



**João Pedro Coelho Nicolau Tabanêz Patricio**

Licenciado em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e de  
Computadores

# GESTÃO DE FLEXIBILIDADE ENERGÉTICA EM EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Eletrotécnica e de Computadores

**Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores**

Universidade NOVA de Lisboa  
Setembro, 2022



# GESTÃO DE FLEXIBILIDADE ENERGÉTICA EM EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

**JOÃO PEDRO COELHO NICOLAU TABANÊZ PATRICIO**

Licenciado em Ciências da Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

**Orientador:** Rui Miguel Amaral Lopes,  
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

**Coorientador:** Naim Majdalani,  
Investigador no *Center for Innovation, Technology and Policy Research*, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

## Júri:

**Presidente:** Rui Neves da Silva,  
Professor Associado, NOVA School of Science and Technology | Universidade NOVA de Lisboa

**Arguentes:** Luís Gonçalo Correia Baltazar,  
Professor Auxiliar, NOVA School of Science and Technology | Universidade NOVA de Lisboa

**Vogais:** Rui Miguel Amaral Lopes,  
Professor Auxiliar, NOVA School of Science and Technology | Universidade NOVA de Lisboa



## **Gestão de Flexibilidade Energética em Edifícios de Escritórios**

Copyright © João Pedro Coelho Nicolau Tabanêz Patricio, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



*À minha família*



## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Rui Lopes, e ao meu coorientador, Naim Majdalani, pela orientação, incansável disponibilidade, motivação, partilha de conhecimentos e confiança no meu trabalho. Muito obrigado por tudo.

Gostaria também de deixar um forte agradecimento ao Engenheiro Mário Boucinha e Engenheira Sandra Oliveira pela formação que me foi dada no âmbito da simulação energética de edifícios, apoio e motivação.

Quero agradecer também ao FX e a todos os seus membros. Sem vocês, esta experiência incrível não seria a mesma. Obrigado pela motivação, apoio e amizade. Sem dúvida, tornaram-se amigos que ambiciono levar para a vida. Agradecer também aos meus restantes colegas de MIEEC com quem também tive a oportunidade de trabalhar e aprender.

Um agradecimento especial também aos meus amigos que, mesmo fora do círculo académico, celebraram comigo os momentos bons e apoiaram-me nos menos bons.

Agradeço, do fundo do meu coração, a toda a minha família, em especial aos meus pais, Fernando e Sofia, à minha irmã Teresa e aos meus avós, Avô Américo, Avô Manel, Avó Maria e Avó Fernanda, que sempre lutaram, fazendo todos os esforços e sacrifícios para me proporcionar o melhor da vida. Se eu sou quem sou hoje é tudo graças à minha família, o grande pilar da minha vida. Obrigado por sempre acreditarem em mim, apoiarem os meus sonhos e pela paciência que sempre tiveram. Espero orgulhar-vos sempre. Obrigado por todo o amor.

Por fim, um agradecimento muito especial à minha Sarinha. Obrigado pelo apoio, amizade e acima de tudo, amor. Obrigado pela compreensão, paciência e por estares sempre presente. Se eu estou onde estou hoje é também muito graças a ti.



*"E se corre bem?"*  
(Rúben Amorim)



## RESUMO

Tendo em conta as consequências das alterações climáticas, todos os Estados-Membros da União Europeia assinaram um acordo com vista a tornar-se na primeira sociedade e economia com impacto neutro no clima até 2050. Sendo que os edifícios pertencem ao setor que mais energia consome, cerca de 33% da energia global produzida, e, uma vez que a energia é essencial para o desenvolvimento de qualquer economia, prevê-se que a procura da mesma aumentará. Dada esta tendência, existe a necessidade de recorrer à flexibilidade energética dos edifícios, uma vez que contribui para uma melhor integração das fontes de energia renovável e redução dos picos de consumo provenientes da eletrificação de algumas cargas onde veículos elétricos e bombas de calor são casos comuns.

Neste contexto, tendo como caso de estudo um edifício de escritórios, o trabalho descrito nesta dissertação apresenta três principais objetivos. O primeiro refere-se ao desenvolvimento de um algoritmo de otimização que visa definir a utilização da flexibilidade energética existente de forma a reduzir os custos de energia elétrica de cada escritório considerando as tarifas aplicadas em cada instante e o pico de potência total de forma que o custo da potência contratada de todo o edifício de escritórios seja reduzido. O segundo diz respeito ao desenvolvimento e adaptação de modelos térmicos de escritórios em edifícios de modo a fornecer os *inputs* necessários para a otimização referida no ponto anterior. O terceiro objetivo foca a aplicação do algoritmo desenvolvido a estudo de caso no contexto português. Os resultados obtidos permitem concluir que, através da utilização da flexibilidade energética existente, é possível reduzir tanto os custos associados à energia elétrica como os custos associados à potência contratada.

**Palavras-chave:** Flexibilidade Energética, Gestão de Energia, Modelação do Consumo de Energia, EnergyPlus, Algoritmo de Otimização.



## ABSTRACT

Due to the consequences of climate change, all the Member States of the European Union signed an agreement with the goal of becoming the first society and economy with a neutral impact on the planet by 2050. Since buildings belong to the sector that consumes more energy, around 33% of the global energy produced, and since energy is essential for the development of any economy, it is expected that the demand for it will increase. Given this trend, there is a need to use the energy flexibility of buildings, as it contributes to a better integration of renewable energy sources and reduction of consumption peaks arising from the electrification of some loads where electric vehicles and heat pumps are common cases.

In this context, taking an office building as a case study, the work described in this dissertation has three main objectives. The first refers to the development of an optimization algorithm which aims to define the use of existing energy flexibility to reduce both the electric energy costs of each office considering the tariffs applied at each moment and the total power peak, so the cost of the contracted power of the entire building is reduced. The second objective concerns the development and adaptation of thermal models of offices in buildings to provide the necessary inputs for the optimization referred to in the previous point. The third objective focuses on the application of the algorithm developed to a case study in the Portuguese context. The results obtained allow us to conclude that, through the use of the existing energy flexibility, it is possible to reduce both the costs associated with electric energy and the costs associated with the contracted power.

**Keywords:** Energy Flexibility, Energy Management, Energy Consumption Modeling, EnergyPlus, Optimization Algorithm.



# ÍNDICE

|          |                                                                     |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                             | <b>1</b>  |
| 1.1      | Enquadramento e Motivação .....                                     | 1         |
| 1.2      | Objetivos .....                                                     | 3         |
| 1.3      | Estrutura do Documento.....                                         | 4         |
| <b>2</b> | <b>ESTADO DA ARTE.....</b>                                          | <b>5</b>  |
| 2.1      | Flexibilidade Energética .....                                      | 5         |
| 2.1.1    | Definições .....                                                    | 5         |
| 2.1.2    | Metodologias para a caracterização da Flexibilidade Energética..... | 9         |
| 2.1.3    | Utilização da Flexibilidade Energética.....                         | 14        |
| 2.1.4    | Algoritmos de Otimização .....                                      | 28        |
| 2.2      | Modelação do Consumo de Energia .....                               | 32        |
| 2.2.1    | Desafios da Modelação de Energia.....                               | 33        |
| 2.3      | Discussão.....                                                      | 35        |
| <b>3</b> | <b>SOLUÇÃO PROPOSTA .....</b>                                       | <b>39</b> |
| 3.1      | Modelação do Comportamento Térmico de um Edifício .....             | 41        |
| 3.1.1    | Metodologia .....                                                   | 41        |
| 3.1.2    | Modelo RC.....                                                      | 45        |
| 3.2      | Algoritmo Genético .....                                            | 48        |
| 3.2.1    | Origem dos Algoritmos Genéticos.....                                | 49        |
| 3.2.2    | Funcionamento Genérico.....                                         | 49        |

|          |                                          |            |
|----------|------------------------------------------|------------|
| 3.2.3    | Estrutura e Processo de Otimização ..... | 52         |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E ANÁLISE .....</b>        | <b>57</b>  |
| 4.1      | Caso de Estudo .....                     | 57         |
| 4.2      | Resultados.....                          | 72         |
| 4.2.1    | Calibração do Modelo RC.....             | 72         |
| 4.2.2    | Cenário 1 .....                          | 81         |
| 4.2.3    | Cenário 2 .....                          | 88         |
| 4.2.4    | Cenário 3 .....                          | 95         |
| 4.3      | Discussão.....                           | 102        |
| <b>5</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>         | <b>107</b> |
| 5.1      | Revisão Geral .....                      | 107        |
| 5.2      | Contribuições Originais.....             | 108        |
| 5.3      | Trabalhos Futuros .....                  | 108        |
| <b>6</b> | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>   | <b>109</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b> - Procura diária de um edifício típico de escritórios localizado na Califórnia .....                                                                                                                                                                               | 3  |
| <b>Figura 2</b> - Ilustração da carga solicitada de modo a satisfazer as necessidades exigidas sem e recorrendo à flexibilidade energética .....                                                                                                                                   | 7  |
| <b>Figura 3</b> - Representação gráfica de exemplos referentes as operações atrasada (Esquerda) e antecipada (Direita) .....                                                                                                                                                       | 9  |
| <b>Figura 4</b> - Representação conceptual da metodologia utilizada por D'hulst et al. [21] para quantificar a flexibilidade energética. Flexibilidade utilizada para aumentar o consumo instantâneo de potência (Esquerda). Flexibilidade utilizada para diminuir o consumo ..... | 11 |
| <b>Figura 5</b> - Representação dos cenários simulados na metodologia proposta por Stinner em [23]. Ilustração referente ao primeiro cenário (Esquerda) e referente ao segundo cenário (Direita).....                                                                              | 12 |
| <b>Figura 6</b> - Curvas de custo utilizadas por De Coninck e Helsen para quantificar a flexibilidade energética [25]. Curva de custo (Esquerda) e curva de custo com pontos intermédios (Direita) .....                                                                           | 13 |
| <b>Figura 7</b> - Esquema de otimização utilizado em [29] .....                                                                                                                                                                                                                    | 16 |
| <b>Figura 8</b> - Representação gráfica da temperatura ambiente (gráficos a) e b)) e da potência do sistema de refrigeração (gráficos c) e d)) aquando submetidos ao comportamento de referência, modulação antecipada e modulação retardada.....                                  | 21 |
| <b>Figura 9</b> - Esquemático das interações entre os escritórios, algoritmo de otimização e sistemas de climatização.....                                                                                                                                                         | 40 |
| <b>Figura 10</b> - Representação de uma zona térmica através de um circuito RC de segunda ordem .....                                                                                                                                                                              | 46 |
| <b>Figura 11</b> - Relação entre população, cromossoma e gene no âmbito dos algoritmos genéticos .....                                                                                                                                                                             | 50 |

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 12</b> - Cruzamento entre cromossomas .....                                                                                 | 50 |
| <b>Figura 13</b> - Mutação de um cromossoma.....                                                                                      | 51 |
| <b>Figura 14</b> - Fluxograma genérico de um Algoritmo Genérico .....                                                                 | 51 |
| <b>Figura 15</b> - Estrutura e funcionamento pormenorizado do programa desenvolvido .....                                             | 53 |
| <b>Figura 16</b> - Sede da Soler & Palau Portugal.....                                                                                | 58 |
| <b>Figura 17</b> - Planta do Piso 0 do edifício de escritórios em estudo.....                                                         | 59 |
| <b>Figura 18</b> - Planta do Piso 1 do edifício de escritórios .....                                                                  | 60 |
| <b>Figura 19</b> - Planta do Piso 2 do edifício de escritórios .....                                                                  | 61 |
| <b>Figura 20</b> - Marcações das zonas térmicas para o Piso 0 .....                                                                   | 65 |
| <b>Figura 21</b> - Marcações das zonas térmicas para o Piso 1 .....                                                                   | 66 |
| <b>Figura 22</b> - Marcações das zonas térmicas para o Piso 2 .....                                                                   | 67 |
| <b>Figura 23</b> - Construção geométrica do edifício de escritórios desenvolvida através do Google SketchUp.....                      | 69 |
| <b>Figura 24</b> - Localização do edifício de escritórios em estudo .....                                                             | 71 |
| <b>Figura 25</b> - Resultados obtidos por Rouchier em [71] .....                                                                      | 73 |
| <b>Figura 26</b> - Resultado obtido aquando considerado um período de simulação de 12 horas..                                         | 73 |
| <b>Figura 27</b> - Resultado obtido aquando considerado um período de simulação de 72 horas..                                         | 74 |
| <b>Figura 28</b> - Resultado obtido aquando considerado um período de simulação de 48 horas..                                         | 74 |
| <b>Figura 29</b> - Resultado obtido aquando considerado um período de simulação de 24 horas..                                         | 74 |
| <b>Figura 30</b> - Resultado obtido aquando considerado um período de simulação de 96 horas..                                         | 75 |
| <b>Figura 31</b> - Comparação entre resultado obtido através da utilização de apenas um modelo RC e EnergyPlus na primavera.....      | 76 |
| <b>Figura 32</b> - Comparação entre resultado obtido através da utilização de apenas um modelo RC e EnergyPlus no verão .....         | 76 |
| <b>Figura 33</b> - Comparação entre resultado obtido através da utilização de apenas um modelo RC e EnergyPlus no inverno .....       | 76 |
| <b>Figura 34</b> - Comparação entre resultado obtido através da utilização de apenas um modelo RC e EnergyPlus no outono.....         | 77 |
| <b>Figura 35</b> - Comparação entre resultado obtido através da utilização de um modelo RC por estação e EnergyPlus no verão.....     | 80 |
| <b>Figura 36</b> - Comparação entre resultado obtido através da utilização de um modelo RC por estação e EnergyPlus na primavera..... | 80 |

|                                                                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 37</b> - Comparação entre resultado obtido através da utilização de um modelo RC por estação e EnergyPlus no inverno.....                                                          | 80 |
| <b>Figura 38</b> - Comparação entre resultado obtido através da utilização de um modelo RC por estação e EnergyPlus no outono .....                                                          | 81 |
| <b>Figura 39</b> - Horário considerado para a Tarifa Bi-Horária .....                                                                                                                        | 84 |
| <b>Figura 40</b> - Horário considerado para a Tarifa Tri-Horária .....                                                                                                                       | 84 |
| <b>Figura 41</b> - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no inverno considerando as condições do cenário 1 .....                            | 85 |
| <b>Figura 42</b> - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no outono considerando as condições do cenário 1 .....                             | 86 |
| <b>Figura 43</b> - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no verão considerando as condições do cenário 1 .....                              | 86 |
| <b>Figura 44</b> - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios na primavera considerando as condições do cenário 1 .....                          | 86 |
| <b>Figura 45</b> - Custos associados ao cenário 1 .....                                                                                                                                      | 87 |
| <b>Figura 46</b> - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no inverno considerando as condições do cenário 2 e uma tarifa bi-horária .....    | 89 |
| <b>Figura 47</b> - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no inverno considerando as condições do cenário 2 e uma tarifa simples .....       | 89 |
| <b>Figura 48</b> - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios na primavera considerando as condições do cenário 2 e uma tarifa simples .....     | 90 |
| <b>Figura 49</b> - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no inverno considerando as condições do cenário 2 e uma tarifa tri-horária .....   | 90 |
| <b>Figura 50</b> - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios na primavera considerando as condições do cenário 2 e uma tarifa bi-horária.....   | 90 |
| <b>Figura 51</b> - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no verão considerando as condições do cenário 2 e uma tarifa bi-horária .....      | 91 |
| <b>Figura 52</b> - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no verão considerando as condições do cenário 2 e uma tarifa simples .....         | 91 |
| <b>Figura 53</b> - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios na primavera considerando as condições do cenário 2 e uma tarifa tri-horária ..... | 91 |
| <b>Figura 54</b> - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no outono considerando as condições do cenário 2 e uma tarifa simples.....         | 92 |

|                                                                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 55</b> - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no verão considerando as condições do cenário 2 e uma tarifa tri-horária.....      | 92 |
| <b>Figura 56</b> - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no outono considerando as condições do cenário 2 e uma tarifa bi-horária.....      | 93 |
| <b>Figura 57</b> - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no outono considerando as condições do cenário 2 e uma tarifa tri-horária .....    | 93 |
| <b>Figura 58</b> - Custos associados ao cenário 2 .....                                                                                                                                      | 94 |
| <b>Figura 59</b> - Comparação entre o cenário 1 e cenário 2 aquando considerada uma tarifa tri-horária durante a estação da primavera.....                                                   | 95 |
| <b>Figura 60</b> - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no inverno considerando as condições do cenário 3 e uma tarifa simples .....       | 96 |
| <b>Figura 61</b> - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no inverno considerando as condições do cenário 3 e uma tarifa tri-horária .....   | 96 |
| <b>Figura 62</b> - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no inverno considerando as condições do cenário 3 e uma tarifa bi-horária .....    | 96 |
| <b>Figura 63</b> - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios na primavera considerando as condições do cenário 3 e uma tarifa tri-horária ..... | 97 |
| <b>Figura 64</b> - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios na primavera considerando as condições do cenário 3 e uma tarifa bi-horária.....   | 97 |
| <b>Figura 65</b> - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios na primavera considerando as condições do cenário 3 e uma tarifa simples .....     | 97 |
| <b>Figura 66</b> - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no verão considerando as condições do cenário 3 e uma tarifa bi-horária .....      | 98 |
| <b>Figura 67</b> - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no verão considerando as condições do cenário 3 e uma tarifa tri-horária.....      | 98 |
| <b>Figura 68</b> - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no verão considerando as condições do cenário 3 e uma tarifa simples .....         | 98 |
| <b>Figura 69</b> - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no outono considerando as condições do cenário 3 e uma tarifa tri-horária .....    | 99 |
| <b>Figura 70</b> - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no outono considerando as condições do cenário 3 e uma tarifa bi-horária.....      | 99 |

|                                                                                                                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figura 71</b> - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no outono considerando as condições do cenário 3 e uma tarifa simples.....           | 99  |
| <b>Figura 72</b> - Custos associados ao cenário 3 .....                                                                                                                                        | 100 |
| <b>Figura 73</b> - Comparação entre o cenário 2 e cenário 3 aquando considerada uma tarifa tri-horária durante a estação do outono.....                                                        | 101 |
| <b>Figura 74</b> - Comparação entre o cenário 2 e cenário 3 aquando considerada uma tarifa bi-horária durante a estação da primavera.....                                                      | 101 |
| <b>Figura 75</b> - Comparação entre os três cenários em estudo no que diz respeito aos custos associados à energia elétrica de cada escritório e o pico de potência total durante o verão..... | 102 |
| <b>Figura 76</b> - Comportamento geral da temperatura da envolvente.....                                                                                                                       | 104 |
| <b>Figura 77</b> - Dificuldade de aproveitamento da inercia térmica .....                                                                                                                      | 105 |



## ÍNDICE DE TABELAS

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1</b> - Método utilizado para o controlo da flexibilidade energética .....                                  | 21 |
| <b>Tabela 2</b> - Legenda relativa à Figura 17 .....                                                                  | 59 |
| <b>Tabela 3</b> - Legenda relativa à Figura 18 .....                                                                  | 60 |
| <b>Tabela 4</b> - Legenda relativa à Figura 19 .....                                                                  | 61 |
| <b>Tabela 5</b> - Constituição assumida para as paredes exteriores presentes no modelo (exterior para interior) ..... | 62 |
| <b>Tabela 6</b> - Constituição assumida para as paredes interiores presentes no modelo .....                          | 62 |
| <b>Tabela 7</b> - Constituição do pavimento do Piso 0 (exterior para interior) .....                                  | 63 |
| <b>Tabela 8</b> - Constituição da cobertura do edifício (exterior para interior) .....                                | 63 |
| <b>Tabela 9</b> - Constituição do pavimento interior (exterior para interior) .....                                   | 63 |
| <b>Tabela 10</b> - Constituição das janelas exteriores (exterior para interior) .....                                 | 64 |
| <b>Tabela 11</b> - Constituição da porta exterior (exterior para interior) .....                                      | 64 |
| <b>Tabela 12</b> - Informações relativas ao sistema de climatização do edifício de escritórios e o simplificado ..... | 68 |
| <b>Tabela 13</b> - Parâmetros obtidos utilizando apenas um modelo RC .....                                            | 75 |
| <b>Tabela 14</b> - Parâmetros ótimos obtidos para o inverno aquando considerado um modelo RC por estação .....        | 77 |
| <b>Tabela 15</b> - Parâmetros ótimos obtidos para a primavera aquando considerado um modelo RC por estação .....      | 78 |
| <b>Tabela 16</b> - Parâmetros ótimos obtidos para o verão aquando considerado um modelo RC por estação .....          | 78 |
| <b>Tabela 17</b> - Parâmetros ótimos obtidos para o outono aquando considerado um modelo RC por estação .....         | 79 |

|                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 18</b> - Temperaturas interiores e da envolvente iniciais para as diversas zonas aquando submetidas ao inverno e primavera..... | 82 |
| <b>Tabela 19</b> - Temperaturas interiores e da envolvente iniciais para as diversas zonas aquando submetidas ao verão e outono .....     | 83 |
| <b>Tabela 20</b> - Tarifas consideradas no âmbito da dissertação .....                                                                    | 84 |
| <b>Tabela 21</b> - Custos relativos à potência contratada .....                                                                           | 85 |

## SIGLAS E ABREVIATURAS

|             |                                                  |
|-------------|--------------------------------------------------|
| <b>ANN</b>  | <i>Artificial Neural Network</i>                 |
| <b>BES</b>  | <i>Building Energy Systems</i>                   |
| <b>BESS</b> | <i>Battery Energy Storage Systems</i>            |
| <b>BIPV</b> | <i>Building-integrated photovoltaics</i>         |
| <b>BTM</b>  | <i>Building Thermal Mass</i>                     |
| <b>CHP</b>  | <i>Combiend Heat and Power</i>                   |
| <b>GEE</b>  | Gases com Efeito de Estufa                       |
| <b>HVAC</b> | <i>Heating, Ventilating and Air Conditioning</i> |
| <b>MPC</b>  | Modelo de Controlo Preditivo                     |
| <b>nZEB</b> | <i>nearly Zero Energy Building</i>               |
| <b>PPLs</b> | <i>Plug and Process Loads</i>                    |
| <b>PV</b>   | <i>Photovoltaics</i>                             |
| <b>RC</b>   | Resistência-Condensador                          |



## INTRODUÇÃO

O presente capítulo inicia-se com um enquadramento ao tema abordado neste trabalho no subcapítulo 1.1, juntamente com a apresentação das motivações que levaram à realização desta dissertação. No subcapítulo 1.2 são expostos os objetivos principais a alcançar com esta dissertação. E por fim, no subcapítulo 1.3, é feita uma breve síntese da estrutura do documento.

### 1.1 Enquadramento e Motivação

Desde meados do século XVIII que a procura mundial de energia é maioritariamente suportada por combustíveis fósseis. O aproveitamento da energia oriunda deste tipo de combustíveis resulta da combustão dos mesmos, sendo que o dióxido de carbono ( $CO_2$ ) libertado por essa combustão é considerado como o principal responsável pelo aumento do efeito estufa [1]. Segundo o Instituto *Goddard* para Estudos Espaciais da NASA, a temperatura média do planeta tem vindo a aumentar década após década, aumentando também a regularidade de ocorrência de desastres naturais e fenómenos meteorológicos extremos, sendo que estes mesmos fenómenos e desastres servem como que um alerta para os impactos dos comportamentos da Humanidade no meio ambiente [2] [3]. A fim de fazer algo e com ambição de mudar o rumo atual do planeta, o mundo uniu-se realizando convenções e cimeiras de maneira a criar acordos com o objetivo de reduzir a produção destes Gases com Efeito de Estufa (GEE). Numa dessas convenções, a Convenção Quadro das Alterações Climáticas, foi desenvolvido o Acordo de Paris [4].

Com vista a tornar-se na primeira sociedade e economia com impacto neutro no clima até 2050, todos os Estados-Membros da União Europeia assinaram o Acordo de Paris [4]. Sendo este um objetivo bastante ambicioso, a Comissão Europeia criou diversos pacotes

estratégicos de maneira a responder da melhor forma a este desafio global. Dos pacotes estratégicos criados destacam-se o Pacote Energia Limpa para todos os Europeus [5] e o Pacote Mobilidade Limpa [6]. Assim sendo, os Estado-Membros têm de cumprir com uma estratégia apresentada de maneira a reduzir as emissões de carbono da União Europeia em, no mínimo, 55% até 2030 comparativamente aos valores obtidos em 1990 [4]. Graças a estas cimeiras e acordos, os sistemas de energia têm sido alvos de diversas mudanças. Muitas destas mudanças são fruto dos constantes avanços tecnológicos associados às fontes de energias renováveis.

Como estado-membro da União Europeia, Portugal estabeleceu diversas metas no âmbito do Plano Nacional de Energia e Clima para o horizonte 2021-2030 com o objetivo de estar na linha da frente no que diz respeito à transição energética [7]. Até 2030, para além de ambicionar aumentar em 35% a eficiência energética, 15% de renováveis nas interligações energéticas e 20% nos transportes e reduzir entre 45% a 55% as emissões de  $CO_2$  relativamente aos valores registados em 2005, Portugal estabelece uma quota de 47% do consumo final bruto de energia seja proveniente de fontes renováveis. Uma vez que a procura de energia está a aumentar em todo o planeta, visto ser essencial para o desenvolvimento de qualquer economia, as fontes de energias renovável são consideradas fundamentais de modo a evitar a destruição do planeta e de quem o habita [8].

Ainda assim, fontes de energia renovável como a energia solar e o vento não possuem uma produção de energia constante sendo impossível satisfazer continuamente as necessidades energéticas de um edifício. Consequentemente, é fundamental arranjar uma solução que reduza os impactos causados pela falta de compatibilidade entre o consumo e a procura, de modo a melhorar o rendimento destas fontes. Esta solução pode passar pela integração da flexibilidade energética nestes sistemas. A flexibilidade energética consiste na capacidade de adaptação do consumo ou geração de energia de um sistema, tendo em conta determinados objetivos, sem comprometer as restrições técnicas e o nível de conforto dos respetivos utilizadores [9]. Existem diversas maneiras de utilizar a flexibilidade de um edifício, sendo que as mais recorrentes passam pelo armazenamento de energia tanto em baterias, como o armazenamento de energia sob forma de calor na estrutura do edifício em questão, graças à sua inércia térmica [10] [11].

Uma vez que os edifícios pertencem ao setor que mais energia consome, cerca de 33% da energia global produzida, a utilização da flexibilidade energética dos edifícios poderá desempenhar um papel fulcral na redução das emissões de carbono através da integração das

fontes de energia renovável e redução dos picos de consumo provenientes da eletrificação de algumas cargas [12]. Nos Estados Unidos da América, os edifícios de escritórios de pequenas e médias dimensões (edifícios com dimensões inferiores a 9000 m<sup>2</sup>) utilizam, em média, 15 kWh de energia por m<sup>2</sup>. Num edifício de escritórios típico, a iluminação, os sistemas de refrigeração e aquecimento consomem grande parte da procura total de energia, sendo que estes são os melhores alvos a fim de reduzir o consumo de energia. Sendo que a energia representa 19% dos custos totais de um edifício típico deste tipo, merece atenção. A Figura 1 representa a procura típica diária de um edifício de escritórios localizado na Califórnia [13].

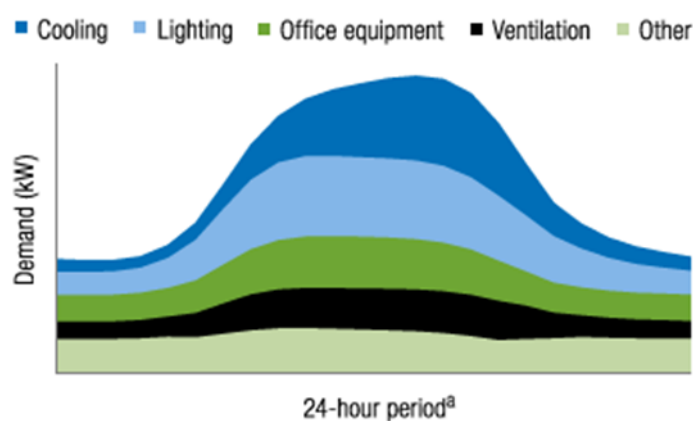


Figura 1 - Procura diária de um edifício típico de escritórios localizado na Califórnia [13]

## 1.2 Objetivos

Considerando os tópicos referidos no subcapítulo anterior, esta dissertação tem os seguintes objetivos:

1. Desenvolver um algoritmo de otimização que visa definir a utilização da flexibilidade energética existente de forma a reduzir os custos de energia elétrica de cada escritório considerando as tarifas aplicáveis em cada instante e o pico de potência total de forma que o custo da potência contratada de todo o edifício seja reduzido;
2. Desenvolver ou adaptar modelos térmicos de escritórios em edifícios de modo a fornecer os inputs necessários para a otimização referida no ponto anterior;
3. Aplicar o algoritmo desenvolvido a estudo de caso no contexto português.

## 1.3 Estrutura do Documento

O presente documento está dividido em cinco diferentes capítulos. Todos eles importantes para um enquadramento e compreensão do trabalho realizado.

No primeiro capítulo, onde se inclui este subcapítulo, é feito um enquadramento ao tema desenvolvido, a apresentação das motivações que levaram à realização desta dissertação e os objetivos a alcançar com a mesma.

O segundo capítulo, Estado da Arte, encontra-se também ele dividido em dois subcapítulos, sendo estes alusivos aos dois temas principais da dissertação, flexibilidade energética e modelação do consumo de energia.

O terceiro capítulo, Solução Proposta, procura expor de forma detalhada o algoritmo de otimização proposto, as decisões tomadas durante a elaboração do mesmo e as suas justificações.

No quarto capítulo, Resultados e Análise, além de apresentado o caso de estudo considerado, é feita uma descrição dos diferentes cenários estudados e uma análise e discussão dos resultados obtidos.

Por fim, no quinto capítulo, é feita uma revisão geral do trabalho realizado no âmbito da dissertação e uma descrição das contribuições originais desenvolvidas e das propostas para trabalhos futuros.

## ESTADO DA ARTE

Este capítulo tem como objetivo introduzir o conceito de flexibilidade energética, expor as diferentes definições e metodologias adotadas pelos demais investigadores e analisar alguns trabalhos realizados relacionados com os temas sob investigação nesta dissertação (Flexibilidade Energética em Portugal, Flexibilidade Energética em edifícios de escritórios e Algoritmos de Otimização). A importância da modelação de energia e os seus principais desafios são também abordados neste capítulo. Para finalizar, é apresentada uma discussão sobre os tópicos abordados tendo em conta os objetivos do presente trabalho.

### 2.1 Flexibilidade Energética

Como anteriormente referido, graças às consequências do aquecimento global, a necessidade de descarbonizar o planeta é vista como uma prioridade. Ainda assim, é um facto que o consumo de energia está a aumentar [8]. Visto isto, existe cada vez mais a necessidade de incorporar fontes de energia renovável na rede elétrica. Graças à necessidade de fazer atualizações dispendiosas na rede de modo a incorporar estas fontes, a exploração da flexibilidade energética surge como parte integrante de uma solução alternativa uma vez que contribui para uma melhor integração das fontes de energia renovável e redução dos picos de consumo provenientes da eletrificação de algumas cargas [14].

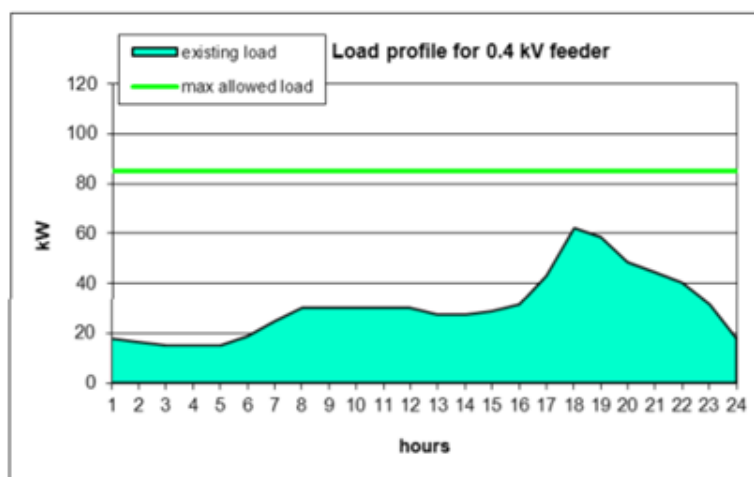
#### 2.1.1 Definições

De acordo com Jensen et al. em [15], é possível definir a flexibilidade energética de um edifício como a capacidade de gestão do consumo ou geração de energia, sem comprometer o nível de conforto dos respetivos utilizadores, tendo em conta um determinado objetivo. Ou

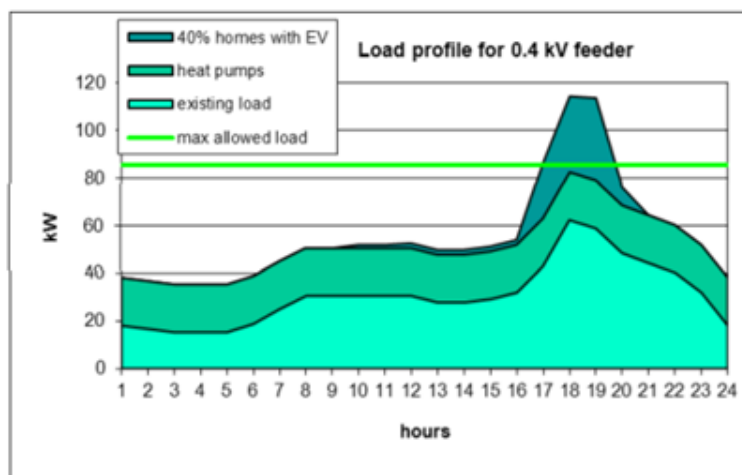
seja, a flexibilidade energética consiste na capacidade de modificar o consumo e a produção de energia através da antecipação ou atraso da sua procura. Utilizar a flexibilidade energética existente depende das cargas que estão ligadas e da sua capacidade de desviar o consumo de energia no tempo. Cargas como os sistemas de segurança requerem energia continuamente, não sendo favoráveis para a flexibilidade energética. Sistemas de climatização, carregamento de veículos elétricos e equipamentos domésticos são cargas cuja utilização pode variar temporalmente sendo assim propensas a oferecer flexibilidade energética.

A Figura 2 mostra um exemplo retirado de [15] com o objetivo de ajudar na compreensão do que é a flexibilidade energética. Numa análise mais detalhada, em 1) é possível verificar a quantidade de carga elétrica necessária para satisfazer as necessidades de uma certa habitação durante um dia e a carga máxima permitida num determinado instante. Em 2) é possível observar a adição de duas cargas, nomeadamente: o carregamento de automóveis elétricos e uma carga referente a bombas de calor. Com esta adição, a carga elétrica solicitada passa, claramente, o máximo permitido entre, sensivelmente, as 17:00h e as 20:00h. Em 3), recorrendo à flexibilidade energética dessas cargas, é possível fazer uma gestão da utilização das mesmas, evitando a ultrapassagem do limite máximo num determinado instante.

1)



2)



3)

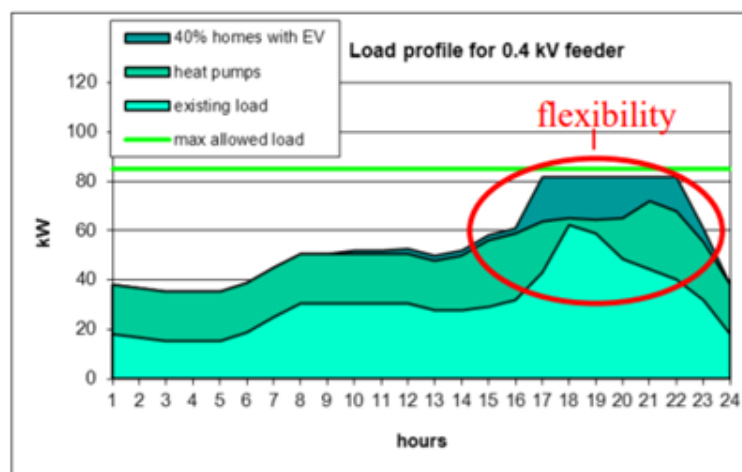


**Figura 2** - Ilustração da carga solicitada de modo a satisfazer as necessidades exigidas sem e recorrendo à flexibilidade energética [15]

No entanto, as definições para o conceito de flexibilidade energética tendem a variar consoante o objetivo do projeto ou o seu investigador. Devido a essa discrepância nas definições e quantificações metodológicas, a comparação de resultados torna-se difícil. Reynders et al. em [9], baseados em diversas definições, com o objetivo de sintetizar as mesmas, identificaram os seus pontos chave e agruparam-nas em 5 categorias diferentes.

A primeira categoria identificada aborda as componentes energéticas. Ou seja, foca-se, normalmente, na rede energética do edifício. Semelhante à primeira, a segunda categoria aborda definições num contexto elétrico (rede elétrica). As definições que tendem a abordar a flexibilidade energética como ferramenta para reduzir os custos monetários encaixam-se na terceira categoria. A quarta categoria aborda a possibilidade de comprometer o conforto dos utilizadores e a influência (negativa) no desempenho de outros edifícios. Por fim, a quinta categoria tem em conta a interação de sistemas externos com o edifício tais como as bombas de calor [9].

Six et al. em [16] definem flexibilidade energética como a capacidade de deslocar o consumo de energia elétrica no tempo. Referem ainda que a flexibilidade das bombas de calor depende de diversos fatores, mas os mais importantes são a necessidade de calor do edifício em questão e a energia presente nos sistemas de armazenamento. Após uma breve análise, é possível constatar que esta definição se encaixa em 3 diferentes categorias: na primeira, segunda e quinta categoria. Le Dréau et al. em [17] e Oldewurtel et al. em [18] definem flexibilidade como a capacidade de realocação do consumo de energia para períodos mais baratos não colocando em causa o conforto dos ocupantes e o reajuste do consumo do utilizador, evitando um pico de procura de eletricidade, reduzindo os custos, respetivamente. A definição proposta por Le Dréau et al. encaixa-se na terceira e quarta categoria, enquanto a de Oldewurtel et al. encaixa-se na segunda e terceira.

Apesar das diferentes definições, é possível constatar que apesar de algumas especificidades todas partilham uma ideia principal, nomeadamente: a flexibilidade energética é a capacidade de adaptação da energia consoante determinados objetivos, sem comprometer as restrições técnicas e o nível de conforto estabelecido.

