

ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionando
CVRMSE	<i>Coefficient of variation of the Root Mean Square Error</i>
FEMP	<i>Federal Energy Management Program</i>
GOF	<i>Goodness-Of-Fit</i>
IEE	Indicador de Eficiência Energética
IPMVP	<i>International Performance Measurements and Verification</i>
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
MBE	<i>Mean Bias Error</i>
RECS	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

## Simbologia e Notações

$U$	Coefficiente de transferência de calor [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]
$S$	Valores resultantes da simulação dos consumos [W]
$M$	Valores resultantes da medição [W]
$R_{horario}$	Relação horária entre o perfil de equipamentos e o perfil de iluminação [-]
$T$	Média diária de $R_{horario}$ para dias úteis [-]
$Tf$	Média diária de $R_{horario}$ para dias não úteis [-]
$K$	Média de $R_{horario}$ para o período de ocupação do edifício [-]
$Kd$	Média de $R_{horario}$ para o período de não ocupação do edifício [-]
$COP$	Coefficiente de Desempenho da bomba de calor [-]
$\eta$	Rendimento [-]
$T_{cond}$	Temperatura de Condensação [K]
$T_{evap}$	Temperatura de evaporação [K]
$T_{out}$	Temperatura exterior [K]

# Capítulo 1 – Introdução

## 1.1. Enquadramento e motivação

Os edifícios surgiram da necessidade de o ser humano se proteger através do controlo das condições ambientais ao seu redor, como a temperatura, humidade relativa, vento, chuva sendo assim possível criar um microclima favorável e confortável às suas atividades em cada divisão do edifício. Atualmente, as populações dos países desenvolvidos passam entre 80 a 90% do seu tempo em espaços interiores, nomeadamente nas suas habitações ou em edifícios de comércio e serviços.

Estima-se que os edifícios representem cerca de 40% do consumo total de energia e um terço das emissões de gases de efeito de estufa na União Europeia (UE) (Diretiva 2010/31/EU, 2010<sup>1</sup>). Desta forma, a UE desenvolveu um conjunto de políticas para fomentar em todos os seus Estados-Membros um maior desenvolvimento do desempenho energético do seu setor imobiliário, nomeadamente com a introdução do Certificado de Desempenho Energético.

A Diretiva 2010/31/UE requer que todos os Estados-Membros da UE assegurem a emissão de um certificado de desempenho energético a todos os edifícios novos, sujeitos a intervenções, que se pretendam arrendar ou vender, públicos ou frequentemente visitados pelo público. Com esta implementação pretendeu-se uniformizar a classificação de desempenho energético para os edifícios, usando a nomenclatura das classes energéticas já aplicáveis a outros equipamentos e identificar medidas de melhorias de desempenho energético sempre com vista a reduzir os consumos de energia nos edifícios e consequente redução de emissões de CO<sub>2</sub>.

Em Portugal, a referida diretiva foi transposta para a legislação portuguesa através do Decreto-Lei n.º 118/2013<sup>2</sup> que visa assegurar e promover a melhoria do desempenho energético dos edifícios através do Sistema Certificação Energética dos Edifícios (SCE), que integra o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS).

No RECS, o desempenho energético de um edifício de comércio e serviços é avaliado através do Indicador de Eficiência Energética (IEE), sendo a simulação dinâmica multizona o método base para a sua determinação.

As simulações energéticas em edifícios (i) fornecem uma rápida e fiável avaliação do desempenho energético do edifício durante todo o seu ciclo de vida, (ii) permitem detalhar de forma eficaz e menos dispendiosa toda a informação referente ao consumo energético do edifício e (iii) oferecem aos utilizadores a possibilidade de facilmente avaliarem a influência de diferentes variáveis de entrada nos resultados da simulação [1].

É, no entanto, necessário fornecer ao programa de simulação uma elevada quantidade de informação descritiva do edifício, nomeadamente as características térmicas da envolvente e as suas dimensões geométricas, dados de todos os sistemas técnicos instalados e perfis de ocupação que reflitam o modo de utilização do edifício [2] [3].

Toda esta informação torna o modelo bastante complexo, tornando-se difícil chegar a uma representação exata da realidade do edifício em estudo. Apesar do crescente desenvolvimento e

---

<sup>1</sup> Alterada pela Diretiva (UE) 2018/844 do Parlamento Europeu e do Conselho de 30 de maio de 2018 e pelo Regulamento (UE) 2018/1999 do Parlamento Europeu e do Conselho de 11 de dezembro de 2018.

<sup>2</sup> Alterado pelos Decretos-Leis n.º 68-A/2015, de 30 de abril, 194/2015, de 14 de setembro, 251/2015, de 25 de novembro, e n.º 28/2016, de 23 de junho, e pela Lei n.º 52/2018, de 20 de agosto

maturidade dos programas de simulações energéticas, são ainda encontradas grandes discrepâncias entre a energia consumida prevista (resultado de simulações) e a energia real do edifício (resultado de medições) [1] [4].

Para além da incerteza associada a todos os parâmetros de entrada definidos inicialmente no modelo, existem fatores e parâmetros que apresentam uma grande variabilidade na fase de operação do edifício. O comportamento aleatório dos ocupantes, os fatores climáticos, alterações na manutenção e operação de equipamentos e sistemas técnicos do edifício, e alterações nas condições ambientais interiores são fatores que podem justificar algumas dessas diferenças entre o edifício na fase de projeto e na fase de operação [1].

Para ser possível atribuir uma classe energética e consequente obtenção do certificado de desempenho energético a um certo edifício, é fundamental que o modelo de simulação represente de forma rigorosa a realidade do mesmo, para que os resultados obtidos de consumos energéticos anuais e poupanças anuais associadas à aplicação das melhorias sejam coerentes e fidedignas.

Neste contexto surgem os modelos de calibração, que têm como principal objetivo reduzir a diferença entre os resultados provenientes da simulação energética do edifício e os consumos energéticos medidos. Estes modelos permitem ajustar os parâmetros de entrada do modelo que apresentam maior incerteza para reduzir a diferença entre a simulação e a medição [3] [5].

A literatura é bastante exaustiva no que se refere à calibração de parâmetros relacionados com a envolvente (características térmicas de materiais opacos e envidraçados, infiltrações de ar, caudais de ventilação) e com equipamentos instalados (potências, eficiências e *set points* de ativação e desativação). No entanto, e apesar de ser consensual que os perfis de utilização apresentam um elevado grau de incerteza, poucas vezes são incluídos nos parâmetros a calibrar [1] [6].

Nestes estudos [1] [6], a definição dos perfis de ocupação é normalmente feita de três formas possíveis: i) considera-se que o edifício não tem ocupação e efetua-se as medições num período em que não existe ninguém no edifício e simula-se com ocupação nula; ii) considera-se no modelo perfis pré-definidos de ocupação tendo em conta o tipo de edifício em estudo, e; iii) realizam-se questionários a todos os ocupantes do edifício de modo a identificar os seus padrões de comportamento e utilização [5] [7] [8].

Esta dissertação pretende, por isso, desenvolver um modelo automático de ajustamento dos perfis de utilização e de carga nos modelos de simulação dinâmica em edifícios, para permitir reduzir as discrepâncias entre resultados simulados e as medições no edifício, tendo por base informações dos utilizadores e a medição dos consumos de energia.

## 1.2. Objetivos

Esta dissertação tem como principal objetivo automatizar e simplificar o processo de criação de perfis de utilização de um edifício de escritórios com o intuito de obter um modelo calibrado e com reduzidas diferenças entre resultados da simulação e da medição. Desta forma procura-se obter modelos de simulação dinâmica mais fidedignos com o edifício real em estudo, para permitir melhores diagnósticos, validação de medidas de melhoria e certificação energética de edifícios.

Numa primeira fase, será desenvolvida e testada uma metodologia de otimização e de calibração num edifício simplificado, com características conhecidas, de modo a que seja possível avaliar qual a melhor forma de resolução do problema proposto. Depois, essa metodologia será aplicada num edifício de serviços existente (escritórios). Em todos os casos, será usado um programa de simulação dinâmica

acoplado ao programa de otimização, obtendo-se assim os perfis de utilização reais do edifício e um modelo de simulação calibrado [9].

Dada a complexidade associada ao estudo dos perfis de utilização de edifícios de escritórios, é também objetivo desta dissertação estudar a relação existente entre os perfis de equipamentos e de iluminação, com o intuito futuro de simplificar o processo de definição dos mesmos. Avaliou-se por isso os impactos e os erros associados a diversos tipos de simplificações e relações diferentes entre eles para que fosse escolhida a melhor metodologia a adotar para os edifícios de escritórios.

Pretende-se com os resultados obtidos neste estudo responder às seguintes questões:

- Terão os perfis de utilização grande influência na discrepância encontrada entre simulação e medição?
- Qual a metodologia de otimização mais adaptada à identificação dos perfis de utilização?
- Serão os perfis pré-definidos de escritórios uma boa representação daquilo que se passa realmente num edifício desta categoria?
- Existirá alguma relação entre os perfis de iluminação e de equipamentos? Se sim, que tipo de relação se deve aplicar de modo a minimizar os erros associados a esta simplificação?

### 1.3. Organização da dissertação

Para uma melhor organização e compreensão da sua leitura, a presente dissertação encontra-se estruturada da seguinte forma:

- **Capítulo 1:** neste capítulo é apresentado o enquadramento, a motivação e a relevância deste estudo para a temática da calibração de modelos em simulação energética em edifícios, assim como os objetivos propostos;
- **Capítulo 2:** este capítulo apresenta o enquadramento legal português no que à certificação energética em edifícios de comércio e serviços diz respeito, assim como o atual estado do conhecimento sobre a calibração de modelos de simulação energética;
- **Capítulo 3:** neste capítulo é apresentada a metodologia adotada neste estudo, sendo feita a descrição e caracterização dos programas de simulação energética, de parametrização e de otimização utilizados;
- **Capítulo 4:** neste capítulo são apresentados os testes de validação da metodologia descrita no capítulo anterior. Estes testes são realizados para um edifício simplificado e pretendem determinar o impacto do tipo de variação dos perfis, que relação deve ser implementada entre o perfil de equipamentos e de iluminações para minimizar os erros. No final do capítulo é feito um pequeno resumo dos resultados obtidos;
- **Capítulo 5:** neste capítulo é apresentado o edifício de estudo, tendo sido definido todas as características necessárias à definição do seu modelo de simulação dinâmica. Aqui são realizadas as simulações de otimização dos seus perfis de utilização e apresentados os resultados finais obtidos;
- **Capítulo 6:** neste último capítulo são apresentados os principais resultados deste estudo, respondendo às questões inicialmente impostas, e propostas de possíveis trabalhos futuros.

## Capítulo 2 – Estado da Arte

### 2.1. RECS – Indicadores de Eficiência Energética

Segundo a atual legislação portuguesa, o desempenho energético de um edifício de comércio e serviços é determinado pelo seu Indicador de Eficiência Energética (IEE), calculado com base no somatório dos diferentes consumos anuais de energia, agrupados em indicadores parciais e convertidos para energia primária por unidade de área interior útil de pavimento [ $kWh_{EP} \cdot m^{-2} \cdot ano^{-1}$ ], como indica a expressão (2.1):

$$IEE = IEE_S + IEE_T - IEE_{ren} \quad (2.1)$$

- $IEE_S$  representa os consumos de energia que são considerados para efeitos de cálculo da classificação energética do edifício. Inclui sistemas de climatização, aquecimento de águas sanitárias, iluminação interior e exterior e elevadores, escadas e tapetes rolantes;
- $IEE_T$  representa os consumos de energia que não são considerados para efeitos de cálculo da classificação energética do edifício, não estando incluídos no  $IEE_S$ . Fala-se de todos os equipamentos instalados no edifício que não contribuem para a climatização do mesmo;
- $IEE_{ren}$  é determinado com base na produção de energia elétrica e térmica a partir de fontes de energia renovável. É apenas contabilizada a energia elétrica destinada a autoconsumo e a energia térmica efetivamente utilizada ou passível de ser utilizada no edifício.

Na Portaria n.º 349-D/2013<sup>3</sup> são distinguidos três tipos de indicadores de eficiência energética:

- a) IEE previsto ( $IEE_{pr}$ ), que procura traduzir o consumo anual de energia do edifício com base na sua localização, nas características da envolvente, na eficiência dos sistemas técnicos e nos perfis de utilização previstos para o edifício, sendo calculado conforme a expressão (2.2).

$$IEE_{pr} = IEE_{pr,S} + IEE_{pr,T} - IEE_{pr,ren} \quad (2.2)$$

- b) IEE efetivo ( $IEE_{ef}$ ), que traduz o consumo anual de energia do edifício, obtido com base no histórico de faturas de energia, e/ou alternativamente considerando os resultados de uma avaliação energética realizado numa base de tempo anual, bem como os dados provenientes de um sistema de gestão de energia;
- c) IEE de referência ( $IEE_{ref}$ ), que procura traduzir o consumo anual de energia do edifício, caso este fosse dotado de soluções de referência para alguns dos elementos da envolvente e para alguns dos seus sistemas técnicos, mantendo inalteradas as demais características do edifício, sendo calculado segundo a expressão (2.3).

$$IEE_{ref} = IEE_{ref,S} + IEE_{ref,T} \quad (2.3)$$

O indicador  $IEE_{ref}$  constitui o limite regulamentar aplicável a edifícios novos e utilizado como referência para efetuar a classificação energética dos edifícios.

Os métodos que são usados para determinar o IEE de um edifício de comércio e serviços são o método de previsão do  $IEE_{pr}$  por simulação dinâmica multizona e por cálculo dinâmico simplificado; o método de determinação do  $IEE_{ef}$  por consumo efetivo não se encontra regulamentado.

<sup>3</sup> Alterada pela Declaração de Retificação n.º 3/2014, de 31 de janeiro, e pelas Portarias n.º 17-A/2016, de 4 de fevereiro e n.º 42/2019, de 30 de janeiro

A simulação dinâmica multizona constitui o método base para a determinação do IEE quando o edifício apresenta mais do que uma única zona térmica, seja ele novo, aquando do licenciamento, ou sujeito a grandes remodelações. Aqui sujeito a grandes remodelações significa que as alterações previstas no edifício incidem sobre a sua envolvente e/ou os seus sistemas de climatização.

É de salientar que no cálculo do  $IEE_{pr}$  e  $IEE_{ref}$  é assumida a climatização dos espaços úteis (mesmo que os edifícios não possuam sistema de climatização). Neste sentido, na calibração do modelo de simulação deve procurar-se fazer a simulação real do edifício e só depois fazer a climatização por defeito definida na regulamentação para obter os indicadores pretendidos.

Para ser possível emitir um pré-certificado e certificado SCE de edifícios de comércio e serviços, é necessário determinar o seu rácio de classe energética ( $R_{IEE}$ ) através da expressão (2.4) e depois atribuir a respetiva classe energética segundo a Tabela 2-1<sup>4</sup>.

$$R_{IEE} = \frac{IEE_S - IEE_{ren}}{IEE_{ref,S}} \quad (2.4)$$

onde,  $IEE_S$  corresponde ao Indicador de Eficiência Energética relativamente aos consumos do tipo S (já anteriormente descrito);  $IEE_{ref,S}$  ao Indicador de Eficiência Energética de referência associado aos consumos anuais de energia do tipo S e  $IEE_{REN}$  ao Indicador de Eficiência Energética renovável associado à produção de energia elétrica e térmica a partir de fontes de energia renovável.

Tabela 2-1: Intervalos de  $R_{IEE}$  considerados para a determinação da classe energética dos edifícios de comércio e serviços.

Classe Energética	Valor de $R_{IEE}$
A +	$R_{IEE} \leq 0.25$
A	$0.26 \leq R_{IEE} \leq 0.50$
B	$0.51 \leq R_{IEE} \leq 0.75$
B -	$0.76 \leq R_{IEE} \leq 1.00$
C	$1.01 \leq R_{IEE} \leq 1.50$
D	$1.51 \leq R_{IEE} \leq 2.00$
E	$2.01 \leq R_{IEE} \leq 2.50$
F	$R_{IEE} \geq 2.51$

## 2.2. Calibração de modelos de simulação em edifícios

Os edifícios não desempenham as suas funções tão bem como previsto na fase de conceção. Muitos estudos têm mostrado a existência de grandes discrepâncias entre os consumos energéticos simulados e medidos, tendo por isso a calibração de modelos de simulação em edifícios ganho grande interesse nos últimos anos [2] [4] [9].

A calibração inicia-se com o ajuste de diversas variáveis que caracterizam o edifício e estão definidas nos programas de simulação, de modo a averiguar o real impacto da sua variação nos consumos energéticos finais. Os resultados obtidos pelo ajuste são comparados com os resultados da medição real no edifício de modo a verificar se o modelo reúne as condições necessárias para simular

<sup>4</sup> Nesta dissertação, dada a utilização de programas de origem anglo-saxónica e para manter uma maior coerência ao longo da mesma, foi adotada o ponto como separador decimal.

fielmente o edifício em estudo. Uma vez calibrado, o efeito da implementação de medidas de melhoria pode ser calculado pelo modelo [11].

A necessidade de calibrar os modelos de simulação de edifícios não é um indicador da sua capacidade limitada de previsão, mas sim uma manifestação do limitado conhecimento do modelo face aos parâmetros operacionais do edifício, à natureza estocástica do comportamento dos ocupantes e aos problemas e alterações que surgem na construção e operação do edifício [5].

Os modelos de simulação energética de edifícios são compostos por muitas variáveis e parâmetros, ganhando por isso uma grande complexidade. Quando se modela um edifício usando um programa de simulação dinâmica, a maior dificuldade do utilizador é escolher os parâmetros que retratem da melhor forma o real consumo de energia no edifício. Dado o grande número de variáveis e parâmetros envolvidos, o processo de calibrar um modelo energético detalhado é um problema indeterminado que leva a infinitas soluções [9] [11].

É bastante comum utilizar-se o método de “tentativa e erro” para calibrar o modelo, adaptando manualmente os vários parâmetros de acordo com a experiência e intuição do utilizador, sempre com o objetivo de igualar energia consumida simulada e medida. Considera-se por isso que todo o processo de calibração é fortemente dependente do julgamento pessoal do utilizador, conferindo-lhe uma grande componente subjetiva. Mesmo com a utilização de procedimentos sistemáticos e automáticos, existe sempre em algum momento da calibração uma necessidade de o utilizador intervir [10].

Nem todos os parâmetros introduzidos inicialmente no modelo influenciam o resultado final da simulação da mesma maneira. Segundo a literatura, os parâmetros que mais afetam os resultados da simulação são [1] [2]:

- **Características da envolvente:** propriedades térmicas de materiais opacos e envidraçados, infiltrações de ar, caudais de ventilação;
- **Características dos sistemas técnicos instalados:** potências instaladas e eficiências de iluminação, de equipamentos de aquecimento e de arrefecimento;
- **Perfis de utilização:** perfil de ocupação do edifício, horário de utilização da iluminação, de equipamentos elétricos e sistemas de climatização (definição de momentos de ativação e desativação).

Para além das incertezas associadas a toda a informação que o utilizador introduz no programa de simulação sobre o edifício, podem existir também incertezas numéricas que são erros intrínsecos ao programa de simulação que podem ocorrer durante a discretização e simulação, e incertezas associadas a fatores externos ao edifício, como os dados climáticos. É por isso importante que estas fontes de incertezas sejam identificadas e quantificadas [4].

Apesar do grande crescimento de interesse dos modelos de simulação em edifícios e do desenvolvimento de diferentes métodos de calibração, não existe ainda uma metodologia formal e reconhecida sobre como efetuar de forma universal a calibração de modelos [10].

### 2.2.1. Critérios de validação dos modelos

Os critérios mais usados para avaliar a precisão de um determinado modelo são os índices estatísticos, que dado à sua crescente importância foram transformados em critérios de referência internacional. Estes critérios determinam quão bem os resultados da energia consumida da simulação concordam com os consumos reais num determinado intervalo de tempo. Apesar de não constituírem uma metodologia para calibrar os modelos de simulação de edifícios, são usados como uma medida de qualidade dos mesmos [10].

Durante a calibração são necessários dois tipos de dados: dados de simulação, do modelo criado, e os dados medidos, vindo do edifício real monitorizado. Como foi referido anteriormente, apenas os parâmetros que apresentam maior influência no modelo vão ser considerados para serem ajustados durante o processo de calibração. Os índices estatísticos usados são o *Mean Bias Error* (MBE), definido pela expressão (2.5) e o *Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error* (CVRMSE), definido pela expressão principal (2.6). A combinação dos dois coeficientes previne a existência de qualquer erro de calibração proveniente da compensação de erros [4] [9].

$$MBE (\%) = \frac{\sum_{\text{Periodo}} (S - M)_{\text{intervalo}}}{\sum_{\text{Periodo}} M_{\text{intervalo}}} \times 100 \quad (2.5)$$

$$CVRMSE_{\text{Periodo}} (\%) = \frac{RMSE_{\text{Periodo}}}{A_{\text{Periodo}}} \times 100 \quad (2.6)$$

$$RMSE_{\text{Periodo}} = \sqrt{\frac{\sum (S - M)_{\text{intervalo}}^2}{N_{\text{intervalo}}}} \quad (2.7)$$

$$A_{\text{Periodo}} = \frac{\sum_{\text{Periodo}} M_{\text{intervalo}}}{N_{\text{intervalo}}} \quad (2.8)$$

Sendo S os valores simulados, M os valores medidos e N o número de valores considerados num dado período. Aqui, “intervalo” representa o intervalo de tempo entre cada valor de medição e simulação e “período” o tempo total de realização da medição e simulação. Note-se que o intervalo e período da medição devem ser iguais aos da simulação.

O MBE representa a média dos erros de uma amostra, demonstrando o comportamento geral dos valores simulados em relação à sua linha de regressão. Quando é positivo significa que o modelo está a subestimar os consumos reais, sendo que quando é negativo está a sobrestimá-los. O CVRMSE mede a variabilidade dos erros entre os valores simulados e medidos, dando uma indicação da capacidade do modelo de prever a forma do perfil de carga global do edifício.

Para se utilizar estes índices na calibração de modelos de edifícios é necessário estabelecer limites para MBE e CVRMSE que devem ser respeitados. Estes índices têm sido recomendados por três organizações internacionais através dos seus respetivos documentos:

- *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) *Guidelines* 14 [9];
- *International Performance Measurements and Verification protocol* (IPMVP) [13];
- *M&V guidelines para Federal Energy Management Program* (FEMP) [14]

Dependendo do intervalo de tempo definido para a calibração (horário ou mensal) e do *Standard* ou protocolo considerado, os limites impostos podem apresentar algumas diferenças, como apresentado na Tabela 2-2.

Tabela 2-2: Limites para os critérios estatísticos considerado na calibração de modelos em edifícios

Índices estatísticos	Calibração mensal (%)		Calibração horaria (%)	
	MBE	CVRMSE	MBE	CVRMSE
ASHRAE <i>Guidelines</i> 14 [9]	± 5	15	± 10	30
IPMVP [13]	± 20	-	± 5	20
FEMP [14]	± 5	15	± 10	30

O índice estatístico *Goodness-Of-Fit* (GOF), que mede quão bem os valores simulados se ajustam aos valores medidos, é também usado para comparar modelos ou testes realizados uma vez que

consegue combinar os valores de MBE e CVRMSE num único índice [15]. Quanto menor for este valor, menor é a dispersão, significando que a linha de regressão dos valores simulados se encontra muito próxima da linha de regressão dos valores medidos. O cálculo deste índice é feito através da expressão (2.9):

$$GOF = \frac{\sqrt{2}}{2} \times \sqrt{CVRMSE^2 + MBE^2} \quad (2.9)$$

Todos os modelos de simulação são simplificações do edifício real em estudo, pelo que nunca se chegará a uma calibração total e completa do modelo. No entanto, se o modelo for calibrado em conformidade com estes índices e limites, considera-se que o que se pretende calibrar é suficientemente próximo da realidade. Assim, a partir daí, todos os resultados obtidos e medidas de melhoria propostas pela simulação são viáveis e credíveis para o caso de estudo a analisar [3].

### 2.3. Metodologias de calibração

Como já foi referido, atualmente não existe uma metodologia definida como *standard* para a calibração de modelos de simulação em edifícios, mas aquelas que são utilizadas atualmente podem ser divididas em quatro categorias diferentes [10]:

- (i) Métodos de calibração manuais baseados em processos iterativos;
- (ii) Métodos de calibração manuais baseados na análise comparativa de gráficos;
- (iii) Métodos de calibração automática baseada em ensaios específicos e procedimentos de análise;
- (iv) Métodos de calibração automáticos baseados em abordagens matemáticas e analíticas.

Estes métodos apesar de estarem divididos em categorias, podem ser utilizados durante o mesmo processo de simulação. Por exemplo, utilizar métodos gráficos ou estatísticos para suportar as tomadas de decisões iterativas manuais ou utilizar métodos gráficos e matemáticos/estatísticos em conjunto para melhorar a calibração do modelo do edifício [9] [11].

#### 2.3.1. Métodos manuais

Os métodos manuais de calibração incluem todos aqueles que não utilizam procedimentos automáticos e sistemáticos. São baseados na experiência e avaliação do utilizador e são considerados os métodos de calibração mais usados, pelo menos numa fase inicial de calibração. Inclui uma abordagem de “tentativa e erro” onde existe um ajuste manual iterativo dos parâmetros de entrada do modelo, tendo em conta a experiência e conhecimento que o utilizador possui do edifício.

Numa primeira fase, o utilizador reúne todas as faturas de consumo de energia disponíveis bem como plantas e outros documentos que definem a construção e características da envolvente. Este constitui o nível de calibração mais baixo e por isso menos detalhado. Uma posterior visita ao edifício e realização de uma auditoria energética dá ao perito uma maior sensibilidade para avaliar aspetos mais estocásticos e operacionais do mesmo. Por fim, o último nível de calibração dá-lhe aquando da monitorização de curta ou longa duração do edifício em estudo. Com toda esta informação recolhida, é possível ir melhorando manualmente cada vez mais o modelo inicialmente definido.

São também utilizados como métodos manuais aqueles que se baseiam em representações gráficas específicas de resultados com o objetivo de orientar o processo de calibração. A análise comparativa de resultados em 3D (em vez de em 2D) permite ao utilizador observar uma grande quantidade de informação facilitando a tomada de decisão. Esta técnica é usada muitas vezes para calibrar parâmetros variáveis no tempo, como perfis horários [12].

### 2.3.2. Métodos automáticos

A calibração baseada em ensaios específicos e procedimentos de análise distingue-se das metodologias automáticas na medida em que não utiliza no seu processo de calibração relações matemáticas nem estatísticas. Este método consiste na realização de testes, ensaios e monitorizações de pequena duração que podem ser usados para calibrar os modelos, como ensaios com uma porta ventiladora (verificar caudais de ventilação e taxas de infiltração), medição do coeficiente de transferência de calor das paredes (características térmicas da envolvente), resultados de auditorias energéticas, entre outros.

O trabalho de calibração tem sido maioritariamente manual, embora tenham sido propostos alguns métodos automáticos de definição de parâmetros do modelo, através da análise de sensibilidade e incertezas e de processos de otimização [16].

A análise de sensibilidade consiste em modificar parâmetros de entrada de um modelo com o objetivo de observar a sua influência nos resultados finais da simulação. Esta análise tem como principal objetivo selecionar, para um determinado caso de estudo, os parâmetros que mais têm influência no modelo do edifício. Rodríguez *et al.* [6] realizou este estudo para uma habitação em Espanha, usando o método da *Latin-hypercube sampling* (LHS) e concluiu que os dados climáticos e a ocupação no edifício são os parâmetros mais fortes no consumo anual de energia. Usando o mesmo método, Cipriano *et al.* [5] analisou um edifício de serviços (não ocupado durante o estudo) tendo concluído que as infiltrações de ar e as características térmicas da envolvente eram os parâmetros que apresentavam maior influência nos seus resultados finais.

O processo de otimização, tal como é aplicado hoje em dia nas simulações de edifícios, consiste em encontrar o valor ótimo dos parâmetros para um melhor desempenho energético do edifício. Aplicados à calibração, os modelos de otimização têm como objetivo ajustar e melhorar os valores de determinados parâmetros para uma melhor concordância entre os dados da simulação com os dados medidos do edifício. Os métodos de otimização são construídos através da acoplação de algoritmos de otimização com programas de simulação dinâmica de edifícios, como o *EnergyPlus*. De forma a realizar a otimização, é utilizada no programa uma função objetivo, que no caso da calibração em edifícios é definida segundo os índices estatísticos *MBE* e *CVRMSE*, como indicado na secção 2.2.1 [7] [9].

Monetti *et al.* [7] estudou a calibração de um modelo acoplado o programa de simulação dinâmica *EnergyPlus* com um programa de otimização *GenOpt*, tendo sido definida a função objetivo para minimizar a diferença entre a energia consumida simulada e medida. Os parâmetros considerados como os mais influentes no consumo energético do edifício foram a potência e a fração radiativa dos equipamentos elétricos, infiltrações de ar e características térmicas da envolvente (espessura, condutividade, volume e calor específico). É de referir que este estudo foi realizado numa altura em que o edifício não se encontrava ocupado.

Hong *et al.* [17] e Lara *et al.* [18] realizaram a calibração de modelos de edifícios de comércio e serviços utilizando como método de otimização de algoritmos genéticos. Este algoritmo evolucionário que tem vindo a ganhar grande interesse no âmbito das simulações energéticas, baseia-se no processo evolutivo dos seres vivos aplicando-o para a otimização. Os parâmetros considerados para serem calibrados foram: características da envolvente (espessura do isolamento e condutibilidade térmica do material), *set-points* do sistema de climatização e eficiência da iluminação [17] e os caudais de ventilação e infiltrações de ar pela envolvente [18].