## 2.1.2 Metodologias para a caracterização da Flexibilidade Energética

Como mencionado, não são apenas as definições que tendem a variar. A flexibilidade energética pode ser caracterizada através de diferentes metodologias, dependendo tanto da definição de flexibilidade do investigador como do objetivo da investigação.

Tal como mencionado acima, as metodologias possuem grande influência dos investigadores e do que é, para eles, o conceito de flexibilidade energética. Tendo em conta a definição fornecida por Six et al. em [16], a metodologia utilizada pelos autores quantifica a flexibilidade energética pela quantidade de tempo que o consumo de energia pode ser deslocado. Six et al. aplicam essa mesma metodologia para explorar a flexibilidade de bombas de calor juntamente com armazenamento de energia térmica [16]. Nuytten et al. [19] também aplicaram esta metodologia à sua investigação onde se considerou a utilização de um sistema combinado de calor e energia (CHP do inglês *Combiend Heat and Power*) com armazenamento de energia térmica. Para atingir a flexibilidade energética, Nuytten et al. recorrem a duas operações distintas: a retardação e a antecipação da utilização do CHP. Na operação atrasada, a utilização do sistema CHP é retardada enquanto a procura de energia é atendida pelo sistema de armazenamento sendo que a flexibilidade é medida pelo tempo em que o sistema CHP se encontra inativo. No caso da operação antecipada, o sistema CHP é forçado a operar enquanto o excesso de energia produzida é armazenado no sistema de armazenamento. A flexibilidade desta operação está relacionada com o tempo que o CHP pode ser forçado a operar enquanto o excesso de calor é armazenado para um uso futuro. A Figura 3 ajuda na compreensão de ambas as operações, sendo que o gráfico à esquerda mostra um exemplo referente à operação atrasada enquanto, o gráfico à direita exhibe um exemplo referente à operação antecipada [19].

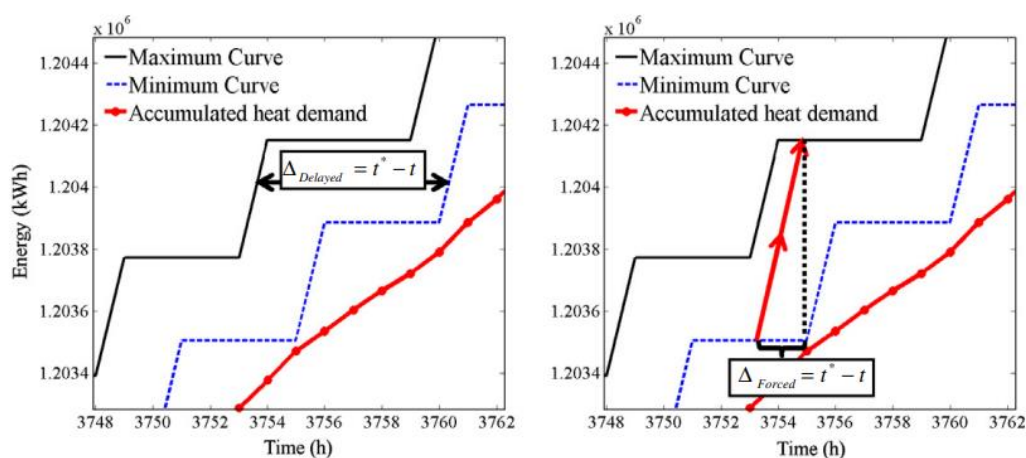


**Figura 3** - Representação gráfica de exemplos referentes as operações atrasada (Esquerda) e antecipada (Direita) [19]

Em [20], D'hulst et al. procuram quantificar a flexibilidade oferecida por cinco diferentes tipos de eletrodomésticos com base nos dados adquiridos na realização do projeto LINEAR. O projeto LINEAR consiste numa pesquisa e demonstração em larga escala com foco na introdução de tecnologias *demand response* em instalações residenciais na Bélgica. Esta tecnologia contribui significativamente para o aumento da flexibilidade através da redução ou realocação da energia usada durante os períodos de maior procura [21]. Para isso, D'hulst et al. quantificam a flexibilidade oferecida pelos diferentes tipos de eletrodomésticos tendo por base o aumento ( $P_{inc}$ ) ou diminuição ( $P_{dec}$ ) da potência num determinado momento do dia combinado com a extensão desta variação ( $\Delta t$ ) sem colocar em causa os limites técnicos e o conforto dos utilizadores [20]. Um pouco à semelhança de Six et al. em [16], D'hulst et al. recorrem também a dois cenários para quantificar a flexibilidade. No primeiro cenário, dada a disponibilidade dos aparelhos num determinado instante, é possível realizar um aumento no consumo de potência de  $P_{inc}$  desde que a soma de  $P_{inc}$  e  $P_{ref}$  não ultrapasse a potência máxima disponível. O aumento de  $P_{inc}$  é sustentado enquanto a flexibilidade de todos os aparelhos disponíveis seja utilizada, ou seja, até comprometer os limites técnicos ou o conforto dos utilizadores (i.e., durante  $\Delta T$ ). O segundo cenário rege-se pelo mesmo princípio sendo que, uma diminuição de potência pode ser realizada desde que  $P_{dec}$  não exceda o consumo de energia de referência dos aparelhos disponíveis. A diminuição de  $P_{dec}$  é sustentada, tal como no primeiro cenário, enquanto a flexibilidade de todos os aparelhos disponíveis seja utilizada (durante  $\Delta T$ ), até comprometer os limites técnicos ou o conforto dos utilizadores. A combinação de  $P_{inc}$  (ou  $P_{dec}$ ) juntamente com  $\Delta T$  contribui para a quantificação da flexibilidade. Na Figura 4 é possível observar à esquerda um gráfico alusivo ao primeiro cenário e à direita um gráfico alusivo ao segundo cenário.

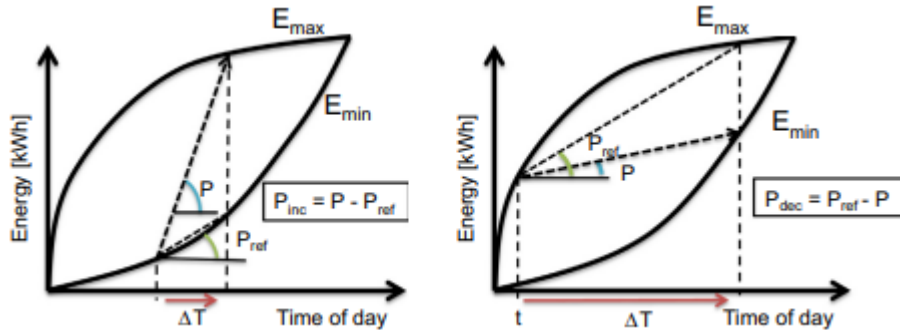


**Figura 4** - Representação conceptual da metodologia utilizada por D'hulst et al. [20] para quantificar a flexibilidade energética. Flexibilidade utilizada para aumentar o consumo instantâneo de potência (Esquerda). Flexibilidade utilizada para diminuir o consumo

A metodologia proposta por Stinner et al. em [22] é utilizada na quantificação da flexibilidade de BES com armazenamentos de energia térmica. A metodologia apresentada pelos autores para fazer essa quantificação tem por base três diferentes tipos de flexibilidade, nomeadamente: flexibilidade temporal, flexibilidade de potência e flexibilidade energética. Apesar das similaridades com as metodologias apresentadas em [16] e [20], o processo difere na quantificação sendo que esta não começa a partir de perfis de energia acumulados, mas sim a partir da simulação de eventos específicos. Stinner et al. começam por quantificar a flexibilidade temporal. Para isso os autores simulam dois cenários diferentes. No primeiro cenário é considerado um tanque de armazenamento de energia térmica completamente carregado que se vai descarregando consoante a procura (operação antecipada). O segundo cenário é o oposto, um tanque descarregado que vai ser carregado (operação atrasada). Graças a estes dois cenários é possível calcular o tempo forçado ( $\tau_{forced}$ ) e o tempo de atraso ( $\tau_{delayed}$ ). Estas simulações são repetidas ao longo do tempo sendo que  $\tau_{forced}$  e  $\tau_{delayed}$  irão variar como se pode constatar pela Figura 5. Por fim, são utilizados os valores de  $\tau_{forced}$  e  $\tau_{delayed}$  para o cálculo da flexibilidade de potência e flexibilidade energética. A flexibilidade de potência é obtida através da comparação da procura de potência durante uma operação normal (sem qualquer tipo de flexibilidade) com o aumento ou diminuição de potência durante as operações. A flexibilidade energética pode ser obtida através da integração da flexibilidade de potência.

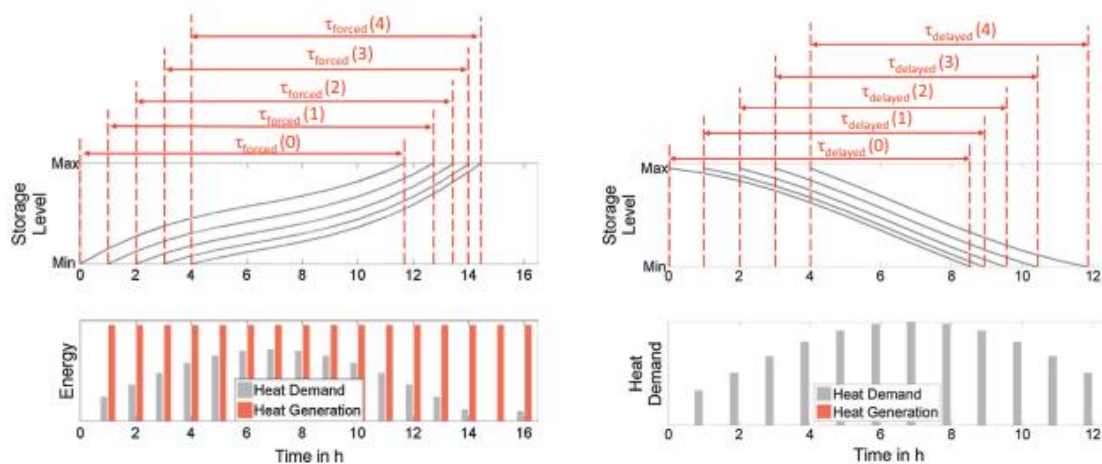


**Figura 5** - Representação dos cenários simulados na metodologia proposta por Stinner em [22]. Ilustração referente ao primeiro cenário (Esquerda) e referente ao segundo cenário (Direita)

Apesar de nunca fazerem referência à flexibilidade energética no seu artigo, Oldewurtel et al. em [23] abordam a configuração de uma agregação de edifícios de escritórios onde têm como objetivo a determinação da potencial alteração do consumo de energia de cada edifício. Para isso, os autores recorrem às propriedades térmicas dos edifícios para fornecer flexibilidade tais como a ventilação, uso de serviços de aquecimento e armazenamento de energia térmica. Um outro objetivo desta investigação é fornecer ao agregador um índice que descreva a energia adicional usada para executar a mudança desejada no consumo de energia. Para isso os autores desenvolvem uma metodologia que quantifica a flexibilidade através de curvas de eficiência, onde está retratado o aumento ou diminuição da potência máxima durante um intervalo de tempo em relação à eficiência de deslocamento da potência. Essa eficiência é obtida através da razão entre a amplitude da mudança induzida na potência consumida durante um evento de flexibilidade e o consumo de energia adicional do sistema ao longo de um período de teste.

A metodologia apresentada por De Coninck e Helsen em [24] foi primeiramente apresentada por De Coninck et al. em [25]. Posteriormente, Oldewurtel et al. publica um artigo onde apresenta uma ideia semelhante [23]. Em [24], os autores utilizam a metodologia apresentada em [25] incorporando algumas das ideias que Oldewurtel et al. apresenta em [23]. A metodologia apresentada tem como objetivo quantificar a flexibilidade em edifícios através de curvas de custo que demonstram a quantidade de energia que pode ser deslocada num determinado momento e o custo associado em comparação com o plano de referência. Tal como

Oldewurtel, De Coninck e Helsen utilizam as propriedades térmicas do edifício para fornecer flexibilidade. Esta metodologia tem por base a resolução de três problemas diferentes de controlo sendo que a sua resolução ajuda na determinação do custo necessário para utilizar a flexibilidade de energia num determinado instante. O primeiro problema visa minimizar os custos operacionais com restrições de conforto térmico num horizonte de previsão de um ou mais dias. O segundo problema tem como finalidade minimizar o consumo de energia elétrica durante um determinado intervalo de tempo através da flexibilidade disponível no sistema. Por fim, o terceiro problema é um antagônico do segundo, visando maximizar o consumo de eletricidade. A resolução destes três problemas vai permitir construir as curvas de custo que ajudam na quantificação da flexibilidade energética. Resolvendo os problemas para níveis de potência intermédia é possível obter uma curva de custo mais detalhada. Na Figura 6 é possível observar um exemplo dessas curvas. As mesmas demonstram a quantidade de flexibilidade e o seu custo associado. Os resultados obtidos revelam que aquando submetidos a diversos fatores, tais como o clima, o tempo, o uso do edifício e os requisitos de conforto, é possível observar uma variação da flexibilidade e do custo.

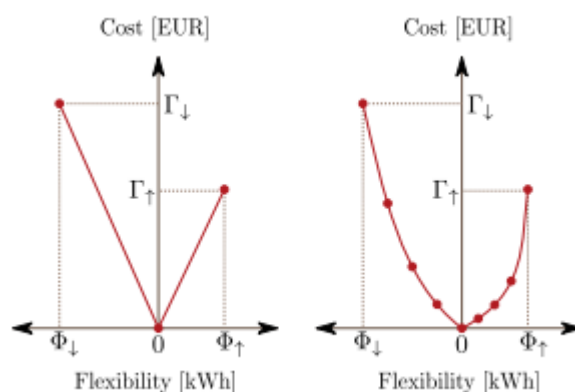


**Figura 6** - Curvas de custo utilizadas por De Coninck e Helsen para quantificar a flexibilidade energética [24].  
Curva de custo (Esquerda) e curva de custo com pontos intermédios (Direita)

Por fim, outra quantificação possível é feita por Reynders et al. em [26] que apresentam uma metodologia que visa quantificar a flexibilidade energética pela capacidade de armazenamento disponível ( $C_{ADR}$ ), a eficiência desse armazenamento ( $\eta_{ADR}$ ) e o potencial de deslocamento da potência (PSC). Pode-se definir  $C_{ADR}$  como a quantidade máxima de energia que é armazenada durante um evento flexível específico. A eficiência do armazenamento quantifica as perdas de energia associadas à utilização do armazenamento. Já o potencial de deslocamento da potência é definido entre a relação do tempo que o sistema pode desviar a procura de energia sem afetar o comportamento do sistema e o nível que o sistema consegue desviar

a sua procura de energia do cenário de referência. O cálculo do PSC é obtido através da simulação do perfil de temperatura de um edifício em que, quando  $t = 0$  a potência de aquecimento é alterada com  $\Delta P$  comparado com o cenário de referência. PSC representa a combinação de  $\Delta P$  com  $\Delta t$ . Esta metodologia quantifica a duração de  $t$  até que os limites técnicos ou de conforto sejam ultrapassados. Os autores aplicaram esta metodologia para examinar a relação existente entre os parâmetros de construção dos edifícios e o potencial de resposta à procura de armazenamento de energia térmica.

### 2.1.3 Utilização da Flexibilidade Energética

Sendo um dos Estados-Membros pertencentes à União Europeia, Portugal tem a necessidade de cumprir com os objetivos traçados pela União Europeia de maneira a reduzir as emissões de carbono na sua totalidade até 2050 [4]. Os escritórios, graças aos aparelhos que os caracterizam (computadores, elevadores, impressoras, servidores, etc), possuem elevados níveis de consumo energético. Um estudo realizado pela ADEME no âmbito do projeto Odyssey-Mure em 2019, indica que os edifícios de escritórios localizados em Portugal apresentam um consumo médio anual de 3411 kWh por empregado [27]. Visto isto, existe a necessidade de reduzir estes consumos ao máximo com o intuito de reduzir as emissões de carbono. Uma das soluções pode passar pelo aproveitamento da flexibilidade energética do edifício. Com intuito de perceber a influência da flexibilidade energética sob condições climáticas típicas portuguesas e/ou em edifícios de escritórios, foram analisados vários estudos.

O autor Naim Majdalani et al. em [28] procuram avaliar o potencial de flexibilidade energética de um sistema de aquecimento e refrigeração numa habitação com diferentes localizações geográficas em Portugal. A fim de avaliar o potencial de flexibilidade energética, os autores baseiam-se num modelo de uma habitação típica portuguesa. Esse modelo viria a ser utilizado na simulação de diversos cenários a fim de avaliar o potencial de flexibilidade proveniente da implementação de medidas de eficiência energética ou dos diferentes modos de operação dos equipamentos. Os cenários simulados descrevem a operação dos dispositivos HVAC controláveis otimizada por um algoritmo genérico com o objetivo de minimizar os custos operacionais dos utilizadores ou a carga acumulada na rede.

Para as simulações, são tomadas três localizações diferentes: Bragança, Lisboa e Faro. Isto acontece devido às diferentes classificações climáticas de Köppen<sup>1</sup> que as localizações possuem, abrangendo as classificações climáticas mais comuns do território nacional. O comportamento do sistema é simulado para cada localização tendo por base as condições climáticas locais habitualmente registadas num dia extremo de verão e num dia extremo de inverno. Existem ainda três fatores variáveis que os autores consideram nas simulações. A taxa de ocupação da habitação típica portuguesa (*Allways home, Family e Working*), a geração de energia local através de um PV e o tipo de tarifas utilizadas (tarifa tri-horária e tarifa simples).

O perfil de procura otimizado é proveniente das configurações do termostato que são otimizadas para responder a dois tipos diferentes de sinais de penalidade. A primeira penalidade é referente aos custos de operação. Já a segunda penalidade está relacionada com a carga máxima acumulada na rede da habitação, considerando tanto a procura como a produção local. Contrariamente ao que acontece na primeira penalidade, a incompatibilidade entre a procura de energia e a geração é penalizada.

Para a otimização das configurações do termostato, os autores recorrem a um algoritmo genético implementado em Matlab. Na Figura 7 está ilustrado o esquema de otimização utilizado nesta investigação. O algoritmo de otimização cria diversas sequências de configurações de termostato, sendo que cada uma dessas sequências abrange o período de tempo considerado e respeita os limites da temperatura impostos. Um *script* desenvolvido em Matlab atualiza as entradas do EnergyPlus de maneira a simular a procura de energia tendo em conta cada sequência de configurações. Os resultados dessa simulação são então devolvidos ao ambiente Matlab. Utilizando os resultados obtidos, os níveis de conforto exigidos pelos ocupantes e a energia produzida localmente, o algoritmo de otimização calcula as penalidades associadas a cada sequência.

---

<sup>1</sup> O sistema de classificações climáticas de Köppen tem como objetivo classificar globalmente os tipos climáticos mais utilizados em geografia, ecologia e climatologia. Através deste sistema é possível classificar o clima do território nacional como temperado, verificando-se o subtipo Cs (clima temperado com verão seco) e as seguintes variedades: Csa (clima temperado com verão seco e quente) e Csb (clima temperado com verão seco e suave) [28].

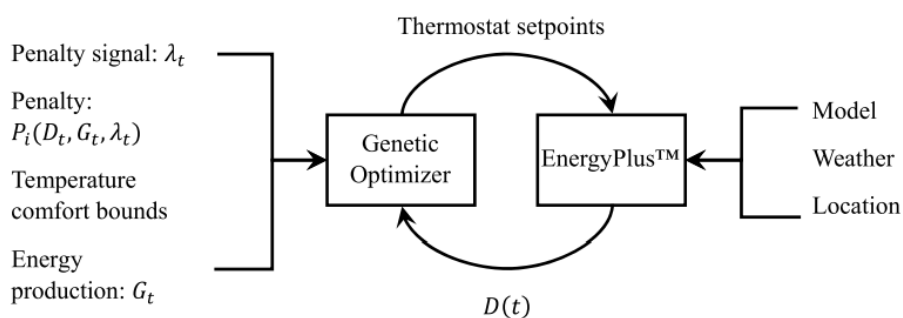


**Figura 7** - Esquema de otimização utilizado em [28]

De maneira a avaliar o desempenho da metodologia utilizada no que diz respeito ao custo de operação, os autores começam por simular o comportamento do sistema considerando uma tarifa tri-horária e uma família trabalhadora (*Working*). Através da análise dos resultados obtidos, é possível perceber que a variação da temperatura na habitação é influenciada pelas alterações das condições externas. Os autores concluem que a habitação modelo não possui inércia térmica suficiente para conseguir usufruir dos benefícios do uso da flexibilidade energética visto que, a quantidade de energia de aquecimento ou arrefecimento que pode ser temporariamente deslocada é limitada.

A inércia térmica de uma construção define-se como a capacidade que esta possui para absorver as mudanças de temperaturas interiores. Numa construção com elevada inércia térmica, a temperatura interior é mais estável, variando pouco independentemente da variação da temperatura exterior e da ocupação do espaço. A inércia térmica de uma construção é fundamental para um melhor aproveitamento da flexibilidade [11]. Jensen et al. [15] afirmam que a quantidade de calor (ou frio) que uma construção consegue armazenar depende da quantidade, distribuição e propriedades dos materiais utilizados sendo assim possível adiar no tempo o aquecimento ou o arrefecimento do espaço sem comprometer o conforto do utilizador. Se se pré-aquecer/arrefecer um edifício em excesso, dentro da faixa de conforto, será possível prolongar o período de inatividade do sistema de aquecimento e arrefecimento. Esse período de inatividade pode variar entre algumas horas até vários dias dependendo, para além das características dos materiais utilizados, das perdas de calor, ganhos internos, ocupação do espaço e condições climáticas. Enquanto no inverno, o calor proveniente de ganhos solares é armazenado e libertado à noite, no verão, o aumento da temperatura é anulado pela inércia térmica sendo o calor acumulado removido pela ventilação adequada durante a noite. Desta

forma, a regulação da temperatura no interior da habitação e a utilização da energia de uma maneira mais eficiente é possível graças à inércia térmica, sendo fundamental na construção dos edifícios em Portugal [29].

Os autores realizaram novas simulações variando os tipos de ocupação, considerando um cenário de uma família com filhos e outro cenário em que a casa está sempre ocupada (*Family e Always home*). Para estas novas simulações os autores alteraram ainda o tipo de tarifa utilizada (de tarifa tri-horária para tarifa simples), visto ser a mais vantajosa para tais comportamentos dos ocupantes, e passa a considerar geração de energia local. Através dos resultados obtidos, é possível concluir que no inverno, Faro é a zona em análise onde se encontra um maior potencial graças ao seu clima ameno e maior incidência de radiação solar. Pelo contrário, a flexibilidade disponível no verão é mais reduzida devido às temperaturas externas elevadas. Relativamente à variação da ocupação da habitação, apesar de não existir diferenças drásticas entre ambas, existe uma poupança maior no custo de operação quando a casa está sempre ocupada.

Se ao invés da otimização do sistema se focar em reduzir o custo de operação, e sim em minimizar a carga máxima acumulada na rede, a flexibilidade disponível aumenta. Ainda assim, e apesar de Bragança demonstrar um grande potencial de flexibilidade no verão aquando da introdução do sistema PV, Faro é a localização onde se regista maior flexibilidade. Esta penalidade incentiva o uso dos sistemas HVAC durante os períodos de produção fotovoltaica, sendo que o valor da flexibilidade tende a aumentar com a presença dos PV.

A sobreposição dos preços elevados das tarifas do tempo de uso da eletricidade e a taxa de ocupação limitam a flexibilidade energética disponível na habitação. Já a introdução de diferentes horários de ocupação e a produção de energia local são fatores benéficos para o aumento da flexibilidade disponível. Neste caso, os aumentos registados são de cerca de 50% quando a otimização considera a carga acumulada na rede e cerca de 20% quando considerado o custo total de operação com tarifa única. Ou seja, aquando da formulação de uma política energética para o contexto residencial urbano em Portugal, os incentivos devem priorizar a instalação de unidades de produção de energia e mecanismos de controlo que priorizem o autoconsumo. O benefício da utilização da flexibilidade energética é significativamente mais alto nas regiões de Faro e Bragança devido às maiores temperaturas ou potencial de radiação solar comparativamente com a região de Lisboa, suportando assim a necessidade de formular políticas energéticas adaptadas ao local para um maior aproveitamento do potencial meteorológico e das características socioeconómicas.

Em [30], Daniel Aelenei et al. procuram investigar o potencial de flexibilidade energética de um edifício de escritórios em Portugal que possui em si instalado duas fontes de energia renovável diferentes. Para isso, os autores recorrem à integração de BESS, com o objetivo de melhorar o autoconsumo e o desempenho da interação com a rede.

Para a realização do estudo, Aelenei et al. consideram o edifício Solar XXI, um edifício de escritórios localizado no campus do Laboratório Nacional de Energia e Geologia em Lisboa. Este edifício tem a particularidade de possuir duas fontes distintas de energias renováveis, nomeadamente: um sistema BIPV incorporado na fachada principal do edifício orientado a sul e um sistema PV instalado no telhado de um parque de estacionamento próximo ao edifício. Tendo em conta que o Solar XXI é um *passive solar building*, grande parte do consumo do edifício é feito pela iluminação e PPLs (do inglês *Plug and Process Loads*). Visto isto, a energia gerada por ambos os sistemas têm como objetivo satisfazer estas necessidades, sendo o excedente (caso exista) fornecido à rede.

Com o objetivo de avaliar o potencial de flexibilidade energética do edifício, este estudo considera dois cenários. O primeiro cenário é referente à operação original/referência do edifício Solar XXI. O segundo cenário aborda o potencial de flexibilidade energética oferecido à operação do edifício de escritórios aquando integradas as BESS. Para isso, foram consideradas BESS com diversas capacidades de armazenamento (13,5 kWh, 27 kWh, 40,5 kWh e 54 kWh) como resultado da colocação sucessiva de baterias de 13,5 kWh em paralelo. A integração destas baterias tem como objetivo melhorar o desempenho da interação com a rede e a correspondência de carga (procura com a geração local). Para isso, é necessário aumentar os indicadores de autoconsumo (SC, do inglês *Self-Consumption*) e autossuficiência (SS, do inglês *Self-Sufficiency*). O indicador SC indica em percentagem a quantidade de energia gerada localmente que é instantaneamente consumida pelo edifício de escritórios, enquanto o indicador SS tem como objetivo indicar a percentagem da procura de energia satisfeita instantaneamente com recurso à energia gerada localmente, considerando, para ambos os indicadores um período definido entre  $n_1$  e  $n_2$ .

Através de uma análise dos resultados obtidos para o primeiro cenário, é possível reparar que o sistema BIPV possui uma maior contribuição para a geração de energia durante o inverno. Isto acontece devido à sua posição ser mais vantajosa perante a baixa altitude solar. Durante o verão, a altitude solar é mais elevada, sendo que o sistema PV posicionado no telhado do parque de estacionamento passa a ser o maior contribuidor de energia.

Considerando o segundo cenário, os resultados obtidos mostram que a integração de BESS possui um impacto no perfil de procura original. Devido ao carregar da bateria, o perfil de procura do edifício de escritórios aumenta durante a manhã. O carregamento das baterias é assegurado pelos sistemas PV sendo que a sua descarga possui um papel fundamental na redução da procura durante os períodos de fraca luminosidade solar, nos quais a energia armazenada é descarregada. Estas alterações no perfil de procura do edifício resultam numa redução na interação com a rede, tanto em termos de energia como de potência. Aquando integrada uma BESS de 13,5 kWh, é possível reduzir o pico de carga negativa diário em cerca de 8,8% e, conseqüentemente, a quantidade de energia elétrica exportada para a rede anualmente em 26,1%. Um outro aspeto positivo da integração desta bateria é a redução do valor médio do pico de carga positiva diário em 2,9%. Também a quantidade de energia elétrica importada da rede de distribuição é reduzida em 31,3%. Os resultados obtidos tendem a melhorar à medida que se integram mais baterias ao sistema.

Os valores anuais de referência dos indicadores SC e SS são 40,9% e 45,3%, respetivamente. O facto de existir um grande desequilíbrio entre a geração dos sistemas PV e o consumo do edifício durante os períodos de maior radiação solar na operação de referência, resultam num baixo valor de SC. Já o baixo valor de SS registado deve-se à falta de geração de energia local durante certos períodos de procura (por exemplo, o período da noite). Esta incompatibilidade entre a procura do edifício de escritórios e a geração de energia é atenuada com a integração de BESS. Os resultados obtidos indicam que estes indicadores sofrem aumentos significativos aquando integradas as baterias. Com apenas a introdução de uma BESS, os indicadores SC e SS aumentam 15,4% e 17,1%, respetivamente. À medida que se aumenta o número de baterias, os indicadores também aumentam. Em termos financeiros, os resultados mostram que a integração de uma BESS de 13,5 kWh é a mais vantajosa.

Em [31], Fei Lu et al. procuram investigar a flexibilidade energética de um sistema de refrigeração utilizando a massa térmica de um edifício de escritórios com necessidades energéticas quase nulas. Os edifícios com necessidades energéticas quase nulas ou nZEB são edifícios com elevados desempenhos energéticos. Muitos destes nZEB são equipados com fontes de produção de energia renovável visto que a pouca energia utilizada pelos edifícios consegue, a longo prazo, ser coberta por essas mesmas fontes [32]. A utilização da massa térmica de um edifício (BTM do inglês *Building Thermal Mass*) como meio de armazenamento de energia é vista como uma solução promissora para a modulação da procura elétrica e aproveitar a flexibilidade energética existente. Isto acontece devido à capacidade de armazenar energia na massa térmica através de um pré-aquecimento ou pré-arrefecimento, sendo que a carga

elétrica destinada ao aquecimento e arrefecimento pode ser deslocada, alcançando a flexibilidade energética. Para além da massa térmica, o comportamento dos ocupantes, o tipo de construção e as condições climatéricas são também considerados fatores cruciais para utilizar a flexibilidade energética.

Nesta investigação, Fei Lu et al. definem flexibilidade energética como a capacidade de realocar a procura de energia do sistema de refrigeração do período original para um mais vantajoso. Para o controlo da flexibilidade energética, foi definido um plano baseado no método de controlo *rule-based* com o objetivo de obter um maior aproveitamento da energia armazenada na massa térmica durante o período de vazio, minimizando a procura de energia durante o período de pico.

Para a modulação da flexibilidade, são consideradas duas estratégias diferentes, nomeadamente: a modulação antecipada e a modulação retardada. A modulação antecipada é realizada fora do período de pico e consiste numa diminuição propositada da temperatura para um valor inferior à temperatura de referência a fim de possibilitar o armazenamento de energia na massa térmica do edifício. A diminuição da temperatura é feita com o edifício desocupado, podendo ignorar os requisitos de conforto térmico. Este tipo de modulação é usado para diminuir a duração do vale durante os períodos de vazio, como é possível observar pelos gráficos a) e c) da Figura 8. A modulação retardada, ao contrário da modulação antecipada, realiza-se durante o período de pico. Nesta modulação, a energia armazenada na massa térmica é libertada graças a um aumento propositado da temperatura em relação à temperatura de referência, sem nunca comprometer o conforto dos ocupantes. Esta modulação é usada com o objetivo de reduzir os picos durante o período de maior procura. É possível observar esta redução através da análise dos gráficos b) e d) da Figura 8.

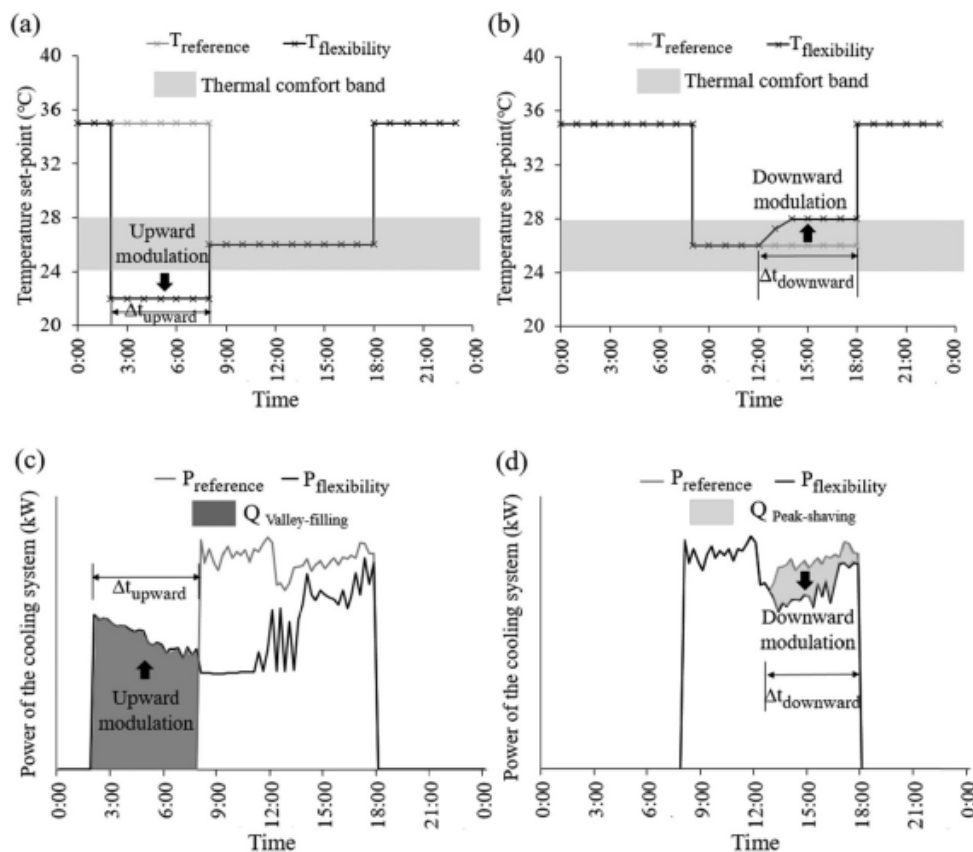


**Figura 8** - Representação gráfica da temperatura ambiente (gráficos a) e b)) e da potência do sistema de refrigeração (gráficos c) e d)) aquando submetidos ao comportamento de referência, modulação antecipada e modulação retardada [31]

Assim, tendo por base as modulações definidas no paragrafo anterior, os autores definem as regras a serem aplicadas pelo método de controlo da flexibilidade energética. Essas mesmas regras podem ser observadas na Tabela 1. Destacar apenas que, para a modulação antecipada, o autor pretende testar diferentes durações (10:00h, 08:00h, 06:00h, 04:00h e 00:00h) e temperaturas de modulação (entre os 23°C e 25°C) de maneira a determinar os parâmetros de modulação mais adequados.

**Tabela 1** - Método utilizado para o controlo da flexibilidade energética [31]

| Building operation period      | Time        | Modulation type | Modulation duration and temperature                      |
|--------------------------------|-------------|-----------------|----------------------------------------------------------|
| Occupied and off-peak period   | 7:00–10:00  | Reference       | 7:00–10:00, 26 °C                                        |
| Occupied and on-peak period    | 10:00–18:00 | Downward        | 10:00–18:00, 28 °C                                       |
| Unoccupied and on-peak period  | 18:00–21:00 | Reference       | No modulation                                            |
| Unoccupied and off-peak period | 21:00–7:00  | Upward          | Duration: 0, 4, 6, 8, 10 h<br>Temperature: 23, 24, 25 °C |

Para avaliar a flexibilidade existente, Fei Lu et al. constroem um modelo do primeiro edifício de escritórios com necessidades energéticas quase nulas localizado na zona norte da China no software TRNSYS a fim de realizar as simulações necessárias. Como referido

anteriormente, os nZEB têm normalmente incorporados em si algum tipo de fonte de produção de energia renovável de modo a cobrir a pouca energia utilizada por estes edifícios a longo prazo. Apesar do edifício em questão possuir em si incorporado um sistema BIPV, nenhuma energia gerada pelo mesmo tem como objetivo satisfazer o consumo feito pelo sistema HVAC, sendo esta maioritariamente utilizada para a iluminação dos espaços. Para além do modelo, os autores definem ainda um período de simulação de 92 dias (entre 1 de junho e 31 de agosto).

Foram então simuladas as várias modulações antecipadas consideradas pelos autores com o objetivo de determinar os parâmetros de modulação apropriados, de maneira a evitar um armazenamento e consumo de energia excessivo. Para isso são analisados os resultados do indicador  $Q_{peak-shaving}^*$ , que representa a quantidade de energia de pico reduzida em percentagem, e do indicador  $\gamma_{energy}$ , que descreve a mudança no consumo total de potência, em relação ao consumo referência, ao implementar uma estratégia de controlo de flexibilidade. Se  $\gamma_{energy}$  for abaixo de 1 significa que foi possível poupar visto o consumo de referência ser maior. Se for acima de 1, existe um maior consumo sendo o consumo de referência mais vantajoso. Quando a duração da modulação é nula, a energia armazenada na massa térmica é muito reduzida devido a falta da pré-refrigeração. Assim sendo, a redução de energia é muito limitada visto que não existe a complementação inicial do vale. À medida que se aumenta a duração da modulação, a quantidade de energia reduzida aumenta até atingir a saturação. Esta saturação existe devido ao facto da energia térmica armazenada na massa térmica se tornar suficiente para satisfazer a procura necessária durante o período de pico aquando ocupado. É importante reparar que o indicador  $\gamma_{energy}$  aumenta com o aumento da duração da simulação. Isto acontece devido à capacidade de preenchimento do vale ser maior que a quantidade de energia reduzida. Portanto, é possível perceber que, aumentar a duração não vai aumentar a capacidade de preenchimento do vale, mas sim aumentar a energia consumida depois de atingir a saturação. Em relação à temperatura adotada na modulação,  $Q_{peak-shaving}^*$  diminui e  $\gamma_{energy}$  aumenta com o aumento da temperatura de modulação até atingir a capacidade máxima de corte de pico. Logo, as condições em que se atinge a saturação são as condições mais adequadas para a modulação antecipada. É ineficiente continuar a aumentar o tempo ou diminuir a temperatura após atingir a saturação. Sendo assim, os autores concluem que uma duração de 6 horas (entre a 01:00h e as 07:00h) e uma temperatura de 23°C são os

parâmetros adequados para maximizar a quantidade de energia reduzida evitando um aumento desnecessário no consumo de energia.

Sabendo os parâmetros mais vantajosos da modulação antecipada, são implementadas ambas as modulações, modulação antecipada e modulação retardada (entre as 10:00h e as 18:00h com a temperatura interior a aumentar até aos 28°C), para averiguar a flexibilidade energética do sistema de refrigeração. Em média, foi possível reduzir o pico de potência num espaço de 24 horas em 30,4%, sendo que, considerando apenas o período de pico com ocupantes no edifício (entre as 10:00h e as 18:00h), houve uma redução de aproximadamente 55,6%. Por fim, em comparação com a modulação de referência, as modulações adotadas reduzem em 54,0% a energia consumida durante o período de pico consumindo praticamente a mesma energia diária ( $\gamma_{energy}$  toma valores a rondar a unidade, mais propriamente, 0,984).

Para além dos parâmetros variáveis da modulação antecipada, tanto o sistema HVAC considerado e os ganhos de calor internos influenciam a procura de refrigeração do edifício. Os autores têm em consideração três tipos de sistemas de refrigeração: *fan coil units*, sistema de climatização baseado em convecção e tetos arrefecidos (sendo este último considerado o sistema de referência). Tendo em conta que a implementação de cada sistema foi realizada tendo em consideração a modulação antecipada mais apropriada, é possível concluir que mudar o sistema de refrigeração de tetos arrefecidos para *fan coil units* levaria a uma diminuição de 2,4% na capacidade de redução do pico de potência consumindo a mesma energia. Já uma mudança de tetos arrefecidos para um sistema de climatização baseado em convecção seria vantajosa visto verificar-se um aumento de 3,1% na capacidade de redução do pico de potência aquando de uma redução no consumo de energia de 3,5%, o que melhoraria a flexibilidade do sistema.

Por fim, para investigar o impacto dos ganhos de calor internos na flexibilidade energética, vários modelos semelhantes foram construídos com diferentes taxas de transferência de calor provenientes dos equipamentos elétricos e iluminação do edifício, tendo sido adotados os parâmetros da modulação antecipada calculados anteriormente. Para uma taxa de transferência de calor reduzida é recomendado assumir uma modulação antecipada de menor duração. À medida que essa taxa aumenta, além de se tornar mais vantajoso utilizar uma modulação antecipada de maior duração, tanto  $Q_{peak-shaving}^*$  como  $\gamma_{energy}$  aumentam, registando também um aumento de 5,71% na capacidade de redução de pico de potência e 9,78% no consumo de energia. Edifícios com elevados ganhos de calor internos conseguem obter uma maior flexibilidade, mas ao mesmo tempo possuem um elevado consumo energético. Isto

acontece porque à medida que os ganhos de calor internos aumentam, é necessário mais tempo para armazenar energia suficiente para reduzir o pico de carga.

Mingzhe Liu et al. em [33] procuram avaliar o potencial de flexibilidade energética presente num edifício de escritórios com necessidades energéticas quase nulas sob influência de diferentes estratégias de controlo. De modo a realizar a sua investigação, os autores consideram um edifício de escritórios localizado em Aarhus, na Dinamarca. Apesar de primeiramente não ser considerado um nZEB, graças a adição de sistemas PV e acumuladores de calor foi possível reduzir a sua procura de energia, atingindo assim esse estatuto. Para efeitos de simulação, Mingzhe Liu et al. assumem ainda que o edifício está equipado com um sistema de climatização baseado em convecção. Este sistema é capaz de aquecer e arrefecer simultaneamente em duas zonas distintas do edifício graças à capacidade de transferir o excesso de calor de zonas quentes para frias ou vice-versa. O edifício de escritórios foi, juntamente com o sistema de climatização baseado em convecção, modelado com auxílio do software EnergyPlus tendo em consideração como tempo de simulação o período de um ano considerando o perfil meteorológico dinamarquês e o preço da eletricidade registados em 2015.

As estratégias de controlo consideradas são desenvolvidas de acordo com a variação do preço da energia elétrica. O preço presente da simulação está dividido em três categorias (baixo, médio e alto) tendo por base os preços das duas semanas transatas. A primeira estratégia implementada pelo autor tem por base o aumento dos *setpoints* de aquecimento e a diminuição dos *setpoints* de refrigeração em 1°C durante ambos os períodos (ocupado e desocupado) quando o preço da eletricidade é considerado baixo. Já quando o preço da eletricidade é considerado alto ocorre o inverso. A segunda estratégia consiste numa combinação de um sistema de controlo preditivo com a primeira estratégia. A grande diferença é que ao invés de aumentar e diminuir os *setpoints* tendo em conta apenas a variação do preço, apenas o faz quando apropriado. Esta necessidade de variar os *setpoints* é agora feita tendo em conta a previsão das condições climatéricas das seguintes 24 horas. Por fim, a terceira estratégia é muito semelhante à segunda sendo que a única diferença é que o aumento dos *setpoints* de aquecimento e a diminuição dos *setpoints* de refrigeração passa a ser apenas de 0.5°C.

De modo a avaliar o desempenho do edifício de escritórios perante a influência das distintas estratégias de controlo, o autor considera diferentes perspetivas. A comparação do desempenho das estratégias de controlo é feita com base em indicadores que representam os benefícios retirados das mesmas, tais como a capacidade de ajustar a potência durante ambos

os períodos, flexibilidade energética, os benefícios económicos e os níveis de conforto. Ao simular o comportamento do edifício, os indicadores são calculados e comparados com o comportamento de referência de modo a avaliar o desempenho do edifício perante as estratégias de controlo.

Através das simulações, é possível obter os seguintes resultados para o indicador de flexibilidade energética, responsável por quantificar a quantidade de energia deslocada dos períodos de maior preço para os de menor, quando o edifício é submetido às diferentes estratégias de controlo: 0,0936 para o caso de referência, 0,6266 para primeira estratégia implementada, 0,6894 para a segunda estratégia implementada e para a terceira estratégia 0,5543. É possível reparar que a aplicação de medidas de controlo preditivo melhoram o desempenho do edifício quando comparado com a primeira estratégia. O facto de ser considerado um intervalo de variação maior para a variação dos *setpoints* também potencia a flexibilidade do edifício positivamente. Além disso, de acordo com as simulações executadas e os resultados recolhidos, é possível analisar que as estratégias aplicadas com objetivo de potencializar a flexibilidade energética do edifício não tem qualquer influência no nível de conforto dos ocupantes, sendo este garantido em qualquer dos casos.

Em termos de custos, a implementação da primeira estratégia provoca um aumento significativo nos custos em relação ao caso de referência (de 0,499 €/m<sup>2</sup> para 0,703 €/m<sup>2</sup> por ano). Ao implementar-se a segunda estratégia, os custos de energia descem para 0,52 €/m<sup>2</sup> por ano, um valor mais reduzido, mas ainda assim mais elevado quando comparado com o comportamento de referência. Através da análise dos resultados acima descritos é possível perceber que é difícil beneficiar economicamente das estratégias implementadas sob o esquema atual de preços se existir um aumento no consumo de energia. Posto isto, os autores recomendam a criação de incentivos à exploração do potencial de flexibilidade energética dos edifícios de maneira a ser possível tirar partido destas estratégias.

Jingfan Hu et al. em [34] procuram otimizar a operação do sistema de aquecimento, refrigeração e ar-condicionado de maneira a reduzir o consumo de energia e o custo de operação. Na sua investigação, os autores procuram fazer a otimização dos sistemas através da combinação de um modelo de controlo *rule-based* com uma rede neuronal (*ANN* do inglês *Artificial Neural Network*). Para a realização deste estudo, os autores selecionam um edifício de escritórios localizado em Tiajin, na região nordeste da China. O edifício possui nele equipado uma combinação de duas bombas de calor de fonte subterrânea e um tanque de armazenamento térmico, de modo a providenciar o aquecimento e refrigeração desejados às zonas

condicionadas, e um sistema de automatização de edifícios (BAS do inglês *Building Automation Systems*) a monitorizar a operação dos sistemas HVAC.

Devido às relações complexas entre as entradas e saídas, Hu et al. escolhem o modelo ANN como método de previsão para realizar a correspondência entre o lado da oferta e o lado da procura do sistema HVAC e resolver o problema de ajuste não linear. O modelo ANN é composto por neurónios que seguem o mesmo mecanismo que o funcionamento do cérebro humano, sendo que a transferência de sinais depende do seu funcionamento. A estrutura do modelo ANN está dividida em 3 camadas distintas, nomeadamente: *input layer*, *hidden layer* e *output layer*. O número de neurónios na *input* e *output layers* derivam do número de entradas e saídas presentes no sistema. Já o número de neurónios da *hidden layer* necessita de ser ajustado de modo a otimizar a precisão do modelo. As entradas devem abranger o máximo de informação possível visto serem fundamentais para obter uma maior precisão da previsão. As entradas consideradas neste estudo pelo modelo ANN são: a taxa de ocupação das diferentes zonas, temperatura externa, a diferença da temperatura entre entrada e saída das bombas de calor do lado da fonte e a temperatura interna das diferentes zonas. A monitorização da temperatura interna tem como função indicar as preferências de conforto térmico dos ocupantes nas diferentes zonas (escritórios, zonas de descanso, salas de espera, corredores e *lobbies*). Já as saídas do modelo ANN são o consumo de energia e a procura de carga do sistema HVAC. Neste estudo o modelo ANN possui apenas uma *hidden layer*, sendo que o número de neurónios presentes na mesma é calculado de acordo com o método de tentativa e erro. Os resultados práticos da aplicação deste método indicam que o modelo ANN com maior precisão é o que possui dez neurónios na *hidden layer*.

O preço da eletricidade em Tianjin varia consoante o período do dia. São identificados três períodos de taxação diferentes, o período de vazio, o *flat period* (equivalente ao período das horas cheias em Portugal) e o período de pico. Graças a esta variação dos custos, o preenchimento dos vales e a redução dos picos de procura desempenham um papel importante na redução do consumo de energia e do custo de operação.

O modelo ANN e o modelo de controlo *rule-based* são então aplicados com o objetivo de prever a procura e o consumo de energia do sistema HVAC e otimizar o funcionamento desse mesmo sistema tendo por base as previsões, respetivamente. Jingfan Hu começa por investigar os efeitos da divisão do espaço em zonas térmicas diferentes. Ao considerar diversas zonas térmicas, o valor  $R^2$  aumenta de 0,91 para 0,97 no que diz respeito à procura de energia

e de 0,89 para 0,99 relativamente à energia consumida, enquanto o  $CV(RMSE)$  diminui 13,62% e 12,94%, respetivamente.

Após perceberem através dos indicadores que a utilização de diversas zonas térmicas melhora a precisão das previsões, os autores focam-se na otimização do sistema. Primeiramente, são escolhidos para otimização os dias de carga máxima e os dias de carga parcial de ambas as estações (inverno e verão), sendo adotado como comportamento de referência o funcionamento das bombas de calor sem auxílio do tanque de armazenamento térmico. Já o funcionamento do sistema otimização resulta de uma combinação das bombas de calor e do tanque de armazenamento térmico. Tendo por base os resultados de previsão do modelo ANN, é aplicado um modelo de otimização a fim de melhorar a estratégia de operação nos dias de carga máxima. As bombas de calor fornecem energia ao tanque de armazenamento até atingir a  $SCAP_{max}$  durante o período de vazio. Toda essa energia armazenada no tanque é descarregada no período de pico, deixando as bombas de calor a cobrir apenas a procura de energia no *flat period*.

No que diz respeito à redução dos custos, existe uma redução de 37,03% e 36,32% nos dias de carga máxima na estação de verão e na estação de inverno, respetivamente. Ainda assim, mesmo com a otimização do sistema, continua a ser muito difícil para o tanque de armazenamento térmico satisfazer as necessidades de energia dos dias de carga máxima. Da mesma maneira que foi feita a otimização para os dias de carga máxima, Hu et al. focam-se também nos dias de carga parcial. Para a otimização do sistema foram seguidos os mesmos processos utilizados para a otimização dos dias de carga máxima. Neste caso, graças à otimização do sistema, a energia libertada pelo tanque consegue cobrir a procura de energia total durante esse período e ainda atenuar o pico de procura no período de pico. Considerando os dias de carga parcial na estação de verão e na estação de inverno existe uma redução dos custos de 45,79% e 48,18%, respetivamente. A otimização elimina por completo o custo de operação no período de pico e reduz significativamente os custos no *flat period*. Isto tudo é possível graças ao total aproveitamento do tanque de armazenamento que, em conjunto com a flexibilidade energética do edifício permite realocar o consumo energético das bombas de calor para períodos de custos mais reduzidos. Tendo em conta toda a estação de aquecimento e a estação de refrigeração, após a implementação do modelo otimizado, observa-se uma redução dos custos de operação do sistema: 39,22% na estação de aquecimento e 44,41% na estação de refrigeração. Tendo em conta a elevada procura de carga de aquecimento, o autor afirma que se se aumentasse a capacidade do tanque de armazenamento térmico ainda seria possível reduzir mais os custos.

## 2.1.4 Algoritmos de Otimização

Um dos principais objetivos desta dissertação é o desenvolvimento de um algoritmo de otimização que reduza tanto os custos de energia elétrica de cada escritório, como o pico de pico de potência total de um edifício de escritórios. Resumidamente, um algoritmo de otimização procura maximizar ou minimizar uma função objetivo tendo por base um valor de entre um espaço de valores disponíveis [35]. Nesta secção são analisados dois artigos relativamente a este tópico sendo que, um dos artigos tem como propósito perceber a influência destes algoritmos na otimização no consumo de energia dos edifícios de escritórios, e o outro comparar a aplicação de diversos algoritmos na otimização de um edifício sujeito a condições meteorológicas semelhantes às registadas em Portugal.

Em [36], Xiwang Li et al. investigam a utilização de um modelo de controlo preditivo para o controlo da massa térmica de um edifício de escritórios. O objetivo da implementação deste modelo é garantir a utilização total da massa térmica na pré-refrigeração do espaço fora do horário de pico, a fim de reduzir os custos energéticos ( $C_{cooling/reheating}$ ) sem comprometer o conforto dos ocupantes ( $C_{PMV}$ ). O modelo de controlo preditivo, ou MPC, é um esquema de controlo que tem por base um modelo para prever o comportamento futuro do sistema. Assim, tendo por base as previsões feitas, será possível calcular os valores de entrada otimizados considerando os objetivos e restrições do sistema. A utilização do MPC possui vantagens quando comparado com a utilização de outros métodos de controlo mais comuns. A capacidade de controlar sistemas não lineares, a consideração das restrições físicas, de segurança e operacionais do sistema e a capacidade de adaptação a distúrbios futuros são apenas algumas dessas vantagens. Este modelo possui ainda a capacidade de trabalhar com sistemas de múltiplas entradas e saídas permitindo inclusive interações entre as mesmas [37] [38].

É possível dividir a estrutura do MPC desenvolvida neste estudo em três camadas. A primeira camada corresponde ao software de simulação. Neste caso, e como referido no parágrafo anterior, é considerado o software EnergyPlus. A segunda camada, ou camada de otimização, é responsável pela execução dos algoritmos de otimização de maneira a encontrar os resultados mais adequados para as variáveis de decisão. Foi escolhido o *Hooke-Jeeves Particle Swarm Optimization* (HJPSO) com o propósito de otimizar o problema devido à sua capacidade de trabalhar com funções custo que não possuem derivadas. Por fim, a terceira

camada funciona como uma interface entre as duas primeiras camadas. Nesta camada encontra-se o programa GenOpt, que é responsável pela transferência dos resultados da simulação para a camada de otimização, providenciando em resposta valores para as variáveis de decisão.

De maneira a avaliar o desempenho deste esquema de otimização, o MPC é implementado em dois tipos de edifícios comerciais (pequenas e médias dimensões) situados em três localizações diferentes nos Estados Unidos da América (Boston, Chicago e Miami) considerando as condições climáticas típicas de verão (1 a 5 de agosto). A utilização de dois tipos de edifícios tem como objetivo avaliar a influência da massa térmica na redução do consumo e custos de energia. Já a utilização de três localizações distintas, tem como objetivo avaliar a influência da temperatura exterior (sendo que Miami regista as temperaturas exteriores mais elevadas) e dos preços de eletricidade (sendo que a maior diferença de entre os preços no período de vazio e os preços no período de pico é registada na cidade Boston). Foram ainda considerados 5 valores diferentes para o fator de ponderação de conforto (0, 1, 5, 10 e 50) de maneira a avaliar a sua influência nos resultados.

Considerando a otimização da temperatura de *setpoint* feita para os dois tipos edifícios de escritórios modelados é possível compreender que, comparando com o comportamento de referência, a estratégia de otimização tem por base uma pré-refrigeração do espaço no período de vazio seguido de um aumento da temperatura de *setpoint* (reaquecimento) durante as horas de pico. No edifício de escritórios de menores dimensões, nos casos em que se considera um fator de ponderação de conforto reduzido, a temperatura de *setpoint* aproxima-se dos valores limite que a mesma pode assumir ( $T_{min}$  no período de vazio e  $T_{max}$  no período de pico). No edifício de escritórios de médias dimensões, apesar dos resultados observados serem semelhantes, a temperatura de *setpoint* nunca atinge os limites, pois o edifício possui uma maior massa térmica e requer uma maior energia de refrigeração para a pré-refrigeração do edifício. Ao aplicar as temperaturas de *setpoint* otimizadas, são encontradas grandes flutuações da temperatura ambiente durante o período de vazio quando considerado um fator de ponderação de 0, 1 e 5 nos edifícios de dimensões reduzidas. Isto acontece devido à carga de refrigeração exceder a capacidade do sistema em determinados períodos quando a temperatura de *setpoint* é muito baixa. É ainda possível concluir que a temperatura otimizada é mais elevada do que a temperatura de referência devido ao intervalo de conforto definido (permite aumentar a temperatura continuando a cumprir os requisitos de conforto).

O índice de conforto térmico, ou  $PMV_i$ , registado sob a operação de referência encontra-se abaixo dos limites de conforto durante o período de pico nos edifícios de reduzidas dimensões. Considerando a otimização da temperatura de *setpoint* para estes edifícios, apenas

quando o fator de ponderação de 10, o  $PMV_i$  médio encontra-se dentro dos limites de conforto em ambos os períodos. Já os estudos realizados considerando os edifícios de médias dimensões, todos os resultados encontram-se dentro dos limites de conforto durante o período de pico. Graças aos requisitos de conforto flexíveis, a implementação do esquema MPC permite reduzir os custos. Isto acontece graças à capacidade que o sistema HVAC possui de sacrificar algum conforto a fim de reduzir os consumos de energia durante o período de pico. Os autores utilizam o edifício médio localizado em Boston para fundamentar a sua conclusão. No caso em que o fator de ponderação é 50 o custo de energia é custo de 171\$. Assumindo 10 como fator de ponderação os custos descem para 160\$ e para 148\$ quando o fator de ponderação é 1. O  $PMV_i$  registado nas outras duas localizações, considerando os fatores de ponderação entre 5 e 50, apresentam valores semelhantes aos registados em Boston.

Os edifícios em Boston apresentam os maiores níveis de poupança dos edifícios estudados. Isto acontece devido aos benefícios de utilização da energia térmica armazenada durante o período de vazio serem maiores para preços de pico mais elevados. A capacidade térmica do edifício é outro fator que influencia as potenciais poupanças de custo. Através deste estudo é possível constatar que o esquema MPC dispõe de um maior potencial de poupança de energia em edifícios de menores dimensões do que nos de médias dimensões. Analisando em comparação com o controlo de referência definido para o período noturno, os esquemas de controlo térmico otimizados possuem a capacidade de reduzir em 40%, 30% e 15% os custos da energia responsável pela refrigeração e reaquecimento nos edifícios de escritórios de pequenas dimensões localizados em Boston, Chicago e Miami, respetivamente, durante o período de estudo. Para os edifícios de escritórios de dimensões médias, as reduções registadas são mais reduzidas, cerca de 20%, 18% e 25%. Apesar da redução dos custos, a utilização de um esquema de controlo otimizado nem sempre significa uma redução do consumo de energia. Isto acontece devido às perdas de energia não intencionais da energia térmica armazenada.

Através deste estudo, os autores concluem que a redução dos custos de energia é afetada por diversos fatores: requisitos de conforto térmico, condições meteorológicas, a construção do edifício, os preços da eletricidade e tarifas de consumo. Por fim, afirmam ainda que, de todos os fatores em consideração, o fator de ponderação é o requisito mais crítico no desempenho dos esquemas MPC.

Yuanjin Xu et al. [39] procuram encontrar o melhor algoritmo de otimização para treinar uma rede neuronal do tipo *Multi-Layer Perceptron* (MLP), com o objetivo de otimizar por completo os seus parâmetros de modo a prever o aquecimento e a refrigeração de edifícios de uma forma mais exata. Para isso, são considerados seis algoritmos de otimização diferentes: *Ant Colony Optimization algorithm* (ACO), *Biogeography-Based Optimization* (BBO), *Evolution Strategy* (ES), *Genetic Algorithm* (GA), *Particle Swarm Optimization* (PSO) e *Population-Based Incremental Learning* (PBIL). Os desempenhos destes algoritmos são então avaliados e comparados através de quatro diferentes indicadores, sendo eles a raiz quadrada do erro médio (RMSD do inglês *Root Mean Square Deviation*), raiz quadrada normalizada do erro médio (NRMSD do inglês *Normalized Root Mean Square Deviation*), coeficiente de determinação ( $R^2$  do inglês *Coefficient of Determination*) e o erro médio absoluto (MAE do inglês *Mean Absolute Error*).

Os parâmetros a serem otimizados, a carga de aquecimento e a carga de refrigeração, são afetados por diferentes fatores tais como a as condições climáticas e as características do próprio edifício. Neste estudo é considerada a influência de oito fatores independentes do edifício na otimização das cargas, nomeadamente: compacidade relativa (relação entre a área da superfície e o volume do edifício), altura total, área do telhado, área envidraçada, área da parede, orientação do edifício, estrutura e o *sash* do edifício. Para isso, de modo a abranger o maior número de casos possível, são estudados 768 modelos de edifícios que, apesar de possuírem formatos, superfícies e dimensões diferentes, possuem o mesmo volume e são constituídos por exatamente os mesmos materiais. Dentre estes modelos, 614 (80% dos modelos considerados) são utilizados para treinar as redes, sendo que o restante é utilizado para avaliar o potencial de generalização dos algoritmos de otimização considerados neste estudo. Estes modelos são simulados tendo em conta as necessidades de um edifício residencial localizado em Atenas (Grécia), destinado à habitação de, no máximo, sete ocupantes com um comportamento sedentário.

Primeiramente, após uma análise detalhada aos resultados dos indicadores, é possível observar que o algoritmo de otimização BBO apresenta o maior valor de  $R^2$  e os menores valores de MAE, RMSD e NRMSD, sendo possível concluir que o algoritmo possui o melhor desempenho aquando comparado com os restantes algoritmos. O algoritmo BBO apresenta ainda os maiores níveis de convergência e de precisão sendo que os seus resultados são extremamente próximos dos resultados exatos. É ainda notório, através dos resultados do indicador  $R^2$  que, o algoritmo ACO não possui as capacidades necessárias de previsão dos dados de modo a otimizar o MLP de uma maneira mais eficiente, possuindo o pior desempenho

dentre todos os algoritmos. Relativamente aos outros algoritmos, os resultados obtidos indicam que o algoritmo GA seria uma boa alternativa ao algoritmo BBO visto apresentar os segundos melhores resultados. Os algoritmos ES e PBIL, à semelhança do algoritmo ACO, apresentam uma grande discrepância entre os resultados obtidos e os resultados exatos sendo que não são uma escolha viável para a otimização do MLP.

## 2.2 Modelação do Consumo de Energia

Como referido anteriormente, esta dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de um algoritmo de otimização que reduza tanto os custos de energia elétrica de cada escritório, como o pico de pico de potência total de um edifício de escritórios.

Neste contexto, a modelação de energia consiste na simulação computadorizada ou virtual de um edifício ou um complexo de edifícios com foco no seu consumo de energia e custos associados aos mais diversos aparelhos relacionados com a energia (como os sistemas HVAC e a iluminação) [40] [41].

Independentemente do tipo do edifício, seja residencial ou comercial, graças às recentes medidas implementadas pela União Europeia, existe a necessidade destes se tornarem eficientes energeticamente, sem nunca esquecer os níveis de conforto mínimos dos seus ocupantes [4]. Esta modelação assume um papel essencial nesse sentido. A modelação de energia pode ser utilizada para determinar as opções mais adequadas a tomar a fim de reduzir os custos e/ou consumo de energia, ou até a reduzir as emissões de carbono [40].

A modelação tem tido um rápido crescimento, sendo que os softwares de modelação estão em contínuo desenvolvimento, levando a simulações cada vez mais precisas [41]. Para isso, e de acordo com a Portaria n.º 17-A/2016, as simulações devem ser realizadas em softwares acreditados pela norma ASHRAE 140, sendo que devem ter a capacidade de, no mínimo, modelar [42] [43]:

- a) Pelo menos duas zonas térmicas simultaneamente;
- b) Tendo em conta a variação horária das cargas internas, diferenciadas em iluminação, equipamentos e ocupação;
- c) Com incremento de tempo durante, pelo menos, o período de um ano civil (8760 horas);
- d) A recuperação de calor do ar de rejeição e o efeito da massa térmica;

- e) As configurações dos termostatos das zonas térmicas em análise e a operação dos sistemas de climatização, permitindo uma parametrização, independente, para fins de semana e restantes dias;

O rápido crescimento da modelação de energia deve-se aos seus inúmeros benefícios. O facto de não ser necessário realizar cálculos extensos e complexos analiticamente, a capacidade de realizar comparações entre diversos modelos do mesmo produto (lâmpadas, por exemplo) e avaliar a sua influência nos ganhos de calor e os custos associados, a capacidade de simular a modelação de energia de acordo com determinadas condições climatéricas e capacidade de otimizar um edifício energeticamente tendo em conta os níveis de conforto dos ocupantes são apenas alguns benefícios oferecidos pela modelação de energia [44].

## 2.2.1 Desafios da Modelação de Energia

Apesar de todas as funcionalidades e vantagens apresentadas na secção anterior, a modelação de energia carece de melhorias. Isto acontece devido a alguns fatores que influenciam as modulações negativamente. Alguns desses aspetos são descritos nos seguintes pontos.

- Falta de informação sobre o edifício

As informações relativamente às características do edifício são essenciais para modular a energia do mesmo da melhor maneira. A ausência dessas mesmas informações são um grande entrave à modelação de energia do mesmo, podendo conduzir a resultados que não representam, de todo, a realidade [45]. M.D. Korovina et al. em [46], investigaram a influência do detalhe na modelação de um determinado edifício. Começaram por modular três versões de um edifício de apartamentos, localizado em São Petersburgo (Rússia), com diferentes níveis de detalhe. Os autores concluíram que quanto mais detalhada seja a modelação, melhores são os resultados obtidos. Tal como M.D. Korovina et al., e como analisado anteriormente, Jingfan Hu et al. [34] investigam também a influência do detalhe nos resultados obtidos, sendo que utilização de diversas zonas térmicas melhoram a precisão das previsões.

- Suposição incorreta de valores

Aquando da modelação do consumo de energia de um determinado edifício, existe a necessidade de supor ou inserir analiticamente dados relativamente a determinados valores [47]. Um exemplo são as eficiências dos sistemas, sendo que a eficiência pressuposta é apenas válida durante um determinado período de tempo. Este valor tende a alterar-se ao longo do tempo devido ao elevado funcionamento do sistema, desgaste de determinadas peças ou

ainda trabalhar segundo condições às quais não está projetado para o fazer. A eficiência de um sistema não é algo linear, sendo que influenciará o resultado, não conseguindo fazer uma modelação precisa do edifício em causa [45]. Tal como a eficiência dos sistemas, o desenvolvimento económico e a precificação do carbono são fatores que, se feita uma suposição inadequada, irão afetar os resultados negativamente tendo em conta os resultados reais [47].

- Comportamento dos ocupantes do edifício

Por mais avançados que os softwares de modelação estejam, será sempre um desafio modular de forma precisa o comportamento dos ocupantes do edifício em estudo. Um pouco à semelhança da eficiência dos sistemas, é difícil prever as condições exatas que o edifício será exposto durante a sua vida útil ou até mesmo um determinado período. Basta uma porta estar aberta durante um determinado período de tempo que pode levar a um condicionamento involuntário do espaço em questão. Um fluxo de ar variável proveniente de uma janela aberta, por exemplo, pode causar diferenças na pressão que não são consideradas, obrigando os ventiladores a trabalharem mais que o necessário, consumindo mais energia do que o previsto, alterando os resultados [45] [47].

- Alcance da simulação e estratégia de otimização

Tendo em vista que a União Europeia pretende tornar-se na primeira sociedade e economia com impacto neutro no clima até 2050, é necessário otimizar os comportamentos com essa finalidade [4]. Softwares que não possuam a capacidade de simular a modelação de energia até 2050, muito dificilmente conseguiram calcular o melhor caminho de maneira a atingir os objetivos traçados [47] [48].

- Resolução temporal e espacial

A resolução temporal é um indicador importante no que diz respeito às questões que a modelação do consumo de energia consegue responder, pois permite avaliar o comportamento do sistema durante um determinado período de tempo. Quanto maior for a resolução temporal, mais detalhe terá a modelação, sendo possível detalhar de maneira mais precisa as flutuações das fontes de energia renovável consideradas. Em contrapartida, o tempo de computação aumenta. Este comportamento é também verificado no que diz respeito à resolução espacial. Quanto maior a resolução espacial, além de serem apresentados resultados mais precisos, o tempo de computação tende também a aumentar. Assim sendo, um dos maiores

desafios da modelação de energia é encontrar o equilíbrio entre a resolução espacial e temporal [47] [48].

## 2.3 Discussão

A necessidade de mudar os nossos comportamentos enquanto sociedade é cada vez maior. Em outubro de 2019, o valor médio global de  $CO_2$  na atmosfera foi de 412,5 partes por milhão, o que, representa um valor recorde [49]. Deste modo, existe a enorme necessidade de instaurar comportamentos e hábitos sustentáveis de modo a descarbonizar o planeta a fim de reverter esta situação antes que seja tarde demais. A incorporação de fontes de energia renovável na rede energética é vista como uma solução. Visto que seria necessário fazer atualizações dispendiosas na rede de modo a conseguir incorporar estas mesmas fontes, a flexibilidade energética surge como parte integrante da referida solução [14]. Isto acontece não só graças à rápida aplicabilidade e capacidade de redução de custos, mas também à capacidade de manter a procura e oferta equilibradas, aliviar o congestionamento e restrições na rede e um maior aproveitamento de sistemas de geração renovável [50].

Através das análises feitas no subcapítulo 2.1.1, e como investigado por Reynders et al. em [9], é possível verificar que, de facto, existem diversas maneiras para definir e quantificar a flexibilidade energética. No entanto, o conceito base presente em todas as definições é semelhante: a flexibilidade energética consiste na capacidade de adaptação da energia tendo em conta determinados objetivos, sem comprometer as restrições técnicas e o nível de conforto estabelecido. Nesta dissertação, será considerada uma definição semelhante à considerada por Oldewurtel et al. em [18]. Por conseguinte, a flexibilidade energética será definida como o reajuste do consumo do utilizador, de modo a evitar o pico de procura, reduzindo os custos sem comprometer o seu conforto.

Apesar da necessidade de uma rápida implementação da flexibilidade energética na rede de modo a reduzir os índices de carbono e alcançar os objetivos propostos pela União Europeia até 2050, a informação e pesquisa relativamente a este assunto é ainda escassa no nosso país quando comparada com outros países. Foram apenas encontrados dois artigos relevantes para o caso em estudo. Ainda que um dos países mais pequenos da Europa, Portugal possui, de acordo com as classificações climáticas de Köppen, dois subtipos de clima (clima temperado com verão seco e quente e clima temperado com verão seco e suave) [51]. Naim et al. em [28] procuram avaliar o potencial de flexibilidade energética de um sistema de aquecimento e refrigeração numa habitação típica com diferentes localizações geográficas em Portugal, e

concluem que, mesmo separadas por alguns quilómetros, existem localizações do nosso território mais propensas à flexibilidade energética que outras. Assim, existe a necessidade de explorar a flexibilidade não só numa zona, mas em diversas zonas do nosso país. No entanto, tendo em conta os resultados obtidos na investigação mencionada, em [30] e em [52], verifica-se que é possível obter resultados positivos sob o clima português e semelhantes. Salientar ainda que, graças à investigação realizada por Xiwang et al. é possível ter uma perceção que a flexibilidade energética varia também consoante o sistema de refrigeração escolhido [36].

Esta dissertação tem como objetivo desenvolver um algoritmo de otimização que visa definir a utilização da flexibilidade energética existente de forma a reduzir os custos de energia elétrica de cada escritório considerando as tarifas aplicáveis em cada instante e o pico de potência total de forma que o custo da potência contratada de todo o edifício seja também reduzido. Yuanjing et al. em [39] consideraram seis algoritmos de otimização de modo a perceber qual o melhor algoritmo para treinar uma rede neuronal para prever de forma mais eficiente o aquecimento e refrigeração de um determinado edifício. Apesar destes algoritmos apresentarem resultados bastante bons noutras investigações [53] [54] [55] [56] [57] [58], nesta investigação houve uma grande diferença entre os resultados. Assim, verifica-se que nem sempre um algoritmo se adapta a determinadas condições. O facto de se desenvolver um algoritmo específico para esta tarefa, tendo em consideração determinadas condições, é uma vantagem.

Do ponto de vista do conforto, graças às análises realizadas nos subcapítulos 2.1.3 e 2.1.4 deste documento, verifica-se que é possível obter bons resultados através da otimização sem comprometer os níveis de conforto dos ocupantes, sendo que todas as investigações analisadas apresentam bons resultados a nível da flexibilidade energética, abdicando apenas de um pouco de conforto. Thibault et al. em [52] apresentam um dos melhores resultados, conseguindo um aumento significativo na flexibilidade energética do sistema resultando numa diminuição do custo de energia em cerca de 22 a 26 %, sendo que após a implementação da estratégia de controlo, os níveis de conforto mantêm um nível semelhante aos níveis apresentados segundo o comportamento de referência.

Por fim, as análises destes artigos alertam para a possibilidade de algumas dificuldades que possam surgir. A primeira dificuldade que pode surgir é a falta de incentivos. Através da análise dos resultados obtidos em [33], é possível perceber que é difícil beneficiar economicamente das estratégias implementadas sob alguns esquemas de preços existentes se existir um

aumento no consumo de energia. Assim, Minghze et al. recomendam a criação de incentivos à exploração do potencial de flexibilidade energética dos edifícios de maneira a ser possível tirar partido destas estratégias. A segunda dificuldade que pode surgir diz respeito ao edifício em estudo não possuir inércia térmica suficiente para conseguir usufruir dos benefícios do uso da flexibilidade energética visto que a quantidade de energia de aquecimento ou arrefecimento que pode ser temporariamente deslocada ser limitada [28]. Uma solução para isso seria considerar algum método de armazenamento de energia como um tanque [34] ou baterias [30] sendo que, requereria investimento. Para finalizar, qualquer falta e/ou suposição de informação relativamente ao edifício ou sistema de refrigeração em estudo, assim como limitações na modelação, podem conduzir a resultados distintos dos reais.



## SOLUÇÃO PROPOSTA

No presente capítulo é apresentada e descrita de uma forma detalhada a solução proposta para os problemas identificados anteriormente, as decisões tomadas durante a elaboração da mesma e as suas justificações.

Sendo um dos principais objetivos a redução dos custos de energia elétrica de cada escritório considerando as tarifas aplicáveis em cada instante e do pico de potência total de forma que o custo da potência contratada de todo o edifício seja reduzido, a fim de alcançar a melhor solução, optou-se por desenvolver um algoritmo de otimização que procure definir, em simultâneo, o melhor funcionamento para o sistema de climatização de cada escritório recorrendo à flexibilidade energética do edifício onde estão agrupados todos estes espaços resultantes da inércia térmica existente. A inércia térmica de uma construção pode ser definida pela sua capacidade de absorver as mudanças de temperaturas interiores. Assim, uma elevada inércia térmica permite usufruir dos benefícios do uso da flexibilidade energética visto que a quantidade de energia de aquecimento ou arrefecimento pode ser temporariamente deslocada. Este deslocamento é fundamental a fim de cumprir os objetivos propostos uma vez que, no caso da redução de custo, permite deslocar as ações de aquecimento e arrefecimento das horas de maior procura, ou no caso do da redução da potência contratada, deslocar a ação do sistema de climatização para um outro momento com o objetivo de reduzir a potência consumida naquele instante.

As interações entre os escritórios, algoritmo de otimização e sistema de climatização estão representadas na Figura 9, onde, além dos escritórios, também salas de reuniões podem ser consideradas, tendo em conta que todos os espaços possuem um termostato independente.

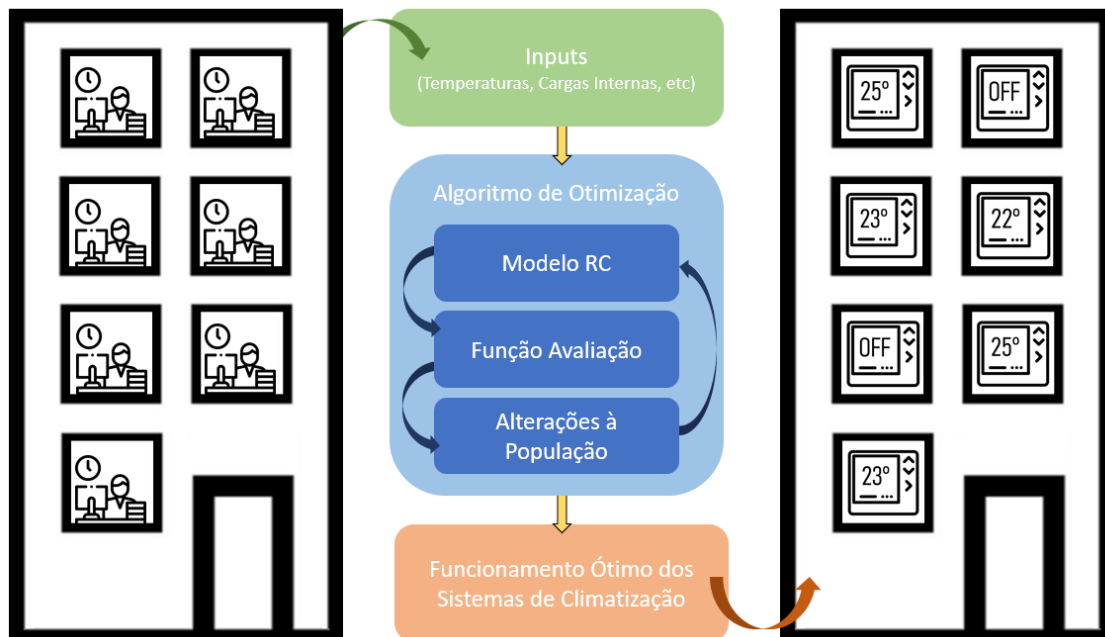


**Figura 9** - Esquemático das interações entre os escritórios, algoritmo de otimização e sistemas de climatização

Como relatado no subcapítulo 2.3, qualquer falta e/ou suposição de informação acerca do edifício podem conduzir a resultados diferentes do real. Posto isto, a interação entre os escritórios e o algoritmo de otimização possui um papel fundamental no que diz respeito à qualidade do resultado obtido pois, nesta interação é feita a partilha de informação por parte dos escritórios para com o algoritmo de otimização.