## 2.4. Perfis de utilização

Durante a atividade normal de um edifício de escritórios, os seus ocupantes vêm-se envolvidos em muitas atividades, como trabalhar nos seus gabinetes, interagir com outros ocupantes ou reunir em salas de reuniões. Muitas destas atividades levam a que os ocupantes se movimentem entre várias divisões e entrem e saiam do próprio edifício [19].

Estar presente num edifício é claramente uma condição necessária para existir uma interação constante com o mesmo. O ser humano ao emitir calor e “poluentes” (como vapor de água, dióxido de carbono e odores) vai influenciar diretamente a qualidade do ar interior em cada divisão do edifício em que estiver. Para melhorarem o seu conforto, os ocupantes vão também interagir com os sistemas de climatização com o objetivo de ficarem mais confortáveis termicamente ou ajustar a iluminação artificial ou natural para otimizarem o conforto visual. Existem também interações relacionadas com as atividades para que se destina o edifício; no caso de edifícios de escritórios os ocupantes utilizam diversos equipamentos elétricos no seu dia-a-dia, aumentando os ganhos internos em cada divisão e o consumo de energia elétrica em todo o edifício [20].

Pode existir também a interação inversa, em que é o próprio edifício que se adapta à presença humana. Neste caso, alguns dispositivos são controlados por sensores de ocupação que se acionam independentemente do comportamento humano, como é o caso da iluminação, da temperatura de ajuste do termóstato, do caudal de ventilação, entre outros. Estas adaptações e ajustes automáticos levam a que a componente subjetiva e estocástica do comportamento dos ocupantes diminua, registando-se por isso uma grande redução dos consumos energéticos do edifício.

Equipamentos como computadores pessoais, equipamentos de escritórios e outros dispositivos elétricos estão interconectados com o horário dos ocupantes no edifício. Estudos mostram uma forte relação entre a probabilidade de um ocupante estar num determinado espaço com a utilização de equipamentos elétricos que estejam contidos nessa divisão do edifício [21].

Verifica-se, portanto, que a presença humana e a sua deslocação pelo edifício bem como o seu tipo de interação em cada momento apresentam uma grande influência no consumo energético do edifício. Desta forma, um reduzido conhecimento da verdadeira ocupação e influência humana num dado edifício pode levar a grandes discrepâncias entre o consumo energético medido e consumo energético simulado em programas de simulação dinâmica de edifícios [21] [22].

Nos modelos de simulação energética em edifícios, o período de operação efetivo de um edifício que reflete o comportamento e a presença humana por hora é definido por Perfis de Utilização. Estes perfis referem-se, por exemplo, à fração de equipamentos de iluminação que se encontram ativos, à percentagem de pessoas que ocupam uma determinada divisão e se os sistemas de AVAC estão ativados ou desativados. Dos perfis de utilização é possível retirar informação horária, devendo existir variação de acordo com os dias da semana e com a estação do ano [24].

A definição dos perfis de ocupação, de modo a serem introduzidos como variável de entrada em modelos de simulação, é habitualmente realizada de três formas possíveis: considera-se que o edifício não tem ocupação e efetuam-se as medições num período em que não existe ninguém no edifício e simula-se com ocupação nula [5] [7]; considera-se no modelo perfis pré-definidos e recomendados por entidades credenciadas tendo em conta o tipo de edifício em estudo [8]; realiza-se inquéritos e questionários a todos os ocupantes do edifício de modo a perceber-se os seus padrões de comportamento e utilização.

A técnica mais usada e aquela que surge nos programas de simulação de edifícios é a de considerar perfis pré-definidos. Os perfis de utilização recomendados pelo ASHRAE *Standard* 90.1 [24] e pela norma europeia ISO 18523-1:2016, onde se descrevem os padrões e perfis comportamentais dos ocupantes em diversos tipos de edifícios como escritórios, hospitais, universidades, hotéis, etc. são os mais utilizados. Em Portugal, são frequentemente utilizados os perfis definidos no RSECE 2006.

Na Figura 2-1 estão representados os perfis típicos de ocupação, iluminação e de equipamentos para um edifício de escritórios, havendo separação dos perfis por dias úteis, sábados e domingos/feriados.

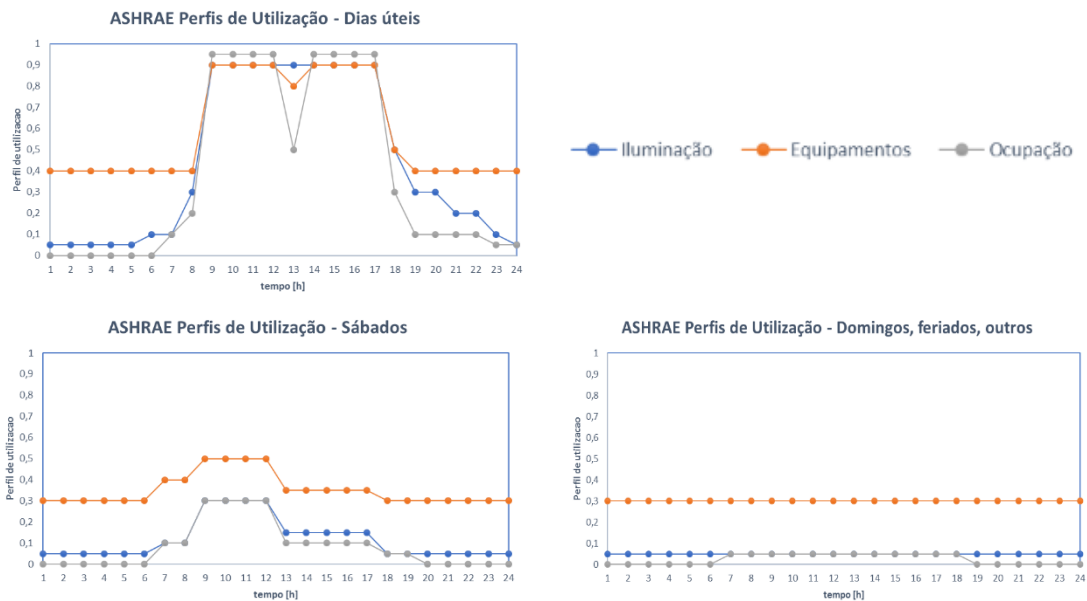


Figura 2-1: Perfis de utilização pré-definidos para edifícios de escritórios, segundo ASHRAE Standard 90.1, para dias úteis, sábados e domingos, feriados e outros [22].

Observando isoladamente o perfil de ocupação nos dias úteis, é evidente um comportamento típico de um dia de trabalho das 9h às 17h: o número de ocupantes atinge 10% de ocupação às 7 horas da manhã aumentando gradualmente até às 9 horas onde atinge um máximo de 95%; à hora de almoço decai até os 50% voltando a 95% após a pausa de almoço; os ocupantes começam a abandonar o edifício às 17 horas, e às 24 horas não se encontra ninguém no interior do mesmo. Nos fins-de-semana, considera-se que sábado da parte da manhã se encontra com 30% da ocupação máxima, havendo uma redução na parte da tarde para 10%. Aos domingos e feriados têm apenas um perfil de ocupação residual de 10% entre as 7 e as 18 horas.

Observa-se também uma grande semelhança entre o perfil de ocupação e de iluminação nos três períodos da semana considerados. No caso do perfil de utilização dos equipamentos, apesar de seguir também o mesmo comportamento que os outros perfis analisados, apresenta uma percentagem de utilização quase sempre superior.

Mesmo existindo a distinção entre dias da semana e fins de semana, todos os dias de trabalho, sábados, domingos e feriados são descritos com o mesmo perfil de utilização respetivo. Quando estes perfis de ocupação homogéneos são usados, cada espaço vai apresentar perfis de carga iguais ou muito semelhantes uns aos outros, não se associando nenhuma diversidade. O facto de se colocarem todos os perfis homogéneos reduz a possibilidade de captar a realidade do edifício e a componente aleatória do comportamento dos ocupantes.

No entanto, as grandes vantagens da utilização destes perfis pré-definidos para caracterizar o comportamento humano são a sua simplicidade e aplicabilidade a diversos comportamentos adaptativos e tipos de edifícios, apesar de, como referido em cima, nem sempre representar a diversidade do comportamento individual. Outra vantagem na sua utilização diz respeito ao facto de ser apenas necessário definir um dia tipo, fazendo-o simples e de fácil interpretação. Qualquer simulador o consegue incorporar rapidamente para representar o perfil de iluminação, equipamentos e ocupação.

De facto, a ocupação de um edifício é probabilística quer no tempo quer no espaço, existindo sempre discrepâncias entre os perfis de ocupação atuais e simplificados. Quando se utilizam diferentes perfis de ocupação para simular a energia consumida num edifício, os perfis determinísticos podem não ser capazes de estimar um pico de consumo quando ocorre um evento especial.

Desta forma, têm surgido muitos estudos que ao pretenderem prever o comportamento dos ocupantes em edifícios para traçar perfis de ocupação mais realistas consideram uma abordagem probabilística.

Feng *et al.* [19] refere no seu estudo que existem diversas formas de abordar a simulação da ocupação num edifício, podendo ser ela:

- (i) **Ao nível do edifício e número de ocupantes:** quantas pessoas entram e saem do edifício. No âmbito da simulação energética em edifícios, esta análise não é muito relevante porque apenas indica o número de pessoas que se encontra dentro do edifício num determinado tempo, não especificando em que divisão é que se encontram.
- (ii) **Ao nível do espaço e tipo de ocupação:** indica se um determinado espaço está ocupado ou não para um dado intervalo de tempo. Esta análise pode ser relevante na ativação ou desativação de sistemas de iluminação e climatização que funcionam mediante a ocupação ou não do espaço.
- (iii) **Ao nível do espaço e número de ocupantes:** indica o número de ocupantes presente em cada divisão (ou zona térmica) num dado intervalo de tempo. Abordagem mais interessante para a elaboração de perfis de ocupação de cada divisão do edifício.
- (iv) **Ao nível do ocupante:** indica com grande detalhe o caminho percorrido por cada ocupante do edifício.

A abordagem mais vezes utilizada em estudos deste tipo é a que se realiza ao nível do espaço e número de ocupantes, já que nos permite saber em cada espaço o número de ocupantes em cada hora de funcionamento do edifício, sendo assim possível de traçar o perfil de ocupação correspondente. Os fatores que mais influenciam esta simulação são o espaço, o tempo e os eventos que surgem do funcionamento natural do próprio edifício.

Em 2011, Wang *et al.* [25] desenvolveu um algoritmo que consegue produzir variações realísticas de ocupação num edifício de escritórios para um dia típico de trabalho considerando propriedades estatísticas de ocupação como o período de entrada e de saída do edifício, período de almoço, períodos de circulação pelo edifício e tipo de ocupante de acordo com a sua atividade. Com a utilização do método de *Markov chain* para simular este movimento aleatório dos ocupantes, o modelo consegue gerar a localização de cada ocupante e a ocupação diária de cada zona térmica/divisão do edifício.

Feng *et al.* [19] testou uma plataforma online desenvolvida pelo Laboratório Nacional de Lawrence Berkeley, designada *Occupancy Simulator*, que simula a presença e o movimento de ocupantes num edifício, gerando perfis de ocupação horários para cada espaço ou para cada ocupante. Este estudo teve como principal conclusão que o simulador, que utiliza como base o modelo de *Markov*

*chain*, gera perfis de ocupação que representam a diversidade real temporal e espacial dos ocupantes num edifício.

Kim *et al.* [23] desenvolveu um método de calibração de modelos de simulação baseado em perfis de ocupação e de carga provenientes de medições dos consumos de energia elétrica do edifício. Com este novo método, que conjuga o perfil do consumo de energia elétrica do edifício com o perfil de ocupação do mesmo, foi possível reduzir os índices estatísticos de validação para valores dentro dos limites impostos (facto que não se verificava quando se utilizava perfis pré-definidos).

## Capítulo 3 – Metodologia de otimização

### 3.1. Aspetos gerais

Neste estudo pretende-se desenvolver um método para criar perfis de utilização (iluminação e equipamentos) que minimizem as diferenças entre a simulação e as medições realizadas no edifício.

Para isso, é necessário fazer variar os perfis de utilização e avaliar o impacto dessa variação horária no consumo de energia do edifício em estudo, comparando o resultado obtido com o consumo de energia medido de modo a verificar se o edifício cumpre os critérios de calibração impostos (Tabela 2-2). Assim, nesta dissertação, os limites impostos para os índices estatísticos que validam a calibração dos modelos, terão as seguintes condições:

- Calibração na base horária;
- MBE e CVRMSE serão os índices estatísticos utilizados. São utilizados os dois em simultâneo para evitar erros provenientes da compensação de erros. Considera-se que o modelo de simulação se encontra calibrado se estes índices apresentarem valores inferiores a  $\pm 10\%$  e  $30\%$ , respetivamente, para as simulações horárias. Estes limites estão de acordo com o *ASHRAE Guidelines 14* e *FEMP* apresentados na subsecção 2.2.1.

Como indicado na Figura 3-1, que descreve a metodologia de calibração utilizada, para criar um modelo de simulação de um edifício é necessário definir a sua envolvente, equipamentos instalados e perfis de utilização bem como associar o ficheiro climático do local onde se encontra o edifício em estudo. Após a simulação do edifício pode-se obter o consumo por uso de energia, que inclui: climatização, iluminação e equipamentos. De seguida é realizada a comparação deste resultado da simulação com a medição do consumo real do edifício, que apresentam períodos de tempo concordantes, sendo calculados os índices estatísticos para verificar a satisfação dos critérios de validação.

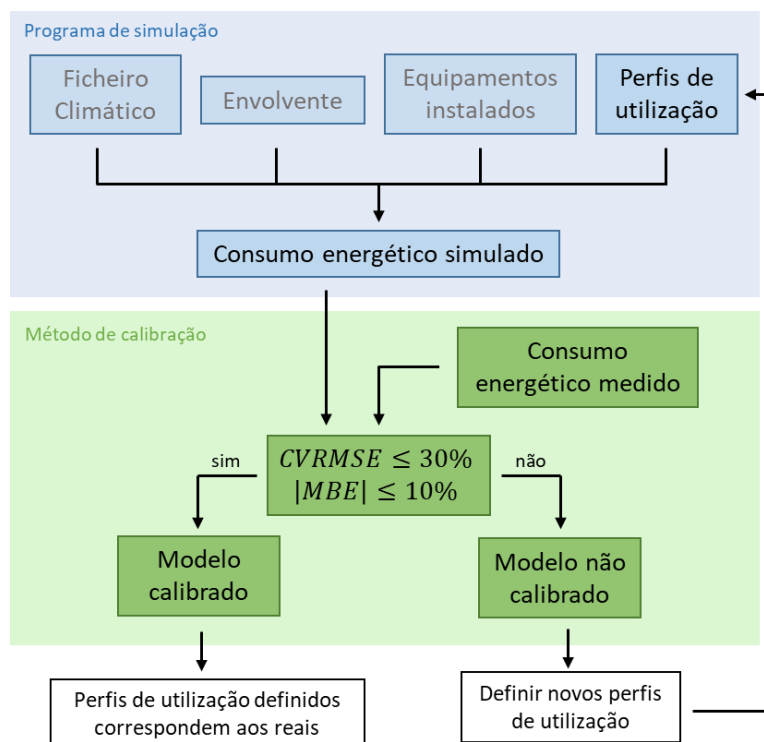


Figura 3-1: Fluxograma da metodologia de calibração utilizada neste estudo.

De acordo com o estado da arte elaborado no capítulo anterior, o parâmetro que mais contribui para a discrepância existente entre os resultados dos modelos de simulação energética e o edifício real é o perfil de utilização. Desta forma, nesta dissertação, considera-se que os perfis de utilização são a principal fonte de incerteza que leva à não calibração do modelo. Assim, se os índices estatísticos apresentarem valores dentro dos limites considerados então o modelo é considerado calibrado e os perfis definidos correspondem a uma solução satisfatória. Se este facto não se verificar, significa que é necessário definir novos perfis de utilização, retomando de novo o ciclo, até se validar o modelo.

Como se pretende avaliar quais os perfis de utilização que minimizam os índices estatísticos, será utilizado um algoritmo de otimização probabilístico das duas funções objetivo (MBE e CVRMSE). O cálculo do GOF é feito posteriormente à simulação, usando os valores finais de MBE e CVRMSE, para que seja feita uma análise mais completa dos resultados das otimizações. A sua implementação no algoritmo como mais uma função objetivo iria torná-lo mais complexo sem adicionar qualquer informação útil.

Os algoritmos de otimização têm como principal aplicação maximizar ou minimizar funções de uma ou mais variáveis num determinado domínio. Os algoritmos usados para a solução de um problema de otimização podem ser determinísticos ou probabilísticos, sendo que estes últimos introduzem no processo de otimização dados e parâmetros estocásticos, retratando melhor a componente aleatória do comportamento dos ocupantes nos edifícios.

Para implementar a metodologia de otimização dos perfis, utilizou-se o *software EnergyPlus* como programa de simulação energética (secção 3.2), o *jEplus* como programa de parametrização e definição de variáveis (secção 3.3) e o *jEplus+EA* como programa de otimização que tem como base algoritmos genéticos (secção 3.4). Após se proceder à descrição e análise individual de cada programa na última secção deste capítulo (3.5), será apresentada a metodologia geral da presente dissertação resultante da utilização combinada destes três programas.

### 3.2. Simulação energética: *EnergyPlus*

O *EnergyPlus* [26] é um programa de simulação energética de edifícios usado por engenheiros, arquitetos e investigadores com o objetivo de simular tanto o consumo energético (climatização, iluminação e equipamentos) como o consumo de água. É baseado em dois programas “antigos” de simulação energética em edifícios desenvolvidos pelo governo dos Estados Unidos da América, o DOE-2 e o *Blast*, que tinham como principais desvantagens a complexidade do seu código e a discrepância nos seus resultados, visto que nem sempre um dos programas era indicado para um dado edifício sendo necessário por isso escolher o melhor. Desta forma, surgiu o *EnergyPlus* que veio resolver as limitações indicadas, mantendo, no entanto, os aspetos positivos dos programas já existentes.

O *EnergyPlus* tem a capacidade de resolver as equações de conservação de massa e de energia em regime transiente. Assim, incluindo os mecanismos de transferência de calor por condução, convecção e radiação assim como a energia transferida pelas cargas de iluminação, equipamentos e climatização, a conservação de energia de uma zona térmica é expressa pela equação (3.1) [26]:

$$G_i + G_s + G_v + G_c = \rho \cdot C_p \cdot V_s \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \sum_{n=1}^k A_n \cdot U_n \cdot (T_i - T_{sn}) \quad (3.1)$$

Em que:

- $G_i$  – Ganhos internos [W];
- $G_s$  – Ganhos solares [W];

- $G_v$  – Ganhos de ventilação [W];
- $G_c$  – Ganhos de carga sensível de climatização [W];
- $\rho$  – Massa volúmica do ar [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];
- $C_p$  – Calor específico do ar [ $\text{J}/(\text{kgK})$ ];
- $V_s$  – Volume da zona térmica [ $\text{m}^3$ ];
- $A_n$  – Área da superfície n [ $\text{m}^2$ ];
- $U_n$  – Coeficiente de transferência de calor entre o ar interior e a superfície n [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ];
- $T_i$  – Temperatura interior [K];
- $T_{sn}$  – Temperatura da superfície n [K].

Esta ferramenta é de utilização gratuita, *open-source* e pode ser utilizada em conjunto com diversas plataformas. Para a sua utilização, é necessário fornecer ao *EnergyPlus* as seguintes informações:

- O modelo geométrico do edifício, onde são identificadas as zonas térmicas a simular. Aqui são definidas as suas dimensões, posições relativas entre elas e condições fronteiras de cada superfície. Nesta dissertação foi utilizado o *software Sketchup* [27] para desenvolver o edifício a estudar em 3D;
- O ficheiro climático da zona onde se localiza o edifício que se pretende simular;
- Definição dos parâmetros que caracterizam o edifício: a sua envolvente, equipamentos instalados, sistemas de AVAC e perfis de utilização e de consumo.

O *EnergyPlus* é uma ferramenta de análise energética em edifícios muito reconhecida e aceite, apresentando uma gama muito vasta de aplicações. Tem sido usada com sucesso para a obtenção de taxas de ventilação, temperaturas do ar e de superfícies num edifício com ventilação natural [28], para a previsão do consumo anual de climatização em edifícios existentes [29] ou para a avaliação do impacto da integração PV no consumo total de em edifício [30].

### 3.3. Parametrização: *jEPlus*

O *software jEPlus* [31] é uma ferramenta, escrita na linguagem de programação java, que permite realizar análises paramétricas de grande complexidade a todos os parâmetros do edifício em simultâneo. A análise paramétrica é usada para explorar opções de design, especialmente para casos em que não é possível usar um método de otimização global ou quando os resultados da otimização são duvidosos.

Para se realizar análises paramétricas complexas em múltiplos parâmetros com diversas alternativas de valores é necessário um programa de simulação que suporte simulações paramétricas (como é o caso do *EnergyPlus*, *TRNSYS* ou *INSEL*) e uma ferramenta com a capacidade de gerar comandos, introduzi-los no programa de simulação e recolher os resultados obtidos (como é o caso do *jEPlus*). [32]

Na Figura 3-2 encontra-se esquematizado o funcionamento do *jEPlus* sendo este dividido em três fases: (1) Fase de definição de variáveis; (2) Fase de simulação; (3) Fase de obtenção de resultados.

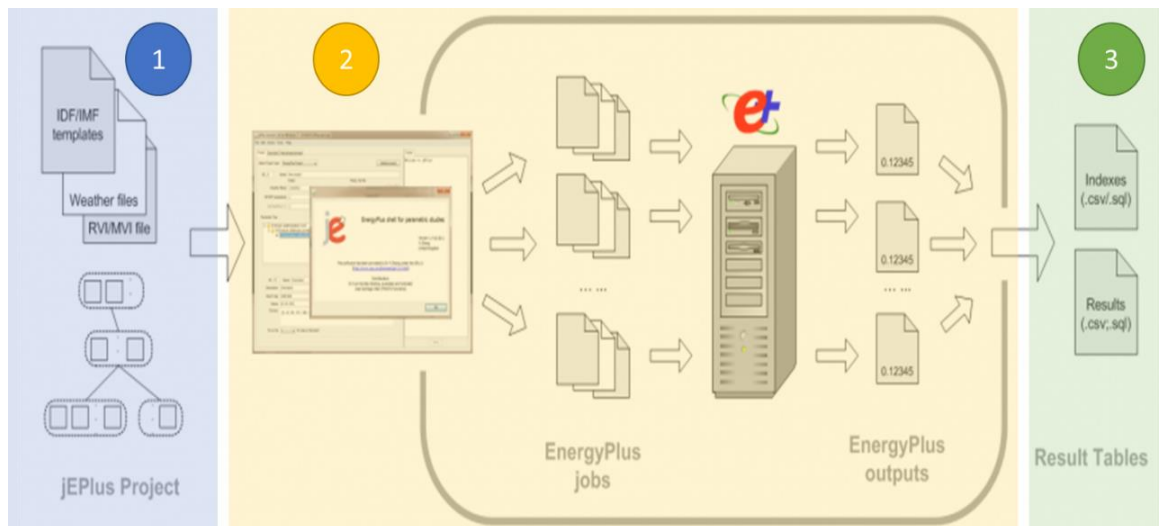


Figura 3-2: Esquema do funcionamento interno da ferramenta *jEPlus*. Adaptado de [31]

A primeira fase consiste na definição e caracterização das variáveis que se pretendem parametrizar. Inicialmente, é necessário fornecer ao *jEPlus* três ficheiros essenciais ao seu funcionamento: o ficheiro do edifício em estudo, ficheiro climático e ficheiro RVX (onde são definidas algumas configurações para a parametrização, simulação e organização dos resultados).

De seguida, os parâmetros que serão alvo da parametrização devem ser definidos. Um parâmetro para ser incorporado na análise paramétrica deve apresentar um ID único, um Código de Procura<sup>5</sup> e uma Lista de Valores<sup>6</sup>. O ID consiste num pequeno código de identificação, sendo usado fundamentalmente para o reconhecimento dos parâmetros no ficheiro de resultados. Por sua vez, o Código de Procura consiste numa sequência de caracteres que se coloca no ficheiro do edifício para identificar o local onde futuramente serão introduzidos os possíveis valores para aquela variável do edifício. É recomendado que se utilize uma sequência de caracteres que o programa de simulação não utilize normalmente para que o mesmo a trate de uma forma especial. A Lista de Valores corresponde aos valores que o utilizador define como sendo os valores possíveis, para cada parâmetro, a serem usados em cada parametrização, podendo ser discretos, inteiros ou decimais [32].

O *jEPlus* utiliza uma estrutura em árvore para organizar os seus parâmetros e valores associados, sendo possível por isso avaliar o efeito de diferentes combinações para parâmetros dependentes. No caso da simulação em edifícios, em que existem muitas variáveis dependentes umas das outras, esta estrutura torna-se bastante vantajosa.

Após todos os parâmetros serem definidos, o *jEPlus* seleciona um grupo de valores (um valor, dentro da Lista de Valores, para cada parâmetro) e procura no ficheiro do edifício o respetivo Código de Procura e substitui os valores antigos pelos novos valores. Inicia-se aqui a segunda fase (ver Figura 3-2). O *jEPlus* cria uma longa lista de casos com todas as combinações possíveis, seguindo a estrutura definida, realizando depois a simulação individual de cada caso. Cada caso contém uma combinação única dos valores dos parâmetros. O programa de simulação está constantemente a ser chamado a simular e a produzir novos resultados, sendo assim possível gerar um grande número de simulações de modo a explorar diversas opções de definições do edifício em estudo.

<sup>5</sup> Tradução do inglês *Search Tag*

<sup>6</sup> Tradução do inglês *Values*

Esta ferramenta permite também que sejam definidas variáveis que derivam dos resultados obtidos das simulações, sendo possível assim caracterizar o processo de otimização com variáveis de constrangimentos e/ou objetivos.

Depois de as simulações estarem concluídas, inicia-se a terceira e última fase: a obtenção de resultados, que são recolhidos segundo a informação contida e definida no ficheiro RVX. Nesta fase, tanto como na primeira fase, é possível introduzir códigos externos em *python* para filtrar ou efetuar cálculos adicionais.

Na presente dissertação, inicializou-se o *jEPlus* com o ficheiro IDF do edifício em estudo (resultado da sua implementação no *EnergyPlus*), ficheiro climático (com extensão EPW) e o ficheiro RVX. Como se pretende parametrizar os perfis de utilização, introduziu-se os Códigos de Procura no comando *Schedule:Compact* do *EnergyPlus*, no lugar dos valores pré-definidos no momento da definição do edifício. Este foi o comando escolhido para trabalhar com os perfis de utilização porque permite uma abordagem mais flexível à definição dos perfis, sendo necessário apenas este comando para definir perfis diferentes para dias de semana e fins de semana.

Foram definidas as duas funções objetivo já referidas (CVRMSE e MBE) através de um código externo em *python* [33]. Aqui, após cada simulação, o resultado obtido do consumo energético do edifício é comparado com o consumo energético medido (ficheiro CSV que é chamado pelo código *python*) através do cálculo do CVRMSE e BEM, sendo estes valores guardados num ficheiro de extensão CSV.

Apesar de o *jEPlus* por si só ter a capacidade de realizar a otimização de um projeto, para a implementação da presente metodologia foi necessário escolher um método de otimização mais eficiente dada a extensa lista de casos possíveis derivada do elevado número de parâmetros definidos. Desta forma, foi implementada no *jEPlus* todos os parâmetros e todas as características da otimização, mas a mesma foi efetuada no *jEPlus+EA*.

### 3.4. Otimização: *jEPlus+EA*

O *jEPlus+EA* [34] é um *software* de otimização que tem como principal funcionalidade resolver os problemas de otimização definidos e estruturados no *jEPlus* com maior eficácia, graças ao seu algoritmo de otimização versátil e muito eficiente: NSGA-II<sup>7</sup>. A ferramenta é bastante intuitiva graças à utilização de gráficos e tabelas representativas do processo de simulação ao longo da otimização.

O poder e simplicidade do algoritmo genético torna-o muito popular mesmo em problemas de otimização de grande escala. Apesar de funcionar muito bem com problemas de otimização de duas funções objetivo, a sua capacidade de pesquisa vai-se deteriorando com o aumento no número das mesmas [35].

O algoritmo genético é um algoritmo evolucionário inspirado na teoria da evolução de Darwin. Na genética natural, as características de um determinado indivíduo na população são definidas pelos seus genes e ordem dos respetivos cromossomas, sendo que esta informação é passada às gerações futuras através de processos biológicos que ocorrem ao nível genético [36].

Este processo ocorre de forma similar num algoritmo genético, que é geralmente composto por dois processos. O primeiro processo é a seleção de indivíduos para criar uma nova geração sendo que o

---

<sup>7</sup> Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II

segundo processo consiste na manipulação, através de técnicas de cruzamentos e de mutações, dos indivíduos selecionados para formar a próxima geração.

O mecanismo de seleção determina que indivíduos são selecionados para se reproduzirem e quantos descendentes são produzidos por cada indivíduo: quanto melhor o seu nível de *fitness*, maior será a sua probabilidade de reprodução. Neste contexto, *fitness* indica a aptidão do indivíduo para se adaptar ao seu ambiente. No caso dos problemas de otimização, a solução que conseguir melhor minimizar ou maximizar (dependendo do caso) a função objetivo apresentará um nível de *fitness* mais elevado tendo por isso maior probabilidade de se reproduzir. Este facto faz com que as novas populações sejam sempre melhores que as anteriores [37].

Na Figura 3-3 é possível observar todo o fluxograma de funcionamento do algoritmo genético.

O processo de seleção tem como função reduzir o espaço de combinações ao descartar as piores soluções, enquanto que o processo de manipulação explora todo o espaço possível. No entanto, mesmo os indivíduos que apresentam baixos valores de *fitness* devem ter a possibilidade (mesmo que seja muito reduzida) de serem selecionados visto que as suas características podem conter informação útil para o problema que se pretende resolver. Desta forma, dentro do mecanismo de seleção é necessário que exista um equilíbrio entre as duas condições seguintes (i) as soluções com valores baixos de *fitness* têm de ter uma possibilidade de seguirem para a próxima geração; e (ii) as soluções com elevados valores de *fitness* têm maior probabilidade de seguir para a próxima geração que as restantes [37].

A seleção apropriada dos operadores do algoritmo genético deve corresponder a um equilíbrio entre rápida convergência e manutenção do poder de exploração do algoritmo (ao garantir a diversidade estamos a prevenir a falsa convergência). Os operadores a serem definidos são: dimensão da população, número máximo de gerações, cruzamento, mutação e tipo de seleção.

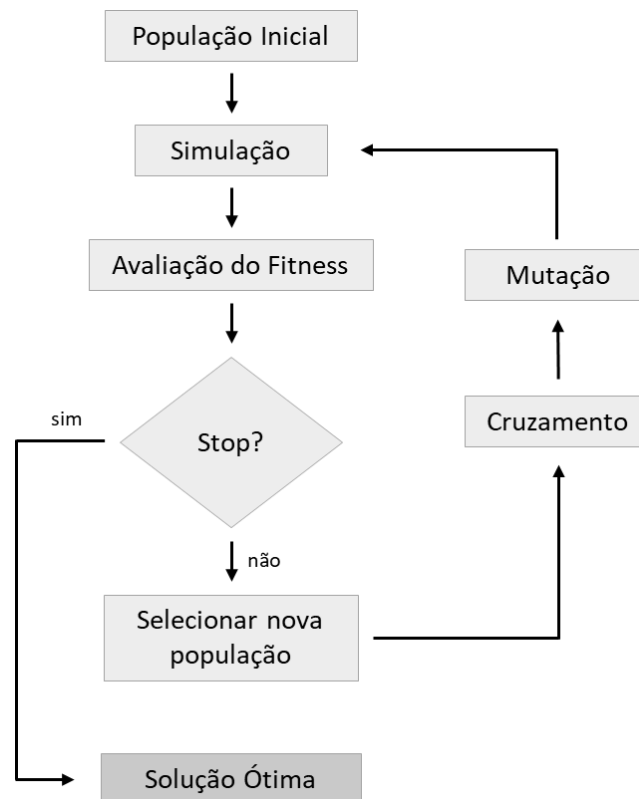


Figura 3-3: Esquemática do funcionamento do algoritmo genético

### **Dimensão da População (*Size population*)**

A dimensão da população corresponde ao número de soluções que serão avaliadas em cada iteração do algoritmo. Em geral, quanto maior for o número de parâmetros a avaliar maior terá de ser a dimensão da população a considerar. É recomendado que este seja no mínimo igual ao número de parâmetros a serem otimizados. Se este valor for inferior a 50, recomenda-se que a dimensão da população seja então o dobro do número de parâmetros a otimizar [38].

No entanto, deve também ser tido em conta o tipo de processador disponível para realizar as simulações no momento da escolha deste operador do algoritmo genético.

### **Número máximo de gerações (*Max generations*)**

O número máximo de gerações corresponde ao número de iterações consideradas para a realização da otimização. Constitui um dos critérios de paragem do algoritmo caso não se atinja a solução ótima para o problema até essa geração.

A dimensão da população e o número máximo de gerações influencia de forma positiva a procura das melhores soluções para o problema de otimização. Ao colocar estes parâmetros com valores elevados, a amostra disponível aumenta também, levando ao processamento de um maior número de indivíduos com diversas características. Desta forma, a probabilidade de encontrar melhores soluções aumenta, podendo, no entanto, demorar mais tempo [36].

### **Cruzamento (*crossover*)**

A taxa de cruzamento varia entre 0 e 1 e descreve como é feita a passagem dos genes dos indivíduos para a sua descendência. Se este valor for 0, significa que o material genético do novo indivíduo é exatamente igual ao seu ascendente, considerando-se clones um do outro. Se este valor for 1, significa que se verifica uma elevada probabilidade de cruzamento e por isso a posição dos seus cromossomas irá ser diferente. No seu estudo, A. R. Avad *et al* [38] recomenda que a taxa de cruzamento esteja compreendida entre 0.7 e 0.9 de modo a se conseguir encontrar a melhor solução com o menor número de gerações.

### **Mutação (*Mutation*)**

A taxa de mutação varia entre 0 e 1 e descreve com que frequência podem ocorrer alterações aleatórias às novas soluções. Recomenda-se que este valor seja reduzido para que o algoritmo não se comporte de forma totalmente aleatória, mas nunca igual a 0. A. R. Avad *et al* [38] avaliou a importância da mutação, verificando que a mutação nula conduz a piores resultados quando comparado com os resultados obtidos por uma taxa de mutação de 0.1, por exemplo.

### **Tipo de seleção (*Selector*)**

Este é o parâmetro que define como é realizada a seleção dos indivíduos para formar uma nova população. A seleção do tipo competição (*tournament selector*) é o método de seleção mais adotado devido à sua elevada eficiência e simples implementação. O processo de seleção é aleatório, mas é influenciado pelas boas características das soluções existentes.

São selecionados aleatoriamente alguns indivíduos de uma grande população para competirem entre si. Ganha aquele que apresentar o valor de *fitness* mais elevado, integrando-se assim na próxima geração criada. O número de indivíduos que competem em cada torneio designa-se por Dimensão da competição, sendo usualmente atribuído o valor de 2. Se este valor for muito elevado, é espetável que haja uma perda de diversidade. A seleção do tipo competição dá uma hipótese a todos os indivíduos de

serem selecionados, mas garante que a probabilidade de serem selecionados os indivíduos com valores de *fitness* mais elevados seja superior aos restantes [37].

No seu estudo, A. Alajmi *et al* [39] concluiu que populações pequenas, taxa de cruzamento elevada e taxa de mutação baixa constitui a melhor combinação de operadores para definir o comportamento do algoritmo genético quando este é aplicado a problemas de otimização em edifícios.

Tanto o *jEPlus+EA* como o *EnergyPlus* têm sido usados em processos de otimização, apresentando características que se mostram suficientes para a modelação energética bem como para os problemas de otimização com múltiplas funções objetivo [17] [39].

### 3.5. Metodologia geral da dissertação

Na Figura 3-4 encontra-se descrita a metodologia geral adotada na presente dissertação, associando as diferentes etapas aos respetivos programas de execução. Esta pode então ser dividida em duas partes fundamentais: a parametrização e a otimização dos perfis, sendo que nesta última encontra-se incluída a simulação e a calibração do modelo.

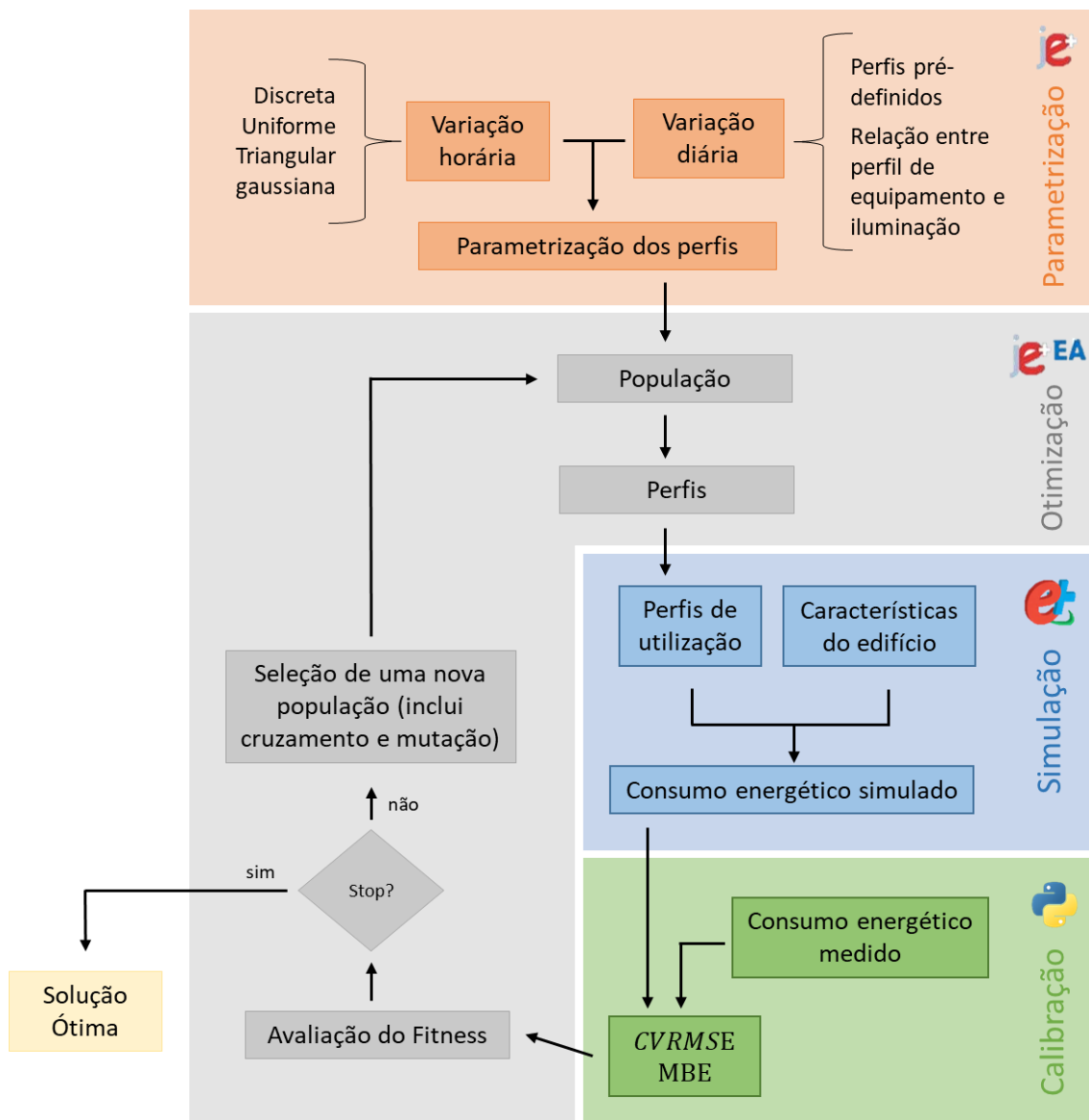


Figura 3-4: Metodologia geral adotada

Em primeiro lugar, e depois de ter sido construído o modelo do edifício tendo em consideração as suas características e sistemas técnicos, é necessário parametrizar as variáveis que se pretendem otimizar (no *jEPlus*), que para este estudo, são os perfis de equipamentos e iluminação. Será utilizado um perfil horário base, em que são identificados os valores horários que serão alvo da otimização. Para se obterem soluções fisicamente satisfatórias, nesta dissertação, pretende-se identificar a relação entre os consumos e perfis de iluminação e equipamentos, pois sem essa informação, a convergência do método pode ser comprometida. Para avaliar a robustez da metodologia, foram realizados testes para apreciar a influência do tipo de parametrização imposta aos perfis no resultado final. Estudou-se por isso:

- Variação horária: que tipo de distribuição (discreta, uniforme, triangular ou gaussiana) e em que gama de valores se pode fazer variar os perfis em cada hora do dia de modo a minimizar os erros;
- Variação diária: que perfil horário pré-definido servirá como base para a realização da otimização. Estudou-se também a hipótese de se relacionar o perfil de equipamentos com o perfil de iluminação de forma a simplificar o processo de definição e obtenção de variáveis.

Depois de serem definidas as características de variação dos perfis de equipamentos e iluminação, segue-se a sua otimização através da aplicação do algoritmo genético (no *jEPlus+EA*). A primeira população, que consiste num conjunto de diversos perfis diferentes, é gerada aleatoriamente. Estes primeiros perfis criados são introduzidos no *EnergyPlus*, sendo assim possível calcular o consumo energético simulado referente a cada um.

Para continuar com o algoritmo genético e antes de avançar para a próxima geração (criação de novos perfis) é necessário calcular e avaliar o grau de *fitness* dos perfis já obtidos de modo a que aqueles que apresentarem as melhores características sejam selecionados para se “reproduzirem”. No presente estudo, um perfil (indivíduo) é classificado como “portador de boas características” quando os seus consumos simulados são semelhantes aos consumos reais do edifício em estudo. Desta forma, desenvolveu-se o algoritmo para que minimizasse os índices estatísticos de calibração MBE e CVRMSE, definidos na subsecção 2.2.1 pelas equações (2.5) e (2.6) respetivamente. Para isso, associou-se ao *jEPlus+EA* um código em *python* para que fosse possível comparar, em cada iteração, os consumos simulados com os consumos medidos.

O objetivo do algoritmo de otimização utilizado é minimizar as duas funções objetivo definidas (índices estatísticos MBE e CVRMSE), pelo que quanto menores forem os seus valores, maior será o grau de *fitness* atribuído ao respetivo perfil de utilização e maior será a sua probabilidade de passar esta informação aos seus descendentes. Significa isto que, à medida que o número de gerações vai aumentando, os perfis de utilização gerados vão ser sempre cada vez mais semelhantes ao perfil de utilização do edifício “real”.

A criação de novos perfis, a partir dos já existentes, prossegue até ser atingida a condição de conclusão do processo de otimização: número de geração > número máximo de gerações.

O algoritmo genético apenas interpreta os valores de MBE e CVRMSE como forma de avaliar o *fitness* de cada perfil gerado, não estando definido para parar a otimização caso se atinja as condições de modelo calibrado consideradas neste estudo:  $|MBE| \leq 10\%$  e  $CVRMSE \leq 30\%$ . Isto deve-se ao facto de se pretender estudar a capacidade máxima de convergência do programa querendo-se obter perfis que reduzam ao máximo estes índices, razão pela qual não se definiu esta condição como condição de paragem da otimização.

Cabe, por isso, ao utilizador interpretar os resultados obtidos após a conclusão da otimização de modo a verificar se os melhores perfis obtidos resultam em índices estatísticos aceitáveis para se considerar o edifício em estudo calibrado. Caso este facto se verifique antes de se atingir o número máximo de gerações, o utilizador pode parar o processo de otimização de forma manual caso seja essa a sua intenção, obtendo logo o perfil de utilização que permite a calibração do modelo. Graças à utilização de gráficos que ilustram a evolução das duas funções objetivo para cada iteração ao longo da calibração por parte da ferramenta *jEPlus+EA* (Figura 3-5), o utilizador vê facilitada a tomada desta decisão. Na Figura 3-5 têm-se um exemplo de utilização desta ferramenta sendo que cada ponto representa uma simulação. A azul tem-se a geração mais recente, a cinzento as gerações mais antigas e a vermelho a(s) solução(ões) óptima(s) encontrada até ao momento.

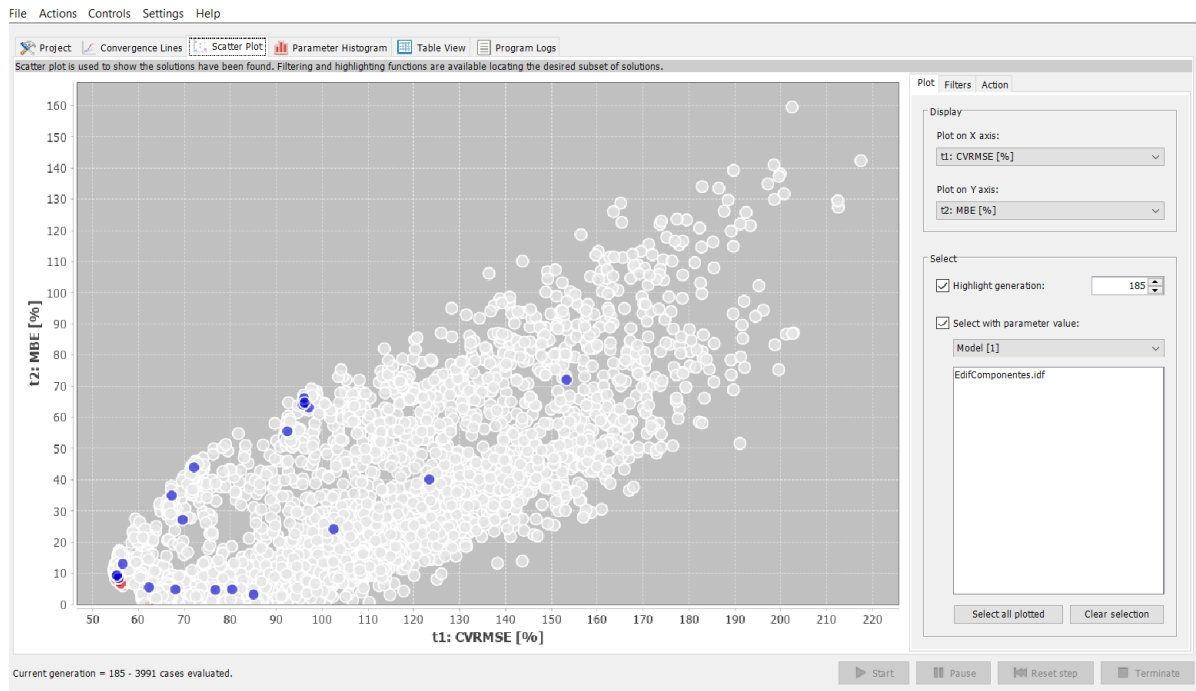


Figura 3-5: Ambiente de trabalho do *jEPlus+EA*. Gráfico que mostra a evolução dos valores das funções objetivo ao longo do processo da sua otimização.

Na Tabela 3-1 estão definidos os valores atribuídos a cada parâmetro do algoritmo genético, tendo estes sido escolhidos tendo como base a análise bibliográfica realizada na secção 3.4. Desta forma, nesta dissertação não foi estudado o impacto dos parâmetros de definição do algoritmo genético nos resultados obtidos. Pretendeu-se com esta combinação de valores selecionados preservar a diversidade da amostra assim como tornar o modelo objetivo e rápido na sua procura pela melhor solução. Para todas as otimizações realizadas, se nada for dito em contrário, foram estes os valores utilizados.

Tabela 3-1: Parâmetros considerados para realizar a otimização no *jEPlus+EA*.

<b>Dimensão da população</b>	$2 \times n^\circ$ de variáveis a parametrizar
<b>Nº máximo de gerações</b>	250
<b>Cruzamento</b>	0.8
<b>Mutação</b>	0.1
<b>Dimensão da competição</b>	2

Deste estudo resulta um método automático de definição de perfis de utilização, referindo qual a melhor abordagem a seguir no que diz respeito à distribuição e gama de valores horária dos perfis, perfil base a considerar na otimização e relação entre perfis de equipamentos e de iluminação.

## Capítulo 4 – Testes de parametrização dos perfis de utilização

### 4.1. Aspectos gerais

Depois de se ter descrito o problema em estudo e de se ter definido a metodologia adotada para a resolução do mesmo, segue-se agora a sua aplicação a um caso de estudo/edifício de forma a verificar a sua adequação. No entanto, e antes de aplicá-la a um edifício real de grande complexidade, definiu-se em primeiro lugar um edifício muito simples onde serão aplicados os testes de parametrização referentes à variação horária e diária dos perfis de utilização, para que depois se possa aplicar a metodologia a um edifício real com um maior grau de confiança.

Desta forma, criou-se um edifício fictício, que será denominado por Edifício TESTE, que tem apenas uma zona térmica e ao qual são aplicados os perfis de utilização de edifícios de escritórios. A sua representação em 3D encontra-se na Figura 4-1, sendo possível observar que não apresenta paredes interiores e que todas as suas paredes exteriores incluem vãos envidraçados.

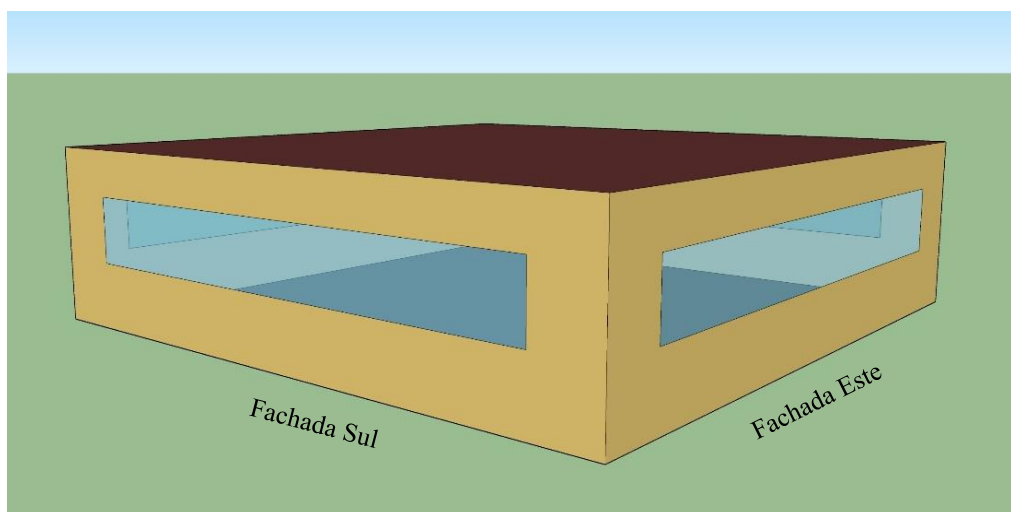


Figura 4-1: Modelo em 3D do edifício TESTE, desenhado em *Sketchup*.

As características consideradas referentes à geometria, ocupação, iluminação, equipamentos e ventilação estão descritas na Tabela 4-1, sendo que os elementos que constituem a sua envolvente assim como as respetivas características térmicas se encontram no anexo A (Tabela A.1-1). As soluções construtivas utilizadas no edifício TESTE cumprem os requisitos máximos impostos pela Portaria n.º 349-D/2013, 2 de dezembro e posteriores alterações, para edifícios novos e sujeitos a grandes intervenções.

O sistema de climatização e ventilação do espaço foi simulado através do modelo ideal “*HVACTemplate: IdealLoadsAirSystem*” que descreve um sistema de aquecimento e arrefecimento ideal, tendo por isso total capacidade para suprir todas as necessidades do espaço.

Tabela 4-1: Resumo das características do edifício TESTE

<b>Localização</b>	Lisboa (Lat. 38.73, Long. -9.15)	
<b>Área Pavimento (<math>m^2</math>)</b>	100	
<b>Pé direito (<math>m</math>)</b>	2.7	
<b>Área envidraçada/área pavimento</b>	32%	
<b>Área envidraçada/área fachada</b>	30%	
<b>U</b> ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )	<b>Paredes</b>	0.32
	<b>Cobertura</b>	0.37
	<b>Pavimento</b>	0.23
	<b>Janelas</b>	3.05
<b>Nº de ocupantes</b>	10	
<b>Iluminação (<math>W \cdot m^{-2}</math>)</b>	10	
<b>Equipamentos elétricos (<math>W \cdot m^{-2}</math>)</b>	10	
<b>Infiltrações de ar (<math>Rph(hr^{-1})</math>)</b>	1	

A este edifício, com as condições pré-definidas, foram realizados testes para selecionar a melhor metodologia de parametrização a aplicar aos perfis de utilização, sempre com o objetivo de minimizar os erros obtidos ao se aplicar a metodologia geral indicada na Figura 3-4. Será apreciada:

- a influência do tipo de variação aplicada a cada valor horário dos perfis de utilização, quando sujeitos a distribuições do tipo discreta, uniforme, triangular e gaussiana (secção 4.2);
- a influência do tipo de perfil horário base usado para otimizar os perfis de utilização. Pretende-se analisar diversos perfis de utilização pré-definidos referidos em regulamentos e normas com o objetivo de encontrar um padrão de comportamento de variação diária e de relação entre perfis de equipamentos e iluminação (secção 4.3).

Na secção 4.5 será apresentado um resumo dos principais resultados obtidos.

Considera-se a seguinte nomenclatura utilizada neste capítulo:

- **Edifício Real:** edifício TESTE com perfis de utilização bem definidos e fixos. Os consumos energéticos associados ao edifício Real representam o resultado Real (ou consumo Real) que será utilizado para o cálculo de MBE e CVRMSE em cada iteração. Fazendo a ligação com a Figura 3-4, o resultado Real corresponde ao “consumo energético medido”.
- **Edifício Simulado:** edifício TESTE cujos perfis de utilização serão alvo de parametrização. Fazendo a ligação com a Figura 3-4, o edifício Simulado corresponde ao edifício que é simulado no *EnergyPlus* em cada iteração tendo como consumo o “consumo energético simulado”;

Pretende-se, por isso, que os consumos simulados se aproximem o máximo possível dos consumos reais. Enquanto o “consumo energético medido” se mantém constante ao longo da otimização (visto que o Edifício Real é simulado antes de se realizar a otimização), o “consumo energético simulado” varia dependendo da população selecionada e dos perfis gerados pelo algoritmo genético. Desta forma, para a aplicação desta metodologia é sempre necessário definir o Edifício Real e o Edifício Simulado.

## 4.2. Variação horária

Nesta secção apresentam-se os resultados do estudo da influência da variação horária dos perfis de utilização na redução do erro da simulação, utilizando a metodologia geral descrita na Figura 3-4. Para isso, definiu-se que o edifício Real apresentava perfis de utilização iguais aos definidos no

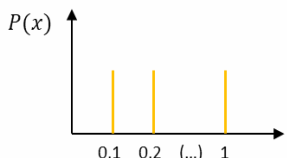
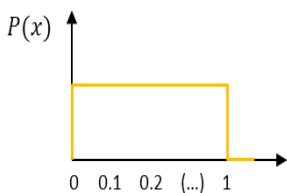
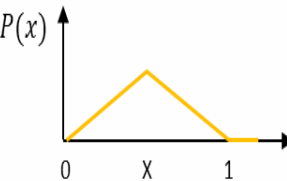
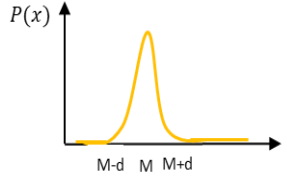
ASHRAE Standard 90.1 (ver Figura 2-1). Para o edifício Simulado pré-definiu-se também o mesmo perfil (ver Figura 2-1), mas permitiu-se variar os valores horários do perfil de iluminação para testar o comportamento do algoritmo de otimização perante a utilização de vários tipos de distribuição aplicados à variável em causa.

Assim, foram testadas quatro distribuições diferentes visto que as mesmas podem ser condicionadas dependendo da informação disponível:

- Determinística discreta, aplicável quando se estima uma igual probabilidade de ocorrência dos valores discretos;
- Probabilística uniforme, aplicável quando não se conhece o perfil de utilização e se consideram todos os valores igualmente prováveis;
- Probabilística triangular, aplicável quando se tem algum conhecimento do perfil de utilização e se considera que um dado valor é o mais provável de ocorrer;
- Probabilística gaussiana, aplicável quando se tem algum conhecimento do perfil de utilização e se considera que a zona de um determinado valor é a mais provável.

Na Tabela 4-2 estão descritas as distribuições indicadas, fazendo referência à sua definição, aplicação no jEPlus e representação gráfica.

Tabela 4-2: Tipos de distribuição e sua aplicação no jEPlus

<i>Nome</i>	<i>Definição</i>	<i>Instrução jEPlus</i>	<i>Representação gráfica</i>
<i>Distribuição discreta</i>	Cada valor definido tem igual probabilidade de ocorrer, não havendo valores intermédios	<b>[0:0.1:1]</b> Valores entre 0 e 1 com um espaçamento de 0.1	
<i>Distribuição uniforme</i>	Distribuição aleatória limitada em que a probabilidade entre os dois valores definidos é igual.	<b>@sample(uniform,0,1,11)</b> 11 valores, entre 0 e 1, segundo uma distribuição aleatória uniforme. Todos os valores entre 0 e 1 são prováveis.	
<i>Distribuição triangular</i>	Distribuição aleatória limitada em que a probabilidade máxima ocorre entre os dois valores definidos	<b>@sample(triangular,0,X,1,11)</b> 11 valores, entre 0 e 1, sendo que o valor X é o mais provável. Todos os valores entre 0 e 1 são prováveis.	
<i>Distribuição gaussiana (normal)</i>	Distribuição aleatória em que a média corresponde ao seu valor mais provável, decaindo à medida que se afasta do mesmo.	<b>@sample(gaussian,M,d, 11)</b> 11 valores, segundo uma distribuição normal, com média M e desvio padrão d.	

Na distribuição discreta consideram-se todos os valores compreendidos entre 0 e 1 com um espaçamento de 0.1. Significa que estes 11 valores obtidos serão utilizados para realizar a otimização (Figura 4-2-a). Nas distribuições aleatórias, de todas as possibilidades existentes, irão ser selecionados 11 valores para serem utilizados na otimização. No caso da distribuição uniforme, os valores situam-se entre 0 e 1 e têm igual probabilidade de serem selecionados (Figura 4-2-b), enquanto nas distribuições triangular e gaussiana existem valores que são mais prováveis. Para este primeiro teste, considerou-se X (valor mais provável na distribuição triangular) e M (valor médio na distribuição gaussiana), ver Tabela 4-2, iguais aos valores definidos no edifício Real, que para as 7h, 8h e 9h corresponde a 0.1, 0.3 e 0.9, respetivamente. Na secção c e d da Figura 4-2 é possível verificar este comportamento em que a probabilidade em redor destes valores, para cada hora, é superior aos restantes. Este facto faz com que a procura pela melhor solução se concentre nesses valores ou numa única zona, dando também espaço para possíveis variações, caso sejam necessárias.