Já a interação entre o algoritmo de otimização e os termostatos é bastante simples, visto ser apenas fornecido o comportamento ótimo que o mesmo deve adotar. O processo para encontrar esse comportamento é que é complexo e será abordado numa fase posterior deste capítulo. Contudo, é possível ver de uma forma pouco aprofundada, através da Figura 9, o que é feito pelo algoritmo de otimização a fim de encontrar essa resposta. Como referido anteriormente, o algoritmo define o melhor funcionamento para o sistema de climatização sendo essa definição feita recorrendo ao auxílio de um modelo *data-driven*, do tipo resistência-condensador, uma vez que este tipo de modelo consegue capturar com exatidão aceitável as dinâmicas térmicas dos demais edifícios, sendo mais rápido que outras ferramentas como o EnergyPlus [28]. Para isso existe a necessidade de treinar o modelo. Para fazer esse treino, é necessário modelar o comportamento térmico do edifício com o objetivo de estimar os valores

das resistências, condensadores e qualquer outro componente necessário. Esse tópico será também abordado numa fase posterior deste capítulo.

Apesar da redução dos custos de energia elétrica e a redução do pico de potência total serem objetos de frequente análise e investigação individual por parte da comunidade científica, pouca informação foi encontrada relativamente a uma exploração em simultâneo. Sendo este um algoritmo de otimização multiobjectivo, é natural que a solução encontrada não seja a solução ótima a fim de reduzir os custos de energia elétrica, nem a solução que visa diminuir o pico de potência total da maneira mais eficiente, mas sim uma solução benéfica de certa forma para ambos.

### **3.1 Modelação do Comportamento Térmico de um Edifício**

Como já referido, um dos principais objetivos propostos para esta dissertação passa pelo desenvolvimento de um algoritmo de otimização capaz de encontrar a utilização ótima do sistema de climatização a aplicar às diversas zonas. Para isso, existe a necessidade de saber como os diversos espaços se comportaram perante as diferentes condições a que serão submetidos com o intuito de encontrar a solução ótima. Uma das hipóteses passaria por conectar o algoritmo de otimização a um software de simulação e, consoante a modificação dos demais parâmetros observar o comportamento das diferentes zonas que constituem o edifício de escritórios. Sendo que este processo, se implementado, viria a tornar-se bastante demorado, foi necessário encontrar uma alternativa [28]. Essa alternativa passaria pela implementação de um modelo resistência-condensador (RC) para cada zona térmica visto que este, como referido anteriormente, consegue retratar de uma forma aceitável as dinâmicas térmicas de edifício possuindo um tempo de computação reduzido.

#### **3.1.1 Metodologia**

Dada a necessidade de treinar o modelo RC a fim de estimar o valor das resistências, condensadores e qualquer outro componente considerado, existe a necessidade de modelar o comportamento térmico do edifício em análise recorrendo a ferramentas já validadas para se recolherem os dados necessários. Assim, de modo a realizar essa modulação, é necessário recorrer a softwares técnicos específicos. No capítulo 2.2, é mencionado que, de acordo com a Portaria n.º 17-A/2016, de modo a aproximar ao máximo o comportamento do edifício à realidade, as simulações devem ser realizadas por softwares acreditados pela norma ASHRAE 140 [43].

Tendo em conta a quantidade de informação disponível e o nível de utilização em artigos, optou-se pela utilização do EnergyPlus. Um outro fator que se revelou chave para a escolha deste software ao invés dos seus concorrentes foram os seus *plugins*. Estes vieram a demonstrar-se fundamentais na simplificação do processo de modelação.

Concebido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América, o EnergyPlus é um software de simulação energética de edifícios não só utilizado por investigadores, mas também por arquitetos e engenheiros no seu dia a dia [59]. O EnergyPlus serve principalmente como motor de simulação e análise energética, tendo por base o clima e a caracterização do edifício ou zona térmica em estudo, sendo este processo bastante semelhante independentemente do objeto a modelar. É possível dividir este processo nas quatro fases descritas nos seguintes pontos:

1. Modelação da geometria do edifício que se pretende simular tendo por base as diferentes zonas térmicas

Apesar de todas as vantagens e garantias que este software oferece, o mesmo poderá não ser intuitivo ao utilizador. Não possuindo uma interface gráfica, torna-se difícil modelar a geometria do edifício de uma forma simples. Esta, é feita através da inserção das coordenadas dos diversos vértices no espaço que constituem as paredes do edifício. Assim sendo, é comum a existência de erros. Ainda assim, graças a um dos seus plugins, é possível simplificar a construção geométrica do edifício, utilizando outro software.

O *Google SketchUp* é um software desenvolvido especialmente para engenheiros civis e arquitetos, sendo este destinado à criação de modelos 3D dos mais variados objetos de uma forma clara e bastante intuitiva. Visto isto, decidiu-se utilizar este software que, juntamente com um *plug-in* (*Legacy OpenStudio*), permite fazer a modelação da geometria do edifício de escritórios considerado e gravar essa informação num ficheiro de extensão IDF, formato reconhecido pelo EnergyPlus.

2. Caracterização dos vários componentes construtivos

Sendo o formato IDF reconhecido pelo EnergyPlus, é possível continuar a editar o ficheiro e adicionar os restantes dados para a simulação. Uma vez que o modelo desenvolvido com auxílio do software *Google SketchUp* representa apenas o edifício em 3D, existe a necessidade caracterizar os seus constituintes, mais propriamente as envolventes do edifício, vãos

envidraçados, etc. Para isso é necessário identificar a constituição dos mesmos e as propriedades dos materiais constituintes. Essas propriedades devem ser consideradas de acordo com fontes creditadas, tal como o ITE 50, desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil [60].

### 3. Definição das cargas internas e localização

Outra característica que é necessário ter em atenção são as cargas internas pois estas, em conjunto com a radiação solar incidente, vão contribuir para os ganhos internos e influenciar as temperaturas interiores. Geralmente, estão associados a estas cargas internas os equipamentos elétricos, sistema de iluminação e os ocupantes dos espaços.

Já a radiação solar incidente é mais simples de definir. Uma vez que os ganhos por radiação solar, proporcionais à quantidade de radiação que passa pelos vãos envidraçados, dependem exclusivamente do clima, da localização e orientação do edifício é necessário definir as mesmas. Graças a uma particularidade do software de simulação EnergyPlus, ao invés de inserir manualmente a variação da radiação solar numa determinada região, é possível transferir diretamente do site oficial do mesmo um documento onde possui já todas essas informações e anexar esse mesmo documento à simulação. Este documento, do tipo EPW, possui todas as informações necessárias sobre o clima do local considerado com o objetivo de realizar uma simulação o mais fiel à realidade possível.

### 4. Descrição dos perfis de funcionamento segundo os padrões de utilização do edifício

Por fim, é necessário definir os perfis de funcionamento segundo os padrões de utilização do edifício, ou seja, definir os horários de funcionamento dos equipamentos elétricos, horários de trabalho dos ocupantes, etc, e associar a cada um dos objetos. Tal como caracterização dos vários componentes construtivos, este é um passo fulcral no que diz respeito à qualidade dos resultados uma vez que a mal definição do comportamento dos ocupantes ou utilização e um dado equipamento podem prejudicar os resultados, levando a um afastamento do que corresponde à realidade.

Uma vez que a solução proposta passa pela procura do funcionamento ótimo do sistema de climatização a aplicar às demais zonas, é necessário saber como se comportam as temperaturas internas das mesmas quando não é aplicada qualquer climatização. Isto acontece dada a necessidade de treinar o modelo RC de forma a responder à variação das temperaturas internas sem qualquer influência do sistema de climatização, uma vez que a procura pelo

funcionamento ótimo será apenas feita numa fase posterior tendo em conta as temperaturas interiores e o conforto dos ocupantes.

Após a conclusão dos passos expostos anteriormente, é possível avançar para a simulação com o intuito de observar as variações das temperaturas internas das diversas zonas do edifício ao longo de um ano, em períodos de 15 minutos, onde, considerando que dentro de cada zona térmica não existe qualquer diferencial de temperatura, todos os componentes presentes numa superfície possuem a mesma temperatura, a condução de calor ocorre apenas numa direção e que, para qualquer comprimento de onda, a emissividade das superfícies mantém-se constante, são processados os dados inseridos e devolvidos os demais *outputs* solicitados pelo utilizador [29].

Sendo o EnergyPlus um dos softwares mais aclamados da área, além das inúmeras funcionalidades, este disponibiliza também uma grande variedade *outputs* provenientes da simulação. Após uma análise detalhada das diversas opções de *outputs* através da documentação de apoio, chegou-se a conclusão de que os *outputs* de simulação necessários para a realização dos seguintes passos desta dissertação são [59]:

- *Zone Mean Air Temperature;*
- *Site Outdoor Air Drybulb Temperature;*
- *Electric Equipment Electric Energy;*
- *Lights Electric Energy;*
- *Zone People Total Heating Energy.*

Estes *outputs* correspondem à temperatura exterior, temperatura interior por zona, ganhos internos provenientes de equipamentos elétricos por zona, ganhos internos provenientes do sistema de iluminação por zona e ganhos internos provenientes dos ocupantes por zona, respetivamente.

### 3.1.2 Modelo RC

Como referido anteriormente, uma das hipóteses a fim de alcançar os objetivos propostos no âmbito desta dissertação passaria por conectar o algoritmo de otimização ao EnergyPlus e, consoante a modificação dos demais parâmetros observar o comportamento das diferentes zonas que constituem o edifício de escritórios. Sendo que, se implementado, este processo viria a tornar-se bastante demoroso, foi necessário encontrar uma alternativa [28].

Os modelos *data-driven* possuem a capacidade de retratar as dinâmicas térmicas de um edifício, conseguindo fornecer estimativas com exatidão aceitável do que seria o comportamento do mesmo face aos mais diversos fatores. Estes modelos são fáceis de formular, necessitam de poucos parâmetros e possuem um tempo de computação reduzido [61]. Posto isto, os modelos *data-driven* são frequentemente utilizados em modelos de controlo de aquecimento e refrigeração dos espaços, na deteção de anomalias de sistemas mecânicos e nas avaliações *retrofit* com o objetivo de reduzir os consumos de energia e os picos de potência total [61] [62] [63] [64] [65].

Dentro da variedade de modelos *data-driven*, existem os modelos resistência-condensador (ou seja, modelos RC) que conseguem capturar as dinâmicas térmicas dos demais edifícios através de um circuito RC. De forma a o fazer, são estimados os valores das resistências, condensadores e qualquer outro componente necessário através de dados recolhidos previamente (neste caso utilizando a ferramenta EnergyPlus). Estes valores estimados dos componentes são muitas vezes fisicamente interpretáveis. Um exemplo recorrente é o valor estimado de uma resistência associada à representação de uma parede corresponder à resistência térmica da mesma. Caso isto não se verifique, pois não é um algo garantido, pode dever-se à utilização de uma estrutura do modelo inadequada ou o facto dos dados recolhidos previamente e utilizados no treino do modelo serem inadequados [61] [66].

A utilização dos modelos RC é frequente entre a comunidade científica a fim de simplificar as simulações térmicas dos edifícios. Em [67], Mariana Rainho conclui que para tipologias de edifícios pouco complexas no que diz respeito ao seu nível construtivo e cujo propósito seja a previsão da procura de energia de climatização, os modelos demonstram ser bastante fiáveis nas previsões do comportamento térmico de uma zona.

Um dos tipos de modelo RC mais utilizado é o modelo R5C1, constituídos por 5 resistências e um condensador. Este tipo em específico é bastante utilizado pelos investigadores europeus como referência, a fim de prever as necessidades anuais de energia e avaliar o risco de sobreaquecimento dos edifícios [68]. Marta Panão et al. [69] adapta com sucesso uma

extensão deste tipo de modelo com o objetivo de aplicá-lo em edifícios com dupla fachada ventilada, a fim de prever a sua temperatura interior. Contudo, e à semelhança do que foi feito por Simon Rouchier et al. [70], o modelo que será considerado no âmbito desta dissertação será o modelo R2C2.

Sendo que a nomenclatura associada às inúmeras variantes de modelos RC provem do número de componentes que o constituem, no caso do modelo R2C2 são consideradas duas resistências e dois condensadores, formando um circuito RC de segunda ordem. Este circuito procura estimar o comportamento da envolvente e do interior de uma determinada zona térmica em relação à variação da temperatura exterior, radiação solar e ganhos internos. Assim sendo, tendo por base [70] e [71], é possível chegar ao circuito presente na Figura 10.

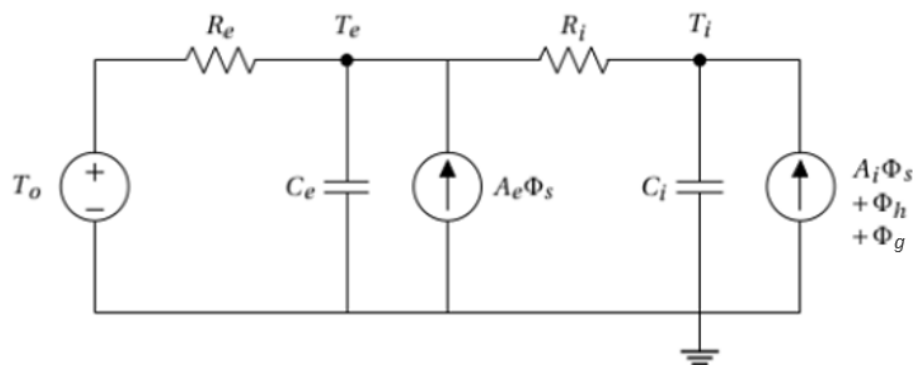


**Figura 10** - Representação de uma zona térmica através de um circuito RC de segunda ordem

Tendo por base o circuito, através do método dos nós, é possível chegar às seguintes equações para este modelo:

$$C_i dT_i = \frac{1}{R_i} (T_e - T_i) dt + \Phi_h dt + \Phi_g dt + A_i \Phi_s dt \quad (1)$$

$$C_e dT_e = \frac{1}{R_i} (T_i - T_e) dt + \frac{1}{R_e} (T_o - T_e) dt + A_e \Phi_s dt \quad (2)$$

Onde  $T_o$ ,  $T_e$  e  $T_i$  representam a temperatura exterior, da envolvente e interior do espaço em análise. Um detalhe a ter em conta relativamente à temperatura da envolvente é que esta está associada a toda a massa térmica de superfícies opacas, não representando apenas um ponto em específico.  $R_e$  (K/W) representa a resistência térmica entre a temperatura da

envolvente e a temperatura exterior e  $R_i$  (K/W) a resistência térmica entre a temperatura interior e a envolvente.  $C_i$  e  $C_e$  (J/K) representam as capacidades de calor do interior e da envolvente, respetivamente. E por fim,  $\Phi_h$  (W) representa a potência de aquecimento ou refrigeração aplicada à zona térmica durante um determinado *timestep* pelo sistema de climatização,  $\Phi_G$  (W) representa os ganhos internos existentes e  $\Phi_s$  (W) representa os ganhos térmicos provenientes da radiação solar sendo  $A_e$  e  $A_i$  ( $m^2$ ) seus coeficientes.

Tendo por base as equações 1 e 2, é possível simplificar as mesmas, obtendo as equações 3 e 4, onde a temperatura interior e a temperatura da envolvente no tempo  $t+1$  são obtidas através de variáveis do tempo  $t$  [70]. Uma vez que nesta fase ainda não foi considerada a influência do sistema de climatização, pode-se considerar que  $\Phi_h = 0$ .

$$T_i^{(t+1)} = T_i^{(t)} + \frac{dt}{C_i} \left( \frac{1}{R_i} (T_e - T_i) + \Phi_h + \Phi_G + A_i \Phi_s \right)^{(t)} \quad (3)$$

$$T_e^{(t+1)} = T_e^{(t)} + \frac{dt}{C_e} \left( \frac{1}{R_i} (T_e - T_i) + \frac{1}{R_e} (T_o - T_e) + A_e \Phi_s \right)^{(t)} \quad (4)$$

Visto que as estimativas das temperaturas vão depender do *timestep* anterior, e não foi retirado qualquer *output* da simulação relativo às temperaturas da envolvente, é necessário calcular a sua temperatura para  $t = 0$ . Para isso, e tendo por base [72], foi considerada a seguinte equação:

$$T_e^{(0)} = \frac{(R_i T_o^{(0)} + R_e T_e^{(0)})}{(R_i + R_e)} \quad (5)$$

Com as equações do modelo já definidas, é necessário encontrar os parâmetros ótimos ( $C_i$ ,  $R_i$ ,  $A_i$ ,  $C_e$ ,  $R_e$ ,  $A_e$ ) que representem com exatidão aceitável as dinâmicas térmicas dos distintos escritórios considerados quando submetidos às diferentes condições impostas pelas diferentes estações do ano. Para isso, procurou-se através de um programa desenvolvido em MATLAB, os parâmetros capazes de minimizar ao máximo a soma dos erros quadrados entre a temperatura interna prevista pelo modelo e obtida através da simulação executada com recurso ao EnergyPlus.

$$SSE = \sum_{i=0}^t (T_i - T_{indoor\ simulated})^2 \quad (6)$$

Uma das formas mais eficazes de fazer a procura pelos valores ótimos seria através do método de tentativa e erro, encadeando seis *loops for*, cada um representando e limitando cada um dos componentes, analisando todas as sequências possíveis dentro de um determinado intervalo. Sendo esta uma vantagem, a análise de todas as sequências, a utilização do método de tentativa e erro traria consigo um problema, o tempo de computação. Assim sendo, recorreu-se a uma função desenvolvida por John D'Errico denominada *fminsearchbnd* [73]. Esta função possui exatamente o mesmo princípio de funcionamento da função *fminsearch*, sendo que existe a possibilidade de aplicar restrições às variáveis uma vez que a função *fminsearch* não admite a aplicação de qualquer tipo de limites.

## 3.2 Algoritmo Genético

São considerados como problemas de otimização problemas de minimização ou maximização de uma função de uma ou múltiplas variáveis num determinado domínio, geralmente delimitadas por um conjunto de restrições. Por sua vez, os algoritmos de otimização são ferramentas matemáticas executadas de forma iterativa a fim de encontrar uma solução ótima, ou pelo menos satisfatória, tendo em consideração as inúmeras soluções possíveis ao problema.

Dado o elevado número de algoritmos de otimização existentes, é possível dividir os mesmos em diferentes ramos de acordo com o seu método de otimização. Um desses ramos visa os algoritmos que se baseiam em técnicas de computação evolucionária que, por sua vez, esse ramo pode-se ainda dividir em duas áreas: inteligência coletiva, onde os algoritmos simulam o comportamento coletivo dos indivíduos pertencentes a determinada população e a sua interação entre si e com o meio ambiente e os algoritmos evolucionários, onde se encaixam os algoritmos genéticos [74].

Graças à sua flexibilidade relativamente a outros métodos de resolução de problemas complexos, os algoritmos genéticos podem ser aplicados numa vasta gama de problemas, necessitando de pouca informação relativamente aos mesmos. Assim sendo, decidiu-se optar pela sua utilização no âmbito da dissertação [74].

### 3.2.1 Origem dos Algoritmos Genéticos

Desde há muito que a natureza serve de base ao Homem para a criação de máquinas, técnicas e métodos a fim de melhorar a sua qualidade de vida. Os algoritmos genéticos são apenas mais um exemplo uma vez que pertencem a um conjunto de modelos computacionais que tem por base a teoria da evolução defendida por Charles Darwin no século XIX.

Nos estudos publicados pelo biólogo britânico, o mesmo conclui que não é certo que todos os organismos que nascem consigam reproduzir-se ou até mesmo sobreviver. Os mais favoráveis à sobrevivência são os que estão mais adaptados para enfrentar quaisquer adversidades. Posto isto, estes organismos possuem uma maior probabilidade de se reproduzirem, deixando descendentes. Assim, é natural que, com o passar do tempo, os organismos com um menor grau de adaptação às diversidades tendam a desaparecer.

Baseado nas teorias de Darwin, o investigador John Holland e os seus alunos da área da genética e sistemas adaptativos introduzem, em 1975, os algoritmos genéticos à comunidade científica através do livro "*Adaptation in Natural and Artificial Systems*" [75]. A ideia foi-se desenvolvendo e em 1989, um dos seus alunos, David Goldberg, obtém as primeiras aplicações com sucesso industrial [76]. Desde aí, estes algoritmos têm vindo a ser vulgarmente aplicados com sucesso na resolução dos mais diversos problemas de otimização.

Segundo Goldberg, os algoritmos genéticos distanciam-se dos métodos tradicionais de procura e otimização uma vez que estes não trabalham com as próprias soluções, mas sim com a codificação das potenciais soluções, baseiam-se em regras de transição probabilísticas ao invés de regras deterministas, utilizam a informação de troca da função objetivo e realizam buscas simultâneas em vários conjuntos de pontos. O fator chave para que estes algoritmos resolvam de uma maneira mais eficaz um determinado problema passa pela interpretação correta do mesmo [76].

### 3.2.2 Funcionamento Genérico

É possível estabelecer como ponto inicial do funcionamento de qualquer algoritmo de otimização a definição da população inicial. Esta pode ser feita aleatoriamente ou recorrendo um procedimento heurístico. A população definida é formada por um conjunto de elementos denominados cromossomas que, por sua vez, são constituídos por um conjunto de genes. A definição do tipo de representação dos indivíduos que constituem a população em análise, a escolha adequada dos operadores genéticos a aplicar e do método de seleção, as características da população e a formulação da função objetivo são fundamentais para que o algoritmo

genético tenha sucesso. Através da Figura 11 é possível observar os vários elementos descritos e a relação que os mesmo possuem entre eles.

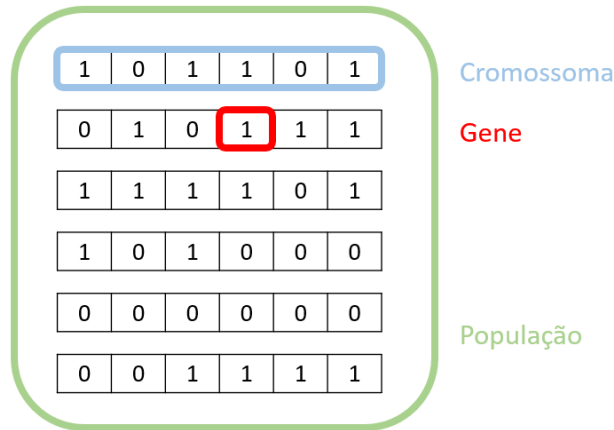


**Figura 11** - Relação entre população, cromossoma e gene no âmbito dos algoritmos genéticos

Seguidamente, recorrendo à função de avaliação, são analisados os elementos da população e selecionados perante a qualidade da sua resposta. Os melhores elementos serão então selecionados para progenitores pois iram reproduzir-se de modo a originar descendência (elitismo). Este processo reprodutivo é constituído por duas fases: cruzamento e mutação. O cruzamento consiste num processo em que os elementos definidos como progenitores trocam o seu material genético, gerando descendência (Figura 12) [77].

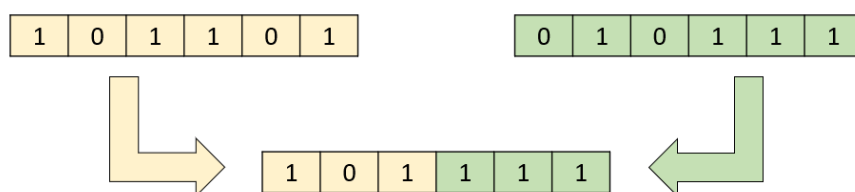


**Figura 12** - Cruzamento entre cromossomas

Posteriormente, essa descendência é alterada através de mutações. A aplicação das mutações desempenha um papel fundamental na procura pela solução ótima uma vez que introduz aleatoriedade, garante diversidade e evita a convergência prematura, evitando que o

algoritmo encontre apenas a solução ótima local [77]. Na Figura 13 é possível observar um exemplo da uma do que consiste uma mutação no contexto do algoritmo.

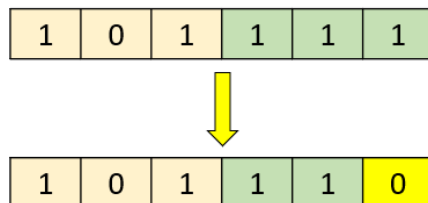


**Figura 13** - Mutação de um cromossoma

Posto isto, os elementos obtidos através dos cruzamentos e mutações constituem a geração seguinte. Estes passos são repetidos de forma sucessiva até serem cumpridas as condições de paragem, significando que se chegou à solução ótima do problema. O funcionamento genérico de um algoritmo genético pode ser observado de uma forma geral através da Figura 14.

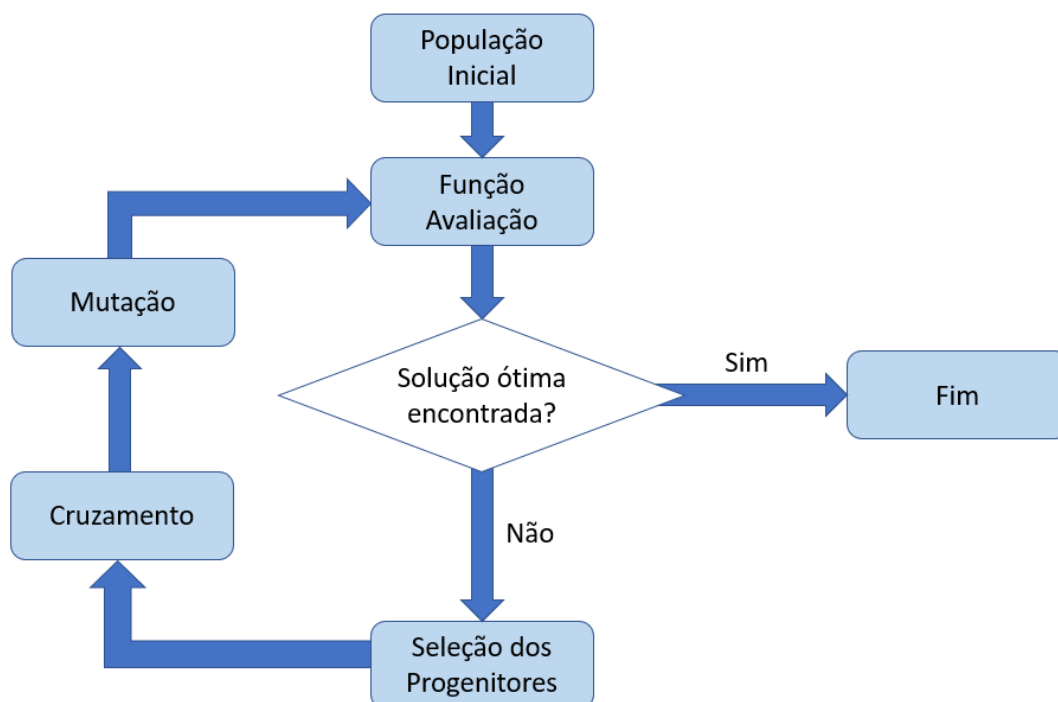


**Figura 14** - Fluxograma genérico de um Algoritmo Genérico

### 3.2.3 Estrutura e Processo de Otimização

Recorrendo ao software MATLAB, desenvolveu-se um programa, incorporando um algoritmo genético, a fim de encontrar a solução ótima tendo em consideração os objetivos propostos numa fase inicial desta dissertação.

No contexto de aplicação do projeto desenvolvido no âmbito da dissertação a um caso real seria necessário dispor de um conjunto de sensores capazes de disponibilizar a temperatura exterior e as temperaturas interiores dentro de cada escritório, calcular de uma forma precisa os ganhos internos, tendo em conta que qualquer comportamento fora do previsto poderá comprometer os resultados, e a radiação solar tendo em conta as distintas orientações dos espaços. Estes dados seriam fornecidos então ao programa desenvolvido de modo a este processar os mesmos e encontrar o funcionamento ótimo a aplicar ao sistema de climatização de cada escritório a fim de alcançar os objetivos já descritos. Uma vez que o projeto desenvolvido será apenas submetido a testes recorrendo a softwares técnicos, estes *inputs* foram simulados. O processo de obtenção destes dados está descrito detalhadamente na Secção 3.1.1. Os mesmos são também utilizados, numa fase anterior, para treinar o modelo RC, responsável pela estimativa da variação das dinâmicas térmicas dos espaços.

Através da Figura 15 é possível observar o funcionamento detalhado do programa desenvolvido e o processo de otimização executado pelo mesmo. À semelhança do relatado no caso de aplicação do programa em contexto real, o primeiro passo passa pelo fornecimento dos *inputs* ao programa. Além dos *inputs* mencionados, provenientes do software de simulação EnergyPlus, é ainda necessário fornecer mais informação ao programa. Sendo um dos objetivos a redução dos custos de energia elétrica de cada escritório considerando as tarifas aplicáveis, é necessário fornecer ao programa informações sobre a tarifa considerada para a otimização. Sendo este um algoritmo genérico aplicável a qualquer edifício de escritórios é também necessário fornecer ao programa desenvolvido as potências dos sistemas de climatização presentes em cada escritório em análise e as componentes obtidas através do treino do modelo RC. Por fim, visto que está a ser utilizado um algoritmo genético, é necessário fornecer a população inicial.

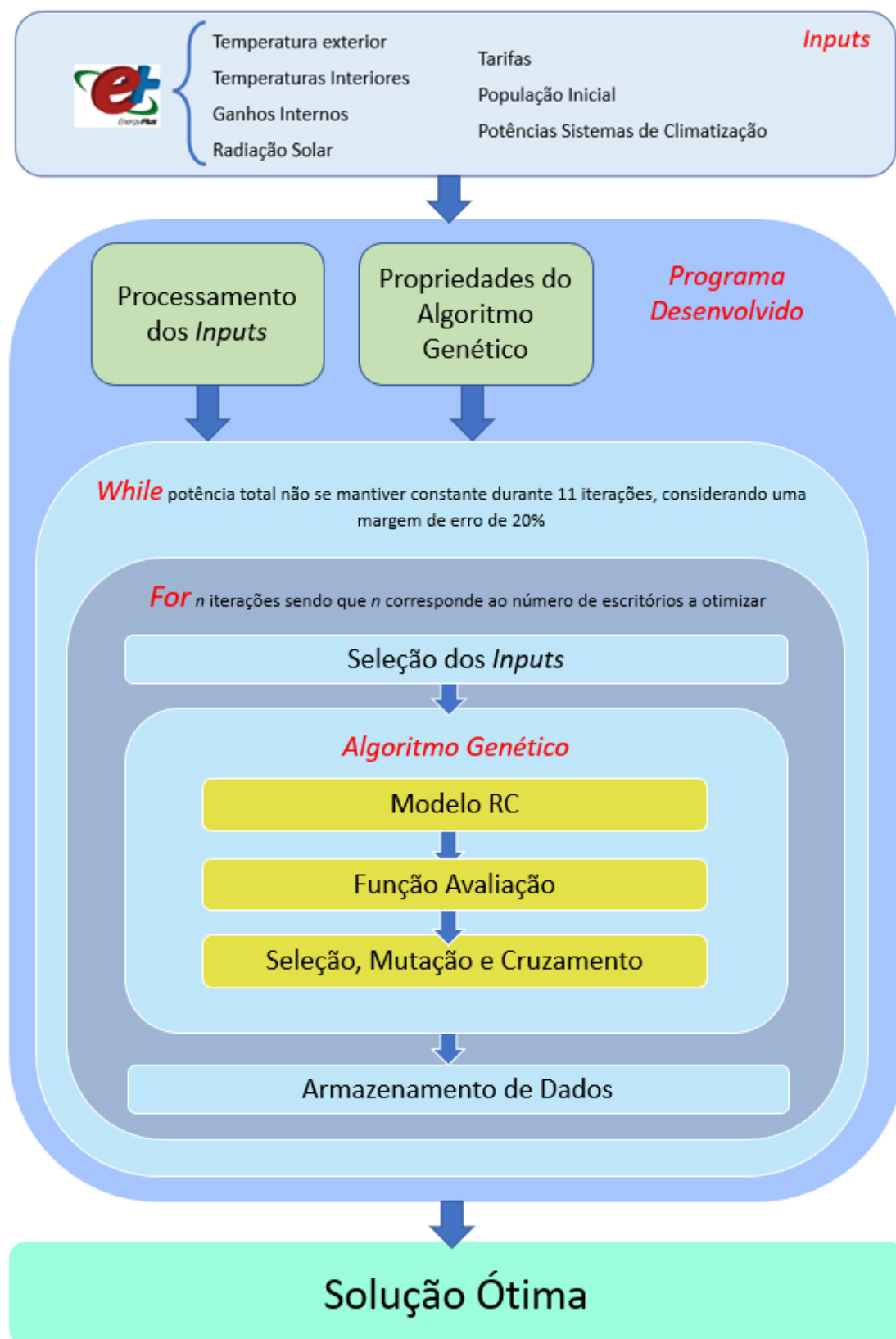


Figura 15 - Estrutura e funcionamento pormenorizado do programa desenvolvido

Estes *inputs* são então processados de modo a facilitar o acesso aos mesmo nas etapas seguintes do processo. Posto isto, estes são organizados em diferentes tabelas, uma por tipo de *input*, sendo que no caso das tabelas em que os dados diferem de escritório para escritório, estes são processados de maneira que, no caso de se estar a otimizar  $n$  escritórios, a coluna  $x$  corresponda ao escritório  $x$  dos  $n$  em análise.

Uma outra informação importante a definir nesta fase inicial do programa refere-se às propriedades do algoritmo genético. Estas são necessárias para o funcionamento do programa pois é aqui que se define o tamanho da população, o número de gerações máximo e o coeficiente de cruzamento e mutação. É ainda definido nesta fase os limites que os genes dos cromossomas podem tomar. Neste caso, cada gene representa o estado de um determinado sistema HVAC de um escritório durante 15 minutos, estando limitado entre 0 e 10, podendo assumir qualquer número inteiro dentro deste intervalo. A utilização deste intervalo tem como objetivo permitir ao sistema de climatização trabalhar segundo diferentes potências uma vez que quando um gene possui nele 0, significa que o sistema de climatização está desligado, quando possui 6 por exemplo, o equipamento está a trabalhar a 60% da sua potência máxima, e quando possui 10 o sistema de climatização está a operar à potência máxima.

Após o processamento dos *inputs* e a definição das propriedades do algoritmo genético, é finalmente possível passar para a otimização. Uma vez que esta dissertação procura solucionar dois problemas em simultâneo, o esquema de otimização pode tornar-se um pouco complexo, sendo este constituído por dois *loops*, um *loop for* e um *loop while* sendo que, como é possível observar pela Figura 15, o *loop for* está incorporado no *loop while*.

O *loop for* surge da necessidade de otimizar não só um espaço, mas diversos espaços pertencentes ao mesmo edifício sendo o número de iterações executadas pelo mesmo equivalente ao número de escritórios. É possível dividir o processo executado pelo *loop for* em três fases. Na primeira fase deste ciclo é feita a seleção dos *inputs* respetivos ao escritório em otimização. Na segunda fase é aplicado o algoritmo genético a fim de encontrar o funcionamento ótimo do sistema de climatização do respetivo espaço. Dependendo das iterações já executadas, começa-se por fazer uma previsão do comportamento dos escritórios recorrendo ou à população inicial ou à sua descendência. Como já referido, o modelo RC possui a capacidade de modelar de uma forma aceitável o comportamento de uma zona térmica, e assim calcular as temperaturas da zona aquando submetidas a determinado comportamento do sistema de climatização. Uma vez que nesta fase já é considerada a influência do sistema de

climatização, é necessário considerar  $\Phi_h$  na Equação 3, sendo que o seu valor provém dos genes dos cromossomos pertencentes à população. Após feita esta previsão é necessário avaliar a qualidade dos elementos utilizados. Para isso recorre-se à função avaliação. A definição correta desta função aquando da formulação do problema é fulcral uma vez que é com base nesta que se irá procurar a solução ótima. A função avaliação utilizada no âmbito desta dissertação está dividida em duas fases: a primeira fase, onde é calculado o custo da climatização do espaço tendo por base as tarifas e o pico de potência total, e a segunda fase, onde se acrescenta aos resultados calculados na primeira fase, uma penalização no caso de não serem respeitados os limites da temperatura impostos:

$$Custos = \sum_{t=t_1}^{t_2} Tarifa_{Energia}(t) * Energia_{HVAC}(t) + \text{máximo}(Potência_{Pico\ Total}) * Tarifa_{Potência\ Contratada} \quad (7)$$

$$\begin{cases} Penalização = \sum_{t=t_1}^{t_2} (T_i - T_{max/min})^2, & \text{se } T_i > T_{max} \text{ ou } T_i < T_{min} \\ Penalização = 0, & \text{se } T_{min} < T_i < T_{max} \end{cases} \quad (8)$$

$$Função\ Avaliação = Custos + \alpha * Penalização \quad (9)$$

Onde  $Energia_{HVAC}(t)$  refere-se à energia consumida por um escritório específico durante um *timestep*,  $Potência_{Pico\ Total}$  representa a carga máxima do edifício durante o período de análise (de  $t_1$  a  $t_2$ ),  $Tarifa_{Energia}(t)$  é a tarifa associada à energia elétrica aplicada a cada *timestep*,  $Tarifa_{Potência\ Contratada}$  corresponde à tarifa associada à potência contratada,  $T_{max/min}$  corresponde aos limites definidos da banda de conforto e  $\alpha$  refere-se ao coeficiente que tem como objetivo enfatizar o peso da penalidade na função avaliação (foi considerado o valor de 1000). No âmbito desta dissertação, estes limites foram definidos tendo por base a Portaria n.º 349-D/2013 onde se define que as temperaturas interiores devem estar compreendidas entre 20° e 25° [78].

Por fim, é feita a seleção dos indivíduos que obtiveram melhores resultados, é feito o cruzamento entre eles e a mutação, dando origem a uma população nova. Quando encontrado o funcionamento ótimo para o sistema de climatização desse determinado escritório, este é armazenado numa matriz com  $n$  colunas. Quando o *loop for* percorrer e otimizar todos os escritórios, essa matriz estará completa e pronta a analisar.