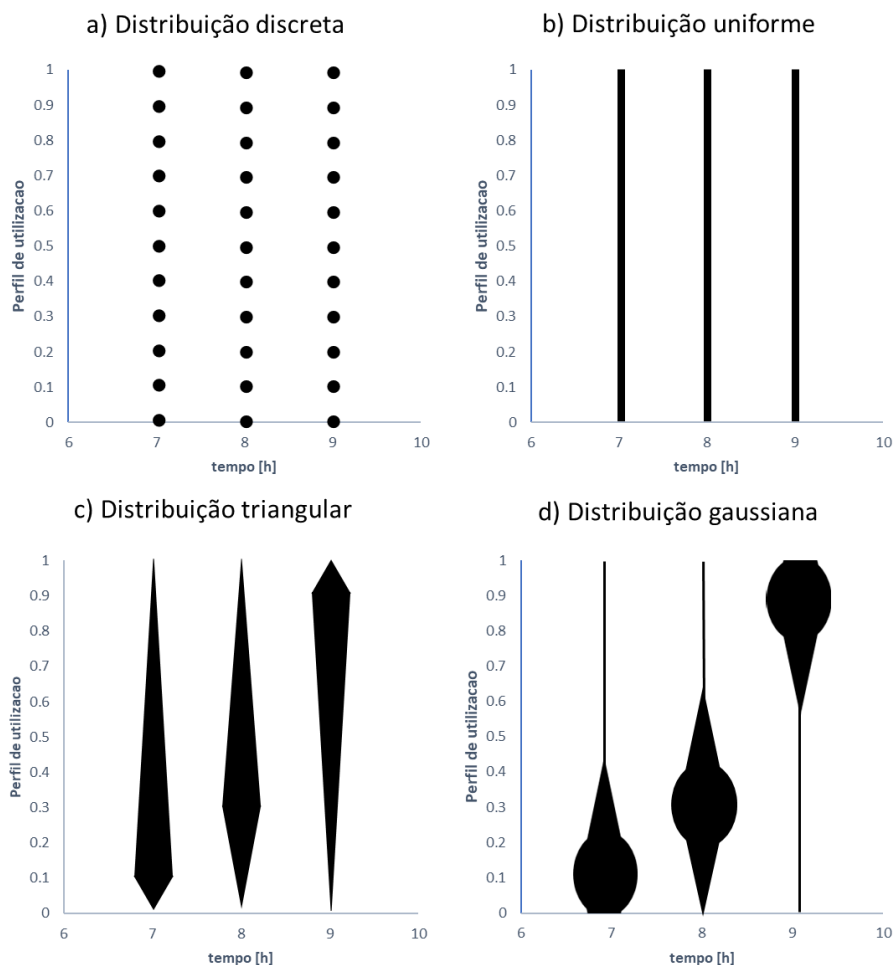


Figura 4-2: Representação horária (exemplo aplicado para as 7h, 8h e 9h) da probabilidade de seleção de cada valor de perfil de utilização para cada tipo de distribuição aplicada.

Foram então definidos 4 edifícios Simulados que se distinguem pelo tipo de distribuição horária (discreta, uniforme, triangular e gaussiana) aplicada na parametrização dos perfis de iluminação.

Os resultados obtidos através da otimização no *jEPlus+EA* estão representados na Figura 4-3, indicando a melhor combinação MBE-CVRMSE obtida para cada tipo de distribuição utilizada. Na Tabela 4-3 estão calculados os valores do GOF de modo a facilitar a comparação dos quatro resultados obtidos. Observa-se que a distribuição discreta foi a única a conseguir obter o perfil de iluminação exatamente igual ao do edifício Real ( $MBE = CVRMSE = 0$ )

A distribuição discreta tem a vantagem de utilizar durante a otimização os valores definidos, experimentando todos os casos possíveis até atingir a combinação igual ao perfil de referência. Para este caso, o perfil definido pelo ASHRAE Standard 90.1 apresenta os seus valores arredondados às décimas, razão pela qual esta distribuição, definida desta forma, se comportou tão bem neste exemplo. No entanto, o mesmo não será de esperar se o perfil horário base apresentar valores com mais casas decimais e com espaçamentos diferentes entre eles. Para estes casos, a distribuição discreta não se conseguiria adaptar de modo a obter resultados tão bons.

Por sua vez, usando a distribuição uniforme esta restrição associada aos valores discretos é ultrapassada, uma vez que esta distribuição consegue gerar qualquer valor entre 0 e 1, podendo-se ajustar aos consumos reais de cada caso de estudo. No entanto, e observando a Tabela 4-3, tem-se que esta distribuição apresenta o pior resultado desta fase de testes, com  $GOF = 4.36$ . Este facto deve-se à geração de muitos valores intermédios e pouca capacidade de convergência, sendo necessário um maior número de gerações e um maior tempo de otimização para obter melhores resultados.

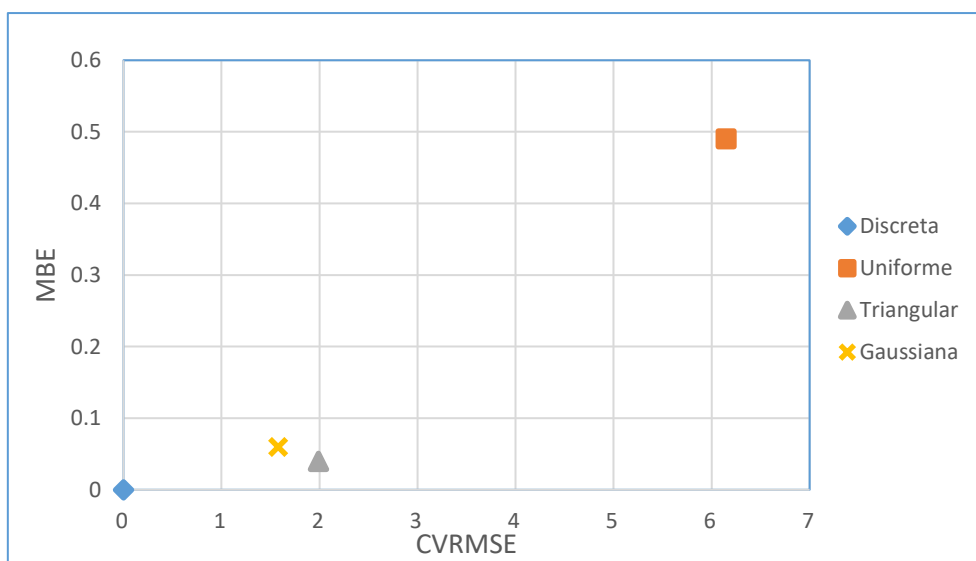


Figura 4-3: Resultados obtidos para a otimização dos perfis de iluminação para cada tipo de distribuição horária aplicada

Tabela 4-3: Valores de GOF para caracterizar a otimização obtida para cada distribuição utilizada

	Discreta	Uniforme	Triangular	Gaussiana
<b>GOF (%)</b>	0	4.36	1.41	1.12

A distribuição triangular apresenta valores de MBE e CVRMSE muito baixos, como pretendido, uma vez que o valor mais provável considerado corresponde ao valor definido no edifício Real. Esta distribuição apesar de ter uma elevada capacidade de convergência, apresenta também condições para se desviar do valor definido caso esse facto faça reduzir as diferenças entre valores medidos e simulados. Contudo, para aplicar esta distribuição, é necessário que o utilizador consiga estimar o valor mais provável para cada hora, sendo que muitas vezes essa é a principal dificuldade na definição de perfis de utilização em edifícios. Considera-se, no entanto, que com a realização de uma auditoria ao edifício seja possível criar um conhecimento mais aproximado dos mesmos.

A distribuição gaussiana apesar de apresentar melhores valores que a distribuição triangular ( $GOF_{gaussiana} < GOF_{triangular}$ ) apresenta alguns inconvenientes. O facto de não ser uma distribuição limitada faz com que seja possível serem selecionados valores negativos (se a média M for próxima de 0) ou valores superiores a 1 (se a média M for próximo de 1). Para que a simulação seja realizada nestes

moldes, é necessário alterar a configuração no *EnergyPlus* dos perfis de utilização de Fração (aceita valores entre 0 e 1) para Qualquer Número. Mas se o programa de simulação consegue realizar a simulação para valores de perfil superiores a 1 (mesmo que não tenham significado físico), o mesmo não se verifica para valores negativos. Assim, para valores de M próximos de zero, é necessário definir valores de desvio padrão muito reduzidos para garantir que não sejam gerados valores negativos que inviabilizem a simulação. Para o teste realizado, os resultados obtidos são bastante bons visto que o valor de M corresponde ao valor que se pretende obter, mas o mesmo não será esperado se este facto não se verificar, uma vez que ao reduzir o desvio padrão está-se a reduzir também a capacidade de desvio e procura da distribuição.

Tendo em conta os resultados obtidos, e querendo preservar a diversidade e capacidade da procura assim como a capacidade de convergência da otimização, tem-se que a distribuição triangular é a distribuição que apresenta melhores características para se aplicar no estudo da variação horária dos perfis de utilização.

### 4.3. Variação diária

#### 4.3.1. Perfis pré-definidos

Definida a distribuição a aplicar na variação horária do perfil, segue-se o estudo da influência da variação diária imposta aos perfis de utilização com o objetivo de selecionar o perfil horário base que minimiza as diferenças entre o edifício Simulado e o edifício Real.

Para isso, estudou-se os perfis pré-definidos recomendados por três entidades diferentes para serem utilizados nas simulações energéticas em edifícios de escritórios:

- ASHRAE Standard 90.1, que doravante será designado como “Perfil ASHRAE”;
- ISO 18523-1:2016, que doravante será designado como “Perfil ISO”;
- Decreto-Lei nº 79/2006, de 4 abril<sup>8</sup>, relativamente ao Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE), que doravante será designado como “Perfil RSECE”.

Os perfis de equipamentos encontram-se na Figura 4-4 (para os dias úteis) e na Figura 4-5 (para os fins-de-semana). As principais diferenças entre os três dizem respeito ao consumo em *standby*, ao período da pausa para almoço e às variações existentes durante o período de trabalho da manhã e da tarde. O perfil RSECE considera o consumo em *standby* de 0.15 tanto para o período não ocupado do edifício como para o fim-de-semana, enquanto no perfil ISO este valor é de 0.25. O perfil ASHRAE considera que este consumo é de 0.4 durante os dias úteis, reduzindo para 0.3 aos domingos, sendo que este perfil é o único que considera diferenças entre sábados e domingos.

---

<sup>8</sup> Decreto lei já revogado.

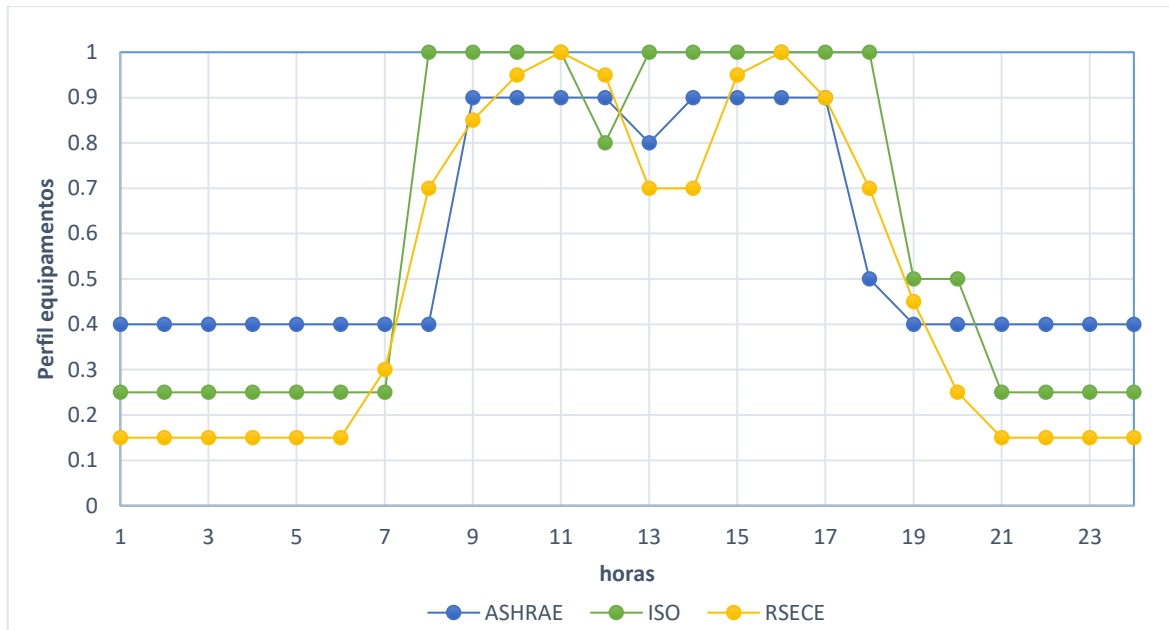


Figura 4-4: Perfis de equipamentos para Edifícios de escritórios relativamente aos dias úteis

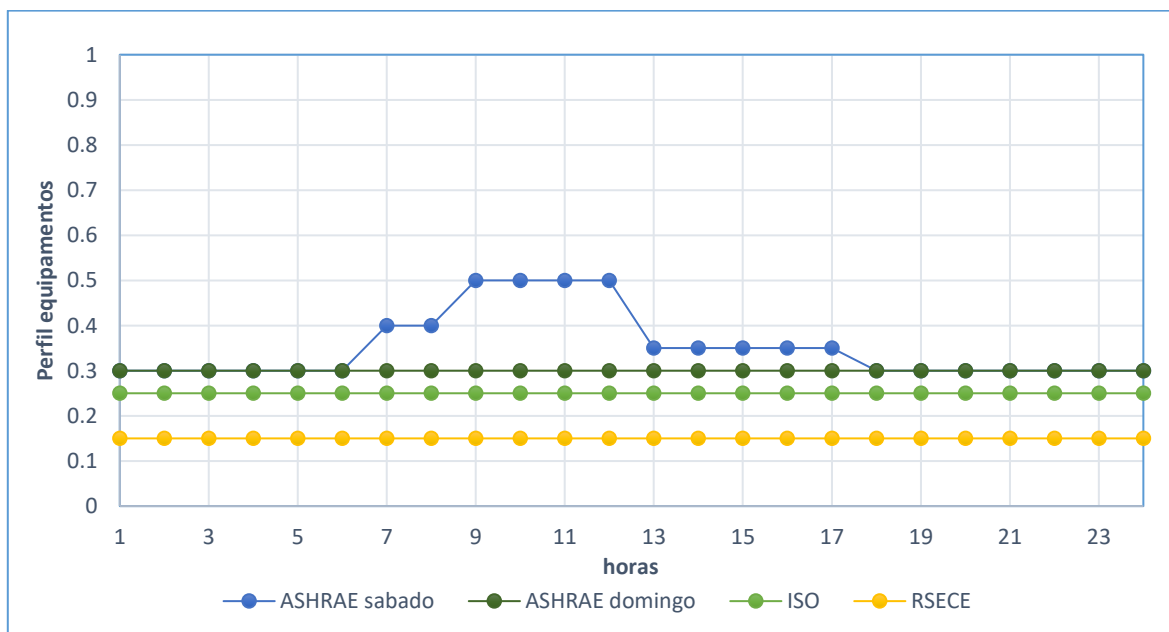


Figura 4-5: Perfis de equipamentos para Edifícios de escritórios relativamente aos fins-de-semana

Os perfis de iluminação encontram-se na Figura 4-6 (para os dias úteis) e na Figura 4-7 (para os fins-de-semana). O perfil ASHRAE considera que 90% da iluminação está constantemente ativa durante todo o período de ocupação do escritório, ao contrário dos outros perfis que consideram uma redução para 50% durante a pausa para almoço. O perfil RSECE caracteriza-se, tanto nos equipamentos como na iluminação, por apresentar uma curva de perfil bastante heterogénea e com alterações suaves de valores ao longo das 24 horas do dia. O perfil ISO apresenta o horário mais alargado de utilização da iluminação no edifício, das 8h às 20h, considerando que durante o período de não ocupação do escritório, toda a iluminação se encontra desligada. Pelo contrário, durante este período, os outros perfis consideram um consumo residual de iluminação de 5%.

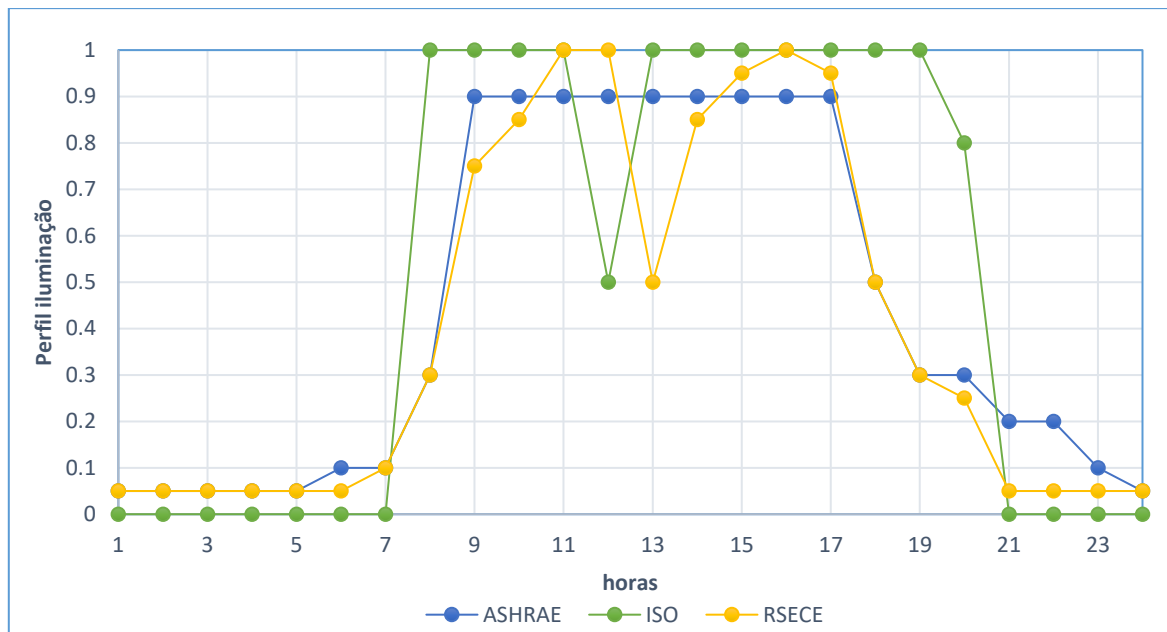


Figura 4-6: Perfis de iluminação para Edifícios de escritórios relativamente aos dias úteis

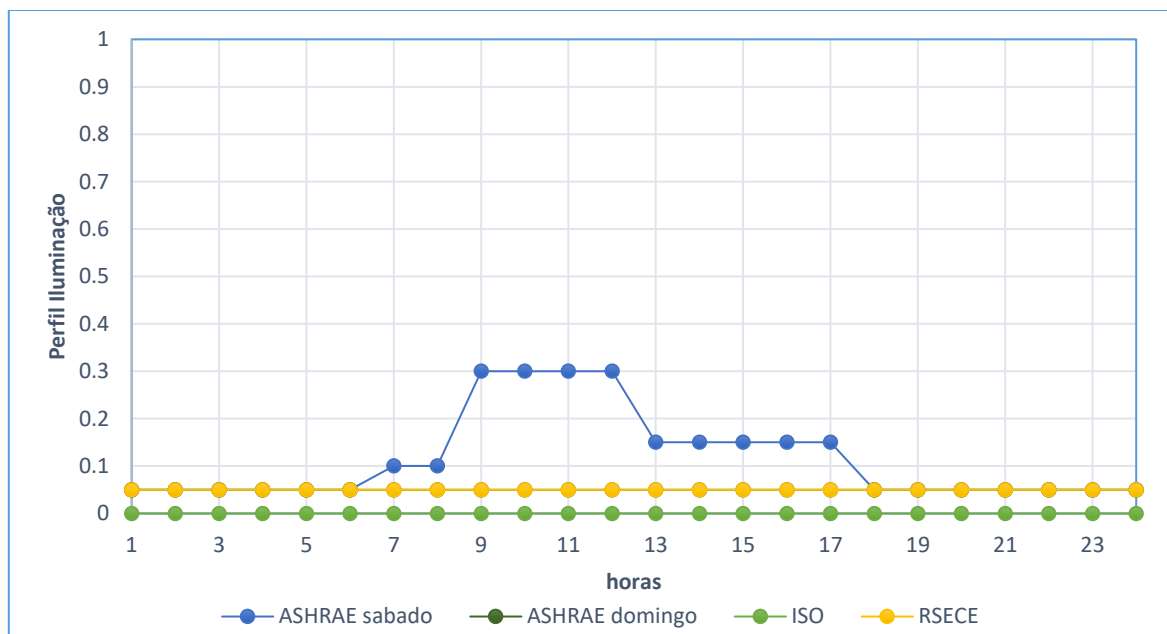


Figura 4-7: Perfis de iluminação para Edifícios de escritórios relativamente aos fins-de-semana

### 4.3.2. Relação entre perfil de iluminação e de equipamentos

Quando se efetuam medições de energia a edifícios existentes, verifica-se muitas vezes que os circuitos de iluminação e de equipamentos são comuns, obtendo-se por isso uma única medição para os dois consumos. Desta forma, torna-se difícil desagregar os consumos de cada um deles assim como identificar os respetivos perfis de utilização. A otimização simultânea dos perfis de iluminação e equipamento aumenta a gama de valores possíveis, não se refletindo, no entanto, numa melhoria da resposta do modelo.

Nesse sentido, e tendo em conta que é provável existir uma relação entre estes dois perfis, nesta fase do estudo foram utilizados os perfis horários base definidos na subsecção 4.3.1 para se avaliar a

existência (e em que moldes) de uma relação entre os perfis de equipamentos e iluminação, estimando o erro associado à aplicação desta simplificação para os diversos casos estudados.

Assim, para cada perfil horário base (ASHRAE, ISO e RSECE) e para cada hora do dia calculou-se a relação ( $R_{horario}$ ) entre o perfil de equipamentos e o perfil de iluminação segundo a equação (4.1), sendo assim possível calcular o perfil de iluminação sabendo *à priori* o perfil de equipamentos.

$$R_{horario} = \frac{Perfil\ Ilum}{Perfil\ Equip} \quad (4.1)$$

Com esta condição estabelecida, estudou-se o impacto de duas abordagens distintas:

- 1ª Abordagem: considera a média diária de  $R_{horario}$  para os dias úteis ( $T$ ) e para os dias não úteis, fins-de-semanas e feriados ( $Tf$ ). Existência de apenas uma relação entre iluminação e equipamentos para cada tipo de dia (úteis e não úteis);
- 2ª Abordagem: considera a média do período de ocupação ( $K$ ) e do período de não ocupação do escritório ( $Kd$ ). Desta forma, para os dias úteis, existem duas relações entre equipamentos e iluminação, sendo que nos não úteis, se não houver ocupação, existe apenas uma.

Para avaliar o impacto destas duas abordagens de simplificação, foram definidos 2 edifícios Simulados para cada perfil horário base (ASHRAE, ISO e RSECE) que se distinguem pela abordagem usada na definição da relação entre os perfis de equipamentos e iluminação. Definiu-se também três edifícios Reais, um para cada perfil horário base, em que os seus perfis de utilização são iguais aos impostos por cada entidade. Estes edifícios são simulados previamente com o objetivo de representarem o “consumo energético medido” associado à utilização de cada perfil horário base. Para este teste em específico foi necessário diferenciar o edifício Real usado para cada perfil horário base de modo a garantir que as diferenças registadas entre o edifício Real e edifício Simulado em cada caso se devessem exclusivamente à simplificação imposta na definição dos perfis de utilização.

Para os 6 edifícios Simulados, fixou-se o valor do perfil de equipamentos e através das relações impostas na Tabela 4-4 obteve-se o valor simplificado do perfil de iluminação para cada abordagem. Nesta primeira fase, não foi realizada qualquer otimização dos perfis para que fosse possível avaliar de uma forma independente o impacto desta simplificação. Todos os edifícios indicados foram simulados em *EnergyPlus*, sendo depois efetuado o cálculo manual dos valores de MBE e CVRMSE para cada par edifício Real – edifício Simulado de forma a avaliar as diferenças registadas.

Para a 2ª abordagem, o período de ocupação considerado para cada perfil horário base estudado foi definido através da análise dos respetivos perfis de ocupação.

Tabela 4-4: Resumo das duas abordagens que relacionam os perfis de iluminação e de equipamentos

<b>1ª Abordagem – Média Diária</b>	
<b>Dias úteis</b>	$ilum_{horario} = T \times equip_{horario}$ $T = Média(R_{horario_{útil}})$
<b>Dias não úteis</b>	$ilum_{horario} = Tf \times equip_{horario}$ $Tf = Média(R_{horario_{não\ útil}})$
<b>2ª Abordagem – Período de Ocupação</b>	
<b>Período de ocupação</b>	$ilum_{horario} = K \times equip_{horario}$ $K = Média(R_{horario_{periodo\ de\ ocupação}})$
<b>Período de não ocupação</b>	$ilum_{horario} = Kd \times equip_{horario}$ $Kd = Média(R_{horario_{periodo\ de\ não\ ocupação}})$

Os resultados obtidos estão representados na Tabela 4-5. A partir desta tabela é possível observar que, independentemente do perfil horário base imposto, a 2ª abordagem resulta sempre em índices estatísticos inferiores aos obtidos pela 1ª ( $GOF_{2ª\ abordagem} < GOF_{1ª\ abordagem}$ ).

Segundo a análise efetuada na subsecção 4.3.1, durante o período de funcionamento do edifício, tanto os equipamentos como a iluminação, estão a consumir perto do seu máximo, apresentando diferenças mais significativas durante os períodos de não ocupação. A 2ª abordagem ao preservar este comportamento, através da implementação de duas relações diárias entre equipamentos e iluminação, faz com que este método seja mais interessante não comprometendo os resultados finais da simulação.

Tabela 4-5: Resultados dos três tipos de perfis pré-definidos tendo em conta a abordagem adotada. Valores de MBE, CVRMSE e GOF em percentagem (%)

<b>Abordagem</b>	<b>Dias úteis</b>	<b>Dias não úteis</b>	<b> MBE </b>	<b>CVRMSE</b>	<b>GOF</b>
<b>Perfil ASHRAE</b>					
<b>1ª</b>	$T = 0.62$	$Tf_{sabado} = 0.3$ $Tf_{domingo} = 0.17$	10.7	27.1	20.6
Período de ocupação: 9h às 17h					
<b>2ª</b>	$K = 1.01$ $Kd = 0.38$	$K_{sabado} = 0.5$ $Kd_{sabado} = 0.18$ $K_{domingo} = Kd_{domingo} = 0.17$	1.2	9.4	6.7
<b>Perfil ISO</b>					
<b>1ª</b>	$T = 0.59$	$Tf = 0$	16.7	34.7	27.2
Período de ocupação: 8h às 20h					
<b>2ª</b>	$K = 1$ $Kd = 0$	$K = Kd = 0$	1.5	13.7	9.8
<b>Perfil RSECE</b>					
<b>1ª</b>	$T = 0.64$	$Tf = 0.33$	11.9	28.3	21.7
Período de ocupação: 8h às 18h					
<b>2ª</b>	$K = 0.91$ $Kd = 0.41$	$K = Kd = 0.33$	2.1	12.6	9.0

Analisando agora apenas os resultados referente à 2ª abordagem, é possível observar que o valor de  $K$  referente aos dias úteis tende a ser muito próximo de um, significando que durante o período de funcionamento do edifício o perfil de iluminação tende a ser igual ao perfil de equipamentos, para os três perfis horários base em estudo. A mesma concordância não se verifica para o valor de  $Kd$ , podendo este variar entre 0 (não se verifica consumo de iluminação durante o período de não ocupação do edifício) e 0.4. Este facto mostra que as três entidades consideradas abordam de forma diferente o consumo em *standby* tanto na iluminação como nos equipamentos.

Por isso, testou-se a influência do *standby* de modo a verificar uma combinação  $K - Kd$  que fosse aceite e pudesse ser aplicável de um modo geral. Considerou-se por isso  $K = 1$  e fez-se variar  $Kd$  entre 0 (1º Cenário – valor obtido pelo perfil ISO), 0.2 (2º Cenário – valor médio) e 0.4 (3º Cenário – valor obtido pelo perfil ASHRAE). Para os três cenários definidos, considerou-se que todo o fim de semana representava um período de não ocupação, tendo igual valor ao período não ocupado durante a semana.

Utilizou-se novamente os edifícios Reais anteriormente considerados e definiu-se 9 novos edifícios Simulação, sendo definidos os 3 cenários indicados para cada perfil horário base. Os resultados obtidos estão representados na Figura 4-8 e na Tabela 4-6. O 1º, 2º e 3º Cenário estão representados na Figura 4-8 por um quadrado, triângulo e círculo, respetivamente. O perfil que apresenta maior variação entre os cenários estudados é o ASHRAE, sendo que o ISO é o que sofre menos impacto quando se altera a componente de *standby*.