Essa análise é feita já fora do *loop for*, mas dentro do *while* onde se soma os  $n$  funcionamentos ótimos de modo a obter o pico de potência total por *timestep*. Esta análise é feita

tendo por base os critérios de paragem definidos. Sendo que os critérios de paragem devem ser adequados ao problema, foi definido o seguinte: continua a otimizar enquanto (*while*) o pico de potência total não se mantiver constante durante 11 iterações, considerando uma margem de erro de 20%.

Quando atingidos os critérios de paragem, o programa devolve uma ou mais soluções, dependendo do número de escritórios considerados. Se por algum motivo esses critérios não foram cumpridos, volta a otimizar.

## RESULTADOS E ANÁLISE

O presente capítulo tem como função expor e analisar os resultados óbitos através da aplicação do algoritmo de otimização desenvolvido para um caso de estudo considerando diferentes cenários. Numa primeira fase é feita a descrição detalhada do caso de estudo e, de seguida, a calibração do algoritmo de otimização e apresentação dos diferentes cenários considerados, juntamente com os respetivos resultados obtidos. Por fim, é feita uma análise e discussão dos mesmos.

### 4.1 Caso de Estudo

A Soler & Palau foi fundada em fevereiro de 1951 pelos engenheiros Eduard Soler e Josep Palau na província de Girona, Catalunha, Espanha. Apesar das suas origens humildes e caráter regional, desde cedo que os seus fundadores possuíram a visão clara que o futuro desta empresa de ventilação passaria pela sua expansão internacional. Assim sendo, rapidamente a empresa se expandiu, chegando à cidade do Porto, Portugal, durante a década de 60. Graças à produção de ventiladores industriais e domésticos de alta qualidade, a Soler & Palau tem vindo a crescer mundialmente sendo que, atualmente, está presente em mais de 30 países, possuindo 18 fabricas espalhadas por todo o mundo (8 no continente europeu, 6 no continente asiático e 4 no continente americano). À semelhança do registado a nível internacional, a Soler & Palau tem também vindo a crescer em Portugal.

Graças ao fluxo de vendas registado em território nacional, surgiu a necessidade de expansão, tendo sido necessário construir um edifício de escritórios que fosse capaz de albergar as enormes dimensões da multinacional espanhola em Portugal.

O edifício de escritórios em questão (Figura 16), desde 2015, ano em que foi finalizada a sua construção, satisfaz as necessidades da S&P Portugal. O mesmo localiza-se numa das zonas industriais da freguesia de Moreira, conselho da Maia, a cerca de 14 quilómetros da cidade do Porto.



**Figura 16** - Sede da Soler & Palau Portugal

Constituído por três pisos, estes possuem uma área útil total de, aproximadamente, 725  $m^2$  e um pé direito médio de 3 metros. Analisando com detalhe a constituição de cada piso, é possível observar que o piso 0 (Figura 17 e Tabela 2) apresenta uma constituição totalmente diferente dos restantes. Isto acontece, uma vez que apenas os pisos superiores se destinam a atividades administrativas. Este piso conta com dois gabinetes (receção do edifício), um *showroom*, uma copa, uma sala técnica de bastidores e instalações sanitárias. Já entre o piso 1 (Figura 18 e Tabela 3) e o piso 2 (Figura 19 e Tabela 4), é possível observar bastantes semelhanças. Ambos os pisos são compostos por escritórios, salas de reuniões, pequenos arrumos e instalações sanitárias. A transição entre os diferentes pisos pode ser feita através de escadas ou de elevador, localizado no centro do edifício.

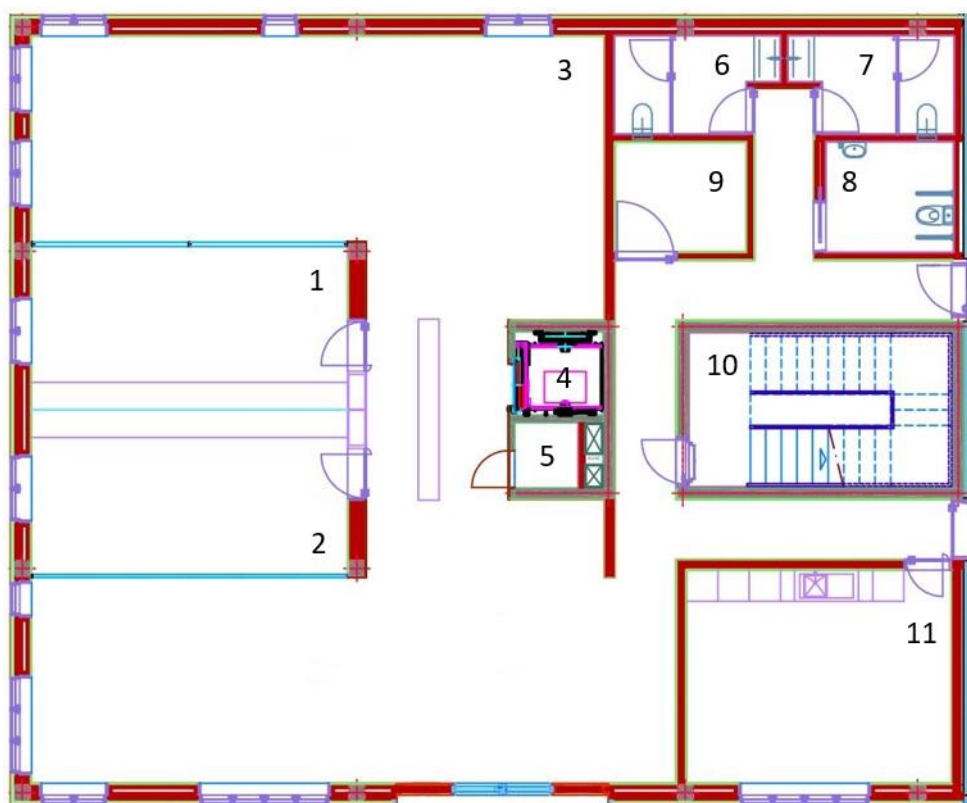


**Figura 17** - Planta do Piso 0 do edifício de escritórios em estudo

**Tabela 2** - Legenda relativa à Figura 17

| <i>ID</i> | <i>Descrição</i>   |
|-----------|--------------------|
| 1         | Gabinete           |
| 2         | Gabinete           |
| 3         | Showroom           |
| 4         | Elevador           |
| 5         | Sala de Bastidores |
| 6         | I.S. Feminina      |
| 7         | I.S. Masculino     |
| 8         | I.S. Deficientes   |
| 9         | Sala do Servidor   |
| 10        | Escadas            |
| 11        | Copa               |

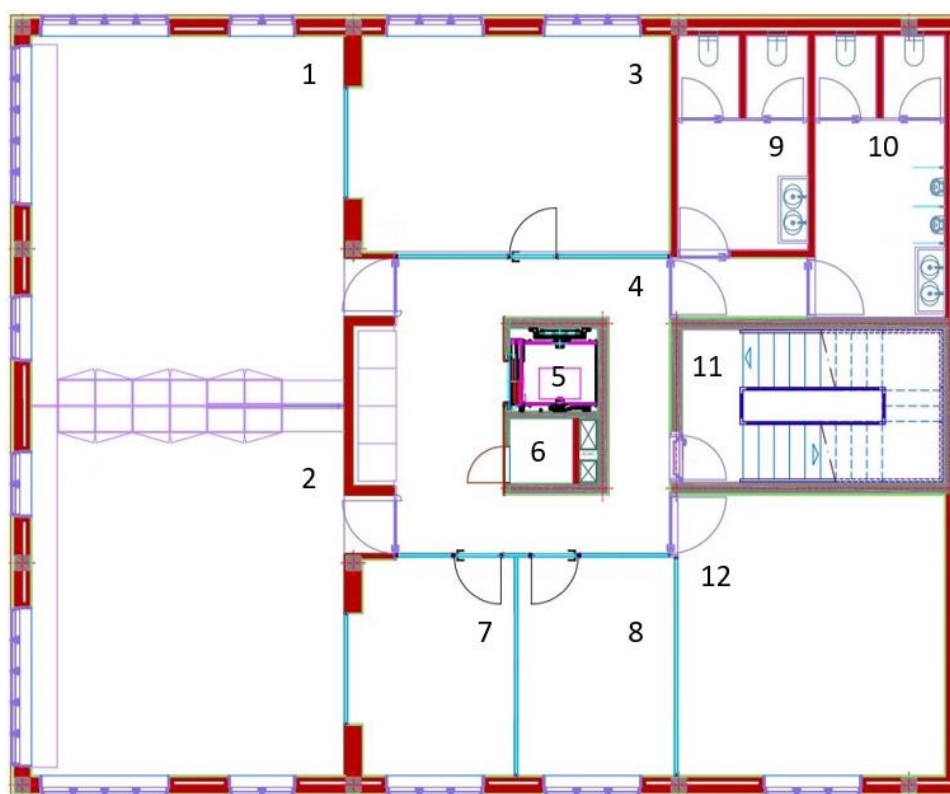


**Figura 18** - Planta do Piso 1 do edifício de escritórios

**Tabela 3** - Legenda relativa à Figura 18

| ID | Descrição          |
|----|--------------------|
| 1  | Escritório         |
| 2  | Escritório         |
| 3  | Sala de Reuniões   |
| 4  | Hall               |
| 5  | Elevador           |
| 6  | Sala de Bastidores |
| 7  | Escritório         |
| 8  | Escritório         |
| 9  | I.S. Femininas     |
| 10 | I.S. Masculinas    |
| 11 | Escadas            |
| 12 | Sala de Reuniões   |

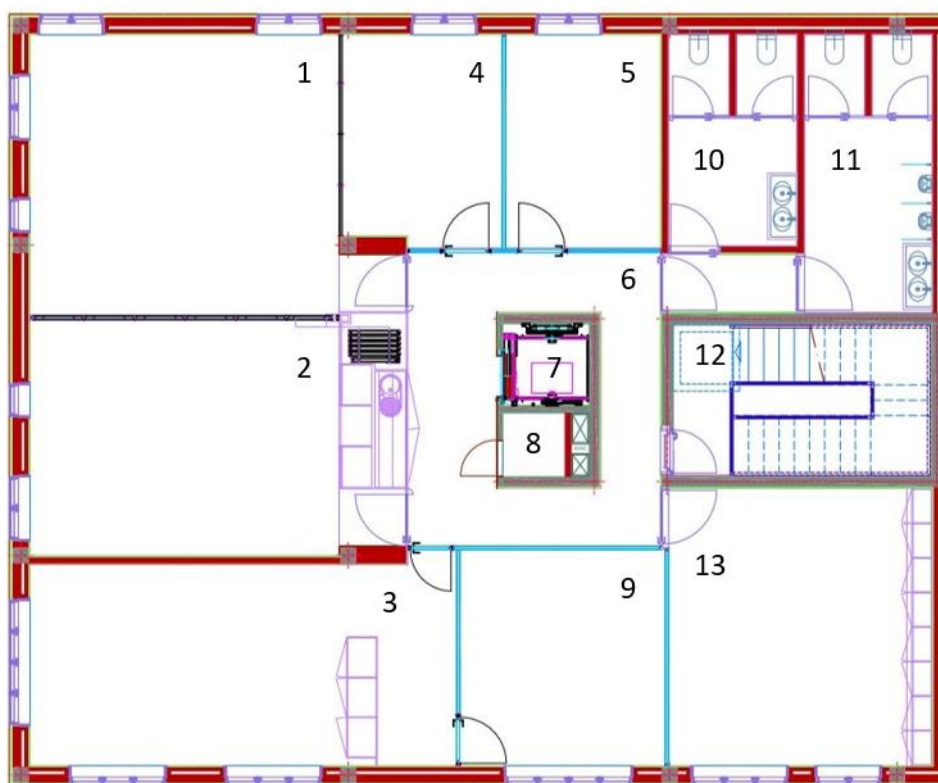


**Figura 19** - Planta do Piso 2 do edifício de escritórios

**Tabela 4** - Legenda relativa à Figura 19

| ID | Descrição          |
|----|--------------------|
| 1  | Escritório         |
| 2  | Escritório         |
| 3  | Escritório         |
| 4  | Escritório         |
| 5  | Escritório         |
| 6  | Hall               |
| 7  | Elevador           |
| 8  | Sala de Bastidores |
| 9  | Arquivos           |
| 10 | I.S. Feminino      |
| 11 | I.S. Masculino     |
| 12 | Escadas            |
| 13 | Sala de Reuniões   |

Como referenciado no Subcapítulo 3.1.1, o modelo concebido no Google SketchUp não passa de um modelo 3D do edifício de escritórios considerado, não possuindo quaisquer das informações necessárias à simulação. Posto isto, é necessário introduzir essas informações. Assim, já no EnergyPlus, são definidos os materiais constituintes da envolvente, vãos envidraçados e porta.

As propriedades dos materiais constituintes da envolvente foram consideradas de acordo com o ITE 50, desenvolvido e aprovado pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil, e o relatório *The Harmonisation of Thermal Properties of Building Materials* e apresentadas nas seguintes tabelas [60] [79].

**Tabela 5** - Constituição assumida para as paredes exteriores presentes no modelo (exterior para interior)

| Material    | Espessura (m) | Condutividade (W/m. K) | Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> ) | Calor Específico (J/kg. K) |
|-------------|---------------|------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| Reboco      | 0,02          | 1,8                    | 2000                                | 1050                       |
| Alvenaria   | 0,15          | 0,39                   | 1200                                | 920                        |
| XPS         | 0,04          | 0,037                  | 30                                  | 1550                       |
| Caixa de Ar | 0,04          | -                      | -                                   | -                          |
| Alvenaria   | 0,07          | 0,39                   | 1200                                | 920                        |
| Reboco      | 0,02          | 1,8                    | 2000                                | 1050                       |

**Tabela 6** - Constituição assumida para as paredes interiores presentes no modelo

| Material  | Espessura (m) | Condutividade (W/m. K) | Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> ) | Calor Específico (J/kg. K) |
|-----------|---------------|------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| Reboco    | 0,02          | 1,8                    | 2000                                | 1050                       |
| Alvenaria | 0,11          | 0,39                   | 1200                                | 920                        |
| Reboco    | 0,02          | 1,8                    | 2000                                | 1050                       |

**Tabela 7** - Constituição do pavimento do Piso 0 (exterior para interior)

| Material                    | Espessura (m) | Condutividade (W/m. K) | Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> ) | Calor Específico (J/kg. K) |
|-----------------------------|---------------|------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| Betão                       | 0,15          | 2,2                    | 2300                                | 900                        |
| Betonilha                   | 0,10          | 1,65                   | 2300                                | 900                        |
| Revestimento madeira/soalho | -             | 0,14                   | 650                                 | 1200                       |

**Tabela 8** - Constituição da cobertura do edifício (exterior para interior)

| Material        | Espessura (m) | Condutividade (W/m. K) | Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> ) | Calor Específico (J/kg. K) |
|-----------------|---------------|------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| XPS             | 0,10          | 0,037                  | 30                                  | 1550                       |
| Betonilha       | 0,10          | 1,65                   | 2300                                | 900                        |
| Betão           | 0,25          | 2,2                    | 2300                                | 900                        |
| Caixa de Ar     | 0,15          | -                      | -                                   | -                          |
| Gesso Cartonado | 0,012         | 0,25                   | 750                                 | 1090                       |

**Tabela 9** - Constituição do pavimento interior (exterior para interior)

| Material                    | Espessura (m) | Condutividade (W/m. K) | Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> ) | Calor Específico (J/kg. K) |
|-----------------------------|---------------|------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| Gesso Cartonado             | 0,012         | 0,25                   | 750                                 | 1090                       |
| Caixa Vertical              | 0,15          | -                      | -                                   | -                          |
| Betão                       | 0,15          | 2,2                    | 2300                                | 900                        |
| Betonilha                   | 0,10          | 1,65                   | 2300                                | 900                        |
| Revestimento Madeira/Soalho | -             | 0,14                   | 650                                 | 1200                       |

À semelhança das propriedades dos materiais constituintes da envolvente, também as propriedades dos constituintes da porta e janelas exteriores foram consideradas de acordo com o ITE 50. Para efeitos da simulação não foram consideradas as portas e vão envidraçados interiores visto que os seus efeitos não iriam mudar significativamente os resultados obtidos. Na Tabela 10 e Tabela 11 estão presentes mais detalhadamente os constituintes das janelas e porta, respetivamente, e as respetivas propriedades dos materiais [60].

**Tabela 10** - Constituição das janelas exteriores (exterior para interior)

| Material    | Espessura (m) | Condutividade (W/m. K) | Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> ) | Calor Específico (J/kg. K) |
|-------------|---------------|------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| Vidro       | 0,003         | 0,9                    | -                                   | -                          |
| Caixa de Ar | 0,013         | -                      | -                                   | -                          |
| Vidro       | 0,003         | 0,9                    | -                                   | -                          |

**Tabela 11** - Constituição da porta exterior (exterior para interior)

| Material            | Espessura (m) | Condutividade (W/m. K) | Massa Volúmica (kg/m <sup>3</sup> ) | Calor Específico (J/kg. K) |
|---------------------|---------------|------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| Superfície Metálica | -             | 45,28                  | 7824                                | 500                        |
| Islamite            | 0,025         | 0,03                   | 43                                  | 1210                       |
| Superfície Metálica | -             | 45,28                  | 7824                                | 500                        |

Considerando a caracterização apresentada por Michaël Kummert et al. [80], é possível chegar à seguinte definição de zona térmica: espaço, ou agrupamento de espaços sob influências externas e utilizações semelhantes, onde se supõe que a temperatura seja uniforme e a sua variação similar. A utilização de zonas térmicas no âmbito da modelação do edifício é bastante benéfica uma vez que, em edifícios de maiores dimensões, permite agrupar espaços físicos simplificando a simulação. Sendo que o edifício de escritórios considerado possui um total de 12 escritórios e salas de reuniões, seria algo natural agrupar alguns destes espaços uma vez que possuem a mesma utilização e, muitos deles influências exteriores semelhantes,

mas tal não acontece. Sendo os escritórios e salas de reuniões espaços climatizados, estes têm de ser considerados à partida como zonas térmicas, pois, apesar de imensas semelhanças, a variação de temperatura pode ser feita de maneira diferente, tendo por base o termostato de cada zona.

Analisando a constituição do Piso 0 através da Figura 17, é possível identificar a presença de dois gabinetes e perceber que ambos possuem influências externas e utilizações semelhantes, sendo assim, possível agrupar os mesmos numa só zona térmica (Z0\_1). Além dos gabinetes, não é possível agrupar quaisquer outros espaços. Assim sendo, é possível chegar às marcações térmicas observadas na Figura 20.

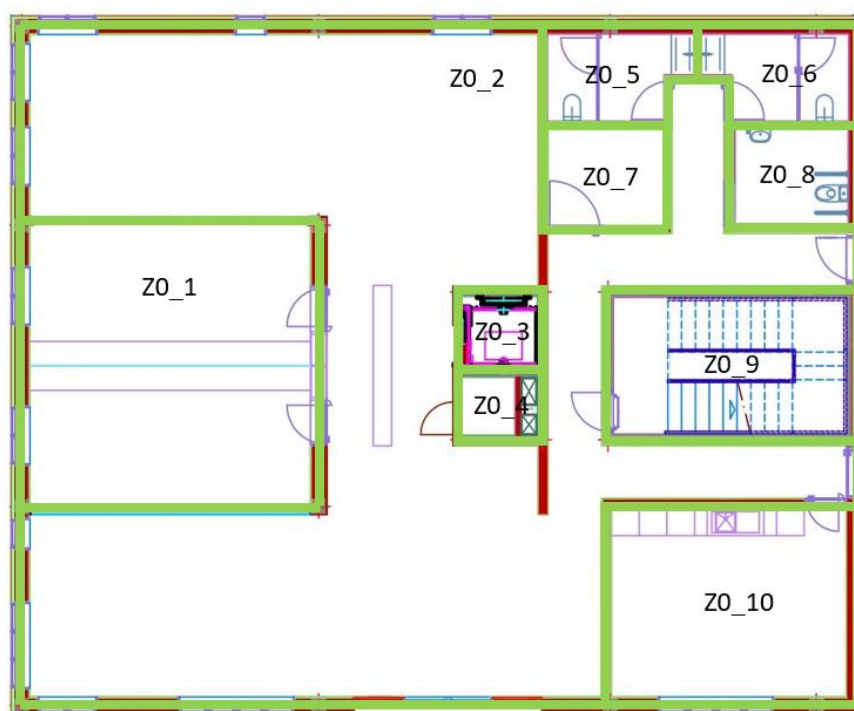


**Figura 20** - Marcações das zonas térmicas para o Piso 0

Apesar de ser constituído maioritariamente por escritórios e salas de reuniões, não é possível agrupar qualquer espaço no Piso 1. Como já referido anteriormente, isto acontece devido à climatização dos espaços, uma vez que a climatização de cada escritório ou sala de reuniões será feita de forma independente (Tabela 12). Relativamente aos restantes espaços presentes, não é possível agrupar nenhum uma vez que possuem todos de utilizações diferentes. Desta forma, as marcações térmicas executadas relativamente ao Piso 1 podem ser observadas na Figura 21.



**Figura 21** - Marcações das zonas térmicas para o Piso 1

Por fim, na Figura 22 está presente o zoneamento térmico considerado para o Piso 2. Também não é possível agrupar nenhum espaço pois este piso partilha a mesma adversidade que o Piso 1.

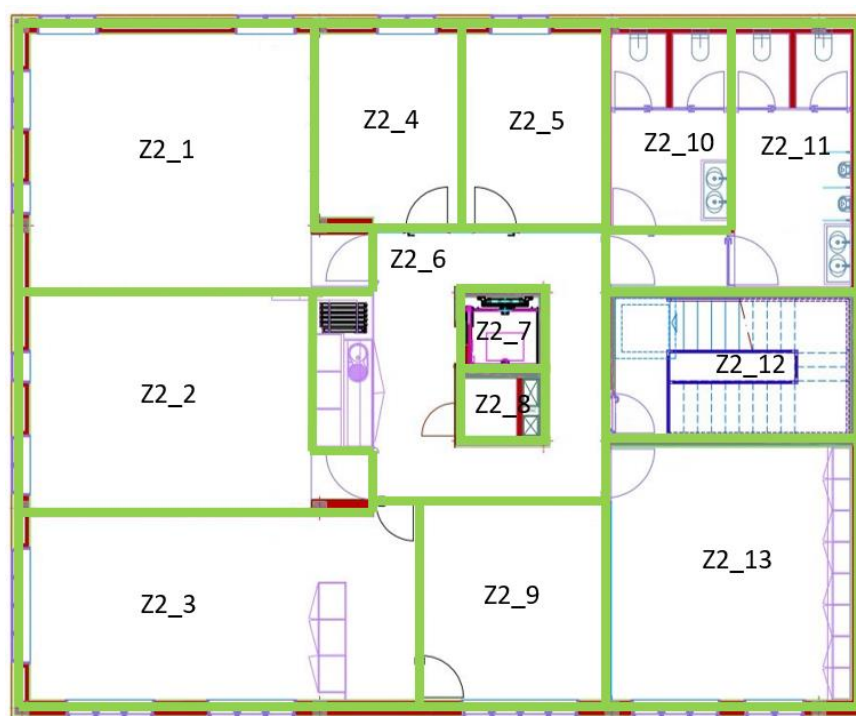


**Figura 22** - Marcações das zonas térmicas para o Piso 2

A climatização do edifício é feita de modo centralizado, recorrendo a uma bomba de calor VRV da marca *Daikin* e modelo *RXYQ8T*, colocada na cobertura do edifício. Ligadas a esta unidade exterior, existem unidades interiores de conduta, estando distribuídas pelos diversos escritórios e salas de reuniões. Com a finalidade de simplificar a modelação, foi considerado o objeto *Ideal System*. Este permite igualar o funcionamento do sistema climatização VRV utilizando um modelo computacional simplificado, obtendo resultados idênticos. Foram assim consideradas para as unidades interiores potências de aquecimento e arrefecimento típicas tendo em conta a dimensão e a utilização dos espaços. Assim, considerou-se três níveis de potências diferentes, nomeadamente: a variante de menores potências, que possui uma potência de aquecimento de 3,6 kW e uma potência de refrigeração de 2,8 kW, a variante de médias potências, possui uma potência de aquecimento de 5,1 kW e 4,2 kW de potência de refrigeração e, por fim, a variante de maiores potências, que possui 6 kW e 5 kW de potência de aquecimento e potência de refrigeração, respetivamente. Assim sendo, foram consideradas as menores potências em espaços até 25 m<sup>2</sup> e as maiores potências em espaços superiores a 40 m<sup>2</sup>, sendo que o nível de médias potências é utilizado em espaços cuja área seja entre os 25 m<sup>2</sup> e 40 m<sup>2</sup>. Na Tabela 12 estão presentes as diversas zonas climatizadas, bem como a sua área, informações sobre as potências consideradas e informações sobre o sistema VRV (potência de aquecimento e refrigeração, COP e EER).

**Tabela 12** - Informações relativas ao sistema de climatização do edifício de escritórios e o simplificado

| Zonas climatizadas   | Área de atuação (m <sup>2</sup> ) | Potência de Aquecimento (W) | COP  | Potência de Refrigeração (W) | EER  |
|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------|------|------------------------------|------|
| Unidade Exterior VRV | -                                 | 25000                       | 4,54 | 22400                        | 4,30 |
| Z1_1                 | 45,8                              | 6000                        | -    | 5000                         | -    |
| Z1_2                 | 45,8                              | 6000                        | -    | 5000                         | -    |
| Z1_3                 | 26,6                              | 5100                        | -    | 4200                         | -    |
| Z1_7                 | 13,5                              | 3600                        | -    | 2800                         | -    |
| Z1_8                 | 13,4                              | 3600                        | -    | 2800                         | -    |
| Z1_12                | 29,1                              | 5100                        | -    | 4200                         | -    |
| Z2_1                 | 35,7                              | 5100                        | -    | 4200                         | -    |
| Z2_2                 | 30,7                              | 5100                        | -    | 4200                         | -    |
| Z2_3                 | 34,3                              | 5100                        | -    | 4200                         | -    |
| Z2_4                 | 13,6                              | 3600                        | -    | 2800                         | -    |
| Z2_5                 | 13,6                              | 3600                        | -    | 2800                         | -    |
| Z2_13                | 29,1                              | 5100                        | -    | 4200                         | -    |

Apesar de cada piso possuir um pé direito médio de 3 metros, valor também considerado para as zonas térmicas, verificou-se uma exceção. Sendo o elevador um único volume que se prolonga pelos três pisos, foram agrupadas as zonas térmica Z0\_3, Z1\_5 e Z2\_7 numa só zona com um pé direito médio de 9 metros.

O edifício está orientado a 16 graus de Norte no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio possuindo, na fachada Este, um armazém diretamente anexado, como é possível observar pela Figura 16. O armazém possui o mesmo pé-direito que o edifício sendo que, influencia as trocas de calor através da fachada Este. Apesar deste bloco não possuir qualquer tipo de climatização, é essencial ter em conta o mesmo visto fazer sombra ao edifício e impossibilitar o contacto direto da fachada este com o exterior. Para simular a presença do armazém foi colocado em anexo um volume de dimensões semelhantes ao mesmo. Além do armazém, não existe mais nenhum edifício/obstáculo que provoque sombreamento e influencie as trocas de

calor do edifício. Na Figura 23 é possível observar a construção geométrica do edifício de escritórios desenvolvida através do software *Google SketchUp*.

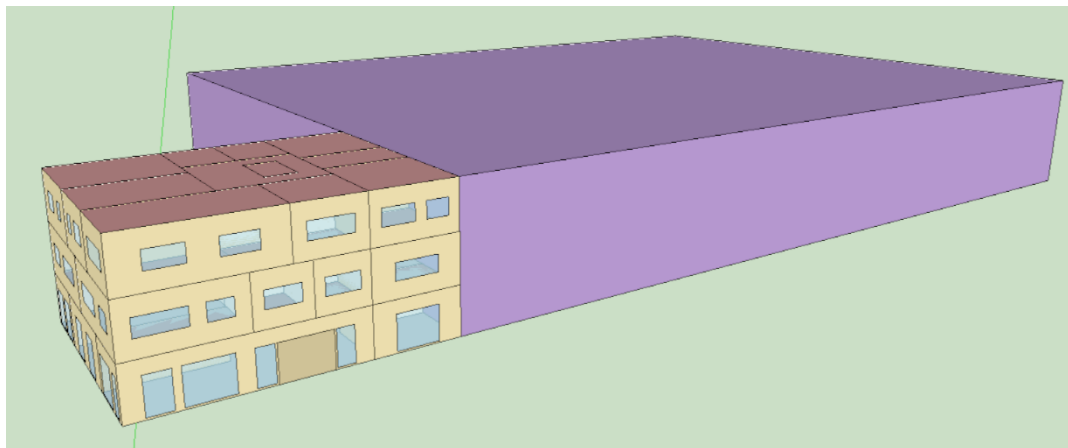


**Figura 23** - Construção geométrica do edifício de escritórios desenvolvida através do Google SketchUp

Ao analisarmos um edifício, independentemente da sua utilização, é possível constatar que este possui dois tipos de ganhos térmicos: através das cargas internas (ocupação, iluminação e equipamentos elétricos) e radiação solar incidente. Sendo que este edifício não é exceção, é necessário definir as mesmas de acordo com as devidas utilizações e localização do edifício, tal como descrito nos seguintes pontos:

- Ocupação

Como já relatado, através da Tabela 2, Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 12, é possível constatar que o edifício de escritórios em análise possui diversos espaços com utilização variável e diferentes áreas. Posto isto, é natural que a ocupação de cada espaço varie mediante estes dois parâmetros. Para efeitos de simulação, e com o objetivo de simplificar um pouco a mesma uma vez o comportamento dos ocupantes ser bastante imprevisível e dinâmico, foram apenas considerados como ocupados quatro tipos de espaço presentes no edifício: escritórios, gabinetes, salas de reuniões e copa.

Relativamente à ocupação dos escritórios, e à semelhança do que foi feito por Vítor Gomes et al. [81], considerou-se como referência os valores impostos pelo Decreto-Lei n.º 79/2006, 15 m<sup>2</sup>/ocupante para este tipo de espaço. Assim, a ocupação dos escritórios varia entre 1 e 3 ocupantes [82]. Em relação aos horários dos ocupantes para este tipo de espaço, foi considerado o horário de trabalho de referência adotado em Portugal, das 09:00h às 17:00h com uma pausa para almoço de uma hora, com início às 13:00h. No que diz respeito aos gabinetes, estes

seguem o mesmo princípio tanto para a ocupação considerada como para o horário de ocupação.

Por fim, tanto para as salas de reuniões como para a copa foi assumida uma ocupação pontual. No caso das salas de reuniões foi considerada uma reunião de 4 a 5 pessoas, todos os dias, entre as 16:00h e as 17:00h. Para a zona da copa, foi assumida uma ocupação de 6 pessoas durante a pausa para almoço.

Relativamente ao valor de carga térmica total libertada por cada ocupante, foi considerado o valor de referência considerado pelo ASHRAE relativamente a uma atividade de escritório, cerca de 120 W/ocupante.

- Iluminação

Dependendo da utilização associada a um determinado espaço, a iluminação recomendada tende a variar. Assim optou-se por um sistema de iluminação adaptativo, variando os valores de luminosidade pretendidos em função dessas mesmas necessidades e utilizações.

Os valores de luminosidade adotados foram considerados tendo em conta as recomendações dadas pelo CIBSE. Assim, assumiu-se um valor de 500 lux para os escritórios, salas de reuniões e gabinetes e 300 lux para a copa. Para os restantes espaços considerou-se 100 lux. Relativamente aos perfis de utilização, estes foram considerados tendo em conta o tabelado pelo Decreto-Lei n.º 79/2006 para os escritórios [82].

À semelhança do que foi feito em [81], os consumos utilizados considerados foram de 3,75 W/m<sup>2</sup>.

- Equipamentos Elétricos

Com o intuito de calcular as cargas térmicas associadas aos equipamentos elétricos, foram considerados novamente os valores indicados pelo Decreto-Lei n.º 79/2006. Assim sendo, foi considerado um valor de 15 W/m<sup>2</sup> para os escritórios, gabinetes e salas de reuniões e 200 W/m<sup>2</sup> para a copa [82].

Em relação aos horários de utilização dos mesmos, no caso dos equipamentos presentes nas zonas de escritórios e gabinetes assume-se uma utilização a 100% durante o horário de trabalho de referência adotado em Portugal e uma redução de 85% fora desse horário. No que diz respeito aos equipamentos eletrónicos presentes na copa e nas salas de reuniões

considera-se uma utilização total apenas durante a hora de almoço e reuniões, respetivamente. Fora esses momentos considera-se apenas uma utilização de 30% para a copa e 15% para as salas de reuniões.

- Radiação Solar

Uma vez que os ganhos por radiação solar, proporcionais à quantidade de radiação que passa pelos vãos envidraçados, dependem exclusivamente do clima, da localização e orientação do edifício é necessário definir as mesmas.

Graças a uma particularidade do software de simulação EnergyPlus, ao invés de inserir manualmente a variação da radiação solar numa determinada região, é possível transferir diretamente do site oficial do mesmo um documento onde possui já todas essas informações e anexar esse mesmo documento à simulação. Este documento, do tipo EPW, possui todas as informações necessárias sobre o clima do local considerado com o objetivo de realizar uma simulação o mais fiel à realidade possível. Sendo que o edifício de escritórios se localiza na Maia, foi considerado o ficheiro relativo ao clima na região do Porto [59].

Relativamente à orientação do edifício, e como referido anteriormente, o mesmo possui um desvio de 16 graus no sentido contrário dos ponteiros do relógio em relação a norte.

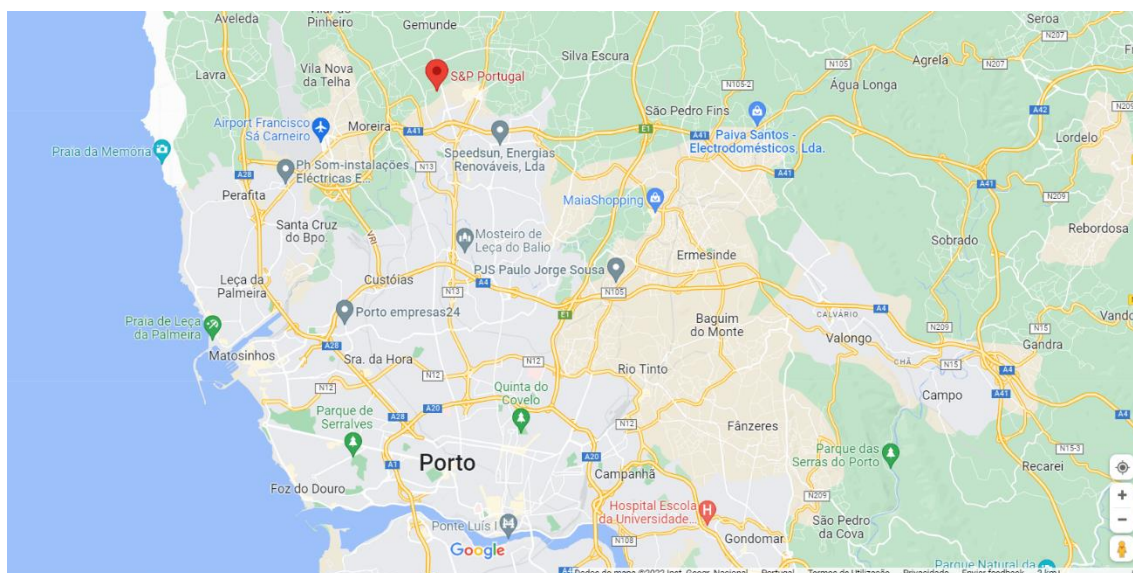


Figura 24 - Localização do edifício de escritórios em estudo

## 4.2 Resultados

No presente subcapítulo, além de descrito o processo de calibração do modelo RC, são também expostos todos os resultados obtidos através da aplicação do algoritmo desenvolvido, referentes aos três cenários de estudo, nomeadamente:

- **Cenário 1:** o sistema de climatização não é controlado pelo algoritmo de otimização, sendo apenas chamado a intervir, aquecendo ou refrigerando o espaço, quando a temperatura interior toma valores fora de um determinado intervalo;
- **Cenário 2:** o sistema de climatização é controlado pelo algoritmo de otimização desenvolvido a fim de reduzir apenas os custos de energia elétrica de cada escritório.
- **Cenário 3:** o sistema de climatização é controlado pelo algoritmo de otimização desenvolvido a fim de reduzir tanto os custos de energia elétrica de cada escritório, como também o pico de potência total do edifício;

### 4.2.1 Calibração do Modelo RC

Uma vez que o algoritmo de otimização desenvolvido é algo genérico e pode ser aplicado em qualquer edifício, é necessário calibrar o modelo RC. Como já referido anteriormente, os modelos RC conseguem capturar com exatidão aceitável as dinâmicas térmicas dos demais edifícios através de um circuito RC. De forma a o fazer, é necessário calcular os valores das resistências e condensadores através de dados recolhidos previamente [61] [66]. Para isso, foram usados dados simulados provenientes do software EnergyPlus referentes ao edifício de escritórios considerado. Ainda antes de proceder para o treino do modelo R2C2, é necessário definir o período de simulação.

Apesar de em [69] ser referido que este tipo de modelo deve ser apenas utilizado para fazer previsões num período máximo de 12 horas, Rouchier et al. apresentam resultados semelhantes às medidas adquiridas mesmo considerando um período de 96 horas como é possível observar pela Figura 25 [70].

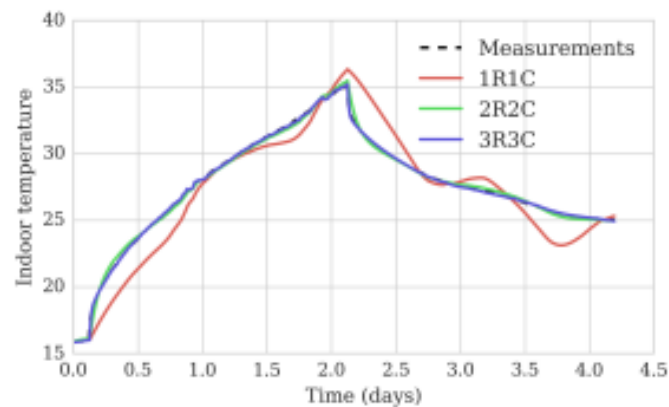


**Figura 25** - Resultados obtidos por Rouchier em [70]

Tendo em conta estas duas informações, com o objetivo de obter os melhores resultados possíveis, foram testados, com o apoio do software MATLAB, cinco distintos períodos de simulação (12, 24, 48, 72 e 96 horas). Através de uma análise aos gráficos obtidos (Figura 26 a 30), é possível observar que quanto menor for o tempo de simulação mais precisos serão os resultados. Ainda assim, apenas os resultados obtidos considerando 72 e 96 horas são pouco precisos e, conseqüentemente inutilizáveis no âmbito desta dissertação. Tanto os períodos de simulação de 12, 24 e 48 horas apresentam boas previsões. Posto isto, visto que é vantajoso para o algoritmo de otimização um maior período de simulação a fim de explorar e beneficiar da inércia térmica, foi considerado um período de simulação de 48 horas.

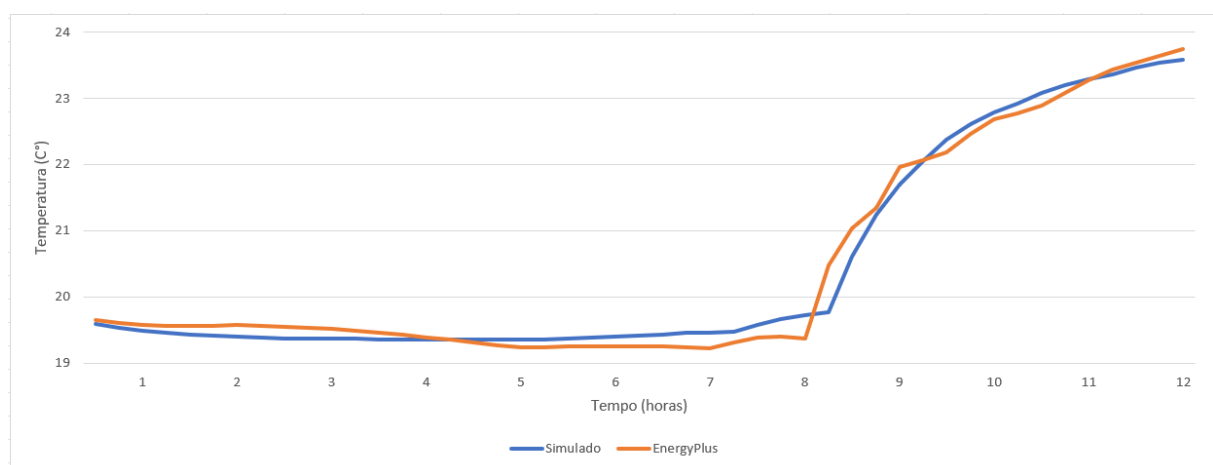


**Figura 26** - Resultado obtido aquando considerado um período de simulação de 12 horas

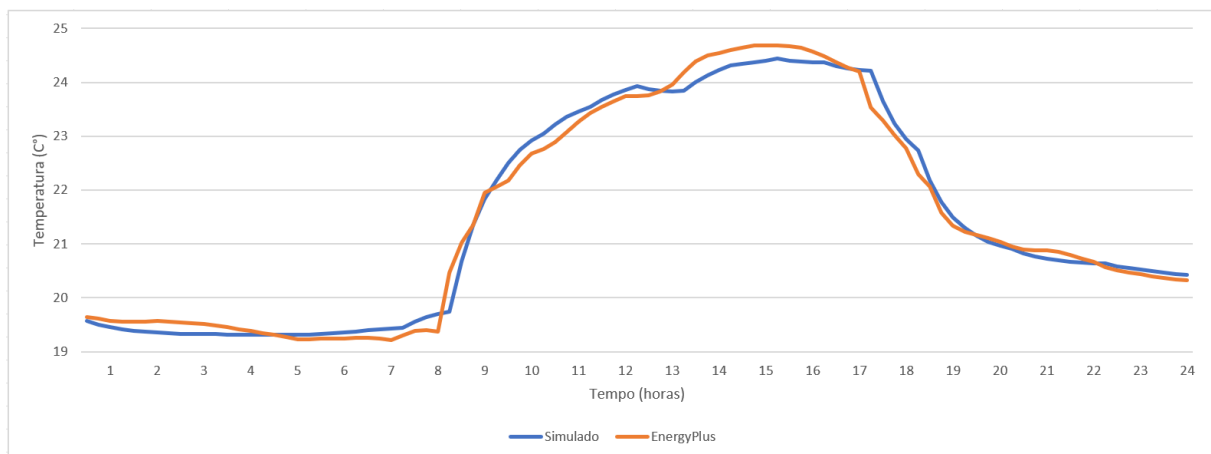


**Figura 27** - Resultado obtido aquando considerado um período de simulação de 24 horas

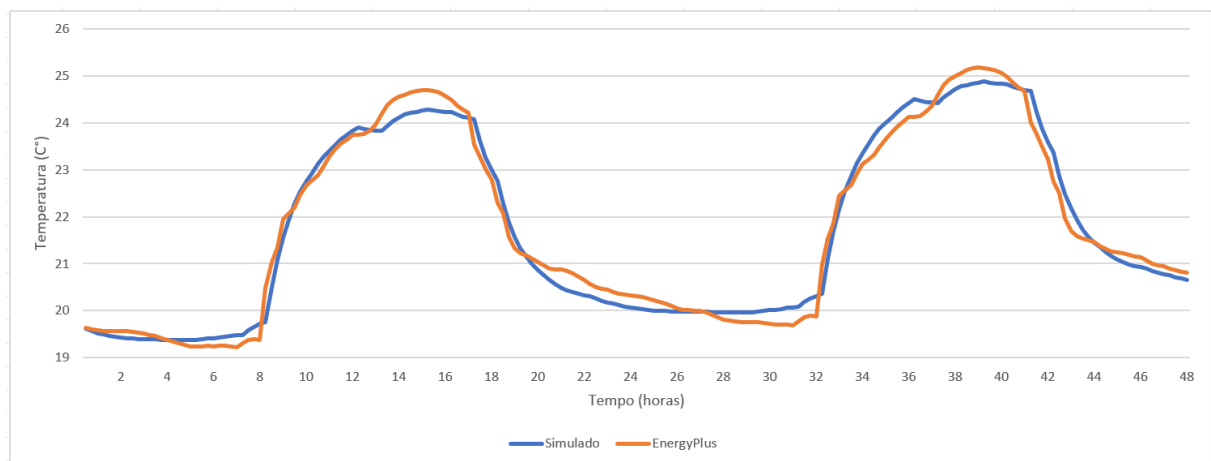


**Figura 28** - Resultado obtido aquando considerado um período de simulação de 48 horas

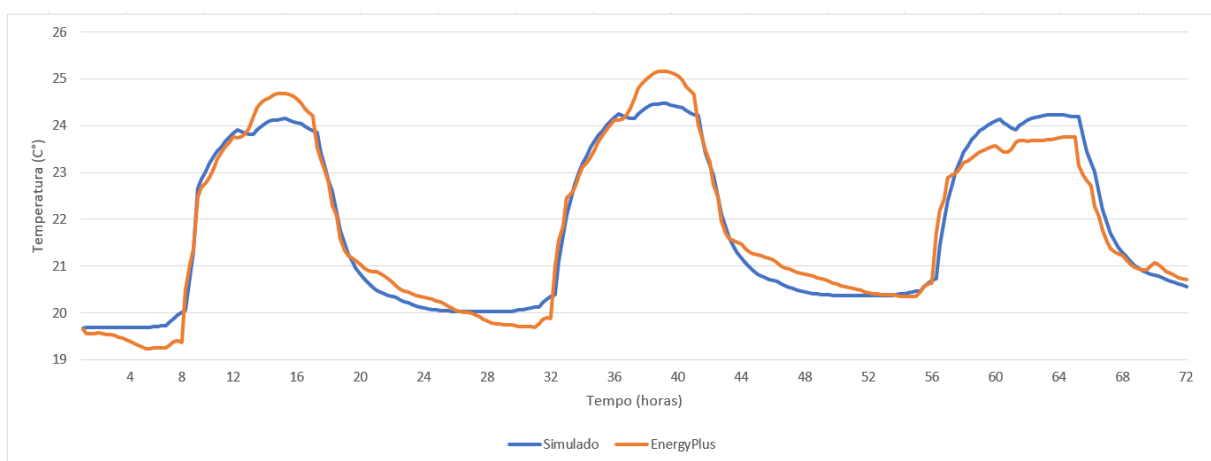


**Figura 29** - Resultado obtido aquando considerado um período de simulação de 72 horas

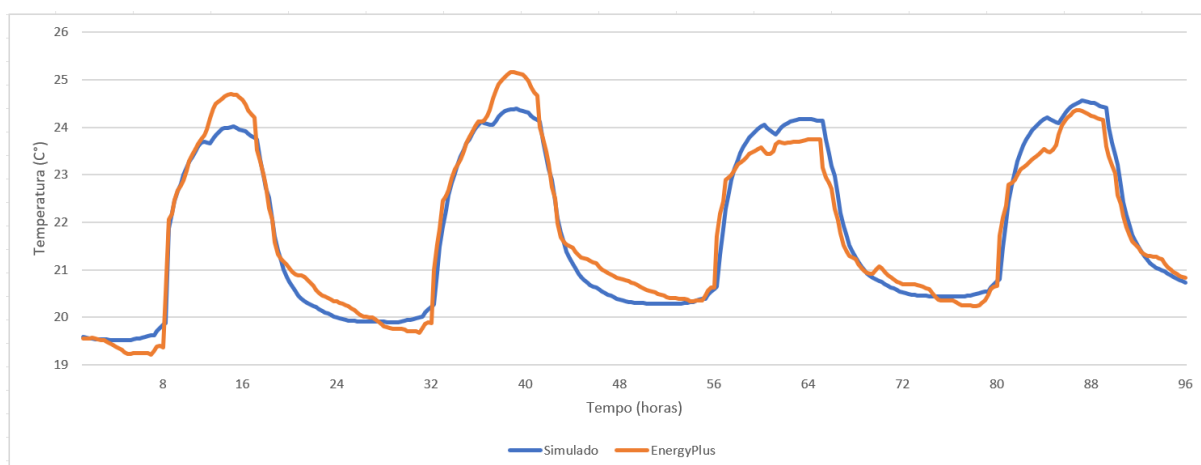


**Figura 30** - Resultado obtido aquando considerado um período de simulação de 96 horas

Já com o período de simulação definido procedeu-se para a otimização dos diversos parâmetros do modelo a fim de encontrar as combinações que melhor retratem as dinâmicas térmicas das diversas zonas em análise. Sendo que de estação para estação o que tende a variar, além da temperatura exterior, é a radiação solar incidente, seria espectável que os valores de  $R_e$ ,  $R_i$ ,  $C_e$  e  $C_i$  se mantivessem constantes uma vez que a constituinte física do edifício não muda. Assim procedeu-se para a otimização dos parâmetros considerando que, de estação para estação, apenas  $A_e$  e  $A_i$  variam.

**Tabela 13** - Parâmetros obtidos utilizando apenas um modelo RC

|           | $C_i$     | $R_i$     | $A_i$    | $C_e$    | $R_e$   | $A_e$    |
|-----------|-----------|-----------|----------|----------|---------|----------|
| Inverno   | 88049,728 | 0,0496418 | 0,162184 | 46409255 | 1,62625 | 14,38734 |
| Primavera |           |           | 0,089975 |          |         | 4,895768 |
| Verão     |           |           | 0,080336 |          |         | 11,33899 |
| Outono    |           |           | 0,134126 |          |         | 10,37057 |

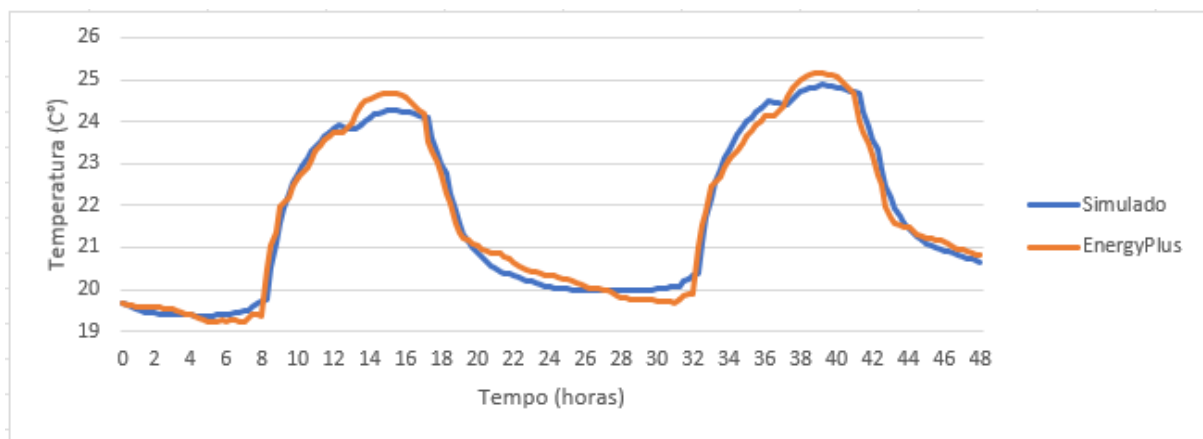


**Figura 31** - Comparação entre resultado obtido através da utilização de apenas um modelo RC e EnergyPlus no inverno

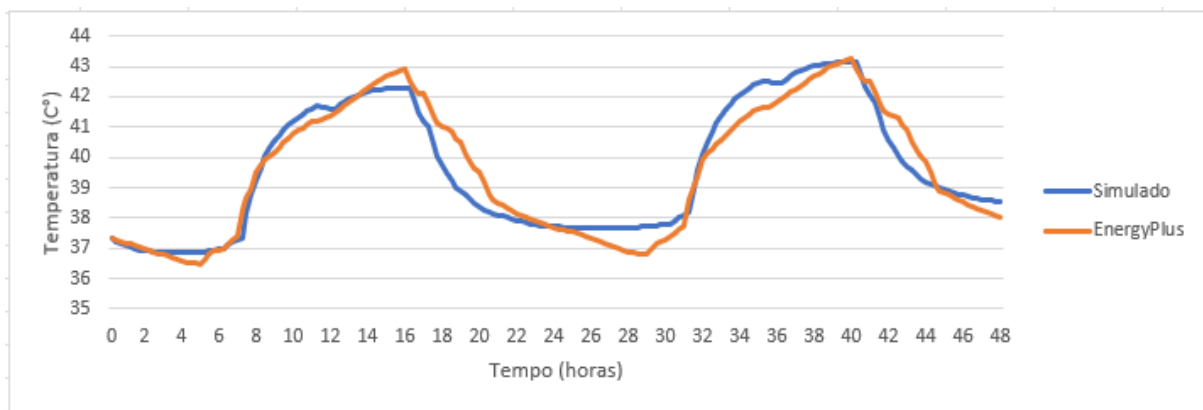


**Figura 32** - Comparação entre resultado obtido através da utilização de apenas um modelo RC e EnergyPlus na primavera

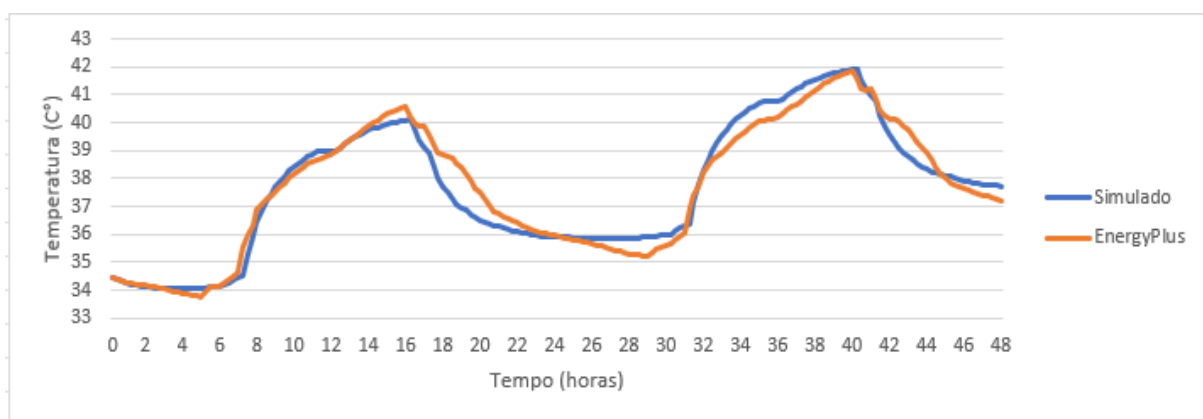


**Figura 33** - Comparação entre resultado obtido através da utilização de apenas um modelo RC e EnergyPlus no verão

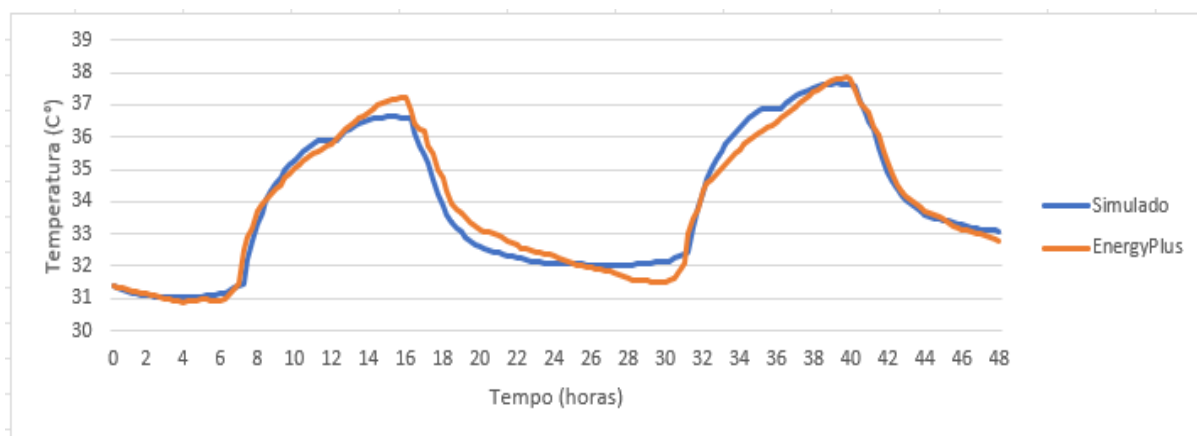


**Figura 34** - Comparação entre resultado obtido através da utilização de apenas um modelo RC e EnergyPlus no outono

Através de uma análise aos gráficos obtidos é possível constatar que um único modelo RC não é capaz de prever o comportamento de uma zona para todas as estações. Se, tal como indicado em [69], se optasse por um tempo de simulação de 12 horas, possivelmente, não se registaria este comportamento. Ainda assim, seria pouco benéfico para o algoritmo de otimização, o principal foco desta dissertação. Posto isto, foi considerado um modelo RC distinto para cada uma das estações. Nas seguintes tabelas estão representados os valores ótimos obtidos aquando feita esta consideração (Tabela 14 a 17).

**Tabela 14** - Parâmetros ótimos obtidos para o inverno aquando considerado um modelo RC por estação

| Zonas | $C_i$    | $R_i$    | $A_i$    | $C_e$      | $R_e$    | $A_e$     |
|-------|----------|----------|----------|------------|----------|-----------|
| Z1_1  | 115817,7 | 0,040107 | 0,157969 | 26628991,8 | 1,848667 | 6,665796  |
| Z1_2  | 88049,73 | 0,049642 | 0,162183 | 46409254,7 | 1,626257 | 14,387339 |
| Z1_3  | 65800,02 | 0,032577 | 0,115207 | 100949790, | 3,572689 | 15,585181 |
| Z1_7  | 39799,44 | 0,101603 | 0,103805 | 47936649,9 | 5,015017 | 15,441295 |
| Z1_8  | 37928,78 | 0,099807 | 0,122932 | 15907569,7 | 4,995903 | 4,344319  |
| Z1_12 | 83636,5  | 0,045308 | 0,186124 | 72626904,4 | 3,224278 | 15,693726 |
| Z2_1  | 102106,2 | 0,041621 | 0,104512 | 63656330,5 | 2,806462 | 15,670239 |
| Z2_2  | 70376,44 | 0,047844 | 0,052287 | 54013723,3 | 4,205719 | 15,699841 |
| Z2_3  | 70536,56 | 0,062066 | 0,111844 | 58826705,4 | 1,854434 | 14,884222 |
| Z2_4  | 40596,43 | 0,070450 | 0,026637 | 31889831,1 | 5,004427 | 4,794063  |
| Z2_5  | 23580,92 | 0,074909 | 0,038493 | 18797929,3 | 5,035396 | 2,530044  |
| Z2_13 | 62621,42 | 0,047394 | 0,186124 | 77504640,1 | 3,553191 | 10,78246  |

**Tabela 15** - Parâmetros ótimos obtidos para a primavera aquando considerado um modelo RC por estação

| Zonas | $C_i$    | $R_i$    | $A_i$    | $C_e$      | $R_e$    | $A_e$    |
|-------|----------|----------|----------|------------|----------|----------|
| Z1_1  | 201713,9 | 0,05678  | 0,000342 | 95934828,9 | 1,90041  | 4,081978 |
| Z1_2  | 141552,7 | 0,066541 | 0,039061 | 87927162,5 | 2,046976 | 4,338496 |
| Z1_3  | 128360,6 | 0,017753 | 0,186119 | 216915823  | 4,030443 | 9,783983 |
| Z1_7  | 76482,8  | 0,058847 | 0,154619 | 91881157,5 | 3,507424 | 6,152563 |
| Z1_8  | 59334,4  | 0,089815 | 0,072892 | 240510881  | 5,433061 | 14,59317 |
| Z1_12 | 130693,7 | 0,033229 | 0,186122 | 163762507  | 3,433841 | 8,254729 |
| Z2_1  | 189695,2 | 0,048883 | 0,000991 | 322900122  | 3,17159  | 15,70631 |
| Z2_2  | 216096,3 | 0,057558 | 0,000549 | 1685586706 | 7,652105 | 15,61594 |
| Z2_3  | 100652,7 | 0,094881 | 9,04E-05 | 425480687  | 3,611368 | 15,06941 |
| Z2_4  | 64221,2  | 0,049417 | 0,036794 | 354963272  | 43,73521 | 15,71811 |
| Z2_5  | 38767,3  | 0,050619 | 0,04846  | 38586653,8 | 25,59372 | 1,625303 |
| Z2_13 | 38767,3  | 0,050619 | 0,04846  | 38586653,8 | 25,59372 | 1,625303 |

**Tabela 16** - Parâmetros ótimos obtidos para o verão aquando considerado um modelo RC por estação

| Zonas | $C_i$    | $R_i$     | $A_i$    | $C_e$       | $R_e$    | $A_e$     |
|-------|----------|-----------|----------|-------------|----------|-----------|
| Z1_1  | 662750,7 | 0,0105170 | 1,333157 | 78659563,6  | 0,415830 | 12,661040 |
| Z1_2  | 470841,7 | 0,010444  | 1,852617 | 73122035,1  | 0,503852 | 15,656180 |
| Z1_3  | 96067,6  | 0,016937  | 0,186118 | 140850519,1 | 4,998125 | 9,697990  |
| Z1_7  | 116621,1 | 0,009232  | 1,598011 | 3741158,4   | 0,474585 | 0,618964  |
| Z1_8  | 149428,2 | 0,008249  | 1,833341 | 8466209,5   | 0,503475 | 0,007803  |
| Z1_12 | 105790,3 | 0,031658  | 0,186107 | 84942867,2  | 3,257322 | 11,343427 |
| Z2_1  | 671959,5 | 0,006797  | 1,571484 | 45008325,3  | 0,450924 | 4,673582  |
| Z2_2  | 939172,5 | 0,005767  | 1,847074 | 132833113,9 | 0,503832 | 14,828370 |
| Z2_3  | 400804,9 | 0,009737  | 1,852830 | 49889879,4  | 0,503824 | 9,098063  |
| Z2_4  | 56578,2  | 0,043655  | 0,053515 | 193349801,5 | 5,037983 | 11,22223  |
| Z2_5  | 31633,6  | 0,048044  | 0,055719 | 3226269,8   | 4,488279 | 0,034942  |
| Z2_13 | 83714,3  | 0,038669  | 0,184269 | 125803025,1 | 2,513791 | 15,714175 |

**Tabela 17** - Parâmetros ótimos obtidos para o outono aquando considerado um modelo RC por estação

| Zonas | $C_i$    | $R_i$    | $A_i$    | $C_e$       | $R_e$    | $A_e$     |
|-------|----------|----------|----------|-------------|----------|-----------|
| Z1_1  | 154578,2 | 0,051167 | 9,48E-09 | 115721626,8 | 2,532311 | 13,351637 |
| Z1_2  | 129297,9 | 0,052560 | 0,146755 | 88222870,49 | 2,535602 | 13,837722 |
| Z1_3  | 95587,5  | 0,024586 | 0,166709 | 184306463,4 | 4,771323 | 13,460518 |
| Z1_7  | 47553,5  | 0,137969 | 0,042630 | 158082,5    | 5,023292 | 0,192098  |
| Z1_8  | 46480,6  | 0,107353 | 0,061751 | 61550019,2  | 5,038516 | 11,312383 |
| Z1_12 | 104400,1 | 0,039789 | 0,185975 | 12818508,7  | 3,871203 | 1,315828  |
| Z2_1  | 137083,3 | 0,047464 | 5,34E-05 | 76287406,1  | 3,946815 | 8,135855  |
| Z2_2  | 133923,6 | 0,049509 | 0,000819 | 33377279,7  | 5,036977 | 3,98385   |
| Z2_3  | 99104,3  | 0,066419 | 0,099093 | 30222527,3  | 5,026976 | 3,888611  |
| Z2_4  | 49933,9  | 0,069179 | 0,006564 | 163735531,7 | 5,038525 | 12,50038  |
| Z2_5  | 29694,5  | 0,068419 | 0,025585 | 9550086,4   | 4,769888 | 0,636558  |
| Z2_13 | 167624,7 | 0,097382 | 0,184021 | 134594,2    | 32,29969 | 0,605458  |

Ao observar as tabelas, é possível constatar que os resultados são bastante semelhantes aos encontrados em [72]. Assim, tendo por base estes resultados partiu-se para a análise das previsões das dinâmicas térmicas. Para isso, como já referido, será considerada um período de simulação de 2 dias (48 horas), sendo que os dias em análise correspondem aos dias extremos de cada estação (dias mais frios no caso do inverno e dias mais quentes nos restantes casos). Nas seguintes figuras estão representados os resultados obtidos considerando exatamente os mesmos *inputs* considerados aquando testado apenas um modelo RC (Z1\_2).

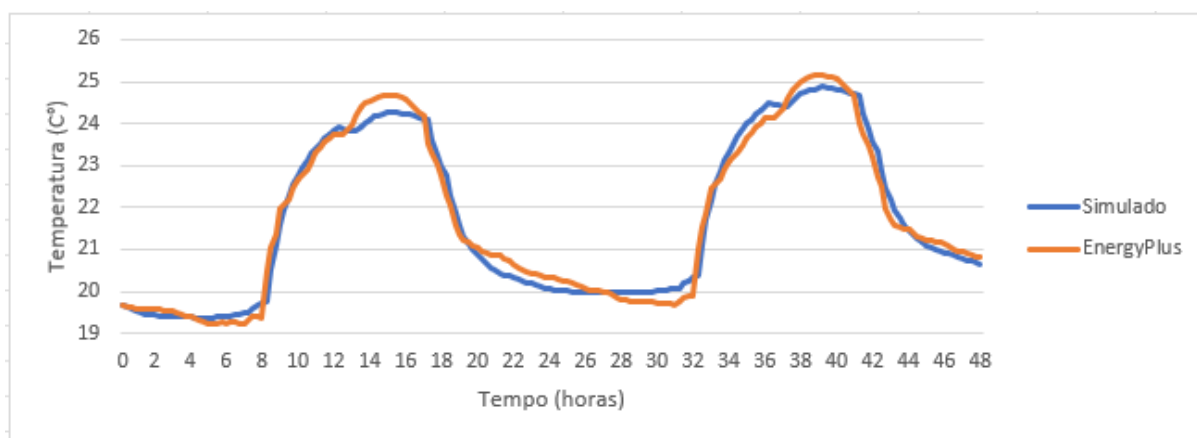


**Figura 35** - Comparação entre resultado obtido através da utilização de um modelo RC por estação e EnergyPlus no inverno

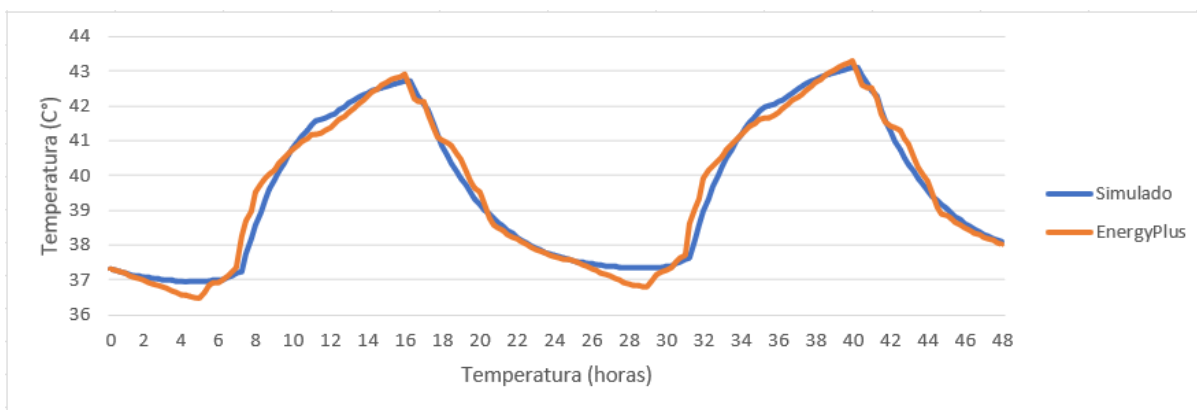


**Figura 36** - Comparação entre resultado obtido através da utilização de um modelo RC por estação e EnergyPlus na primavera

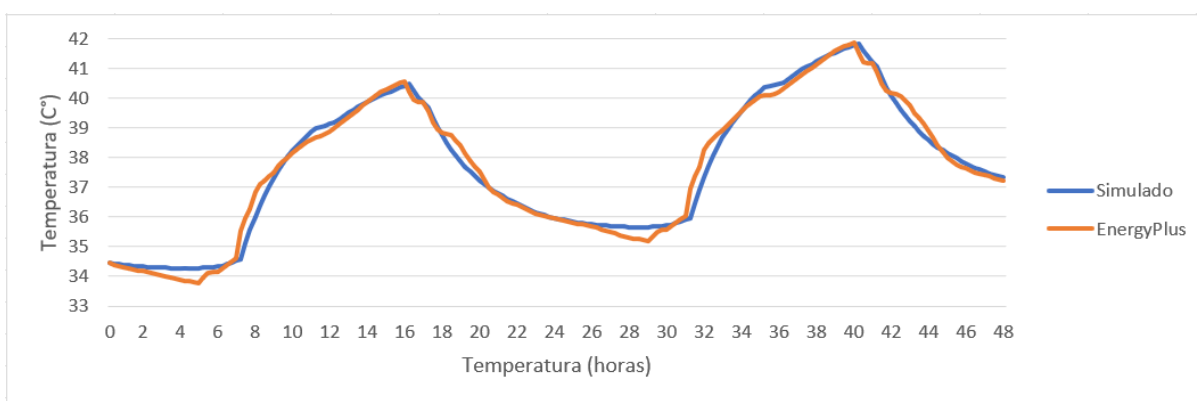


**Figura 37** - Comparação entre resultado obtido através da utilização de um modelo RC por estação e EnergyPlus no verão

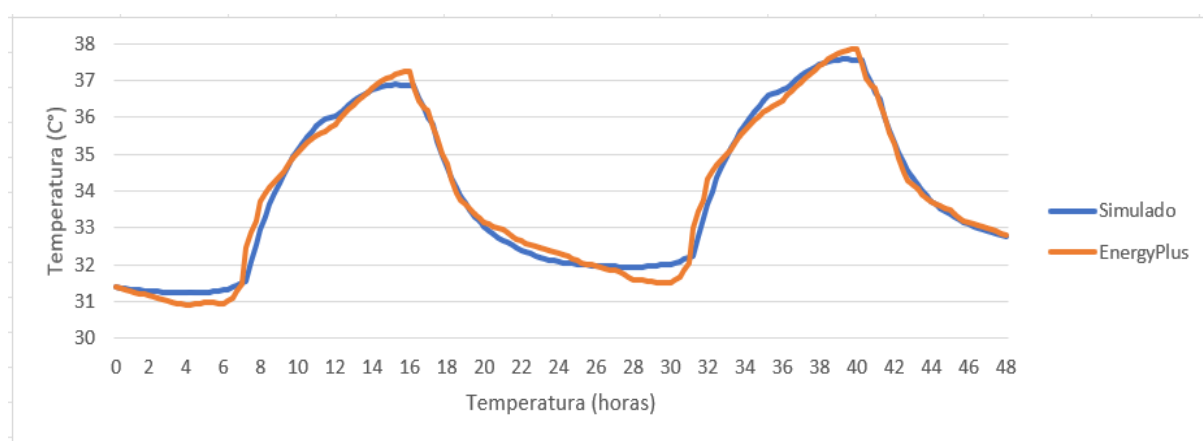


**Figura 38** - Comparação entre resultado obtido através da utilização de um modelo RC por estação e EnergyPlus no outono

Observando os gráficos acima apresentados é possível constatar que, todos apresentam bons resultados no que diz respeito do acompanhamento da temperatura interior. Este é um comportamento comum para todas as zonas térmicas independentemente da estação do ano.

## 4.2.2 Cenário 1

O cenário 1 tem como objetivo ilustrar o cenário mais próximo da realidade antes da aplicação do algoritmo de otimização e será utilizado como base de comparação com os restantes cenários. Neste cenário o sistema de climatização não é controlado pelo algoritmo de otimização, sendo é apenas chamado a intervir, aquecendo ou refrigerando o espaço, quando a temperatura interior toma valores fora de um determinado intervalo. Estes limites foram definidos tendo por base a Portaria n.º 349-D/2013 onde se define que as temperaturas interiores devem estar compreendidas entre 20° e 25° [78].

Visto que um edifício de escritórios possui elevados ganhos internos, é normal que na estação do inverno, sem climatização, as zonas em estudo estejam durante grande parte do tempo dentro do limite. Foi feita essa análise e reparou-se que não seria necessário praticamente climatização nenhuma. Assim, foi possível concluir que se poderia ser um pouco mais "severo" com a largura da banda imposta aquando considerada a estação do inverno. Assim sendo, foi considerada uma banda entre os 21° e 24°.

Sendo que se vai considerar, no âmbito da dissertação, apenas dois dias, não há maneira de saber a temperatura inicial de cada espaço uma vez que não há um processo contínuo. Assim sendo foram estabelecidas temperaturas iniciais para o interior e para a envolvente

(Tabela 18 e 19). Graças ao efeito do sombreamento do edifício e do facto de não existir radiação solar direta nesta parte, foi considerado que as zonas presentes a norte do edifício possuem temperaturas iniciais menores que as presentes a sul. Outra distinção feita, foi a utilização de cada espaço. Considerou-se ainda que os escritórios, estando ocupados durante o dia, possuem temperaturas iniciais maiores que as salas de reuniões visto que estas são apenas utilizadas apenas em reuniões pontuais.

**Tabela 18** - Temperaturas interiores e da envolvente iniciais para as diversas zonas aquando submetidas ao inverno e primavera

|       | Inverno              |                        | Primavera            |                        |
|-------|----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|
|       | Temperatura Interior | Temperatura Envolvente | Temperatura Interior | Temperatura Envolvente |
| Z1_1  | 21                   | 19,5                   | 23                   | 21,5                   |
| Z1_2  | 21                   | 19,5                   | 23                   | 21,2                   |
| Z1_3  | 22,5                 | 20,5                   | 22,8                 | 22,8                   |
| Z1_7  | 21,2                 | 19,5                   | 23,5                 | 21,5                   |
| Z1_8  | 21,2                 | 19,5                   | 23,5                 | 21,5                   |
| Z1_12 | 21,8                 | 20                     | 22,3                 | 21,5                   |
| Z2_1  | 22,2                 | 20                     | 23,2                 | 22,2                   |
| Z2_2  | 21                   | 19,5                   | 24                   | 22,8                   |
| Z2_3  | 21                   | 19,5                   | 23                   | 20,5                   |
| Z2_4  | 21,5                 | 19,5                   | 23                   | 22,2                   |
| Z2_5  | 21                   | 19,6                   | 23                   | 22,2                   |
| Z2_13 | 22                   | 20                     | 22                   | 20,8                   |

**Tabela 19** - Temperaturas interiores e da envolvente iniciais para as diversas zonas aquando submetidas ao verão e outono

|       | Verão                |                        | Outono               |                        |
|-------|----------------------|------------------------|----------------------|------------------------|
|       | Temperatura Interior | Temperatura Envolvente | Temperatura Interior | Temperatura Envolvente |
| Z1_1  | 23                   | 21,5                   | 22,4                 | 21,2                   |
| Z1_2  | 23,3                 | 21,7                   | 22,6                 | 20,8                   |
| Z1_3  | 23,7                 | 22,8                   | 22,6                 | 22,2                   |
| Z1_7  | 24                   | 21,5                   | 21,8                 | 21,5                   |
| Z1_8  | 24,3                 | 22,3                   | 21,9                 | 21                     |
| Z1_12 | 22,8                 | 21,1                   | 21,6                 | 21,2                   |
| Z2_1  | 23,2                 | 22,2                   | 23                   | 22,2                   |
| Z2_2  | 24                   | 22,5                   | 23,2                 | 22,4                   |
| Z2_3  | 24                   | 22,1                   | 23                   | 21,6                   |
| Z2_4  | 24                   | 22,8                   | 22,5                 | 21,9                   |
| Z2_5  | 23                   | 22,4                   | 22,5                 | 21,9                   |
| Z2_13 | 22,8                 | 21,1                   | 22,3                 | 20,9                   |

Sendo que um dos pontos em análise desta dissertação consiste também na análise da influência das tarifas na otimização do funcionamento dos sistemas de climatização dos espaços, foram consideradas três tipos diferentes de tarifas, nomeadamente: tarifa simples, tarifa bi-horária e tarifa tri-horária. Através das seguintes tabelas é possível observar os custos associados a cada tarifa (Tabela 20) e os seus horários (Figura 39 e Figura 40). Foram ainda considerados os custos relativamente à potência contratada, observáveis através da Tabela 21.