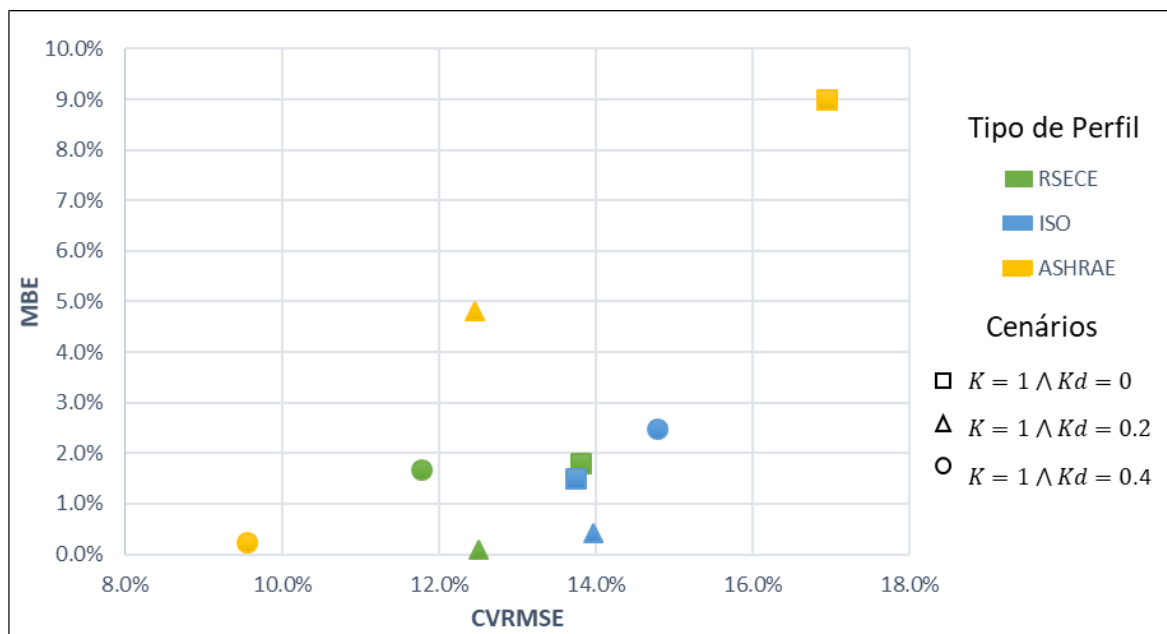


Figura 4-8: Influência do *standby* (consumo energético no período de não ocupação do edifício) nos resultados na calibração do modelo.

Tabela 4-6: Valores de GOF (%) para caracterizar a otimização obtida para cada cenário de simplificação

	ASHRAE	ISO	RSECE
<b>1º Cenário</b>	13.6	9.8	9.8
<b>2º Cenário</b>	9.4	9.9	8.9
<b>3º Cenário</b>	6.8	10.6	8.4

É interessante referir que para o perfil ASHRAE, a 2ª abordagem ( $GOF = 6.7$ ) resulta em resultados muito semelhantes aos obtidos pelo Cenário 3 ( $GOF = 6.8$ ) mesmo tendo este último sofrido mais processos de simplificação. Apesar de para os dias úteis os valores de  $K$  e  $Kd$  serem muito semelhantes (1 e 0.4 respetivamente), é no fim de semana que existem mais diferenças, estando a 2ª abordagem a atribuir valores diferentes para sábado e domingo e o 3º Cenário a considerar apenas uma relação fixa para todo os dias não úteis. Serve este facto para mostrar que as simplificações aplicadas aos dias não úteis têm pouco impacto nos resultados globais do consumo do edifício.

O cenário que apresenta resultados relativamente semelhantes para os três perfis utilizados é o Cenário 2, com  $K = 1$  e  $Kd = 0.2$ , (com valores de GOF de 9.4, 9.9 e 8.9 para ASHRAE, ISO e RSECE, respetivamente), caracterizando-se como sendo o cenário intermédio dos três definidos.

Através da análise de três perfis pré-definidos utilizados no âmbito da simulação energética em edifícios de escritórios, foi possível concluir que são necessárias duas relações entre iluminação e equipamentos para definir um dia num edifício de escritórios, sendo uma relação ( $K = 1$ ) referente ao período de ocupação (em que o perfil de iluminação é igual ao de equipamentos) e outra ( $Kd = 0.2$ ) referente ao período de não ocupação (em que o perfil de iluminação representa 20% do de equipamentos). Referindo, novamente, que nos dias de fins de semana se aplica a relação dos períodos de não ocupação ( $Kd = 0.2$ ).

Considerando o perfil de equipamentos fixo, a aplicação desta simplificação resulta num erro MBE de até 5%, CVRMSE de até 14% e GOF de até 14%. Na secção seguinte, ao realizar-se a otimização dos perfis de utilização nestas condições, espera-se conseguir reduzir ainda mais estes erros.

### 4.3.3. Otimização dos perfis, com $K = 1$ e $Kd = 0.2$

Para avaliar o impacto desta simplificação no processo de otimização dos perfis de utilização, são realizados nesta secção duas experiências independentes. A primeira experiência tem como objetivo verificar se a otimização dos perfis de equipamentos (quando se aplica o 2º cenário de simplificação com  $K = 1$  e  $Kd = 0.2$ ) resulta em valores de índices estatísticos inferiores aos indicados na secção anterior. A segunda experiência tem como objetivo avaliar o comportamento de adaptação dos três perfis horários base durante o processo de calibração (quando aplicado o 2º cenário) quando lhe é imposto um edifício Real que apresenta valores diferentes daqueles que foram usados para definir os valores de  $X$ , que definem a distribuição triangular horária.

#### Primeira experiência

Para realizar a primeira experiência foram definidos três edifícios Reais, um para cada perfil horário base, tal como na secção 4.3.2, e três edifícios Simulados em que se aplicou, aos perfis de equipamentos, a variação horária segundo uma distribuição triangular (como concluído na secção 4.2) e a simplificação referente ao 2º cenário. Os resultados obtidos da otimização no *jEPlus+EA* estão descritos na Tabela 4-7.

Tabela 4-7: Índices estatísticos que caracterizam a otimização no *jEPlus+EA* com o 2º cenário para os três perfis horários base estudados

Perfil horário base	<i>jEPlus+EA</i> + 2º Cenário		
	MBE	CVRMSE	GOF
ASHRAE	0.5	8.7	6.2
ISO	1.0	10.7	7.6
RSECE	0.2	10.4	7.4

Analisando a Tabela 4-7 em conjunto com a Tabela 4-6, verifica-se que, para os três perfis analisados, a incorporação do 2º Cenário no programa de otimização resulta em perfis de utilização mais próximos dos do edifício Real de cada um ( $GOF_{jEPlus+EA+2^{\circ} \text{ cenário}} < GOF_{2^{\circ} \text{ cenário}}$ ), sendo a redução nos valores de GOF de 3.2%, 2.3% e 1.5% para ASHRAE, ISO e RSECE, respetivamente.

Tem-se também que os resultados obtidos a partir da otimização no *jEPlus+EA* são sempre melhores que o melhor cenário obtido para cada perfil ( $GOF_{jEPlus+EA+2^{\circ} \text{ cenário}} < GOF_{\text{melhor cenário}}$ ).

Estes dois resultados demonstram a capacidade adaptativa do método de otimização criado para os perfis de utilização. O facto de os valores de X serem otimizados de modo a diminuir as diferenças registadas entre os consumos Reais e Simulados, faz com que o impacto da simplificação imposta aos perfis se reduza.

Na Figura 4-9 estão representados os perfis de iluminação obtidos para o perfil ISO quando aplicado apenas o 2º cenário e quando aplicada a otimização no *jEPlus+EA* com o 2º cenário. A diferença existente entre a aplicação isolada do 2º cenário e com o *jEPlus+EA* é que neste último dá-se a liberdade de ajuste ao perfil caso seja necessário alterar o seu valor provável horário de modo a aproximar-se do perfil ISO. Observa-se que em períodos de maior diferença, a otimização consegue reduzi-la, como é o caso do período das 12h e entre as 18h e as 20h.

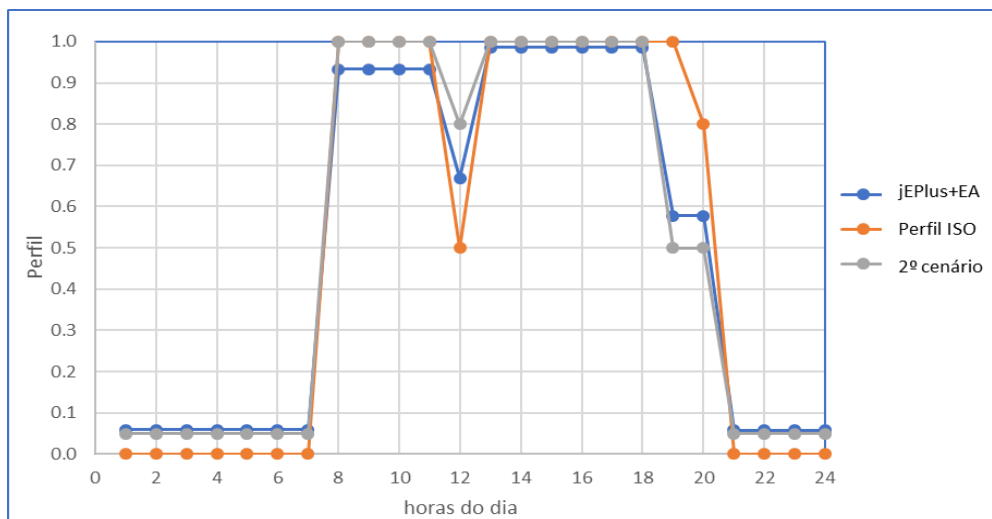


Figura 4-9: Comparação do perfil de iluminação ISO para dias úteis com o obtido através do 2º cenário e do *jEPlus+EA*

## Segunda experiência

Para realizar a segunda experiência foi definido um único edifício Real para os três edifícios Simulados da experiência anterior. Ou seja, os consumos simulados resultantes da utilização dos perfis horário base ASHRAE, ISO e RSECE serão comparados com o mesmo consumo Real de modo a ser possível calcular os índices estatísticos necessários à calibração.

Para o edifício Real considerou-se o perfil de iluminação e equipamentos igual ao da

Figura 4-10, designado por perfil Novo. Este perfil foi gerado aleatoriamente, tendo, no entanto, como base os três perfis pré-definidos estudados, havendo espaço para a inserção de variações ao longo do dia, para equipamentos e iluminação, dividido em dias úteis e não úteis. Definiu-se então, para a segunda experiência, o edifício Real com o perfil Novo a definir os perfis de utilização.

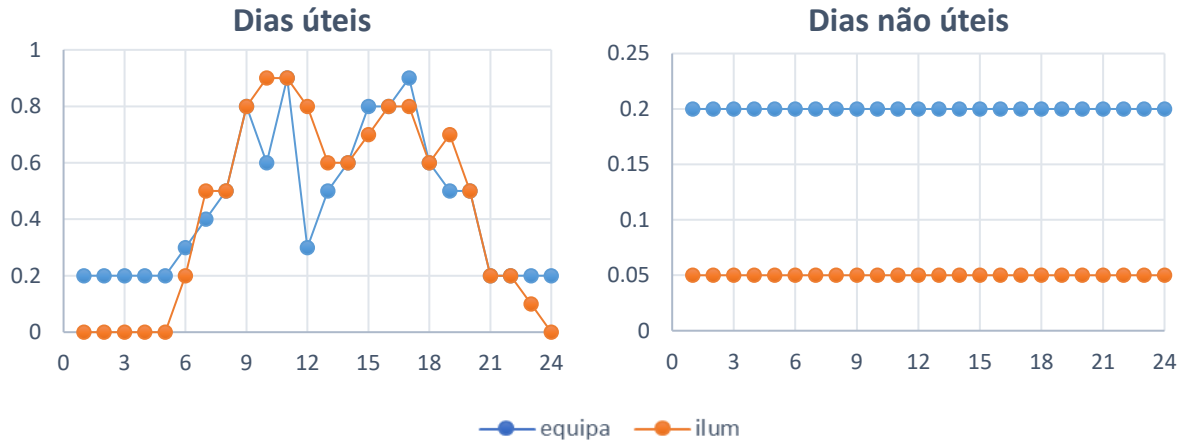


Figura 4-10: Perfil Novo de iluminação e equipamentos para dias úteis e não úteis.

Os perfis obtidos através da otimização, para cada perfil horário base, estão descritos em seguida, sendo que na Figura 4-11 é possível observar os perfis de equipamentos e na Figura 4-12 os perfis de iluminação, ambos para dias úteis. Na Tabela 4-8 estão indicados os valores dos índices estatísticos para cada otimização realizada.

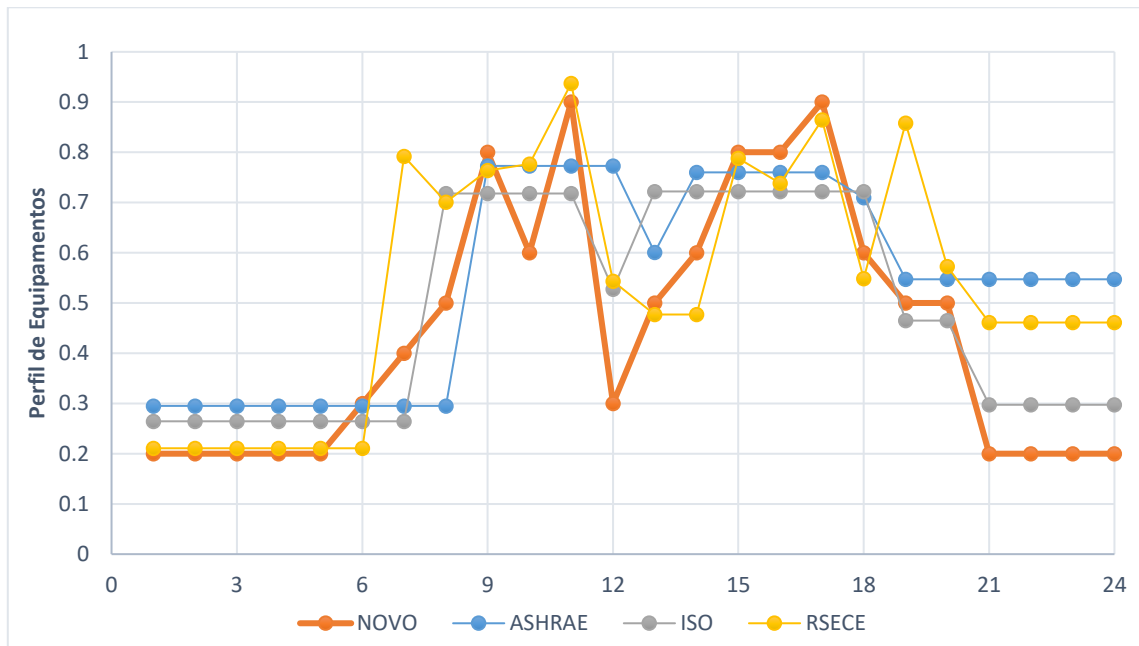


Figura 4-11: Otimização dos perfis de equipamentos para dias úteis para cada perfil horário base, tendo sido utilizado como perfil Real o perfil Novo.

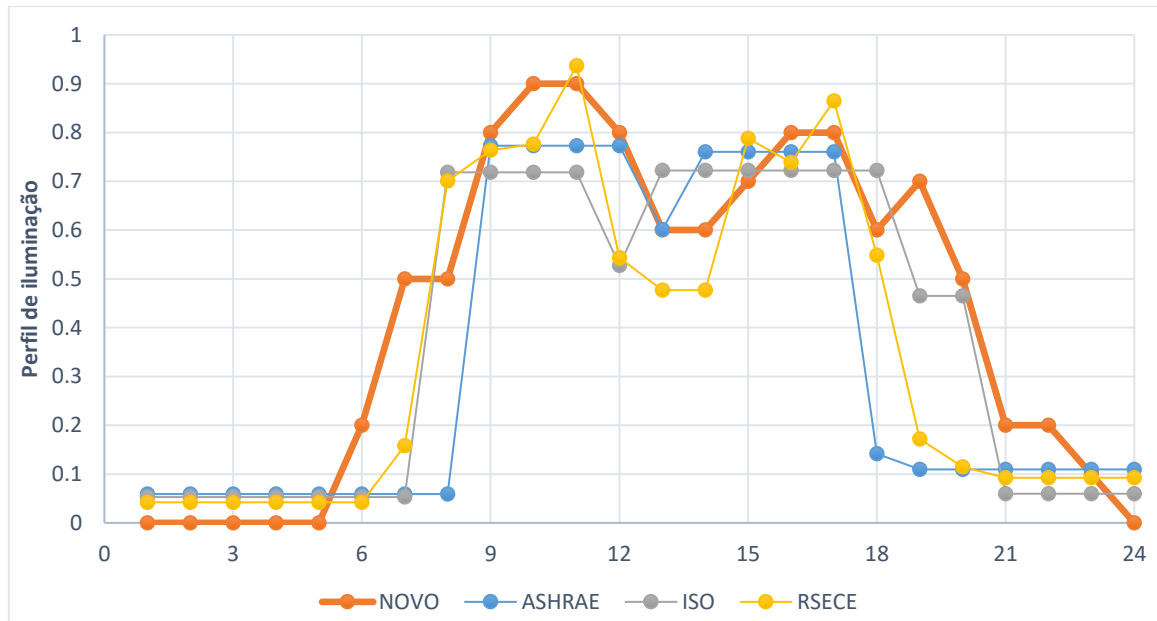


Figura 4-12: Otimização dos perfis de iluminação para dias úteis para cada perfil horário base, tendo sido utilizado como perfil Real o perfil Novo.

Tabela 4-8: Índices estatísticos (%) para cada perfil horário base quando imposto no seu edifício Real o perfil Novo

Tipo de Perfil	MBE	CVRMSE	GOF
ASHRAE	0.4	31.3	22.1
ISO	0.2	24.7	17.4
RSECE	0.4	16.9	11.9

É possível observar que o perfil RSECE é aquele que consegue obter perfis de utilização mais semelhantes aos perfis Reais, resultando, por isso, em índices estatísticos inferiores. Por sua vez, os perfis ISO e ASHRAE, ao não permitirem variações durante o período de trabalho da manhã e da tarde, não se conseguem adaptar com a mesma facilidade, fazendo apenas um ajuste médio durante esse período de modo a reduzir as diferenças.

Uma vez que são os perfis de equipamentos a serem otimizados, é de esperar que o perfil de equipamentos gerado seja muito semelhante ao respetivo perfil Real de equipamentos e que o perfil de iluminação gerado apresente algumas diferenças em relação ao seu perfil Real de iluminação. No entanto, a otimização é realizada tendo em conta os valores de K e Kd, sendo que o valor horário do perfil de equipamentos influencia o consumo de equipamentos assim como o de iluminação, dada a relação estabelecida entre eles.

#### 4.4. Notas conclusivas

Ao realizar os testes apresentados ao longo deste capítulo foi possível identificar a melhor parametrização a adotar quando se pretende variar os perfis de utilização de modo a minimizar as diferenças registadas entre consumo Real e consumo Simulado.

No que diz respeito à variação horária, concluiu-se que esta deve ser aplicada sob a forma de uma distribuição probabilística triangular para preservar a diversidade e, ao mesmo tempo, a capacidade de convergência da otimização. Para cada hora, é necessário então definir o valor mais provável X para que seja possível definir a curva de probabilidade do perfil, como indica a Figura 4-2-c.

No que diz respeito à variação diária, tem-se que o perfil RSECE é aquele que apresenta maior diversidade horária nos seus perfis de iluminação e equipamentos e, por isso, quando otimizados, conseguem-se adaptar melhor ao perfil Real de modo a minimizar as diferenças entre ambos.

Concluiu-se também, com a análise detalhada de três perfis pré-definidos recomendados para a simulação energética em edifício de escritórios, que é possível estabelecer uma relação entre os perfis de iluminação e de equipamentos de modo a simplificar o processo de otimização sem comprometer demasiado os resultados finais obtidos. Devem ser aplicadas duas relações diárias para os dias de semana ( $K = 1$  para os períodos de ocupação e  $Kd = 0.2$  para os períodos de não ocupação) e uma relação para os dias de fim de semana ( $Kd = 0.2$ ). Desta forma, consegue-se obter o perfil de iluminação a partir do perfil de equipamentos, sendo apenas necessário aplicar a parametrização horária ao perfil de equipamentos. Esta relação ( $K$  e  $Kd$ ) pode ter variações importantes sendo necessário haver um conhecimento prévio do edifício, dos seus equipamentos e usos.

Analisando agora os valores gerais obtidos pelos índices estatísticos, tem-se que MBE e CVRMSE apresentam valores muito díspares entre eles.

O MBE, que representa a média dos erros de uma amostra, constitui um bom indicador do comportamento geral dos valores simulados em relação à sua linha de regressão. Quando é positivo significa que o modelo está a subestimar os consumos reais, sendo que quando é negativo está a sobrestimá-los. O principal problema deste índice é a razão pela qual não deve ser utilizado isoladamente, diz respeito à ocorrência de compensações de erro em que a soma de erros positivos e negativos leva a uma redução do valor de MBE. É possível observar este facto na Tabela 4-8, em que todos os valores de MBE obtidos se encontram bem abaixo do valor recomendado (10%) mesmo quando os respetivos valores de CVRMSE são muito elevados.

Por outro lado, o CVRMSE, que mede a variabilidade dos erros entre os valores simulados e medidos, dá uma indicação da capacidade do modelo de prever a forma da carga global do edifício que é refletida nas medições realizadas ao mesmo. Durante os testes realizados ao longo deste capítulo foi possível verificar sempre grandes variações deste índice, sendo mais reduzido quanto maior fosse a proximidade do perfil Simulado ao perfil Real. Na

Figura 4-10 é possível verificar uma diferença significativa entre a performance do perfil ASHRAE em relação ao perfil RSECE, no entanto, ambos apresentam o mesmo valor de MBE. Assim, o índice que de facto tem a capacidade de mostrar se o modelo está a prever bem a forma do perfil de carga do edifício em estudo é o CVRMSE.

Considerando os resultados obtidos neste capítulo, segue-se agora a sua aplicação a um edifício existente de modo a validar a sua robustez perante um modelo e um edifício de maior complexidade.

## Capítulo 5 – Caso de estudo

### 5.1. Aspetos gerais

O presente capítulo apresenta os resultados da aplicação da metodologia descrita e testada nos capítulos anteriores a um edifício de escritórios. Este capítulo encontra-se dividido em 7 secções. A secção 5.1 constitui um breve resumo dos tópicos abordados neste capítulo. Na secção 5.2 é caracterizada a localização do edifício, descrevendo o seu clima e sua envolvente geográfica. Na secção 5.3 são apresentadas as características geométricas, térmicas e energéticas do edifício em estudo. Na secção 5.4 são apresentados os resultados das medições de energia realizadas ao caso de estudo. Na secção 5.5 é descrito todo o processo de obtenção do modelo de simulação energético que representa o edifício e será simulado em *EnergyPlus*. Na secção 5.6 é realizada a calibração do modelo tendo em conta as simulações e medições feitas, aplicando-se aqui a metodologia descrita. O capítulo termina com uma secção de resumo (5.7) com as principais conclusões do mesmo.

### 5.2. Localização

O edifício selecionado para o presente estudo é o Edifício de ensaio de componentes do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), localizado na freguesia de Alvalade, em Lisboa. O LNEC é uma instituição pública de investigação e desenvolvimento científico e tecnológico, sendo constituído por 13 edifícios principais e por mais de 10 pavilhões de ensaios. Este edifício, que doravante será denominado por Edifício de Componentes, pertence ao departamento de Edifícios e tem como principal função servir de local de diversos ensaios de vãos envidraçados e opacos assim como fachadas, albergando também os gabinetes dos trabalhadores deste departamento. Na Figura 5-1 é possível observar a sua localização no mapa de Portugal bem como sua fachada principal orientada a sul.



Figura 5-1: Localização do edifício em estudo. Imagem de satélite retirada do Google Earth Pro.

Na Figura 5-2 é possível observar as características climáticas (irradiação global e temperatura média, máxima e mínima) do município de Lisboa, obtidas através do ficheiro climático produzido pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) no âmbito do Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de agosto com posteriores alterações [41].

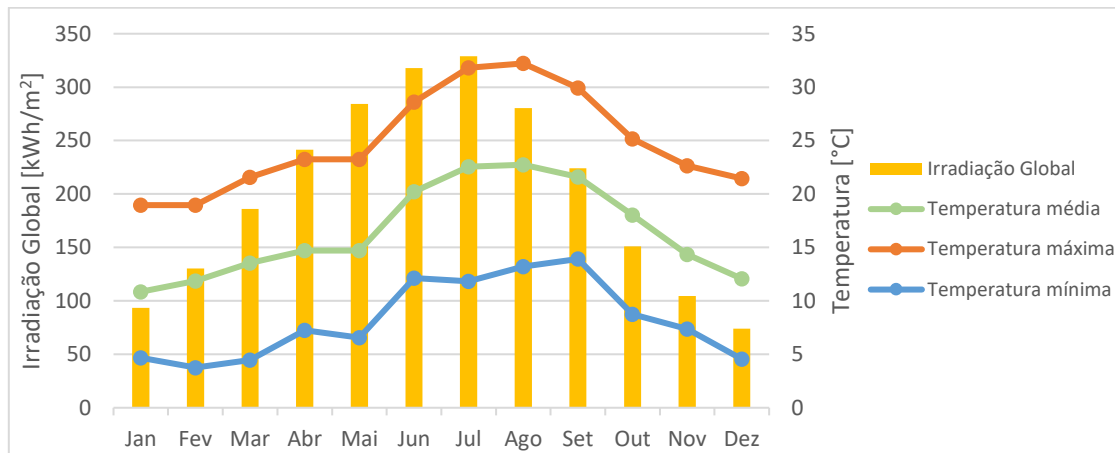


Figura 5-2: Características climáticas do município de Lisboa. Informação retirada de [41].

A região da Grande Lisboa apresenta uma irradiação global média de  $202 \text{ kWh/m}^2$  e uma temperatura média anual de  $16.6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Segundo o Despacho n.º 15793-F/2013 da Direção-Geral de Energia e Geologia, é atribuído ao município de Lisboa a classificação de zona climática de inverno I1, com  $1071 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{dias}$ , e de zona climática de verão V2, com  $21.7 \text{ }^\circ\text{C}$  de temperatura média no verão.

### 5.3. Descrição do edifício

O edifício de Componentes foi construído em 1982 e dada a sua utilização e área de pavimento é classificado, segundo a legislação em vigor, como um grande edifício de comércio e serviços. Este edifício apresenta três pisos (piso térreo, piso 2 e piso 3) e todas as suas quatro fachadas encontram-se em contacto com o exterior. Na Tabela 5-1 estão representadas as características gerais referentes à sua geometria.

Tabela 5-1: Resumo das características geométricas do edifício de Componentes

<b>Área planta (<math>m^2</math>)</b>		1283
<b>Área pavimento (<math>m^2</math>)</b>		2018
<b>Altura total (m)</b>		10.54
<b>Pé direito (m)</b>	<b>Piso térreo</b>	3.64
	<b>Piso 2</b>	2.80
	<b>Piso 3</b>	3.53
<b>Área envidraçada/área pavimento</b>		14 %
<b>Área envidraçada/área fachada</b>		22 %

O piso térreo é constituído sobretudo por laboratórios, oficinas e salas de arrumos. Destaca-se neste piso a existência de uma grande nave de ensaios que ocupa toda a ala norte, em que o seu pé direito é de 10.54. Por sua vez, os pisos 2 e 3 são constituídos maioritariamente por gabinetes individuais. Na Figura 5-3 é possível observar o esquema das plantas do edifício em estudo tendo este sido dividido em três grandes zonas mediante a sua tipologia:

- Zona de Ensaio: esta zona inclui a grande nave de ensaios assim como as oficinas de apoio. Este tipo de zona é exclusivo do piso térreo do edifício;
- Zona de Laboratórios: esta zona refere-se aos laboratórios que se localizam no piso 1 (térreo). Inclui-se aqui também alguns gabinetes de apoio e instalações sanitárias adjacentes aos laboratórios.
- Zona de Gabinetes: esta zona refere-se a todo o piso 2 e 3, incluindo gabinetes e respetivas zonas de circulação, instalações sanitárias, a sala de refeições e o arquivo (ambos no piso 3). Os gabinetes são na sua maioria individuais estando sempre localizados na fachada Sul do edifício.

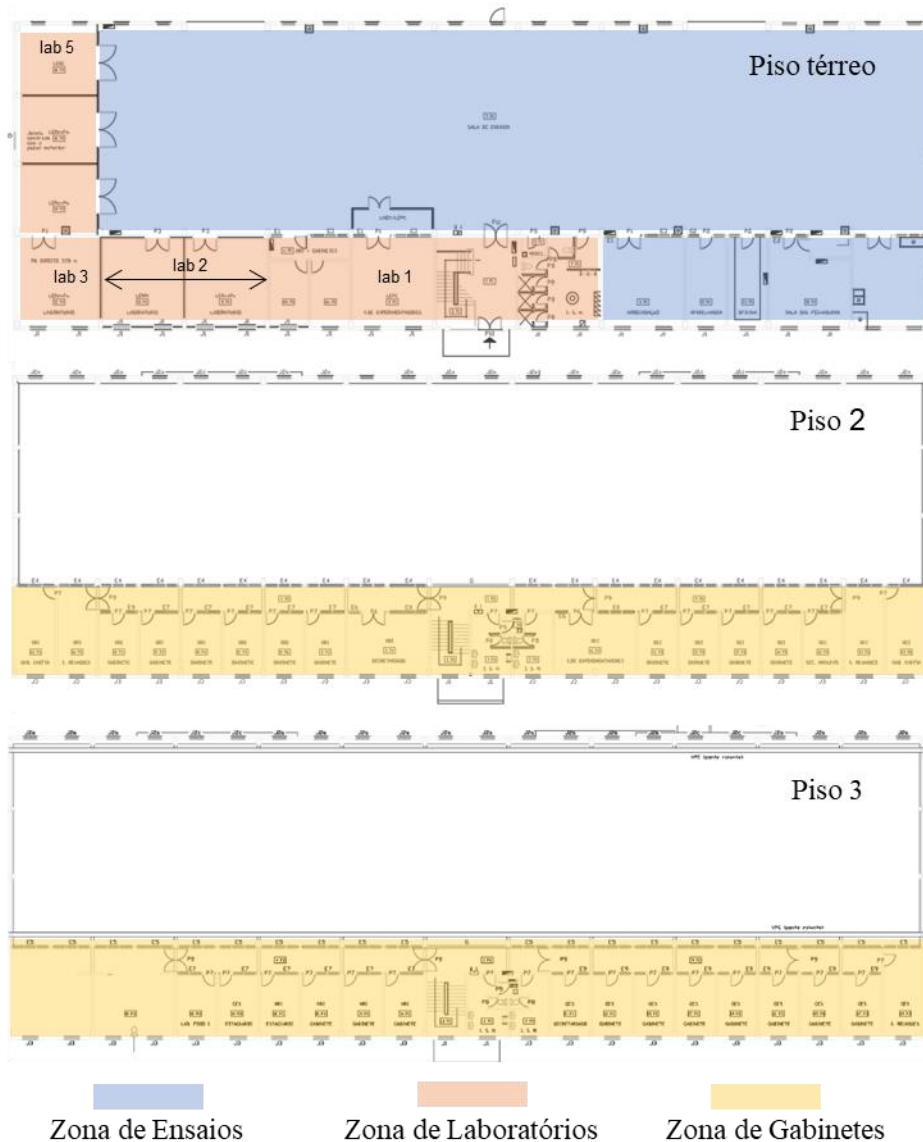


Figura 5-3: Divisão da planta do edifício de Componentes nas suas três zonas principais

Não foi possível ter acesso ao projeto inicial do edifício de Componentes, pelo que não se tem a certeza de todos os materiais e constituintes da sua envolvente. Desta forma, e recolhendo toda a informação disponível e atendendo à sua época de construção, considerou-se:

- Paredes exteriores de alvenaria simples com alguns elementos em betão armado, sem isolamento. Exceto no laboratório 2 (na Figura 5-3 designado por lab 2) em que dada a necessidade de isolamento devido à realização de ensaios específicos se adotou por uma parede dupla com uma caixa de ar no seu interior;

- Cobertura em terraço constituída por lajes de betão, com isolamento de 100 mm apenas na zona dos gabinetes;
- Na fachada Sul encontram-se janelas de alumínio de vidro simples incolor de 4 mm, estando estas protegidas por persianas com réguas de PVC. Exceto no laboratório 2, que foram instaladas janelas duplas sendo o vidro da janela interior duplo. As grandes janelas da nave de ensaios são de alumínio de vidro duplo;

A iluminação artificial do edifício é feita maioritariamente através de lâmpadas fluorescentes tubulares de 36 W para todos os gabinetes e laboratórios, fluorescentes tubulares de 55 W para as escadas e entrada e de iodetos metálicos de 400 W para a nave de ensaios;

O aquecimento do edifício é feito através de um sistema de radiadores elétricos que fornecem os gabinetes dos pisos 2 e 3. Refere-se ainda que apenas os laboratórios 1, 3 e 5 (na Figura 5-3 designado por lab 1, lab 3 e lab 5, respetivamente) têm um sistema AVAC instalado, sendo usado apenas quando existem determinadas atividades/experiências a decorrer.

## 5.4. Modelo de simulação

Depois de descrito o edifício que se pretende estudar, segue-se agora a criação do seu modelo de simulação de forma a ser possível averiguar o seu desempenho energético, tendo-se recorrido, para isso, à ferramenta de simulação energética *EnergyPlus* [26]. Este é o modelo que será alvo do processo de otimização dos perfis de utilização (na secção 5.6) de modo a se atingir a sua calibração.

Nesta secção serão descritas as opções tomadas e os valores utilizados para a definição e implementação do modelo de simulação energético do edifício de Componentes, como a definição das zonas térmicas (secção 5.4.1) e os parâmetros e valores utilizados para definir a sua envolvente e sistemas energéticos (secção 5.4.2).

### 5.4.1. Zonas Térmicas

Segundo o Decreto-Lei n.º 118/2013, de 20 de agosto com posteriores alterações, uma zona térmica é “o espaço ou conjunto de espaços passíveis de serem considerados em conjunto devido às suas similaridades em termos de perfil de utilização, iluminação e equipamentos, ventilação mecânica e sistema de climatização e, quanto aos espaços climatizados, igualmente devido às similaridades em termos de condições de exposição solar”. Tendo em consideração estes critérios, foram definidas 27 zonas térmicas para criar o modelo de simulação energética do edifício de Componentes representado na Figura 5-4 e Figura 5-5, sendo que estas se encontram definidas na Figura 5-6.

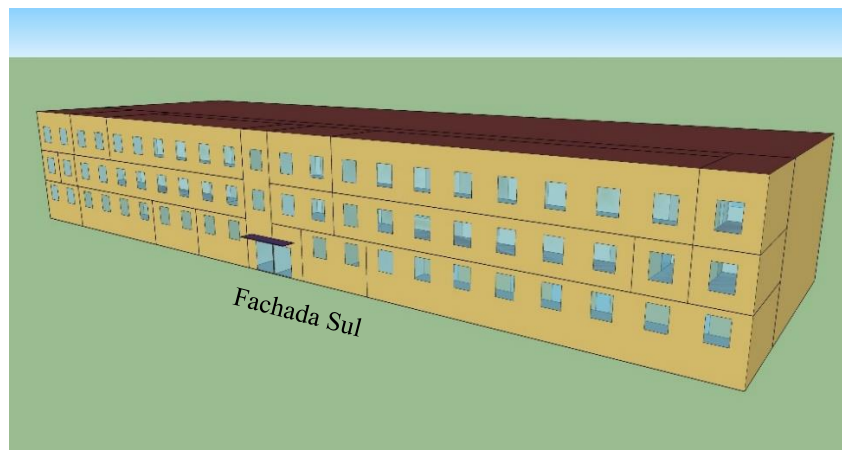


Figura 5-4: Modelo em 3D do edifício de Componentes. Imagem da fachada Sul (principal) e fachada Este.

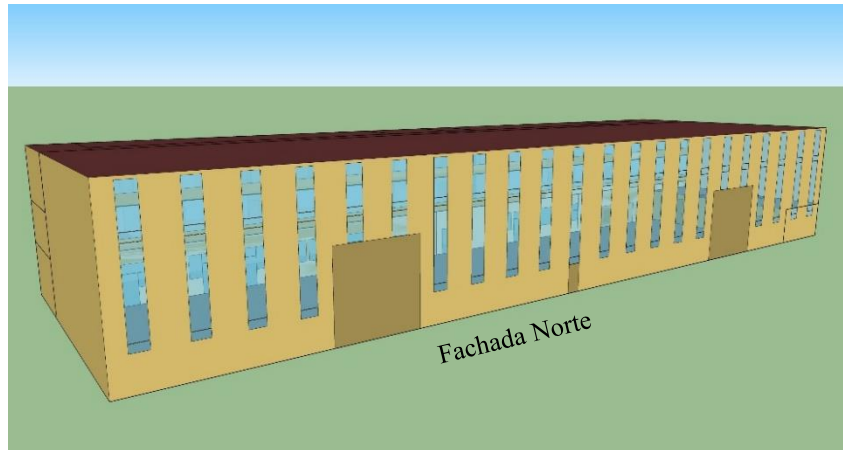


Figura 5-5: Modelo em 3D do edifício de Componentes. Imagem da fachada Norte (com as janelas) e fachada Oeste.

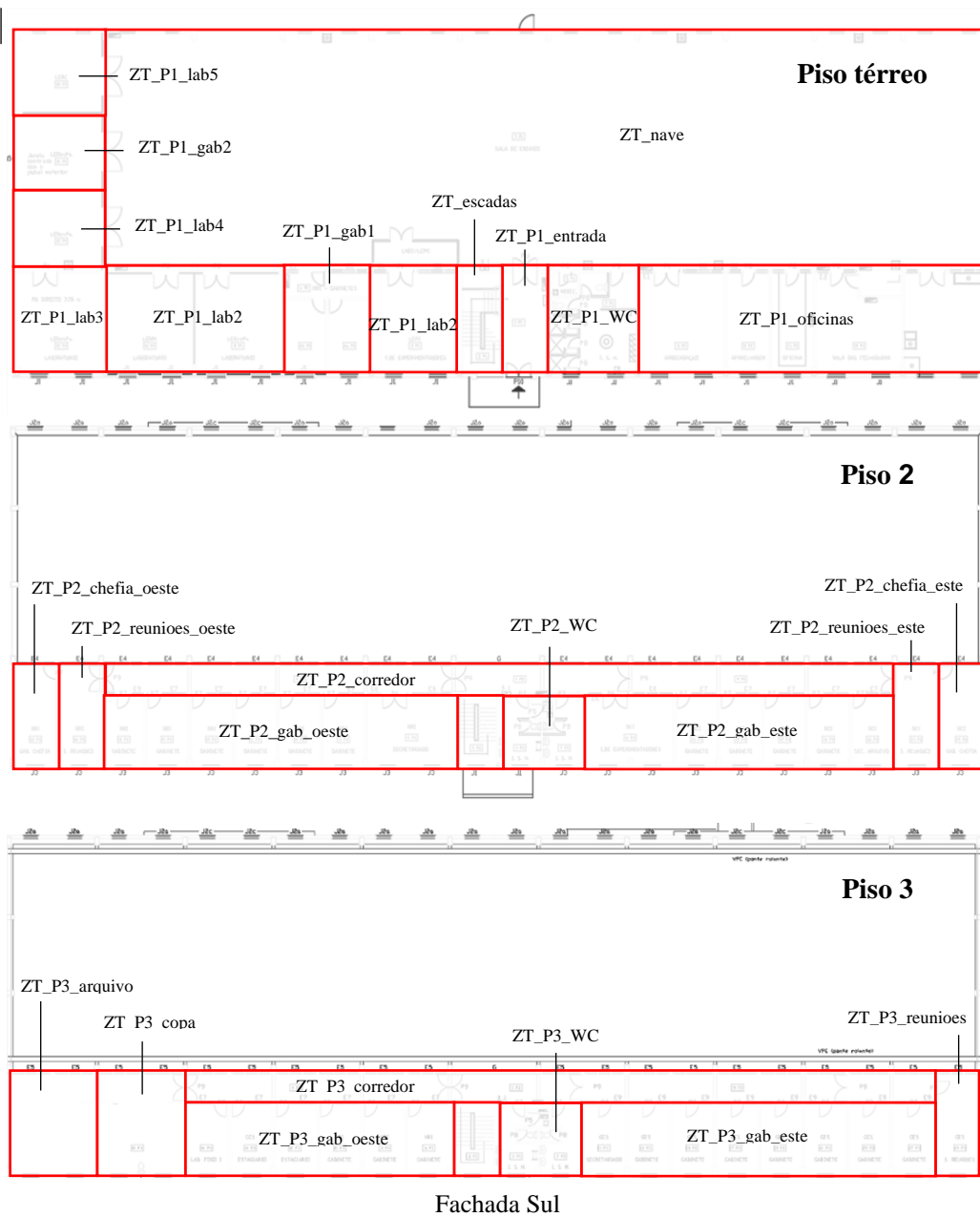


Figura 5-6: Identificação, em planta, das zonas térmicas definidas no programa de simulação

### 5.4.2. Parâmetros da simulação

Segundo a Portaria nº 349-D/2013, de 2 de dezembro e posteriores alterações, do Regulamento de desempenho energético dos edifícios de comércio e serviços (RECS), para caracterizar um edifício para efeitos de aplicação do método de simulação dinâmica multizona é necessário definir, como principais parâmetros, a sua envolvente, iluminação e equipamentos instalados e sistemas de climatização.

Não tendo sido possível ter acesso aos projetos de arquitetura que detalham os materiais utilizados na sua construção, a definição da envolvente do edifício de Componentes no *EnergyPlus* foi feita com base no seu ano de construção assim como na recolha de informação *in loco*. Na Tabela 5-2 estão descritas as soluções construtivas adotadas, estando em anexo (Tabela A.1-2) as propriedades termofísicas dos respetivos materiais considerados.

Tabela 5-2: Soluções construtivas adotadas no modelo do edifício de Componentes

Nome	Material	Espessura (m)	U ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )
<i>Parede simples exterior</i>	<i>Reboco</i>	<i>0.01</i>	1.68
	<i>Betão</i>	<i>0.18</i>	
	<i>Reboco</i>	<i>0.01</i>	
<i>Parede dupla exterior (Lab 2)</i>	<i>Reboco</i>	<i>0.01</i>	0.86
	<i>Betão</i>	<i>0.18</i>	
	<i>Caixa de ar</i>	<i>0.02</i>	
	<i>Betão</i>	<i>0.18</i>	
	<i>Reboco</i>	<i>0.01</i>	
<i>Parede simples interior</i>	<i>Reboco</i>	<i>0.01</i>	1.75
	<i>Betão_13</i>	<i>0.13</i>	
	<i>Reboco</i>	<i>0.01</i>	
<i>Parede falsa interior</i>	<i>Gesso Cartonado</i>	<i>0.05</i>	2.80
<i>Portas interiores</i>	<i>Madeira</i>	<i>0.05</i>	1.57
<i>Pavimento em contacto com o solo (Piso térreo)</i>	<i>solo</i>	<i>0.5</i>	1.14
	<i>Cimento</i>	<i>0.15</i>	
	<i>Cerâmica</i>	<i>0.01</i>	
<i>Teto (Piso 1 e 2) Pavimento interior (Piso 2 e 3)</i>	<i>Cerâmica</i>	<i>0.01</i>	1.34
	<i>Reboco</i>	<i>0.01</i>	
	<i>Betão_13</i>	<i>0.13</i>	
	<i>reboco</i>	<i>0.01</i>	
<i>Cobertura nave ensaios</i>	<i>Aço</i>	<i>0.01</i>	1.84
	<i>Betão</i>	<i>0.18</i>	
	<i>Reboco</i>	<i>0.01</i>	
<i>Cobertura gabinetes (Piso 3)</i>	<i>Aço</i>	<i>0.01</i>	1.36
	<i>Lã de vidro</i>	<i>0.1</i>	
	<i>Betão</i>	<i>0.18</i>	
	<i>Reboco</i>	<i>0.01</i>	
<i>Janelas interiores de caixilharia de madeira de vidro simples de 4 mm</i>			5.1
<i>Janelas interiores de caixilharia de alumínio de vidro simples de 4 mm</i>			6.0
<i>Janelas interiores de caixilharia de plástico de vidro simples de 4mm</i>			4.9
<i>Janelas exteriores moveis de caixilharia de alumínio de vidro simples de 4 mm</i>			6.2
<i>Janelas exteriores duplas de caixilharia de alumínio, sendo o vidro interior duplo e o vidro exterior simples.</i>			2.34

Na Tabela 5-3 estão representadas, para cada zona térmica, as cargas internas definidas no modelo de simulação, sendo estas o número de ocupantes, iluminação e equipamentos instalados. A tabela encontra-se colorida de acordo com o código de cores usado na Figura 5-3 de forma a identificar a que zona do edifício pertence cada zona térmica. A cor de laranja estão representadas as zonas térmicas que constituem a Zona de Gabinetes, sendo estas as zonas térmicas cujos perfis de iluminação e equipamentos serão alvo de aplicação da metodologia descrita no Capítulo 3 e testada no Capítulo 4.

Apenas foi necessário definir o perfil de utilização da Zona de Laboratórios (zonas térmicas a cor verde) e de Ensaios (zonas térmicas a cor azul), estando representados na Figura 5-7. Tem-se que o perfil de Zona de Laboratórios é muito semelhante ao perfil de escritórios pré-definidos. Para a Zona de Ensaios, apesar de se verificar uma grande quantidade de potência instalada de iluminação, a sua utilização não é muito frequente dada a existência de grandes vãos envidraçados que providenciam muita iluminação natural.

Os equipamentos das zonas térmicas Nave e P1\_entrada estão sempre a funcionar independentemente da hora do dia ou do dia da semana, sendo por isso o seu perfil constante e igual a um.

Tabela 5-3: Potência instalada de iluminação e equipamentos e nº de ocupantes por zona térmica.

<b>NOME</b>	<b>Nº de ocupantes</b>	<b>Iluminação [W]</b>	<b>Equipamentos [W]</b>
<i>P1_LAB3</i>	3	528	-
<i>P1_LAB4</i>	2	176	-
<i>P1_GAB2</i>	2	176	600
<i>P1_LAB5</i>	-	176	-
<i>P1_LAB1</i>	-	528	800
<i>P1_GAB1</i>	1	528	100
<i>P1_WC</i>	-	268	-
<i>P1_OFICINAS</i>	-	2200	-
<i>NAVE</i>	-	14469	2100
<i>P1_ENTRADA</i>	-	440	200
<i>P1_LAB2</i>	2	500	-
<i>P2_CORREDOR</i>	-	792	-
<i>P2_CHEFIA_OESTE</i>	1	264	90
<i>P2_REUNIOES_OESTE</i>	4	264	-
<i>P2_GAB_OESTE</i>	7	1408	684
<i>P2_CHEFIA_ESTE</i>	1	264	90
<i>P2_REUNIOES_ESTE</i>	4	264	-
<i>P2_GAB_ESTE</i>	8	1232	511
<i>P2_WC</i>	-	368	-
<i>P3_ARQUIVO</i>	-	528	-
<i>P3_COPA</i>	10	528	186
<i>P3_GAB_OESTE</i>	6	1056	448
<i>P3_REUNIOES</i>	4	264	-
<i>P3_WC</i>	-	356	-
<i>P3_GAB_ESTE</i>	9	1408	609
<i>P3_CORREDOR</i>	-	792	-
<i>ESCADAS</i>	-	308	-

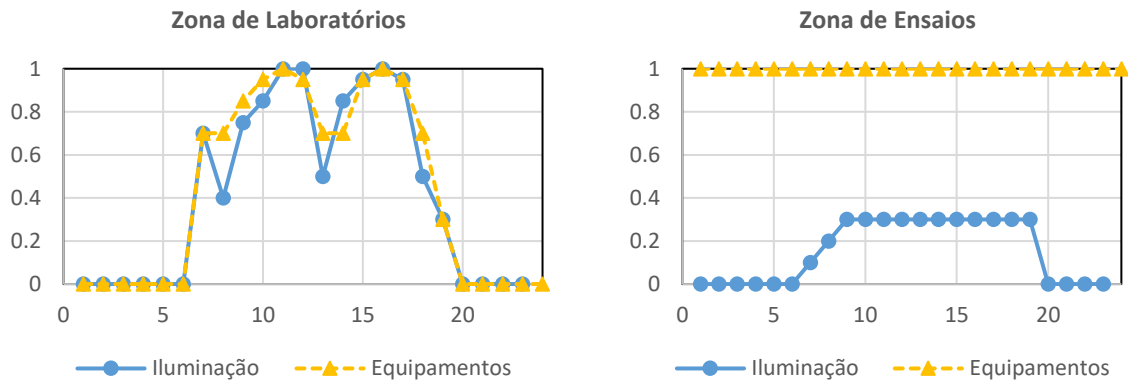


Figura 5-7: Perfis de iluminação e equipamentos para as Zonas de Laboratórios e de Ensaios. Estão representados os perfis para os dias úteis, sendo que o perfil para dias não úteis é constante e igual ao valor de *standby* dos dias úteis.

O aquecimento elétrico central existente em todos os gabinetes do piso 2 e 3 foi simulado através do objeto do *EnergyPlus HVACTemplate:Zone:BaseboardHeat*, com uma capacidade de aquecimento de 900 W.

Como foi referido na secção 5.3, apenas os laboratórios 1, 3 e 5 apresentam um sistema de climatização, tendo este sido simulado no *EnergyPlus* através do modelo PTHP correspondente a uma UTAN + bomba de calor do *IdealLoads*. Tem-se assim a modelação de sistemas que climatizam as divisões referidas recorrendo a ar exterior devidamente aquecido e arrefecido. Para obter os consumos de energia associados a estes sistemas de climatização, foi necessário calcular o seu COP dinâmico recorrendo às condições expressas na Tabela 5-4.

Tabela 5-4: Método de cálculo para obter o COP dinâmico para o aquecimento e arrefecimento [42]. Têm-se que  $T_{out}$  corresponde à temperatura exterior.

Aquecimento	Arrefecimento
$COP = \eta \frac{T_{cond}}{T_{cond} - T_{evap}}$	$COP = \eta \frac{T_{evap}}{T_{cond} - T_{evap}}$
$T_{cond}[K] = 318.15$	$T_{cond}[K] = T_{out} + 5$
$T_{evap}[K] = T_{out} - 5$	$T_{evap}[K] = 313.15$
$\eta = 0.3$	$\eta = 0.3$

## 5.5. Medições

Para realizar a calibração do modelo de simulação do edifício de Componentes definido na secção anterior, é necessário efetuar medições dos seus consumos de energia de modo a ser possível comparar os consumos simulados com os consumos reais.

O consumo energético neste edifício encontra-se desagregado em Aquecimento (referente aos radiadores instalados nos gabinetes dos pisos 2 e 3), Iluminação+equipamentos (referente a toda a iluminação e equipamentos instalados nos pisos 2 e 3) e Geral (referente ao consumo elétrico global de todos os pisos do edifício).

Foram efetuadas medições durante o período de 18 dias, entre 28/março e 14/abril de 2019. Os resultados obtidos são apresentados em seguida.

Para o Aquecimento, os resultados obtidos para o consumo energético diário e potência média horária estão representados na Figura 5-8 e Figura 5-9, respetivamente. Pela primeira figura, é possível observar que o aquecimento apenas se encontrou operacional durante a semana de 8/abril a 12/abril, tendo registado neste período um consumo médio total de cerca de 48 kWh.

O ato de ligar ou desligar o aquecimento central é feita de forma manual e está dependente da temperatura do ar exterior registada. Pela Figura 5-8, é possível verificar uma descida acentuada da temperatura média exterior nos dias 4 e 5 de abril, dos 16 °C para os 10°C, que fez com que na semana seguinte se ativasse o sistema de aquecimento. Estando este operacional para todo o edifício, cada ocupante no seu gabinete pode optar por manter o radiador ligado, regular a sua temperatura ou até mesmo desligá-lo se assim o pretender. Por isso é que se verificam variações de consumo de energia durante essa semana de funcionamento uma vez que depende do conforto térmico de cada ocupante em cada gabinete.

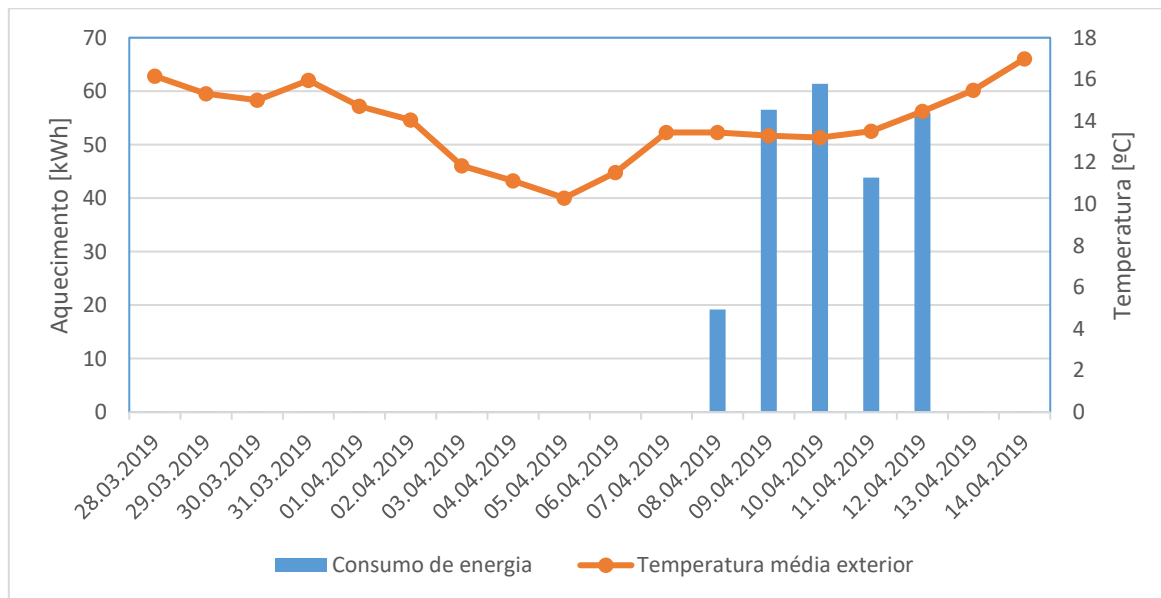


Figura 5-8: Consumo energético diário [kWh] medido para o Aquecimento

Para não inviabilizar os resultados obtidos da potência média diária de aquecimento, apenas se considerou a semana onde se registou de facto consumo de energia proveniente da utilização dos radiadores. Com a Figura 5-9 pretende-se mostrar o perfil de carga médio referente à utilização do aquecimento para um dia. Têm-se que este é ligado a partir das 5h e desligado às 18h, mantendo-se

constante perto dos 3 kW. Apenas perto das 16h se verificou um pico de consumo, chegando até aos 3.5 kW.

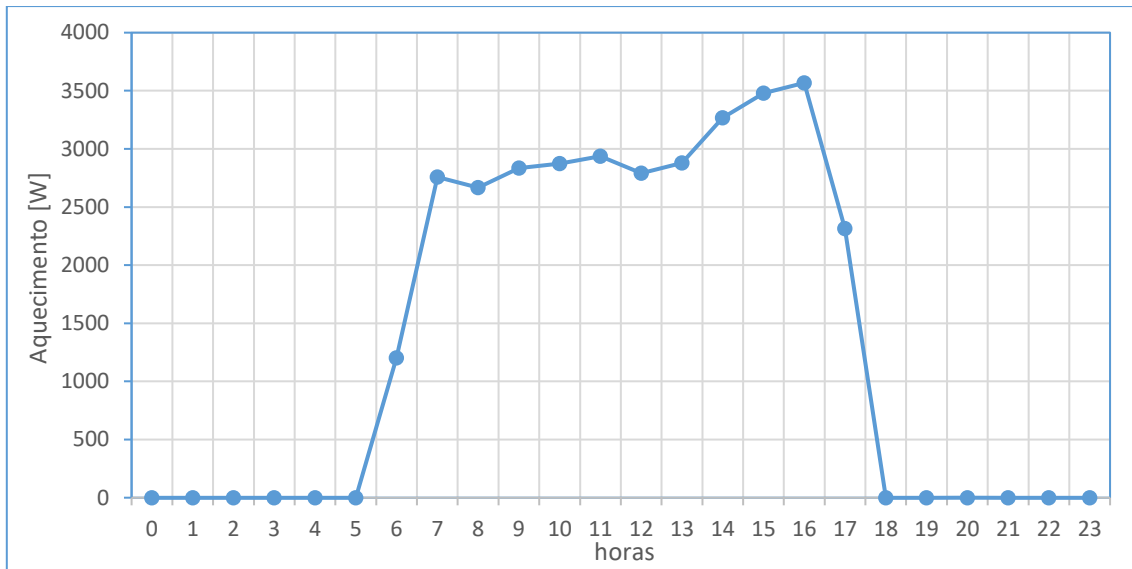


Figura 5-9: Perfil de carga diária para o Aquecimento

Para o Geral, os resultados obtidos para o consumo energético diário estão representados na Figura 5-10, assim como os consumos referentes à iluminação e equipamentos dos pisos 2 e 3.

Têm-se que, para o período medido, o consumo médio diário para todo o edifício é de 162 kWh, sendo o consumo médio diário para os dias úteis de 190 kWh e para os dias não úteis de 105 kWh.

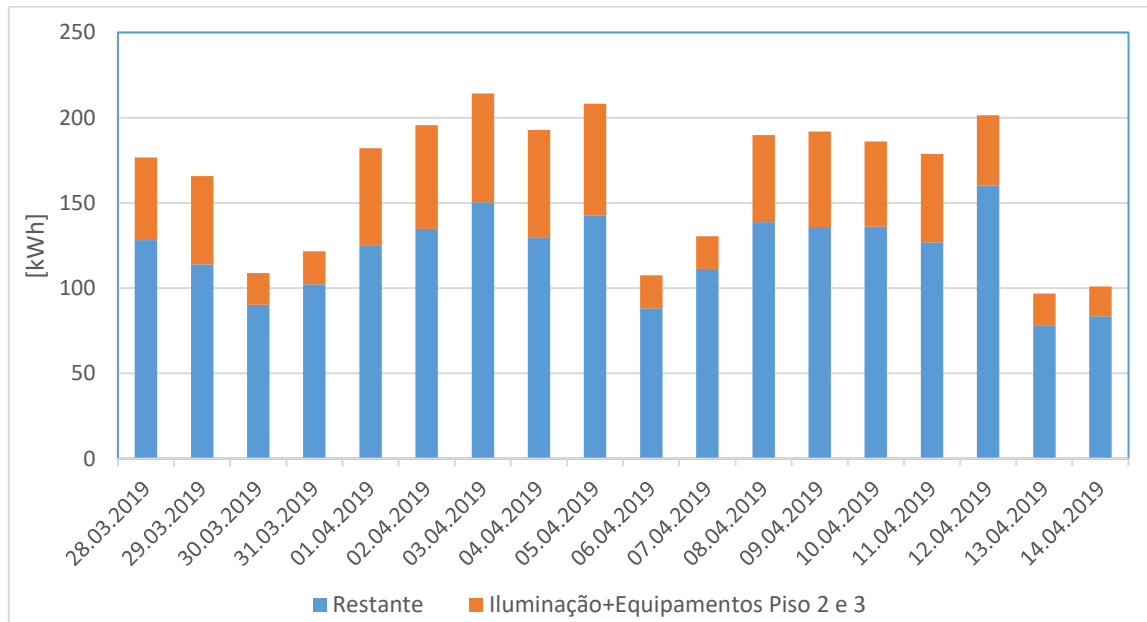


Figura 5-10: Consumo energético diário [kWh] medido para o consumo Geral.