**Tabela 20** - Tarifas consideradas no âmbito da dissertação [83]

| Preço da Energia Ativa | Período Horário | €/kWh  |
|------------------------|-----------------|--------|
| Tarifa Simples         | -               | 0,1742 |
| Tarifa Bi-horária      | Fora de Vazio   | 0,1994 |
|                        | Vazio           | 0,1058 |
| Tarifa Tri-horária     | Ponta           | 0,3161 |
|                        | Cheia           | 0,1702 |
|                        | Vazia           | 0,1058 |

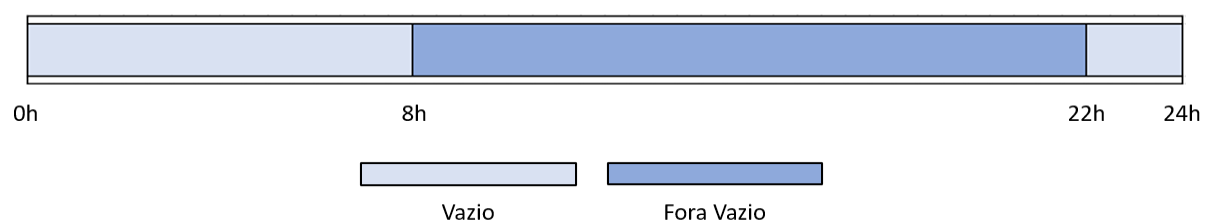


**Figura 39** - Horário considerado para a Tarifa Bi-Horária [84]

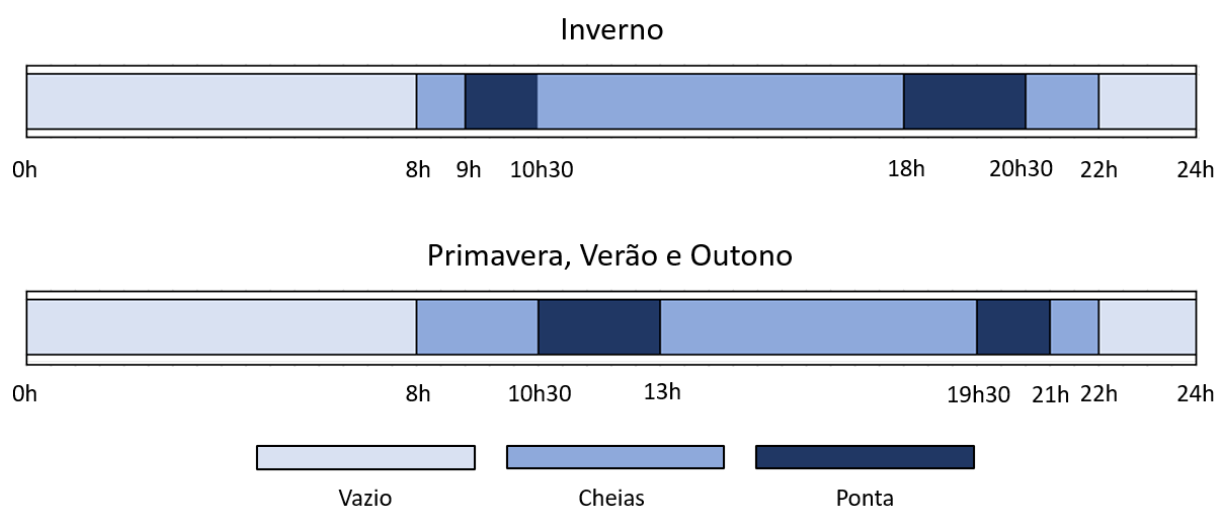


**Figura 40** - Horário considerado para a Tarifa Tri-Horária [84]

**Tabela 21** - Custos relativos à potência contratada [83]

| KVA   | €/dia  |
|-------|--------|
| 1,15  | 0,0791 |
| 2,3   | 0,1315 |
| 3,45  | 0,1662 |
| 4,6   | 0,2163 |
| 5,75  | 0,2661 |
| 6,9   | 0,3160 |
| 10,35 | 0,4656 |

Posto isto, tendo em conta o relatado, procedeu-se para a simulação do edifício. Nas seguintes figuras estão representados os resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios, aquando submetida às diferentes estações.

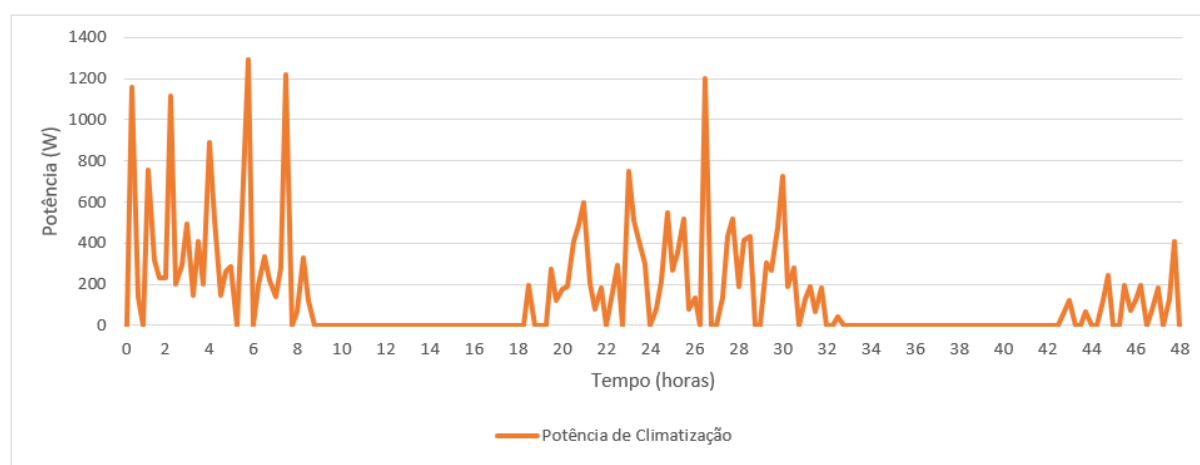


**Figura 41** - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no inverno considerando as condições do cenário 1

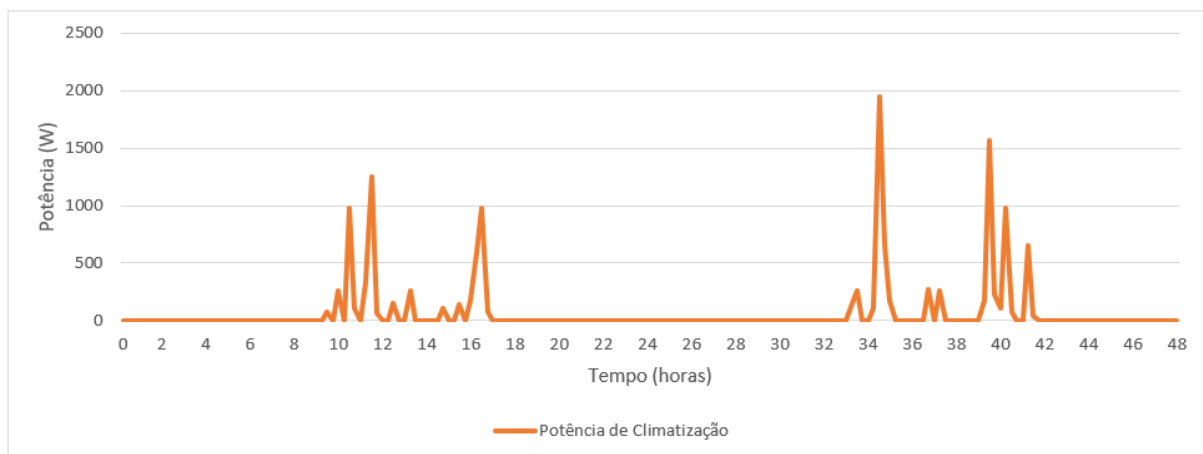


**Figura 42** - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios na primavera considerando as condições do cenário 1

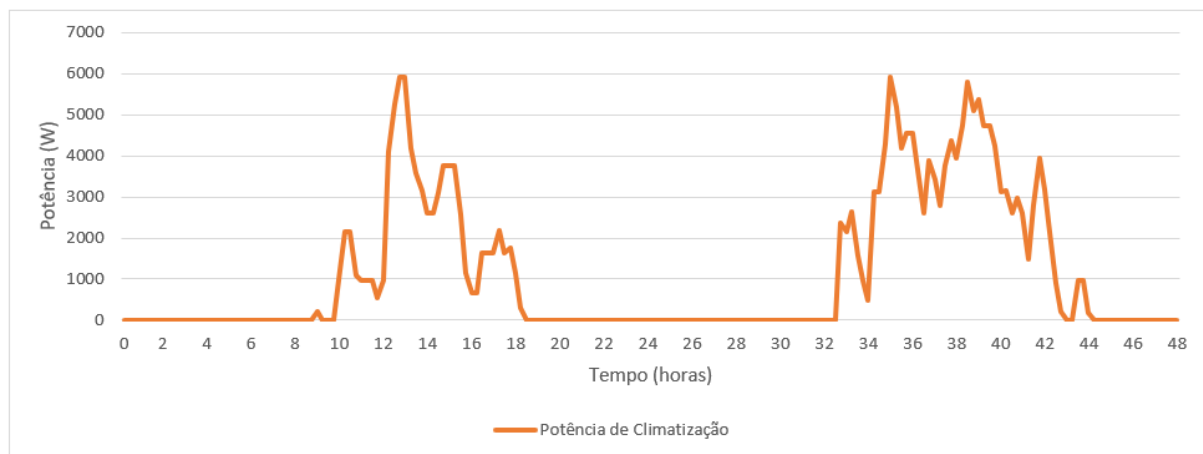


**Figura 43** - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no verão considerando as condições do cenário 1

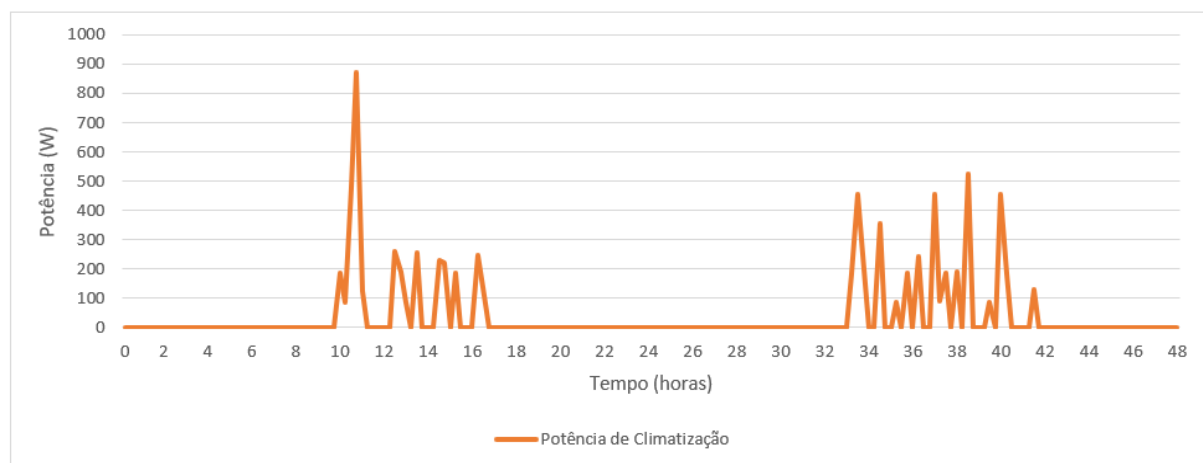


**Figura 44** - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no outono considerando as condições do cenário 1

Tendo por base os resultados apresentados nos gráficos anteriores, foram calculados, e apresentados na Figura 45, os custos associados a cada tarifa por estação.

|           |                        |                     |                         |                 |
|-----------|------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------|
| Inverno   | Tarifa Simples (€)     | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 4,91                   | 1295                | 0,1315                  | 5,173           |
|           | Tarifa Bi-Horária (€)  | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 3,39                   | 1295                | 0,1315                  | 3,653           |
|           | Tarifa Tri-Horária (€) | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
| Primavera | 3,44                   | 1295                | 0,1315                  | 3,703           |
|           | Tarifa Simples (€)     | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 2,3                    | 1953                | 0,1315                  | 2,563           |
|           | Tarifa Bi-Horária (€)  | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 2,63                   | 1953                | 0,1315                  | 2,893           |
| Verão     | Tarifa Tri-Horária (€) | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 3,11                   | 1953                | 0,1315                  | 3,373           |
|           | Tarifa Simples (€)     | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 38,17                  | 5907                | 0,2661                  | 38,7022         |
|           | Tarifa Bi-Horária (€)  | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
| Outono    | 43,69                  | 5907                | 0,2661                  | 44,2222         |
|           | Tarifa Tri-Horária (€) | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 47,07                  | 5907                | 0,2661                  | 47,6022         |
|           | Tarifa Simples (€)     | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 1,37                   | 870                 | 0,0791                  | 1,5282          |
| Outono    | Tarifa Bi-Horária (€)  | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 1,52                   | 870                 | 0,0791                  | 1,6782          |
|           | Tarifa Tri-Horária (€) | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
| Outono    | 1,7                    | 870                 | 0,0791                  | 1,8582          |

**Figura 45** - Custos associados ao cenário 1

Através de uma análise à Figura 45, é possível observar que no verão, estação de maior necessidade, é ultrapassada a potência elétrica máxima de arrefecimento, possuindo um pico de potência total de máximo de 5,9 kW, ultrapassando os 5,2 kW de capacidade da bomba de calor VRV aquando submetidas as condições do cenário 1. Isto revela que o sistema de climatização considerado não tem capacidade para responder às exigências do dia a dia impostas através do cenário em estudo. Numa tentativa resolver este percalço, foi imposta uma limitação da potência para 88% da potência máxima do sistema de climatização por espaço. Este valor é proveniente da divisão entre a capacidade máxima da bomba de calor e o pico de potência total atingido na primeira simulação. Ainda assim, a limitação da potência provoca a necessidade de climatizar os espaços durante um maior período, levando a um aumento na probabilidade de climatizar diversos espaços ao mesmo tempo, sendo difícil diminuir a potência máxima (diminuiu apenas 1%). Posto isto, seria necessário continuar a impor limitações à potência até que não fossem ultrapassados os 5,2 kW. Deste modo, visto que iria envolver uma pesquisa algo extensa, no âmbito desta dissertação, vai ser menosprezado este facto, sendo apenas analisada a influência do algoritmo nos custos e no pico de potência máxima.

Por fim, relatar apenas que as bandas de conforto definidas e as temperaturas iniciais consideradas serão utilizadas também para os restantes cenários. Tal como o funcionamento dos sistemas de climatização encontrado no cenário 1, que será utilizado como população inicial do algoritmo genético.

### 4.2.3 Cenário 2

No cenário 2 é utilizada uma adaptação do algoritmo desenvolvido a fim de reduzir apenas os custos de energia elétrica de cada escritório considerando as tarifas aplicáveis em cada instante, ignorando a redução em simultâneo do pico de potência total. Parte das adaptações que foram feitas ao programa desenvolvido passaram pela modificação da função avaliação, adaptando a mesma ao cenário em estudo, deixando de ter como influência o comportamento dos restantes escritórios e apenas considerar a otimização escritório a escritório individualmente (Equação 10).

$$Função\ Avaliação = \sum_{t=t_1}^{t_2} \left( Tarifa_{Energia}(t) * Energia_{HVAC}(t) \right) + \alpha * Penalização \quad (10)$$

O facto de a otimização do funcionamento dos sistemas de climatização ser feita considerando as tarifas aplicáveis em cada instante, levará a que o algoritmo procure climatizar sempre fora dos períodos em que as tarifas são mais elevadas, tentando aproveitar a inércia térmica ao máximo, reduzindo os custos.

Assim, tendo em conta a função avaliação adaptada, procedeu-se para a simulação do edifício. Nas seguintes figuras estão representados os resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios, variando a tarifa aplicada, aquando submetida às diferentes estações.

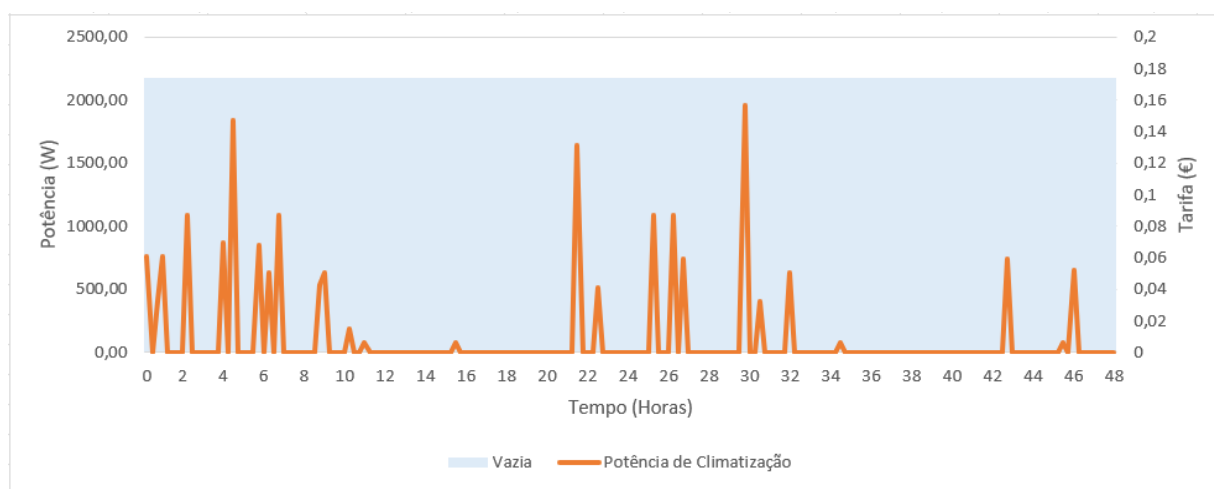


**Figura 46** - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no inverno considerando as condições do cenário 2 e uma tarifa simples

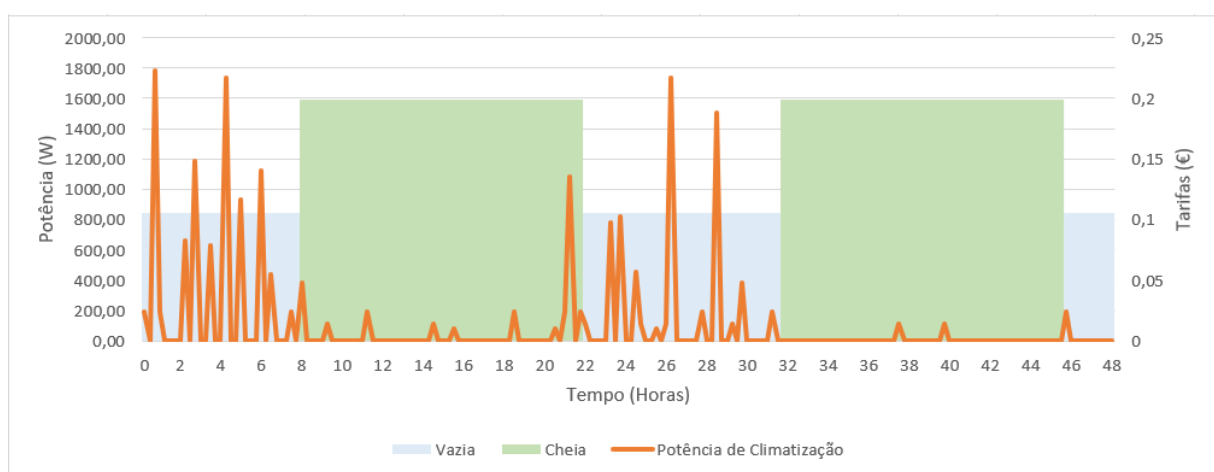


**Figura 47** - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no inverno considerando as condições do cenário 2 e uma tarifa bi-horária

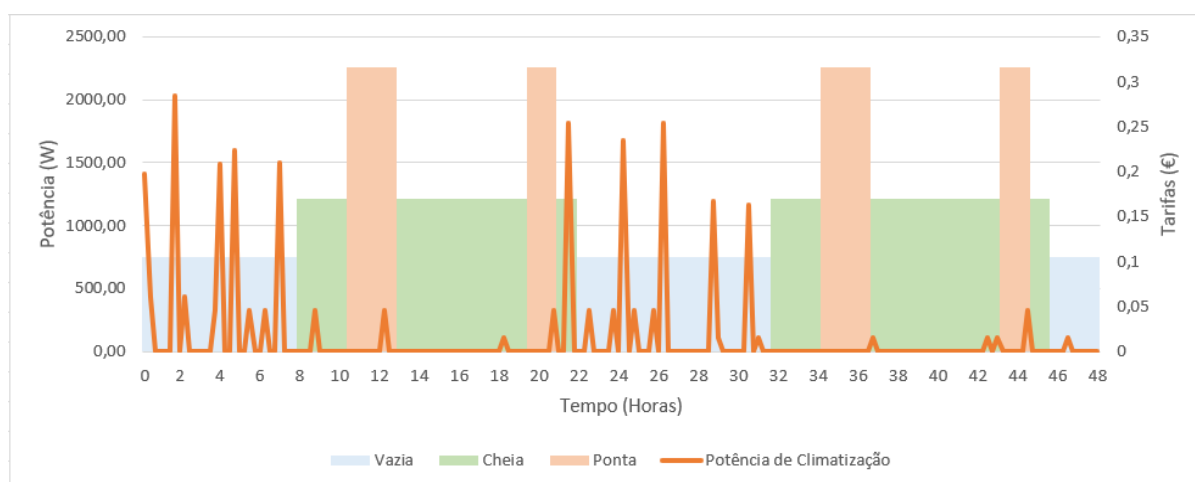


**Figura 48** - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no inverno considerando as condições do cenário 2 e uma tarifa tri-horária

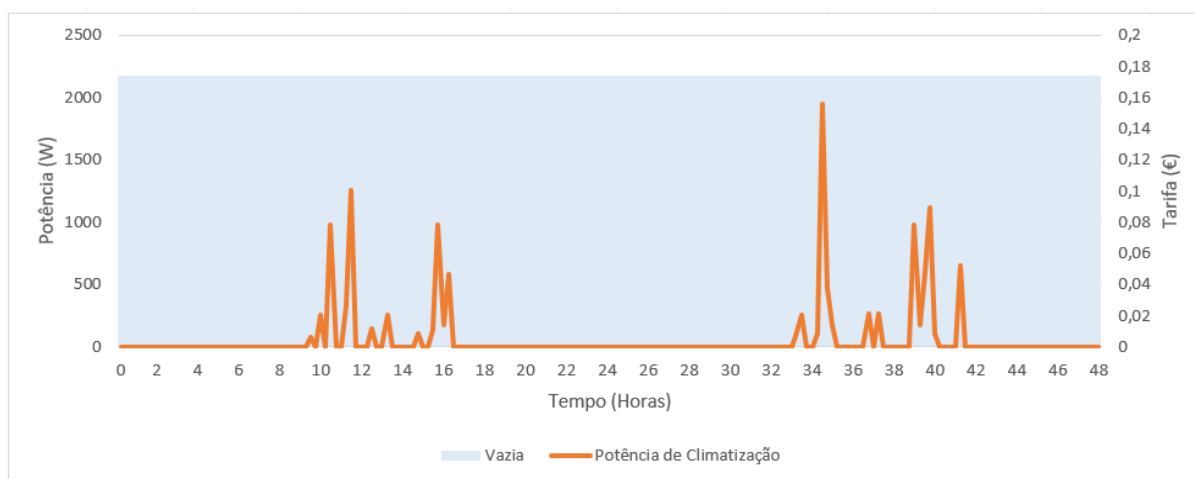


**Figura 49** - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios na primavera considerando as condições do cenário 2 e uma tarifa simples

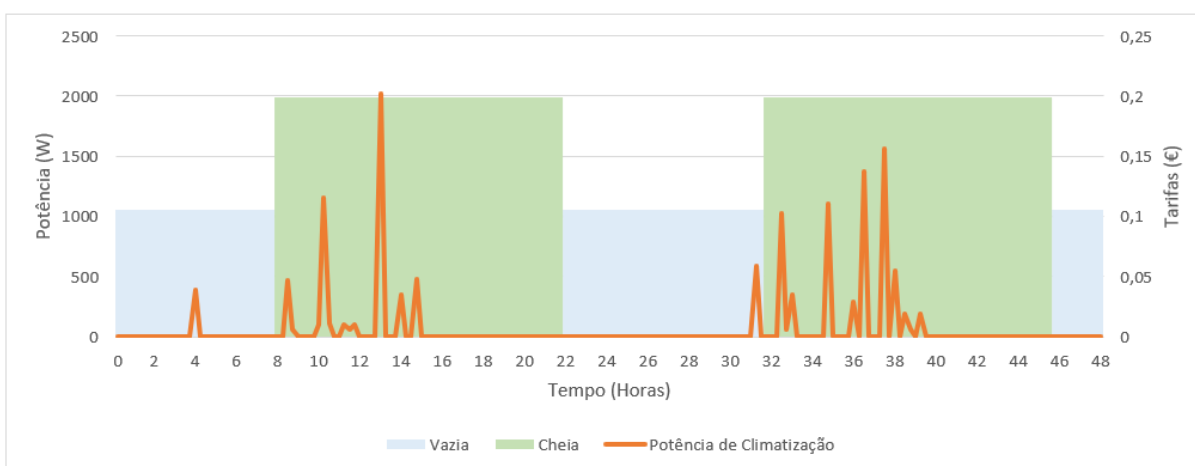


**Figura 50** - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios na primavera considerando as condições do cenário 2 e uma tarifa bi-horária

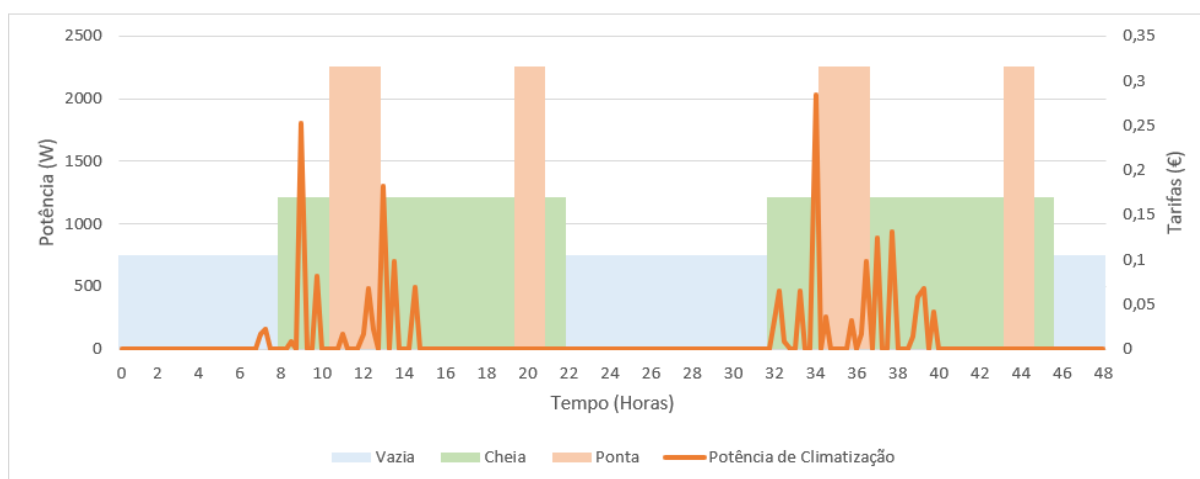


**Figura 51** - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios na primavera considerando as condições do cenário 2 e uma tarifa tri-horária

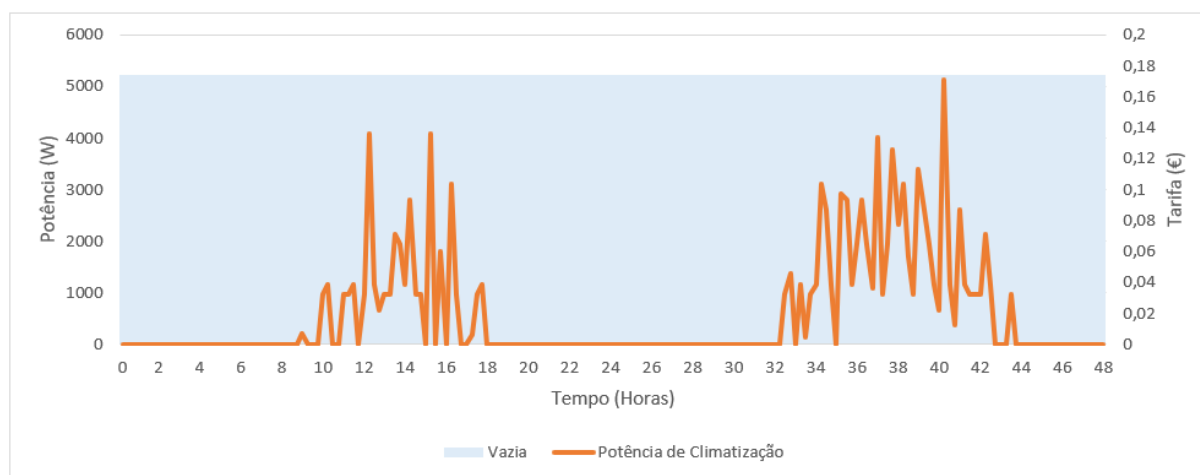


**Figura 52** - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no verão considerando as condições do cenário 2 e uma tarifa simples

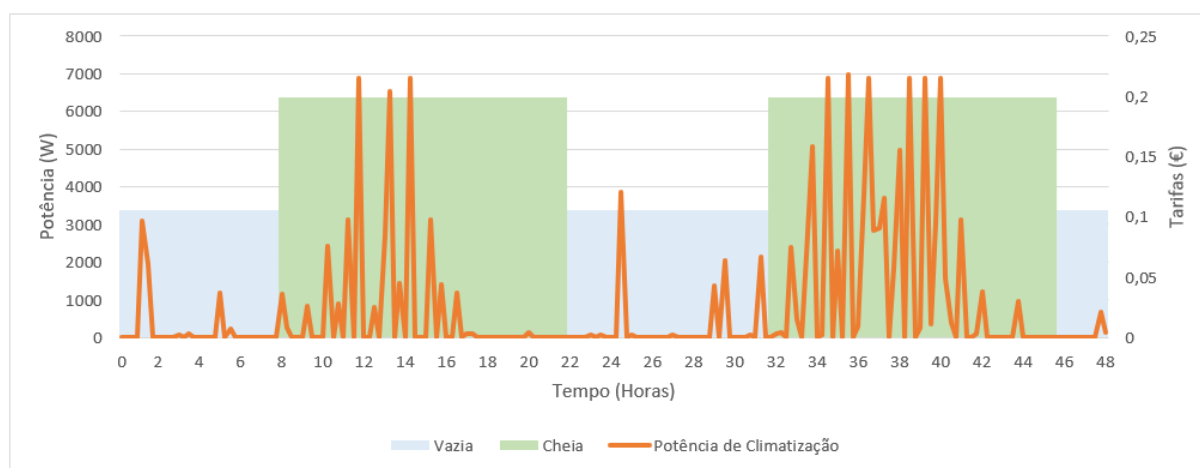


**Figura 53** - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no verão considerando as condições do cenário 2 e uma tarifa bi-horária

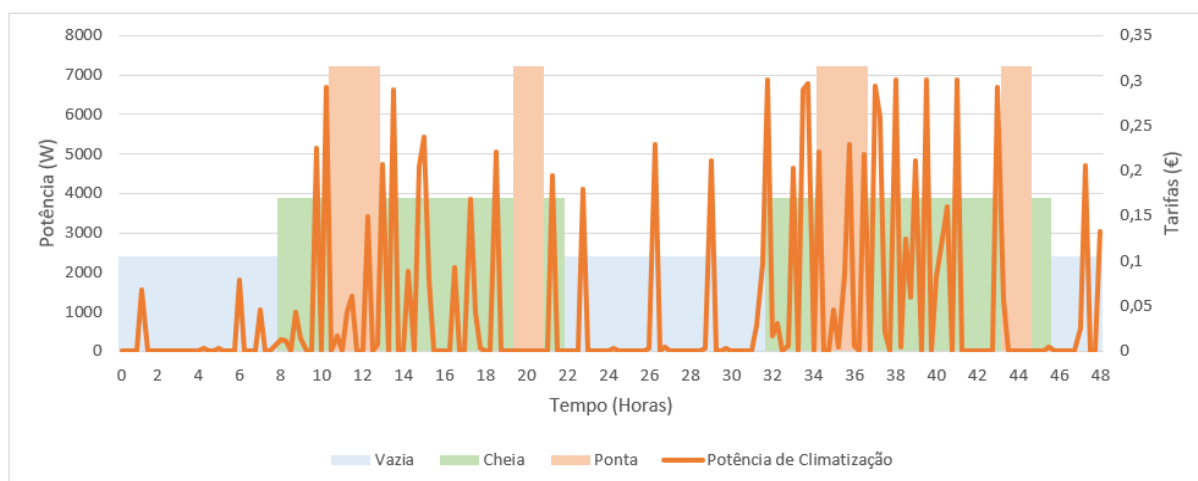


**Figura 54** - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no verão considerando as condições do cenário 2 e uma tarifa tri-horária

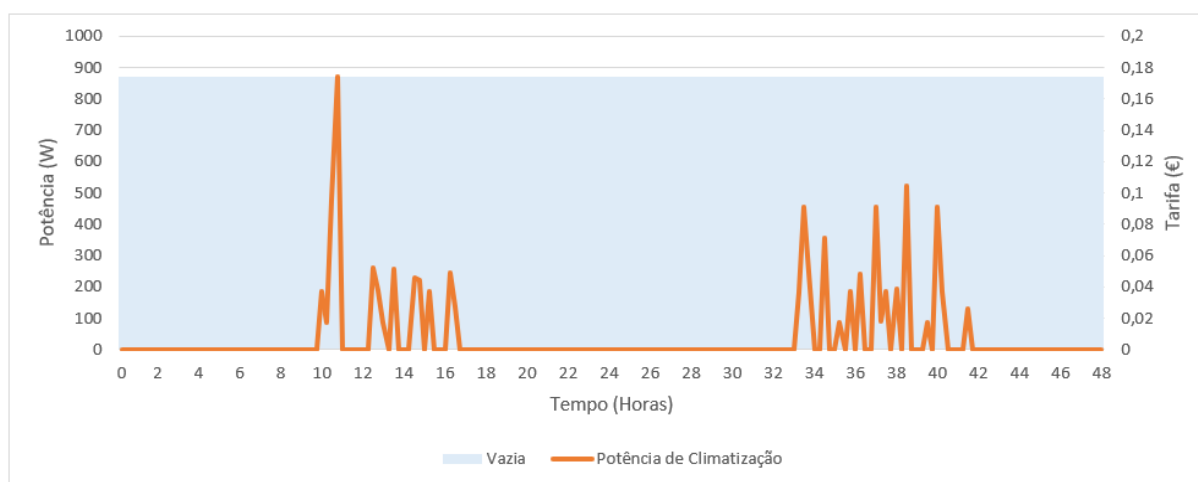


**Figura 55** - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no outono considerando as condições do cenário 2 e uma tarifa simples

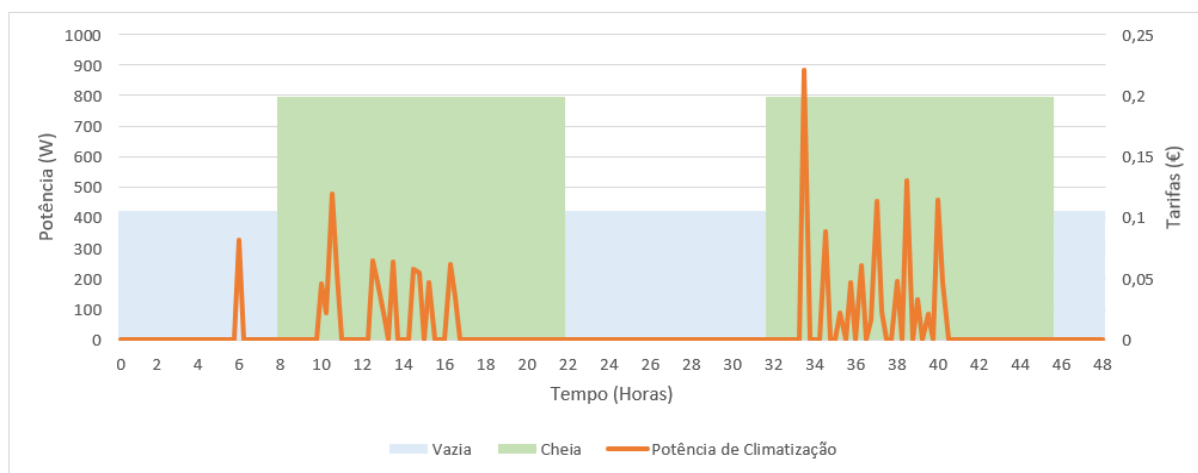


**Figura 56** - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no outono considerando as condições do cenário 2 e uma tarifa bi-horária

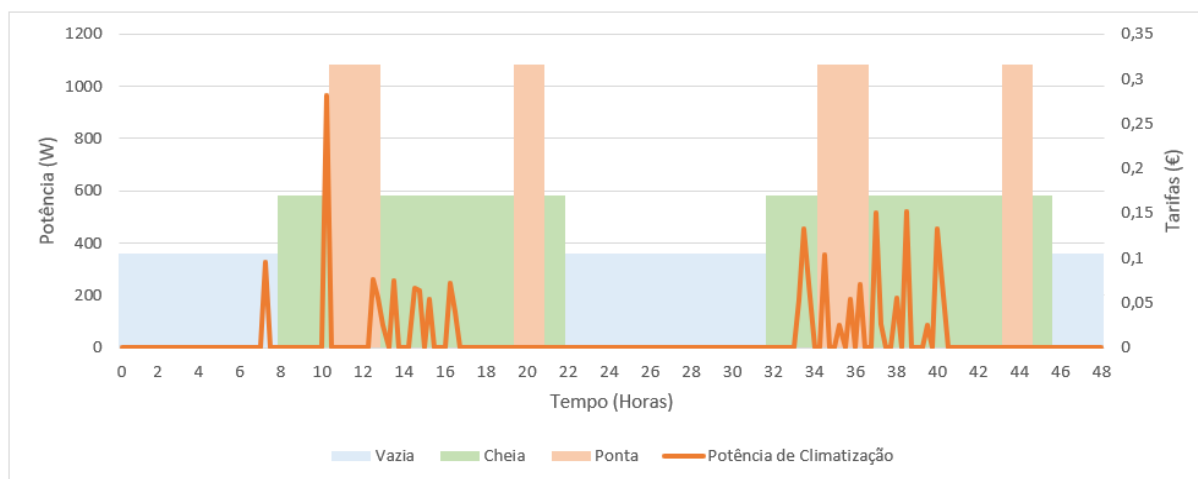


**Figura 57** - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no outono considerando as condições do cenário 2 e uma tarifa tri-horária

Tendo por base os resultados apresentados nos gráficos anteriores, foram calculados, e apresentados na Figura 58, os custos associados a cada tarifa por estação.

|           |                        |                     |                         |                 |
|-----------|------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------|
| Inverno   | Tarifa Simples (€)     | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 3,37                   | 1956                | 0,1315                  | 3,633           |
|           | Tarifa Bi-Horária (€)  | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 2,26                   | 1784                | 0,1315                  | 2,523           |
| Primavera | Tarifa Tri-Horária (€) | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 2,5                    | 2035                | 0,1315                  | 2,763           |
|           | Tarifa Simples (€)     | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 2,18                   | 1953                | 0,1315                  | 2,443           |
| Verão     | Tarifa Bi-Horária (€)  | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 2,45                   | 2019                | 0,1315                  | 2,713           |
|           | Tarifa Tri-Horária (€) | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 2,64                   | 2028                | 0,1315                  | 2,903           |
| Outono    | Tarifa Simples (€)     | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 19,21                  | 5137                | 0,2163                  | 19,6426         |
|           | Tarifa Bi-Horária (€)  | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 26,84                  | 6981                | 0,316                   | 27,472          |
|           | Tarifa Tri-Horária (€) | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 33,86                  | 6884                | 0,2661                  | 34,3922         |
|           | Tarifa Simples (€)     | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 1,31                   | 870                 | 0,0791                  | 1,4682          |
|           | Tarifa Bi-Horária (€)  | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 1,37                   | 870                 | 0,0791                  | 1,5282          |
|           | Tarifa Tri-Horária (€) | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 1,36                   | 966                 | 0,1315                  | 1,623           |

**Figura 58** - Custos associados ao cenário 2

No gráfico presente na Figura 59 estão representadas em simultâneo as potências obtidas através das referentes simulações relativamente ao cenário 1 e cenário 2, aquando considerada uma tarifa tri-horária durante a estação da primavera. Nesta figura é possível constatar o efeito da aplicação do algoritmo de otimização e observar a tentativa do mesmo em deslocar a refrigeração do espaço para os períodos de menor preço.