Para o caso do consumo de iluminação e equipamentos dos pisos 2 e 3, verifica-se uma maior diferença entre os consumos de dias úteis e de dias não úteis. Obteve-se assim, para o período medido, um consumo médio diário total de 43 kWh, sendo o consumo médio diário para os dias úteis de 55 kWh e para os dias não úteis de 19 kWh. Para os restantes consumos tem-se uma maior atenuação entre dias

úteis e não úteis uma vez que, neste edifício, são realizados ensaios que implicam, por vezes, a utilização de equipamentos e sistemas de climatização durante 24h por dia e 7 dias por semana.

Na Figura 5-11 é possível observar que o consumo registado ao fim de semana constitui o consumo base do edifício, registando-se igual valor para o período de não ocupação durante a semana. O perfil de carga diário (a azul) foi obtido através da média horária dos 18 dias em que foi realizada a medição, o perfil de carga semanal (a laranja) corresponde à média horária apenas dos dias úteis e o perfil de carga de fim de semana (a cinzento) corresponde apenas aos dias não úteis (neste caso, sábados e domingos).

Verifica-se que durante o período de ocupação do edifício (nos dias úteis) foram registados três grandes picos de consumo de energia: às 6h da manhã, no período de trabalho da manhã (entre as 9h e as 11h) e no período de trabalho da tarde (entre as 14 e as 15h).

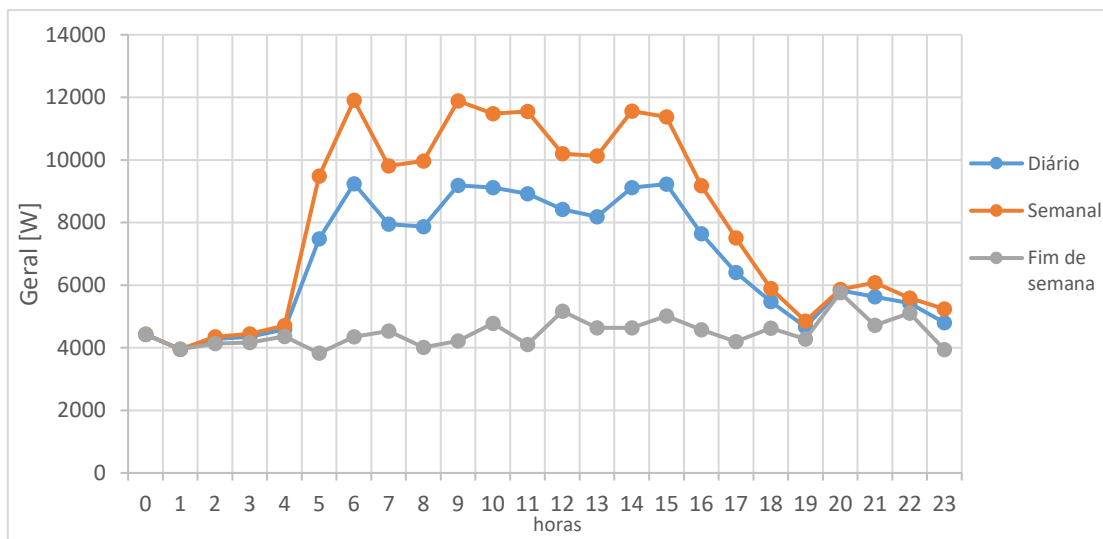


Figura 5-11: Perfil de carga para um dia do consumo Geral

Analisando Figura 5-12, têm-se que o perfil de carga da Iluminação+equipamento apresenta uma forma muito semelhante aos perfis pré-definidos de escritórios indicados na secção 4.3.1, sendo possível separar com rigor o período de trabalho da manhã do da tarde através do decréscimo do perfil de carga às 12h (pausa para almoço). Verifica-se ainda a existência de um máximo relativo perto das 6h da manhã, originado pela atuação da equipa de limpeza dos gabinetes.

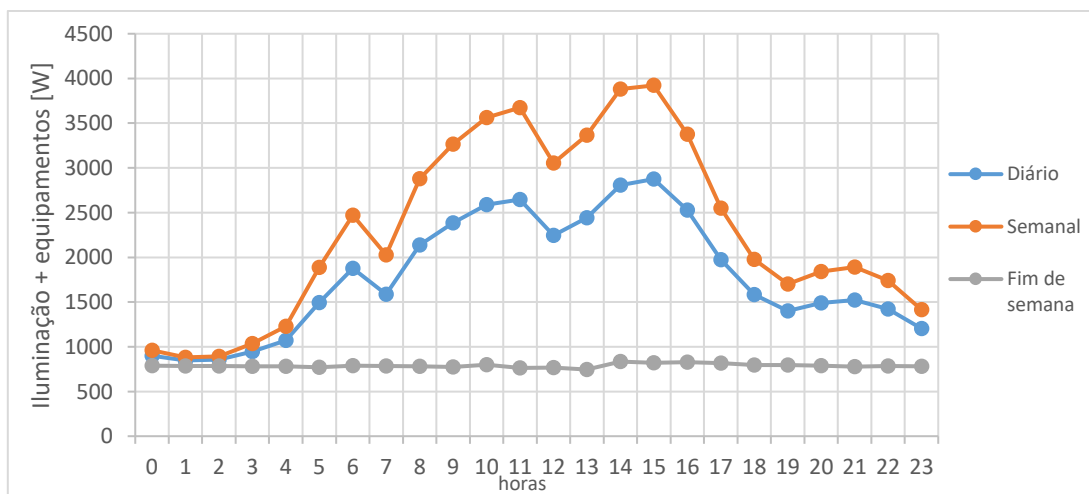


Figura 5-12: Perfil de carga diário para Iluminação+equipamentos

## 5.6. Calibração do modelo

### 5.6.1. Aspetos gerais

Tendo-se concluído a definição do modelo de simulação do edifício de Componentes, segue-se agora a sua simulação e posterior calibração. O período de simulação considerado foi de 8\abril a 14\abril, de forma a coincidir com o período de medição indicado na secção 5.5. O ficheiro climático utilizado referente à região de Lisboa produzido pelo LNEG está representado na secção 5.2. Na presente secção serão realizadas duas experiências:

- Simulação do modelo em que os perfis de iluminação e de equipamentos da Zona de Gabinetes são iguais aos perfis pré-definidos estudados anteriormente (ASHRAE, ISO e RSECE). Os resultados obtidos serão comparados com as medições efetuadas de modo a ser possível verificar a calibração do modelo, através do cálculo dos índices estatísticos MBE e CVRMSE. Esta experiência encontra-se descrita na subsecção 5.6.2;
- Otimização dos perfis de iluminação e equipamentos da Zona de Gabinetes através da metodologia introduzida por esta dissertação, representada na Figura 3-4. Serão criados perfis de escritórios que minimizem as diferenças registadas entre os consumos simulados e os consumos medidos, no período de tempo considerado. Em primeiro lugar serão comparados os consumos referentes à iluminação e equipamentos dos pisos 2 e 3 (Zona de Gabinetes) e depois os consumos gerais do edifício. Esta experiência encontra-se descrita na subsecção 5.6.3.

### 5.6.2. Simulação com perfis pré-definidos

Nesta subsecção foram realizadas três simulações diferentes do modelo do edifício de Componentes, alterando-se apenas, entre elas, os perfis de utilização da Zona de Gabinetes tendo em conta os perfis pré-definidos ASHRAE, ISO e RSECE. Os seus perfis de equipamentos e de iluminação encontram-se representados na subsecção 4.3.1. Esta experiência teve como principal objetivo apreciar se a utilização de perfis pré-definidos para definir o perfil de iluminação e equipamentos da Zona de Gabinetes do edifício de Componentes constitui uma boa simplificação, ou seja, se a sua utilização conduz a um modelo calibrado.

Para realizar a calibração do modelo, os consumos de energia obtidos através da sua simulação foram comparados com os consumos medidos de forma desagregada. Desta forma, compararam-se os consumos de Iluminação+equipamentos, uma vez que se pretende ajustar os perfis de iluminação e equipamentos dos pisos 2 e 3, e também o consumo Geral do edifício para averiguar se o modelo consegue prever com rigor o comportamento global do edifício.

Os resultados obtidos para cada simulação estão representados na Figura 5-13. É possível verificar que para nenhum dos perfis pré-definidos se obtêm as condições necessárias à calibração do modelo, isto é,  $|MBE| \leq 10\%$  e  $CVRMSE \leq 30\%$ .

Tem-se que a utilização do perfil ISO para definir o perfil de equipamentos e iluminação da Zona de Gabinetes resulta na maior discrepância registada entre consumo e medição referente tanto ao Geral como à Iluminação+equipamentos. Significa que este perfil está longe de conseguir representar o comportamento real do edifício em estudo. Os perfis RSECE e ASHRAE apresentam resultados inferiores, mas ainda assim, muito acima dos limites definidos pelos critérios de calibração.

Os índices estatísticos referentes ao consumo Geral são inferiores aos referentes à Iluminação+equipamentos, porque o consumo de energia dos pisos 2 e 3 constitui uma pequena fração dos consumos globais do edifício, que ocorre sobretudo na nave de ensaios e nos laboratórios, localizados no piso 1.

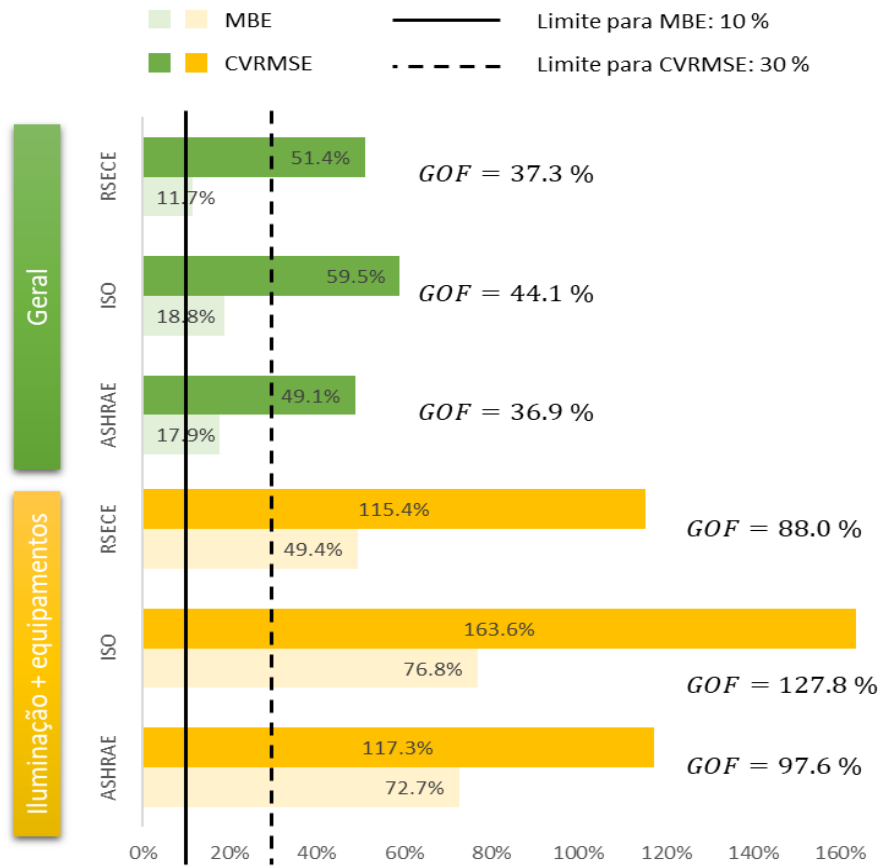


Figura 5-13: Índices estatísticos obtidos para cada perfil pré-definido

Na Figura 5-14 e Figura 5-15 estão representados os consumos medidos e simulados (usando o perfil RSECE) para o Geral do edifício e Iluminação+equipamentos, respetivamente, sendo possível observar em que momentos do dia ou da semana se verificam maiores discrepâncias.

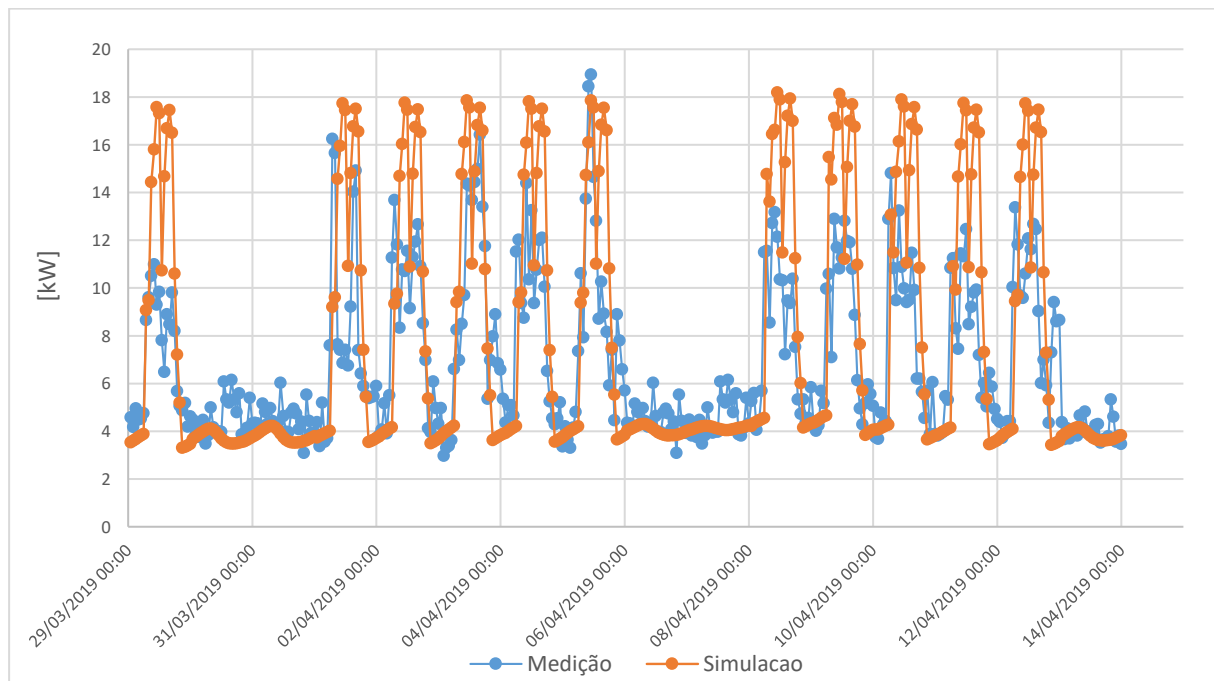


Figura 5-14: Consumos medido e simulado referente ao consumo Geral quando aplicado no modelo o perfil de utilização RSECE à Zona de Gabinetes

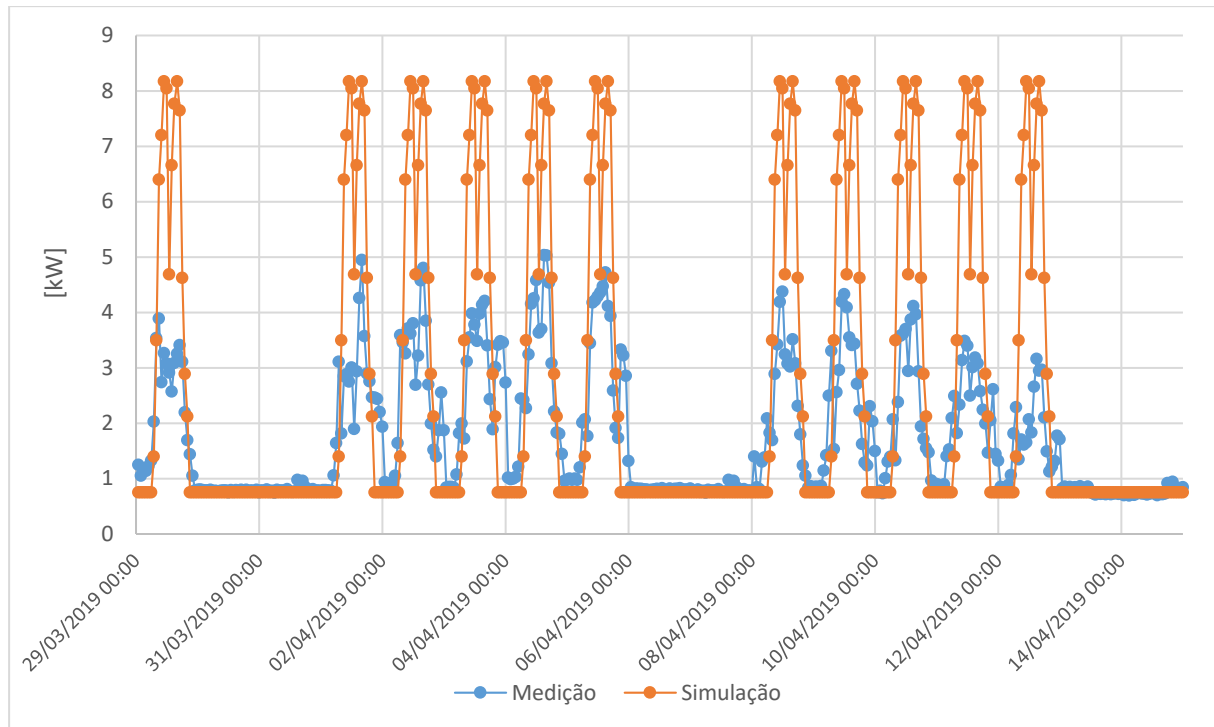


Figura 5-15: Consumos medido e simulado referente ao consumo de Iluminação+equipamentos quando aplicado no modelo o perfil de utilização RSECE à Zona de Gabinetes

Para ambos os consumos, o modelo de simulação apresenta uma boa capacidade de previsão do consumo em períodos de não ocupação do edifício, representando o consumo em *standby*. No entanto, a grande diferença registada, sobretudo nos consumos de iluminação e equipamentos do piso 2 e 3, diz respeito ao consumo durante o período de ocupação do edifício, estando o modelo a sobrestimar o seu consumo. Significa, por isso, que os ocupantes da Zona de Gabinetes não utilizam todos os equipamentos disponíveis, ou não utilizam toda a iluminação disponível ao longo do dia, ou ambos. Esta análise não é possível ser feita a partir dos consumos medidos visto que a medição do consumo de equipamentos e iluminação dos pisos 2 e 3 é feita de forma agregada.

Com este estudo foi possível verificar a reduzida capacidade dos perfis pré-definidos de retratarem a realidade de operação de um edifício de escritório, como é o caso da Zona de Gabinetes do edifício de Componentes. Na próxima subsecção, onde será realizada a otimização dos seus perfis de utilização, espera-se conseguir reduzir de forma drástica esta discrepância encontrada entre simulação e medição.

### 5.6.3. Otimização dos perfis no jEPlus+EA

Como representado na secção anterior, a aplicação dos perfis pré-definidos de iluminação e equipamentos para a Zona de Gabinetes do edifício de Componentes constitui uma opção muito simplificada no que se refere à previsão do comportamento dos consumos para esta zona. Desta forma, ao aplicar a metodologia representada na Figura 3-4, espera-se obter perfis de utilização mais ajustados ao caso de estudo de forma a minimizar as diferenças registadas entre os consumos medidos e simulados.

Com a análise realizada no Capítulo 4, foi possível definir as melhores condições de implementação da otimização dos perfis de modo a potencializar os seus resultados. Assim sendo, a otimização dos perfis de iluminação e equipamentos da Zona de Gabinetes do edifício de Componentes foi realizada tendo em conta os seguintes critérios:

- Variação horária sob a forma de distribuição aleatória triangular, podendo variar entre 0 e 1, sendo  $X$  o seu valor mais provável. O valor de  $X$ , para cada hora, é igual ao valor horário recomendado pelo perfil RSECE (ver subsecção 4.3.1). Assim, os perfis de iluminação e equipamentos criados terão como perfil horário base o perfil RSECE havendo margem de manobra para se adaptarem de forma a que os consumos horários simulados se aproximem dos respetivos consumos horários medidos;
- A relação entre equipamentos e iluminação será realizada considerando  $K = 1$  e  $Kd = 0.2$ . Ou seja, para os períodos de ocupação do edifício (das 8h às 18h), os perfis de iluminação e equipamentos são iguais, sendo que fora deste período nos dias úteis e durante todo o período dos dias não úteis, o perfil de iluminação será 20 % do perfil de equipamentos. Assim, apenas é aplicada a variação horária ao perfil de equipamentos, sendo que o perfil de iluminação é definido através da relação descrita;
- Os valores atribuídos aos parâmetros que definem o algoritmo genético estão representados na Tabela 3-1, sendo que, para este caso de estudo, o nº de variáveis a parametrizar é de 15.

Como se pretende verificar o perfil de carga da iluminação e equipamentos da Zona de Gabinetes, será utilizado como “consumo energético medido” (ver Figura 3-4) o consumo de Iluminação+equipamentos, representado na Figura 5-10. Com os perfis obtidos através da aplicação do método de otimização, será depois apreciada a sua influência no consumo Geral do edifício, comparando depois estes valores com os respetivos valores medidos, para o mesmo período, através do cálculo do MBE e CVRMSE.

Na Figura 5-16 estão representadas todas as simulações realizadas durante o processo de otimização descrito em cima em que cada simulação apresenta um perfil de utilização (de equipamentos e iluminação) único. É possível observar que se obteve um intervalo de valores bastante alargado para os índices MBE e CVRMSE derivado apenas da variação dos perfis de equipamentos e iluminação. Este facto reforça a ideia de que uma definição errada dos perfis de utilização pode desencadear valores de consumos simulados muito diferentes dos consumos reais do edifício em estudo.

Os perfis de utilização que resultaram em consumos simulados mais próximos dos consumos medidos (valores mais baixos de MBE e CVRMSE) estão representados na Figura 5-17, estando os seus índices estatísticos associados representados na Tabela 5-5.

Tem-se que tanto no consumo Geral como no de Iluminação+equipamentos registou-se um decréscimo significativo nos valores de MBE e CVRMSE, resultando em valores de GOF mais baixos em 11.1% e 48.1%, respetivamente, quando comparado com os índices obtidos pela utilização estática do perfil RSECE (ver Figura 5-13).

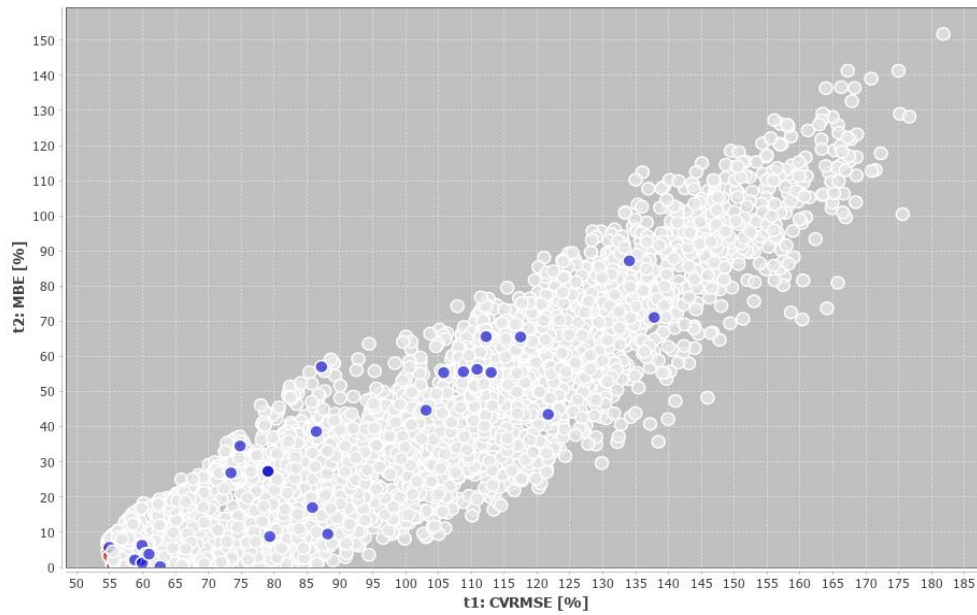


Figura 5-16: Índices estatísticos MBE e CVRMSE obtidos para cada simulação realizada durante as 250 gerações do processo de otimização.

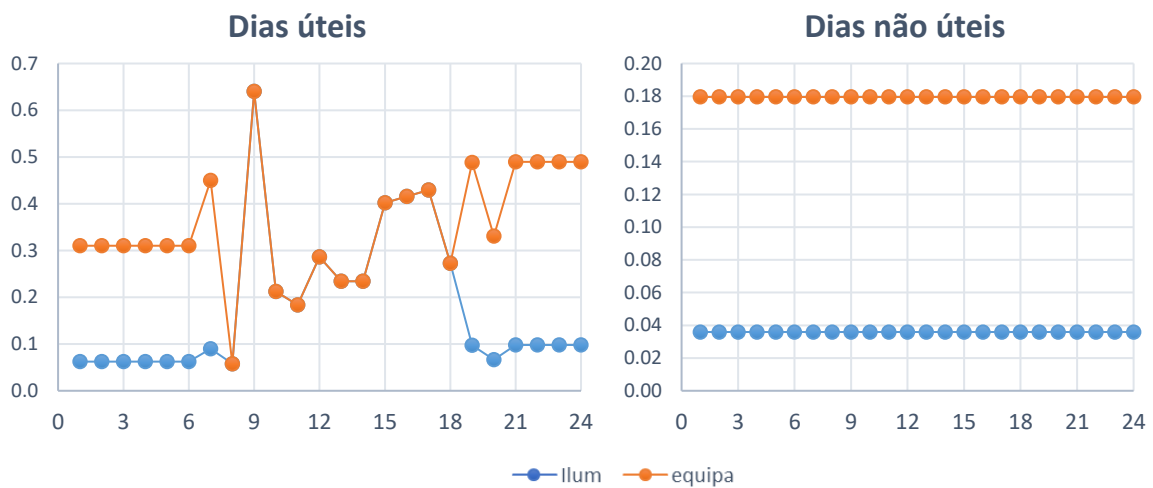


Figura 5-17: Perfis de utilização obtidos no processo de otimização para  $K=1$  e  $K_d=0.2$

Tabela 5-5: Índices estatísticos, em %, para o melhor perfil obtido através do processo de otimização para  $K=1$  e  $K_d=0.2$ , quando comparado com os consumos Geral e Iluminação+equipamentos

Consumo	MBE	CVRMSE	GOF
<i>Iluminação+equipamentos</i>	8.3	55.8	39.9
<i>Geral</i>	5.9	36.5	26.2

No entanto, mesmo com valores de MBE inferiores a 10%, ainda não foi possível obter valores de CVRMSE abaixo do valor limite considerado para calibração, 30%. Isto significa que este perfil obtido, mesmo tendo sido otimizado para minimizar as diferenças entre os consumos de iluminação e equipamentos do piso 2 e 3 simulado e medido, não consegue representar ainda o perfil de carga que reflete o comportamento de consumo medido para a Zona de Gabinetes do edifício de Componentes.

Realizando uma pequena auditoria ao edifício em estudo, durante o período de medição, foi possível verificar que os seus ocupantes nos respetivos gabinetes usufruíam bastante da iluminação natural proveniente dos vãos envidraçados orientados a sul, em detrimento da iluminação artificial. Desta forma, e de uma maneira geral, os ocupantes da Zona de Gabinetes utilizam, durante o período de ocupação, uma fração bastante reduzida da iluminação instalada nos pisos 2 e 3.

De forma a avaliar o impacto deste facto na definição dos perfis de utilização e nos respetivos valores dos índices estatísticos, realizou-se de novo a otimização dos perfis de utilização da Zona de Gabinetes do edifício de Componentes, mas agora com  $K = 0.5$ , ou seja, o perfil de iluminação, para cada hora no período de ocupação, representa 50% do perfil de equipamentos.

Os resultados obtidos para esta nova otimização estão apresentados em seguida. Na Figura 5-18 e na Tabela 5-6 é possível verificar que para os consumos Iluminação+equipamentos já se consegue obter valores de CVRMSE inferiores a 30%, significando que, para este novo caso, o modelo já consegue prever de forma satisfatória os consumos de iluminação e equipamentos do piso 2 e 3 do edifício em estudo.

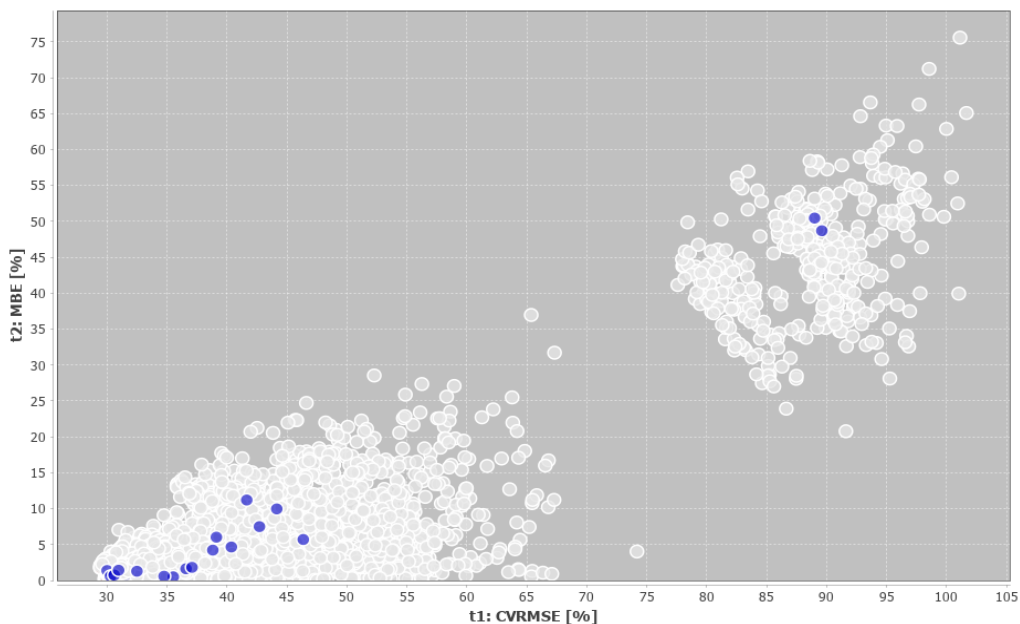


Figura 5-18: Índices estatísticos MBE e CVRMSE obtidos para cada simulação realizada durante as 250 gerações do processo de otimização para  $k=0.5$

Tabela 5-6: Índices estatísticos, em %, para o melhor perfil obtido através do processo de otimização para  $K=0.5$  e  $K_d=0.2$ , quando comparado com os consumos Geral e Iluminação+equipamentos

Consumo	MBE	CVRMSE	GOF
<i>Iluminação+equipamentos</i>	1.7	29.4	20.85
<i>Geral</i>	3.0	32.7	23.2

Comparando os perfis de utilização obtidos nas duas otimizações realizadas (na Figura 5-17 para  $K = 1$  e na Figura 5-19 para  $K = 0.5$ ), é possível observar diferenças significativas para os dias úteis. Enquanto que o perfil de equipamentos para  $K = 1$  apresenta variações aparentemente aleatórias ao longo do período de ocupação do edifício, o perfil de equipamentos nas condições  $K = 0.5$  tem a mesma forma ao longo do dia que o perfil de carga referente aos consumo de Iluminação+equipamentos,

representado na Figura 5-12. O facto de se considerar o perfil de equipamentos e iluminação iguais para os períodos de ocupação, fez com que a variação do perfil de equipamentos ficasse inflacionada, assumindo valores intermédios entre o consumo relativamente elevado de equipamentos e o consumo muito reduzido de iluminação artificial.

Para os dois perfis, o comportamento para os dias não úteis é muito semelhante visto que não se alterou a relação entre equipamentos e iluminação para os períodos de não ocupação do edifício, sendo sempre  $Kd = 0.2$ .

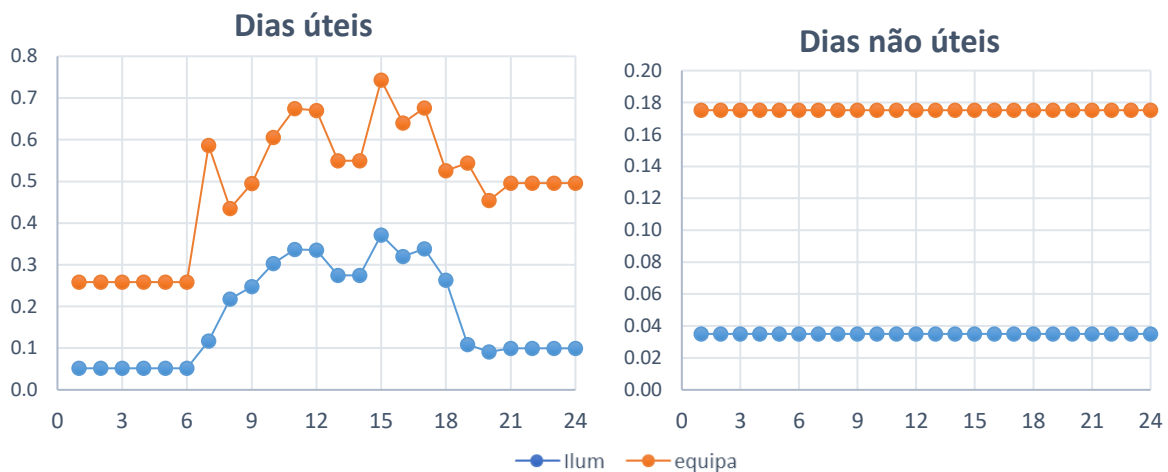


Figura 5-19: Perfis de utilização obtidos fruto do processo de otimização para  $K=0.5$  e  $Kd=0.2$

Apesar de já se ter definido quais os perfis de equipamentos e iluminação para a Zona de Gabinetes que resultam em índices estatísticos inferiores aos recomendados e, por isso, podem ser considerados suficientemente próximos da realidade, ainda não é possível afirmar que o modelo de simulação se encontra calibrado. Isto deve-se ao facto de o índice CVRMSE para o consumo Geral ser ainda superior a 30%.

Segundo o estado do conhecimento sobre a calibração de modelos de simulação (ver secção 2.2) os perfis de utilização não são a única fonte de incerteza que conduz à não calibração do modelo. As características da envolvente, os sistemas técnicos instalados e o ficheiro climático utilizado podem também ser responsáveis pelas diferenças encontradas entre consumo simulado e medido. Desta forma, no caso do edifício em estudo, não é válido afirmar que os perfis de utilização representam a única incerteza do modelo de simulação.

O desconhecimento da constituição detalhada da sua envolvente e a existência de outras zonas de utilização diferente àquelas cujos perfis foram otimizados (zona de ensaios e laboratórios), podem justificar o facto de ainda não ser possível considerar o modelo calibrado mesmo após ser realizada a otimização dos perfis de escritórios.

Outra fonte de incerteza está também relacionada com o consumo de Aquecimento. Efetuando a comparação entre os resultados obtidos da medição com os resultados da última otimização realizada, verificou-se uma grande discrepância entre os consumos de aquecimento reais e simulados, com valores de MBE e CVRMSE de 33% e 132%, respetivamente. Esta diferença pode ser explicada pelo facto de, como anteriormente referido, a ativação do aquecimento de cada gabinete depender do nível de conforto de cada ocupante, sendo que esta interação constante entre o ocupante e o edifício não foi contabilizada na definição do modelo de simulação.

O facto de existirem outras incertezas associadas ao modelo foi a razão pela qual não se efetuou a otimização dos perfis utilizando o consumo Geral como “Consumo energético medido”. Se assim fosse, os resultados poderiam ter sido muito diferentes visto que a criação dos perfis da zona de Gabinetes iria ser influenciada por todas as diferenças encontradas entre medição e simulação. Se o modelo estiver a subestimar os consumos reais, os perfis obtidos iriam ser superiores aos reais para reduzir os valores dos índices e vice-versa. No entanto, para edifícios em que sejam conhecidas todas as soluções construtivas adotadas e que toda a sua área útil seja ocupada por atividade de escritórios, a utilização do consumo Geral como comparação durante o método de otimização poderia ser suficiente para validar a calibração do modelo.

No entanto, apesar de não se ter conseguido obter a calibração global do modelo apenas com a variação dos perfis de utilização da Zona de Gabinetes, registou-se uma redução bastante significativa no valor do GOF, de cerca de 14%, quando comparado com a utilização fixa do perfil RSECE.

## 5.7. Notas conclusivas

A Tabela 5-7 constitui um resumo dos resultados obtidos nas diferentes definições dos perfis de utilização da Zona de Gabinetes do edifício de Componentes.

Tabela 5-7: Resumos dos resultados obtidos para a calibração do modelo de simulação

Condições da simulação	Iluminação+equipamentos		Geral	
	MBE	CVRMSE	MBE	CVRMSE
<i>Perfil RSECE</i>	49.4	115.4	11.7	51.4
<i>Otimização <math>K = 1</math> e <math>K = 0.2</math></i>	8.3	55.8	5.9	36.5
<i>Otimização <math>K = 0.5</math> e <math>K = 0.2</math></i>	1.7	29.4	3.0	32.7

A partir da tabela resumo é possível concluir que a relação estabelecida a partir da análise dos perfis pré-definidos de escritórios pode não ser uma aproximação razoável para definir os perfis de iluminação e equipamentos da Zona de Gabinetes do edifício de Componentes em específico. Isto deve-se ao facto de os perfis pré-definidos não terem a capacidade de refletir o comportamento característico de cada edifício de escritórios, sendo que para este caso, a existência de vãos envidraçados orientados a sul em cada gabinete, fazia diminuir a necessidade da utilização da iluminação artificial.

No entanto, é de referir que estes resultados obtidos se referem apenas a 18 dias de medição durante o mês de abril. Se o período de medição tivesse sido realizado durante o inverno ou durante uma semana em que o céu se apresentasse maioritariamente nublado, seria de esperar que a utilização de iluminação artificial fosse superior àquela que se obteve neste estudo e por isso a relação  $K$  também seria distinta. Se fosse realizada a calibração do modelo para o período de simulação e medição de um ano (365 dias, de janeiro a dezembro) o perfil de utilização obtido e a relação  $K$  seriam também diferentes, uma vez que os perfis de utilização têm a capacidade de se adaptarem sempre aos consumos medidos.

Assim, em cada caso é necessário haver uma avaliação preliminar para procurar identificar fatores  $K$  que atendam aos equipamentos e padrões de utilização.

A utilização dos perfis pré-definidos para definir o valor de  $X$  na distribuição probabilística triangular não constitui uma aproximação errada uma vez que este apenas indica o valor mais provável. Como indicado na Figura 4-2-c, todos os valores entre 0 e 1 têm probabilidade de serem selecionados, mesmo aqueles que são muito diferentes de  $X$ , em cada hora. Cabe ao algoritmo genético verificar os

valores horários que resultam em índices estatísticos inferiores (avaliação do *fitness*) de modo a passar essa informação aos perfis gerados em próximas gerações levando assim à minimização das suas funções objetivo (MBE e CVRMSE). Por isso, mesmo que o valor horário de  $X$  não represente o comportamento real do edifício em estudo, a variação horária aliada à capacidade de variabilidade e convergência do algoritmo vão conseguir encontrar o valor horário correto.

Por outro lado, os valores de  $K$  e  $K_d$  não foram variáveis no processo otimizáveis, sendo por isso fundamental definir a melhor relação possível *à priori* da otimização. Dadas as características particulares deste edifício assim como o comportamento atípico dos seus ocupantes relativamente à utilização da iluminação artificial, apenas foi possível obter a simulação correta dos consumos de iluminação e equipamentos do piso 2 e 3 quando se aliou a utilização da metodologia introduzida neste estudo com um conhecimento geral do comportamento dos seus ocupantes. Uma vez que não se efetuou a otimização dos valores de  $K$  e  $K_d$  para perceber qual a relação que iria minimizar os erros, a realização de uma visita ao edifício foi essencial.

O edifício de Componentes apesar de apresentar, no piso 2 e 3, características de escritório é um edifício especial que pouco se assemelha a um edifício comum de escritórios construídos nos dias de hoje na região de Lisboa. Para além de incluir zonas de ensaios e laboratórios que constituem o grande propósito do edifício e assumem a maior parte do seu consumo, o sistema de climatização utilizado na zona de escritórios é bastante diferente dos edifícios de escritórios atuais. Para a zona de Lisboa, os edifícios de escritórios são dotados de sistemas técnicos de climatização capazes de aquecer e arrefecer, sendo que é no arrefecimento do edifício que se verificam maiores consumos de energia. Isto deve-se ao facto de a nova legislação exigir que os novos edifícios de comércio e serviços apresentem características térmicas muito boas de modo a conseguirem aproveitar da melhor forma os ganhos internos e solares. Pelo contrário, nos gabinetes existentes no edifício de Componentes, o sistema de climatização é só referente ao aquecimento dos mesmos.

Como verificado no presente capítulo, para o edifício estudado, não é válido considerar que os perfis de utilização são a única fonte de incerteza associada à não calibração do modelo.

O fraco conhecimento dos materiais que constituem a sua envolvente, a utilização distinta do edifício em diferentes zonas (gabinetes, ensaios e laboratórios) e a interação dos ocupantes no funcionamento do aquecimento nos gabinetes, conduz, para além dos perfis de utilização da Zona de Gabinetes, a grandes discrepâncias entre os consumos simulados pelo modelo e os consumos reais.

Nesta dissertação foram selecionados como perfis a otimizar os perfis de equipamentos e iluminação dos pisos 2 e 3 dada a sua grande variabilidade resultante da interação dos ocupantes com o edifício. No entanto, a metodologia apresentada pode ser utilizada e adaptada a todo o tipo de perfis de utilização que possam existir num edifício de escritórios (ou outros). Fala-se aqui de perfis de utilização de equipamentos em específico, de sistemas de climatização, ou qualquer outro sistema que por apresentar variações ao longo do dia, derivado da interação estocástica dos seus ocupantes, seja difícil de definir com rigor o seu comportamento diário.

No caso deste edifício, poderia ter sido realizado a otimização dos perfis de iluminação e equipamentos da Zona de ensaios e laboratórios, assim como o perfil de utilização do radiador elétrico presente em cada gabinete. Seria apenas necessário redefinir as condições de variabilidade do valor horário para se adaptar melhor aos perfis em questão (intervalo de valores e valor mais provável  $X$ ) e substituir o “consumo energético medido” pelo consumo do que se pretende comparar.

Para o caso de um edifício que apresente equipamentos ou sistemas de iluminação que se ativem com a presença humana, esta metodologia pode também ser aplicada sendo que o perfil que iria ser otimizado seria o perfil de ocupação. A ocupação ou não ocupação de um dado espaço levaria à ativação

desses dispositivos traduzindo-se assim num aumento dos consumos de energia do edifício para uma dada hora. Uma vez que estas condições seriam definidas nos programas de simulação dinâmica, apenas seria necessário, na metodologia de otimização adotada, variar horária e diariamente os perfis de ocupação de modo a que os consumos simulados tendam para os consumos medidos.

## Capítulo 6 – Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

Os modelos de simulação energética em edifícios assumem um papel fundamental na previsão do consumo energético e na avaliação do impacto da aplicação de medidas de melhoria no seu desempenho energético final. De modo a que os modelos de simulação sejam utilizados com um elevado grau de confiança, é essencial que estes representem de forma aproximada o comportamento real do edifício em estudo, sendo por isso necessário calibrá-los de modo a que sejam minimizadas as diferenças encontradas entre os consumos simulados e medidos.

Os perfis de utilização são um dos fatores que mais contribui para esta diferença, na presente dissertação foi proposta uma metodologia que permite criar de forma automática perfis de iluminação e equipamentos de um edifício de escritórios com o objetivo de reduzir as diferenças entre simulação e medição. Esta metodologia tem como base a variação horária e diária dos perfis, sendo que através da utilização de um algoritmo de otimização (algoritmo genético - NSGA-II) definido por duas funções objetivo. Estas avaliam as diferenças registadas entre consumos simulados e medidos (MBE e CVRMSE), permitindo selecionar os perfis que conduzem à calibração do modelo.

Com a utilização de um edifício fictício simplificado (edifício TESTE) foi possível realizar testes de parametrização para averiguar que tipo de variações deveriam ser implementadas nos perfis horários, para que os resultados da aplicação da metodologia descrita fossem satisfatórios.

Concluiu-se que, ao perfil que se pretende otimizar, deve ser definida uma variação horária sob a forma de uma distribuição probabilística triangular de modo a que seja preservada a diversidade na procura assim como a capacidade de convergência da otimização. Assim, para cada hora é necessário definir o seu valor mais provável,  $X$ . No que diz respeito à variação diária, concluiu-se que o perfil RSECE é aquele que apresenta maior diversidade horária nos seus perfis de iluminação e equipamentos e, por isso, quando otimizados, conseguem-se adaptar melhor ao perfil Real de modo a minimizar as diferenças entre ambos.

Com a análise detalhada de três perfis pré-definidos recomendados para a simulação energética em edifício de escritórios, concluiu-se também que é possível estabelecer uma relação entre os perfis de iluminação e de equipamentos de modo a simplificar o processo de otimização sem comprometer em demasia os resultados finais obtidos. Devem ser aplicadas duas relações diárias para os dias úteis ( $K = 1$  para os períodos de ocupação e  $Kd = 0.2$  para os períodos de não ocupação) e uma relação para os dias não úteis ( $Kd = 0.2$ ). Contudo, da aplicação ao caso de estudo real, constata-se ser necessário um levantamento para identificar uma relação  $K$  e  $Kd$  razoável que atenda aos equipamentos e usos.

Aplicando a metodologia desenvolvida a um caso de estudo, o edifício de Componentes, foi possível concluir que a variação dos perfis de utilização tem grande impacto na calibração do edifício, sendo que durante as várias iterações da otimização é possível verificar uma grande variação dos valores obtidos dos índices estatísticos MBE e CVRMSE. Através da utilização do algoritmo genético foi possível garantir que ao longo das gerações e do processo de otimização, os perfis que resultavam em índices estatísticos inferiores iriam passar essa informação para a descendência, fazendo com que os perfis gerados fossem sempre cada vez mais semelhantes aos perfis reais do edifício.

Tendo em conta a análise realizada aos três perfis pré-definidos presentes nas normas, dos quais se obtém  $K = 1$  e  $Kd = 0.2$ , conclui-se que o uso desses parâmetros no edifício de Componentes não permite obter o perfil de iluminação e equipamentos que se aproxime do comportamento real do edifício, refletindo o uso diferente do adotados nesses perfis normalizados. Este facto mostra a importância de se ter um conhecimento geral do comportamento adotado pelos ocupantes dos edifícios, fazendo uma visita ou auditoria energética ao mesmo, antes de se realizar a otimização dos perfis. Uma vez que os ocupantes do edifício de componentes privilegiavam a iluminação natural, para esse caso de estudo, é aplicável  $K = 0.5$  e  $Kd = 0.2$ .

Conclui-se que a aplicação da metodologia apresentada pela presente dissertação permite uma grande redução nos erros associados à definição dos perfis de equipamentos e iluminação para edifícios de escritórios em cerca de 41% para o MBE e 60% para o CVRMSE. No entanto, apenas aliando esta metodologia a um conhecimento geral da interação dos ocupantes com o edifício é que se obtém a calibração do modelo de simulação.

Tendo em conta o estudo realizado, sugerem-se os seguintes trabalhos futuros:

- a continuação do estudo do edifício de Componentes com o objetivo de reduzir ainda mais as diferenças registadas entre simulação e medição. Na presente dissertação realizou-se a otimização dos perfis para um período de apenas 18 dias, sendo que seria interessante comparar este perfil com aquele que seria obtido se a calibração fosse realizada para um ano completo. Neste caso, poderia ser estudado também o impacto da variação de K e Kd ao longo do ano, de modo a minimizar as diferenças entre simulação e medição. Outro trabalho relacionado com este edifício seria a otimização do perfil de utilização do aquecimento presente em cada gabinete utilizando a metodologia descrita nesta dissertação de modo a obter a calibração total do seu modelo de simulação;
- Aplicar a metodologia desenvolvida por este estudo noutros edifícios de escritórios de modo a validar os resultados obtidos. Seria enriquecedor testá-la a edifícios que apresentassem sistemas de climatização diferentes do edifício de Componentes e que apenas apresentassem zonas de gabinetes no seu interior;
- Aplicar a mesma metodologia a edifícios de comércio e serviços de tipologias distintas como escolas, hospitais, centros comerciais, entre outros, de modo a verificar a sua versatilidade. Para estes casos, seria necessário analisar os perfis pré-definidos recomendados para essas tipologias de modo a definir os seus valores de K, Kd e X (valor horário mais provável na distribuição aleatória triangular);
- Incluir a otimização dos parâmetros K e Kd na metodologia geral de criação de perfis de iluminação e equipamentos de modo a obter a calibração do modelo de simulação;
- Estudar a influência dos valores atribuídos aos parâmetros do algoritmo genético (dimensão da população, número máximo de gerações, mutação, cruzamento e dimensão de seleção) nos resultados finais obtidos.

## Referências Bibliográficas

- [1] K. Sun, T. Hong, S. C. Taylor-Lange, and M. A. Piette, “A pattern-based automated approach to building energy model calibration,” *Appl. Energy*, vol. 165, pp. 214–224, 2016.
- [2] M. Herrando, D. Cambra, M. Navarro, L. de la Cruz, G. Millán, and I. Zabalza, “Energy Performance Certification of Faculty Buildings in Spain: The gap between estimated and real energy consumption,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 125, no. January 2014, pp. 141–153, 2016.
- [3] N. Fumo, “A review on the basics of building energy estimation,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, pp. 53–60, 2014.
- [4] D. Coakley, P. Raftery, and M. Keane, “A review of methods to match building energy simulation models to measured data,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 37, pp. 123–141, 2014.
- [5] J. Cipriano, G. Mor, D. Chemisana, D. Pérez, G. Gamboa, and X. Cipriano, “Evaluation of a multi-stage guided search approach for the calibration of building energy simulation models,” *Energy Build.*, vol. 87, pp. 370–385, 2015.
- [6] G. Calleja Rodríguez, A. Carrillo Andrés, F. Domínguez Muñoz, J. M. Cejudo López, and Y. Zhang, “Uncertainties and sensitivity analysis in building energy simulation using macroparameters,” *Energy Build.*, vol. 67, pp. 79–87, 2013.
- [7] V. Monetti, E. Davin, E. Fabrizio, P. André, and M. Filippi, “Calibration of building energy simulation models based on optimization: A case study,” *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 2971–2976, 2015.
- [8] J. Ferdyn-Grygierek and K. Grygierek, “Multi-Variable optimization of building thermal design using genetic algorithms,” *Energies*, vol. 10, no. 10, pp. 1–20, 2017.
- [9] “ASHRAE GUIDELINE: Measurement of Energy and Demand Savings,” in *ASHRAE Guideline 14-2002*, 2002.
- [10] E. Fabrizio and V. Monetti, “Methodologies and advancements in the calibration of building energy models,” *Energies*, vol. 8, no. 4, pp. 2548–2574, 2015.
- [11] E. WP, *Cost-Effective Energy-Efficient Building Retrofitting*. Matthew Deans.
- [12] G. Mustafaraj, D. Marini, A. Costa, and M. Keane, “Model calibration for building energy efficiency simulation,” *Appl. Energy*, vol. 130, pp. 72–85, 2014.
- [13] IPMVP New Construction Subcommittee, “Concepts and Options for Determining energy and Water Savings,” *Int. Perform. Meas. Verif. Protoc.*, vol. 1, no. DOE/GO-102002-1554, pp. 1–93, 2002.
- [14] U. S. D. of Energy, “M & V Guidelines : Measurement and Verification for Contracts,” no. November, 2015.
- [15] G. Ramos Ruiz and C. Fernández Bandera, “Validation of Calibrated Energy Models: Common Errors,” *MDPI energies*, 2017.
- [16] M. Royapoor and T. Roskilly, “Building model calibration using energy and environmental data,” *Energy Build.*, vol. 94, pp. 109–120, 2015.
- [17] T. Hong, J. Kim, J. Jeong, M. Lee, and C. Ji, “Automatic calibration model of a building energy simulation using optimization algorithm,” *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 3698–3704, 2017.
- [18] R. A. Lara *et al.*, “Optimization Tools for Building Energy Model Calibration,” *Energy Procedia*, vol. 111, no. September 2016, pp. 1060–1069, 2017.
- [19] X. Feng, D. Yan, and T. Hong, “Simulation of occupancy in buildings,” *Energy Build.*, vol. 87, no. January, pp. 348–359, 2015.
- [20] J. Page, D. Robinson, N. Morel, and J. L. Scartezzini, “A generalised stochastic model for the simulation of occupant presence,” *Energy Build.*, vol. 40, no. 2, pp. 83–98, 2008.
- [21] A. Mahdavi, F. Tahmasebi, and M. Kayalar, “Prediction of plug loads in office buildings: Simplified and probabilistic methods,” *Energy Build.*, 2016.

- [22] K. Ahmed, A. Akhondzada, J. Kurnitski, and B. Olesen, “Occupancy schedules for energy simulation in new prEN16798-1 and ISO/FDIS 17772-1 standards,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 35, no. January, pp. 134–144, 2017.
- [23] Y. S. Kim, M. Heidarinejad, M. Dahlhausen, and J. Srebric, “Building energy model calibration with schedules derived from electricity use data,” *Appl. Energy*, vol. 190, pp. 997–1007, 2017.
- [24] B. Thornton *et al.*, “Achieving the 30% Goal: Energy and Cost Savings Analysis of ASHRAE Standard 90.1-2010,” 2011.
- [25] C. Wang, D. Yan, and Y. Jiang, “A novel approach for building occupancy simulation,” *Build. Simul.*, vol. 4, no. 2, pp. 149–167, 2011.
- [26] “EnergyPlus,” 2018. [Online]. Available: <https://energyplus.net/>.
- [27] “Sketchup,” 2019. [Online]. Available: <https://www.sketchup.com/>.
- [28] N. M. Mateus, A. Pinto, and G. Carrilho, “Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell,” vol. 75, pp. 511–522, 2014.
- [29] A. Boyano, P. Hernandez, and O. Wolf, “Energy demands and potential savings in European office buildings : Case studies based on EnergyPlus simulations,” *Energy Build.*, vol. 65, pp. 19–28, 2013.
- [30] M. Ordenes, D. Luis, P. Braun, and R. Ru, “The impact of building-integrated photovoltaics on the energy demand of multi-family dwellings in Brazil,” vol. 39, pp. 629–642, 2007.
- [31] “jEplus,” 2019. [Online]. Available: <http://www.jeplus.org/wiki/doku.php?id=start>.
- [32] Y. Zhang, “PARALLEL ’ ENERGYPLUS AND THE DEVELOPMENT OF A PARAMETRIC Institute of Energy and Sustainable Development , De Montfort University , Leicester , UK,” pp. 1382–1388, 2009.
- [33] “Anaconda Distribution - Python 3.7,” 2019. [Online]. Available: <https://www.anaconda.com/distribution/>.
- [34] “jEPlus+EA,” 2019. [Online]. Available: [http://www.jeplus.org/wiki/doku.php?id=docs:jeplus\\_ea:start](http://www.jeplus.org/wiki/doku.php?id=docs:jeplus_ea:start).
- [35] H. Ishibuchi, N. Tsukamoto, and Y. Nojima, “Evolutionary Many-Objective Optimization: A short Review,” pp. 2419–2426, 2008.
- [36] O. Boyabatli, “Parameter Selection in Genetic Algorithms,” pp. 78–83, 2004.
- [37] N. M. Razali and J. Geraghty, “Genetic Algorithm Performance with Different Selection Strategies in Solving TSP,” 2011.
- [38] A. R. Ayad, H. A. Awad, and A. A. Yassin, “Parametric analysis for genetic algorithms handling parameters,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 52, no. 1, pp. 99–111, 2013.
- [39] A. Alajmi and J. Wright, “Selecting the most efficient genetic algorithm sets in solving unconstrained building optimization problem,” *Int. J. Sustain. Built Environ.*, vol. 3, no. 1, pp. 18–26, 2014.
- [40] R. D. Bingham, M. Agelin-chaab, and M. A. Rosen, “Whole building optimization of a residential home with PV and battery storage in The Bahamas,” *Renew. Energy*, vol. 132, pp. 1088–1103, 2019.
- [41] LNEG, “CLIMAS-SCE - Software para o Sistema Nacional de Certificação de Edifícios.,” 2013. [Online]. Available: <http://www.lneg.pt/servicos/328/2263/>.
- [42] G. Carrilho, N. R. Martins, and C. S. Horta, “Thermal and airflow simulation of a naturally ventilated shopping mall,” vol. 50, pp. 177–188, 2012.
- [43] ISO 10456, “Building materials and products — Hygrothermal properties - Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values,” 2009.
- [44] C. A. P. dos Santos and L. Matias, *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios. Versão actualizada 2006*. LNEC, 2008.

## ANEXOS

### A.1 – Características construtivas da envolvente

Tabela A.1-1: Características dos materiais utilizados nas soluções construtivas (envolvente opaca a envidraçada) do edifício TESTE. (Elementos apresentados do exterior para o interior). Propriedades termofísicas retiradas de [43][44].

Envolvente opaca				
Material	Espessura (m)	Condutividade Térmica ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	Massa Volúmica ( $k \cdot gm^{-3}$ )	Calor específico ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )
Paredes Exteriores				
<i>Reboco</i>	0.01	0.5	1200	800
<i>Tijolo (11 cm)</i>	0.11	0.56	821	800
<i>Isolamento</i>	0.1	0.04	32	830
<i>Tijolo (15 cm)</i>	0.15	0.56	821	800
<i>Reboco</i>	0.01	0.5	1200	800
Pavimento				
<i>Solo</i>	0.5	1.14	1000	1280
<i>Isolamento</i>	0.08	0.04	32	830
<i>Cimento</i>	0.15	1.72	2243	830
Cobertura				
<i>Isolamento</i>	0.15	0.04	32	830
<i>Cimento</i>	0.2	0.57	609	830
<i>Reboco</i>	0.01	0.5	1200	800
Envolvente envidraçada				
Material	Espessura (m)			
Janelas exteriores				
<i>Vidro Simples incolor</i>	0.006			
<i>Caixa de ar</i>	0.012			
<i>Vidro simples incolor</i>	0.006			

Tabela A.1-2: Características termofísicas dos materiais que constituem a envolvente do edifício de Componentes. Valores retirados de [44][43].

Material	Condutividade Térmica ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	Massa Volúmica ( $k \cdot gm^{-3}$ )	Calor específico ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )
<i>Madeira</i>	0.09	150	1610
<i>Reboco</i>	0.5	1200	1000
<i>Betão</i>	0.468	1100	1000
<i>Aço</i>	50	7900	450
<i>Betao_13</i>	0.36	1460	1000
<i>Gesso Cartonado</i>	0.18	900	1050
<i>Lã de vidro</i>	0.040	30	1450
<i>Cerâmica</i>	1.3	2300	840
<i>Solo</i>	1.14	1000	1280
<i>Cimento</i>	1.72	2243	830