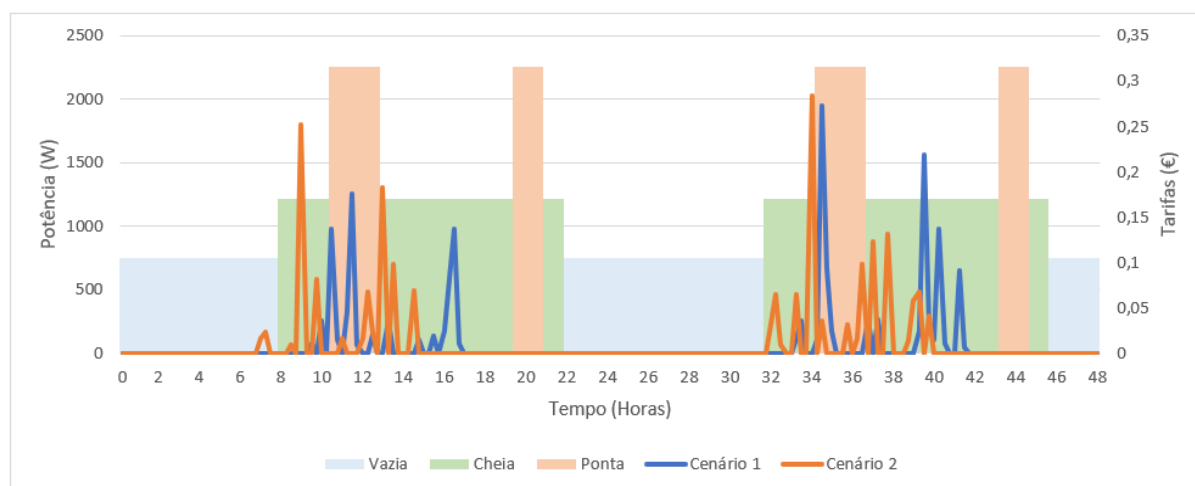


**Figura 59** - Comparação entre o cenário 1 e cenário 2 aquando considerada uma tarifa tri-horária durante a estação da primavera

#### 4.2.4 Cenário 3

Por fim, o terceiro cenário consiste na aplicação do algoritmo desenvolvido, procurando reduzir em simultâneo tanto os custos de energia elétrica de cada escritório considerando as tarifas aplicáveis em cada instante, como o pico de potência total de forma que o custo da potência contratada de todo o edifício seja reduzido, considerando também as condições impostas nos cenários anteriores.

Nas seguintes figuras (Figura 60 a 71) estão representados os resultados obtidos relativamente à potência requisitada em todo o edifício de escritórios, variando a tarifa aplicada, aquando submetida às diferentes estações.

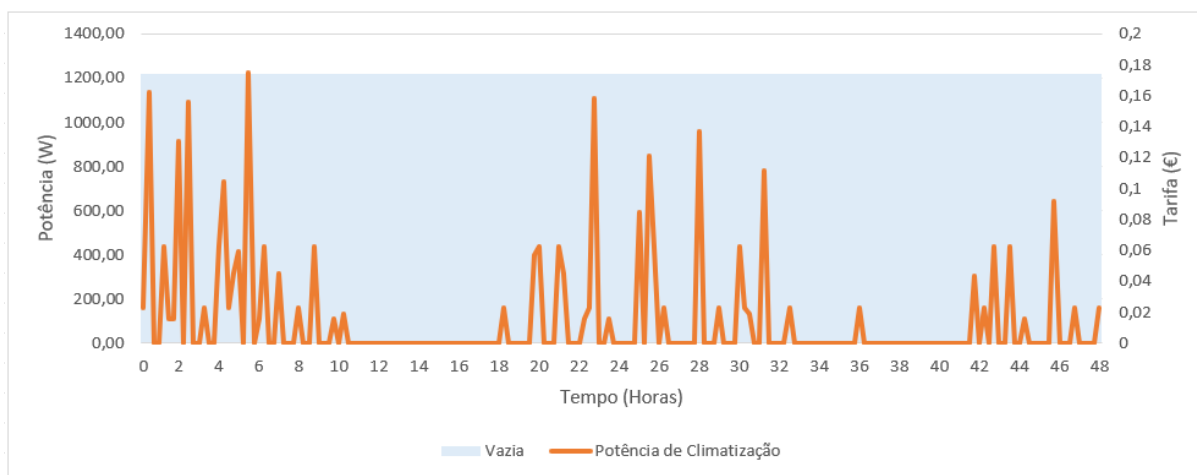


**Figura 60** - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no inverno considerando as condições do cenário 3 e uma tarifa simples

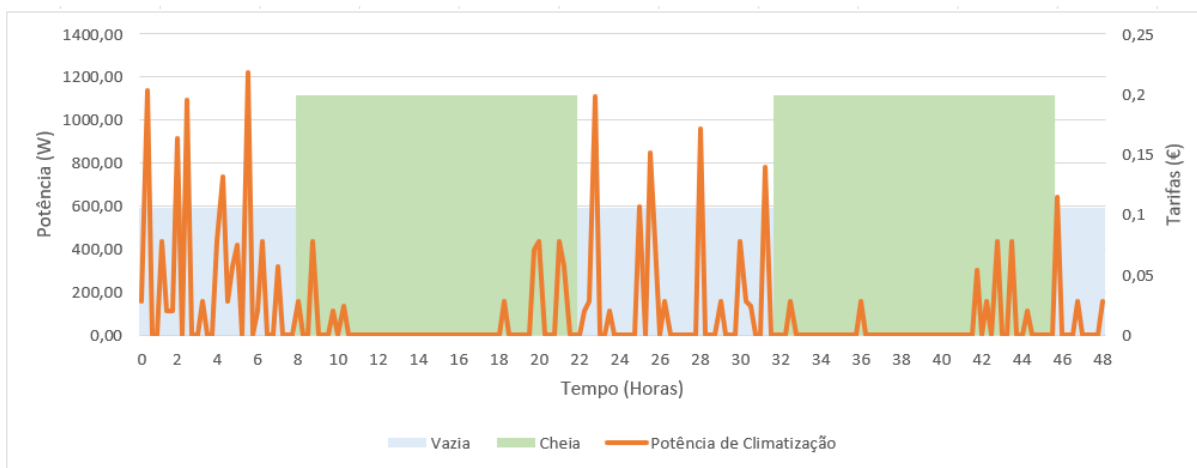


**Figura 61** - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no inverno considerando as condições do cenário 3 e uma tarifa bi-horária

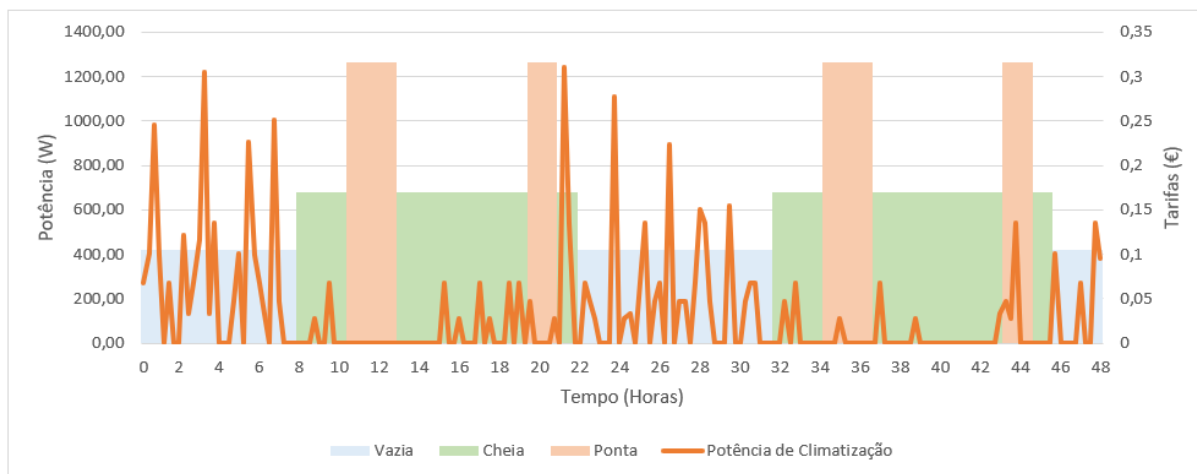


**Figura 62** - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no inverno considerando as condições do cenário 3 e uma tarifa tri-horária

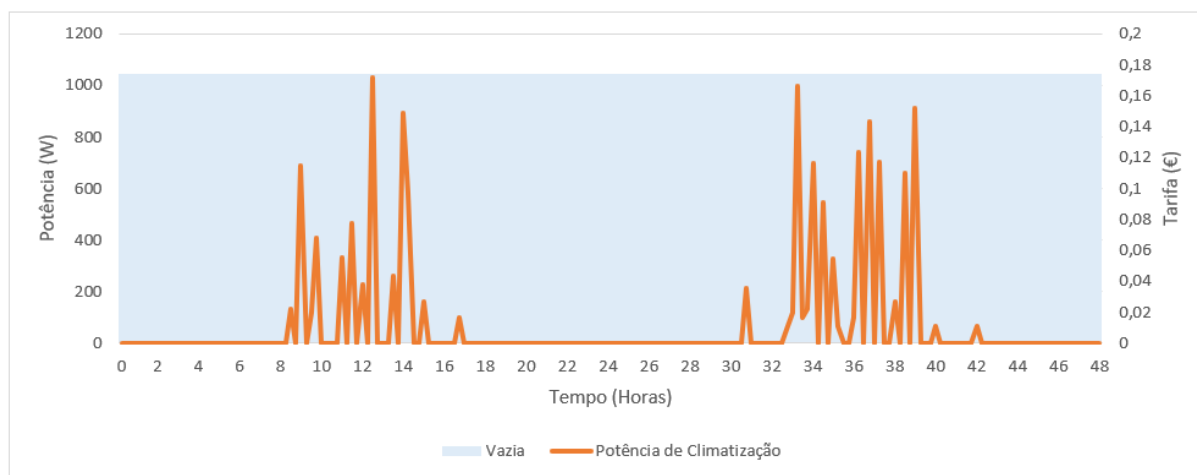


**Figura 63** - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios na primavera considerando as condições do cenário 3 e uma tarifa simples

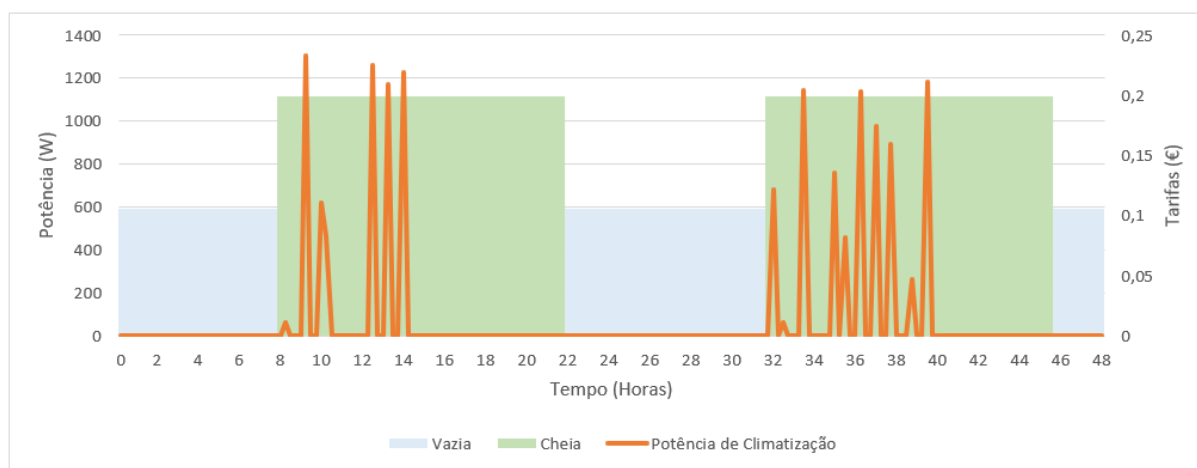


**Figura 64** - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios na primavera considerando as condições do cenário 3 e uma tarifa bi-horária

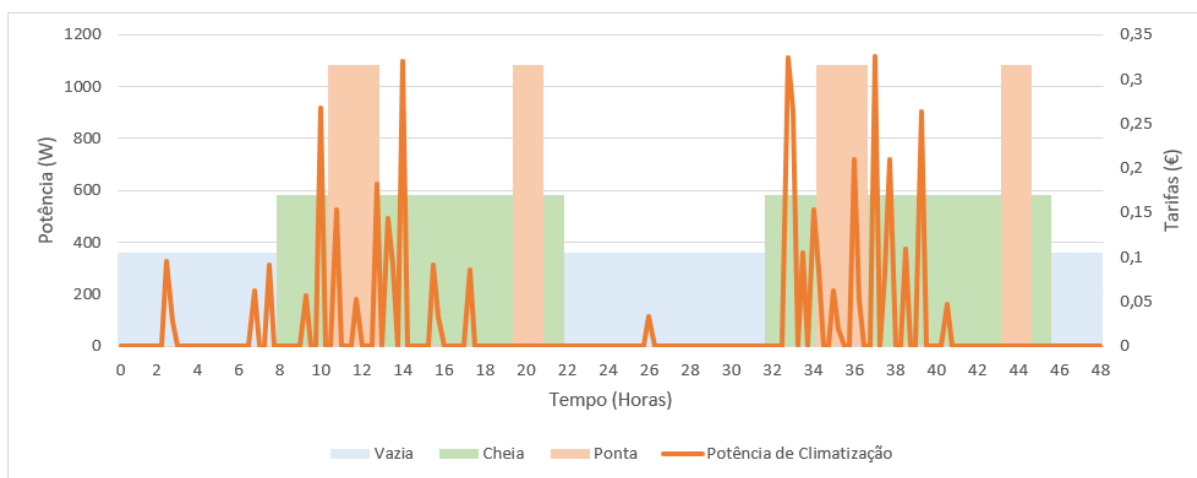


**Figura 65** - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios na primavera considerando as condições do cenário 3 e uma tarifa tri-horária

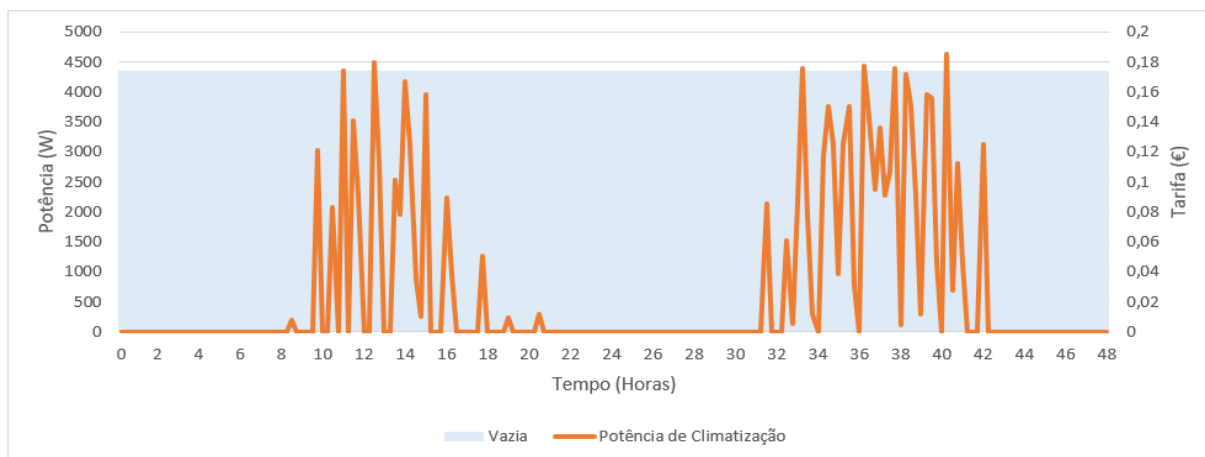


**Figura 66** - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no verão considerando as condições do cenário 3 e uma tarifa simples

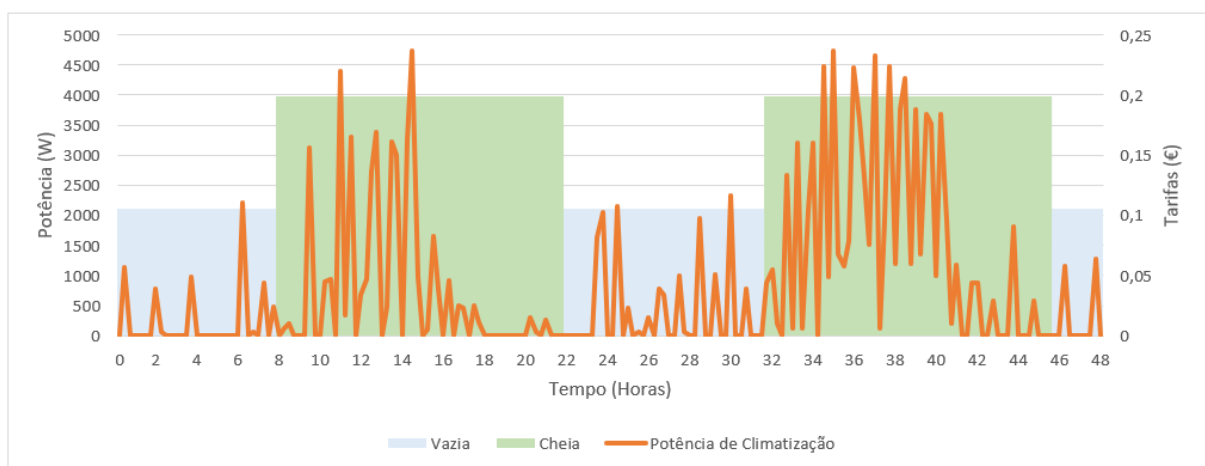


**Figura 67** - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no verão considerando as condições do cenário 3 e uma tarifa bi-horária

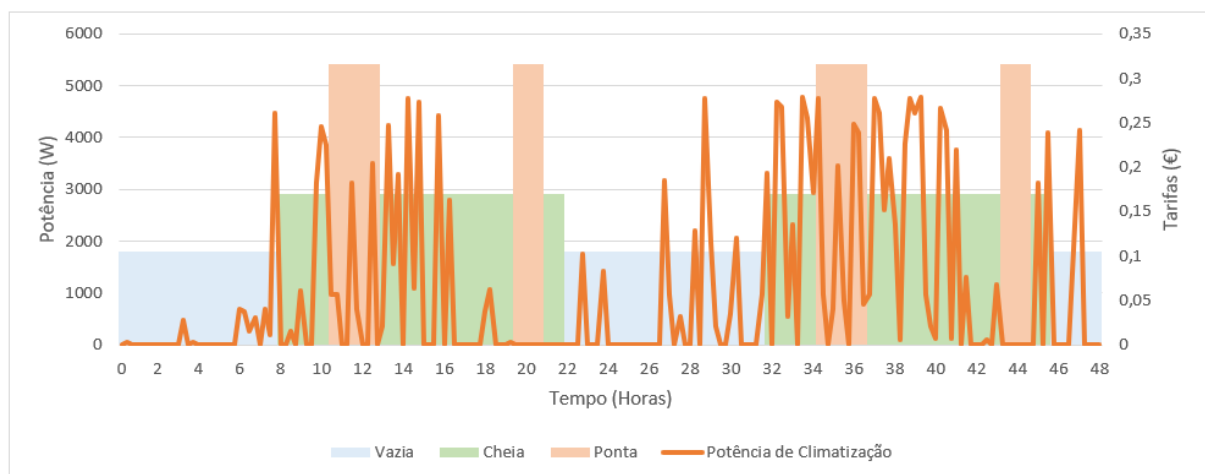


**Figura 68** - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no verão considerando as condições do cenário 3 e uma tarifa tri-horária

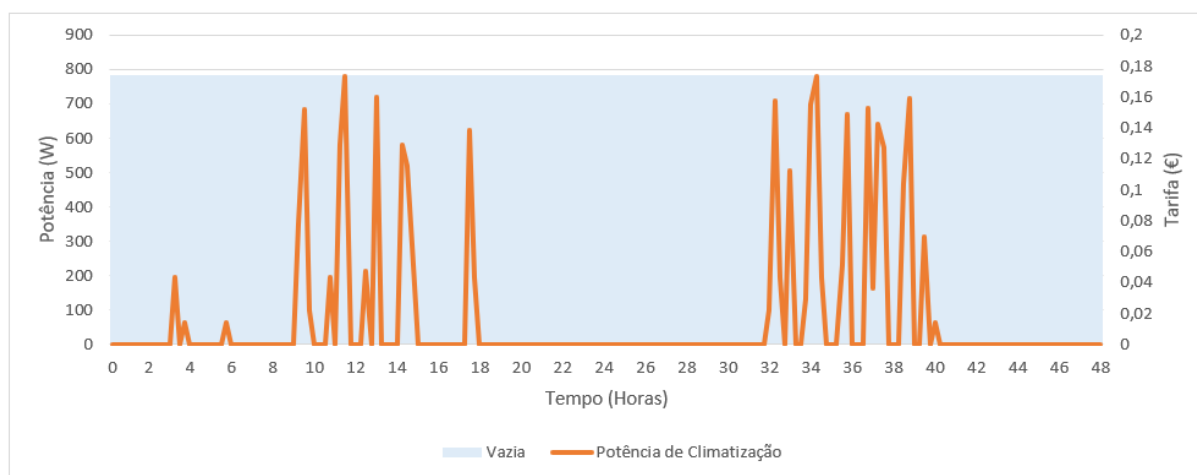


**Figura 69** - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no outono considerando as condições do cenário 3 e uma tarifa simples

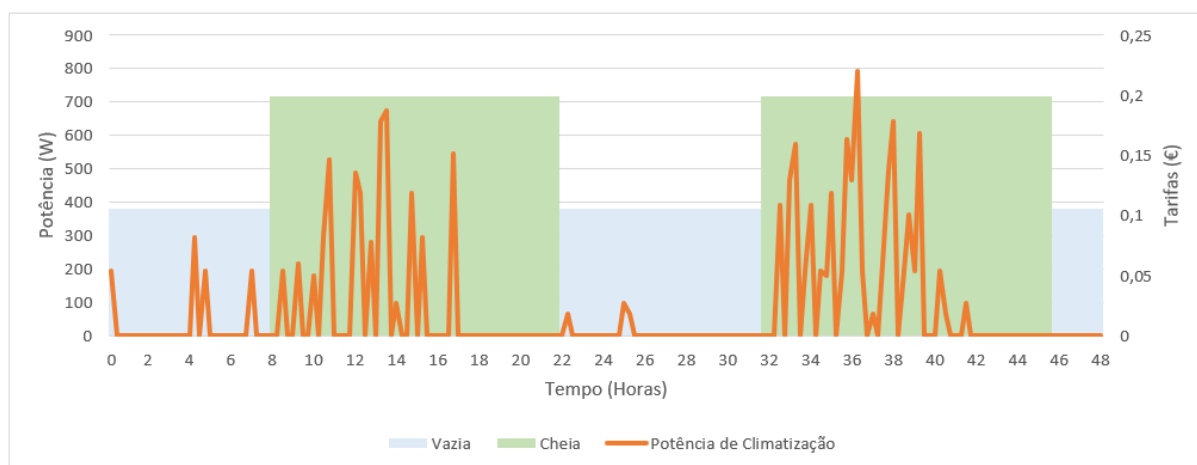


**Figura 70** - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no outono considerando as condições do cenário 3 e uma tarifa bi-horária

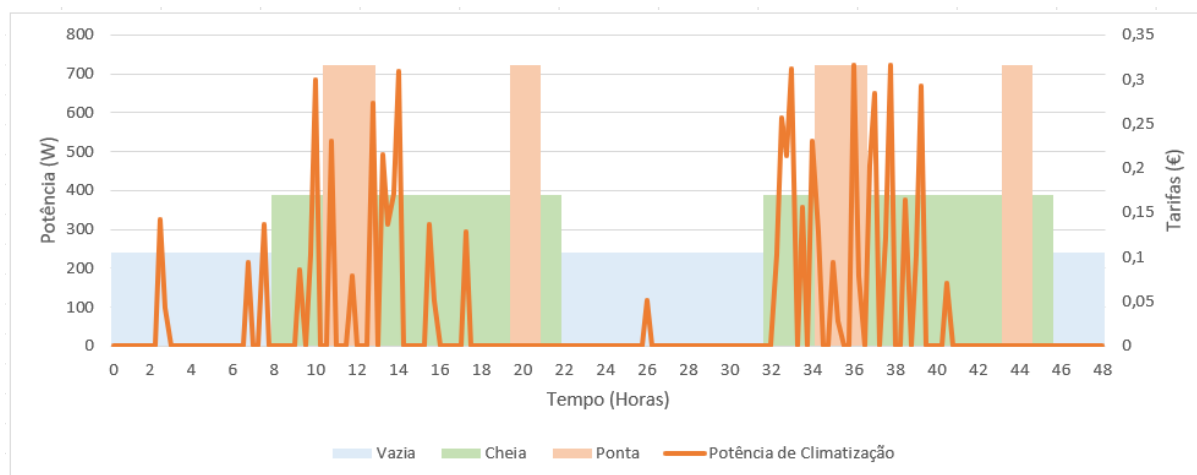


**Figura 71** - Resultados obtidos relativamente à potência aplicada em todo o edifício de escritórios no outono considerando as condições do cenário 3 e uma tarifa tri-horária

Tendo por base os resultados apresentados nos gráficos anteriores, foram calculados, e apresentados na Figura 72, os custos associados a cada tarifa por estação.

|           |                        |                     |                         |                 |
|-----------|------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------|
| Inverno   | Tarifa Simples (€)     | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 3,44                   | 1222                | 0,1315                  | 3,703           |
|           | Tarifa Bi-Horária (€)  | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 2,55                   | 1222                | 0,1315                  | 2,813           |
| Primavera | Tarifa Tri-Horária (€) | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 3,2                    | 1242                | 0,1315                  | 3,463           |
|           | Tarifa Simples (€)     | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 2,25                   | 1033                | 0,0791                  | 2,4082          |
| Verão     | Tarifa Bi-Horária (€)  | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 2,72                   | 1302                | 0,1315                  | 2,983           |
|           | Tarifa Tri-Horária (€) | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 2,69                   | 1116                | 0,0791                  | 2,8482          |
| Outono    | Tarifa Simples (€)     | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 22,83                  | 4637                | 0,2163                  | 23,2626         |
|           | Tarifa Bi-Horária (€)  | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 28,25                  | 4744                | 0,2163                  | 28,6826         |
|           | Tarifa Tri-Horária (€) | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 34,17                  | 4791                | 0,2163                  | 34,6026         |
|           | Tarifa Simples (€)     | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 2,44                   | 781                 | 0,0791                  | 2,5982          |
|           | Tarifa Bi-Horária (€)  | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 2,8                    | 791                 | 0,0791                  | 2,9582          |
|           | Tarifa Tri-Horária (€) | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 2,76                   | 721                 | 0,0791                  | 2,9182          |

**Figura 72** - Custos associados ao cenário 3

Nos gráficos presentes nas Figuras 73 e 74 estão representados em simultâneo as potências obtidas através das referentes simulações relativamente ao cenário 2 e 3, aquando considerada uma tarifa bi-horária durante a primavera e tri-horária durante o outono, respetivamente. Nestas figuras é possível constatar o efeito da aplicação do algoritmo de otimização e observar a tentativa do mesmo em, além de deslocar a refrigeração do espaço para os períodos de menor preço, reduzir o pico de potência total. É possível observar que, qualquer que seja a tarifa, a potência máxima reduz, sendo o caso mais evidente o presente na Figura 74.

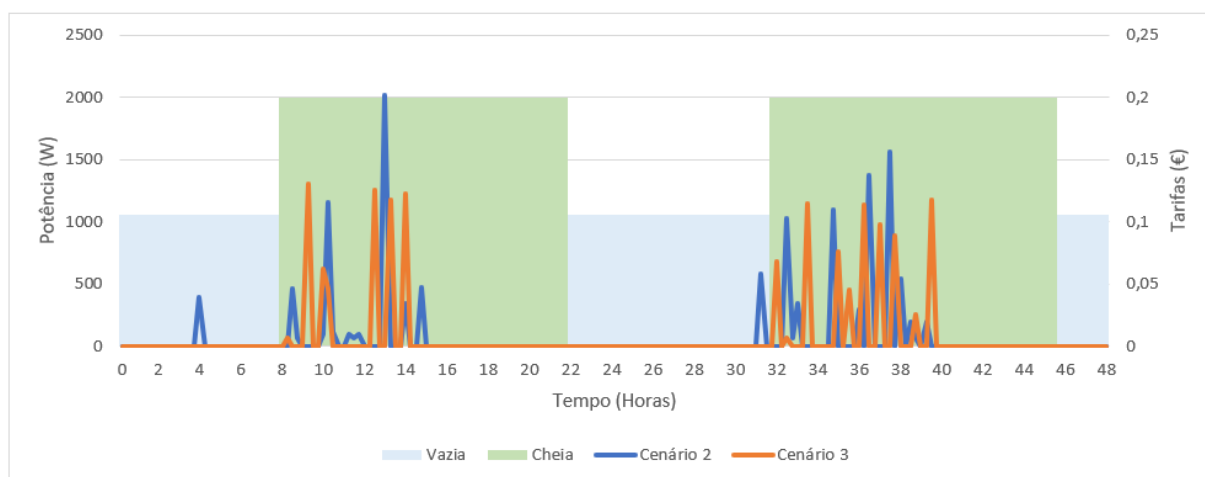


**Figura 73** - Comparação entre o cenário 2 e cenário 3 aquando considerada uma tarifa bi-horária durante a estação da primavera

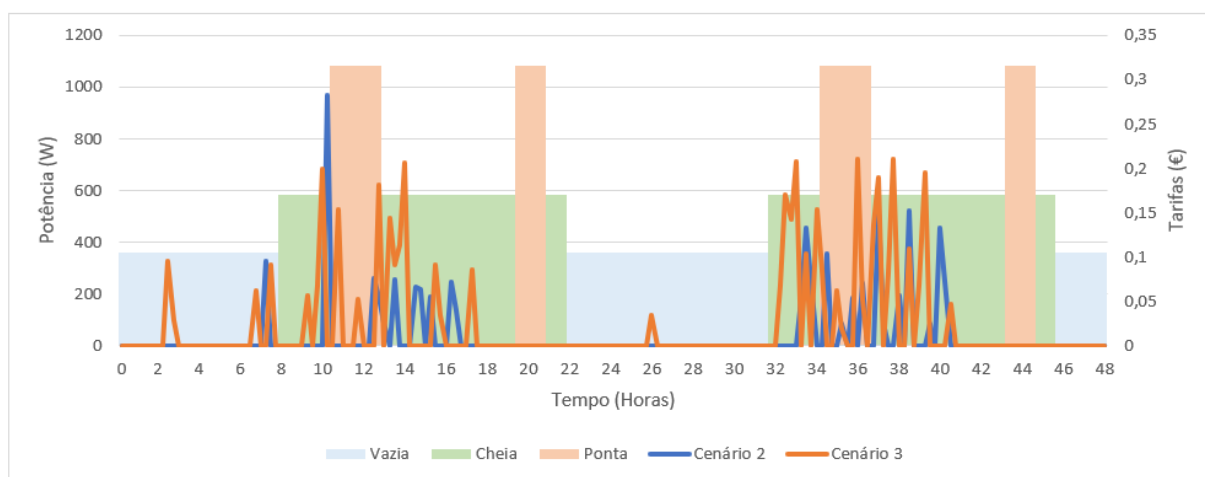


**Figura 74** - Comparação entre o cenário 2 e cenário 3 aquando considerada uma tarifa tri-horária durante a estação do outono

## 4.3 Discussão

No presente subcapítulo é feita a comparação de todos os resultados obtidos e a sua discussão tendo em conta os três cenários considerados. Através da Figura 75, é possível observar uma junção das Figura 45, Figura 58 e Figura 72, facilitando a comparação entre os três cenários no que diz respeito aos custos associados à energia elétrica de cada escritório e o pico de potência total durante a estação de maior necessidade, isto é, o verão.

|           |                        |                     |                         |                 |
|-----------|------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------|
| Cenário 1 | Tarifa Simples (€)     | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 38,17                  | 5907                | 0,2661                  | 38,7022         |
|           | Tarifa Bi-Horária (€)  | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 43,69                  | 5907                | 0,2661                  | 44,2222         |
| Cenário 2 | Tarifa Tri-Horária (€) | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 47,07                  | 5907                | 0,2661                  | 47,6022         |
|           | Tarifa Simples (€)     | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 19,21                  | 5137                | 0,2163                  | 19,6426         |
| Cenário 3 | Tarifa Bi-Horária (€)  | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 26,84                  | 6981                | 0,316                   | 27,472          |
|           | Tarifa Tri-Horária (€) | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 33,86                  | 6884                | 0,2661                  | 34,3922         |
| Cenário 3 | Tarifa Simples (€)     | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 22,83                  | 4637                | 0,2163                  | 23,2626         |
|           | Tarifa Bi-Horária (€)  | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 28,25                  | 4744                | 0,2163                  | 28,6826         |
| Cenário 3 | Tarifa Tri-Horária (€) | Potência Máxima (W) | Custo Associado (€/dia) | Custo Total (€) |
|           | 34,17                  | 4791                | 0,2163                  | 34,6026         |

**Figura 75** - Comparação entre os três cenários em estudo no que diz respeito aos custos associados à energia elétrica de cada escritório e o pico de potência total durante o verão

Comparando com os resultados obtidos no cenário 1 e no cenário 2, é possível observar que existe uma descida considerável no que diz respeito aos custos associados e uma subida significativa no que diz respeito à potência máxima. Isto acontece, tal como definido através da função avaliação adaptada, devido existência de apenas um objetivo, redução de custos de energia elétrica de cada escritório, considerando as tarifas aplicáveis em cada instante, não existindo uma preocupação a nível comunitário. No cenário 2, o algoritmo de otimização, no caso das tarifas bi-horárias e tri-horárias, vai procurar deslocar o aquecimento/refrigeração dos espaços para momentos onde as tarifas possuem um preço mais reduzido, procurando

fugir às horas fora de vazio. Este fenómeno é facilmente observado na Figura 59. Posto isto, apesar da redução significativa do custo relacionado com os consumos, não havendo uma preocupação a nível comunitário, grande parte das cargas são deslocadas para o mesmo instante, aumentando o pico de potência total. No caso das tarifas simples, uma vez que a tarifa aplicada é sempre constante, existe uma otimização dos custos devido à simples procura pelo funcionamento ótimo, que consuma menos energia sem abdicar do conforto dos ocupantes dos espaços.

Através da comparação dos resultados obtidos relativamente ao cenário 3 e os resultados obtidos no cenário 2, é possível observar que, apesar de ambos procurarem reduzir os custos associados à energia elétrica, o cenário 3 não apresenta reduções tão significativas quanto o cenário anterior. Isto acontece visto que o algoritmo de otimização desenvolvido e aplicado no cenário 3, mais propriamente a sua função avaliação, procura otimizar o funcionamento dos sistemas dos diversos escritórios tendo em conta dois objetivos. Visto isto, mesmo não possuindo uma redução nos custos associados à energia tão significativa como o cenário 2, o cenário 3 apresenta uma enorme redução no pico de potência máxima, apresentando os valores mais baixos dos três cenários independentemente da tarifa.

Através da observação dos resultados obtidos em cada cenário para todas as estações é possível concluir que foram alcançados com sucesso os objetivos propostos no âmbito desta dissertação, existindo sempre uma redução do custo de energia e no pico de potência total. Ainda assim, uma vez que o custo da potencia contratada possui um impacto pouco significativo, é possível observar através da Figura 75 que o cenário 2 é o mais vantajoso em termos económicos.

Não obstante terem sido cumpridos todos os objetivos, foram encontrados dois fatores que impossibilitaram a obtenção de melhores resultados. O primeiro diz respeito à temperatura da envolvente. Através das Figuras 76, é possível observar que a temperatura da envolvente não varia e muitas vezes acaba por ser constante sendo este comportamento registado em, praticamente, todas as zonas em análise. Isto acontece devido aos valores ótimos calculados para o parâmetro  $C_e$  ser elevados aquando comparados com os restantes parâmetros, influenciando a Equação 4, equação que procura prever o comportamento da envolvente. Através de uma análise à Figura 77, é possível observar que, em alguns casos, é bastante complicado tirar partido da inércia térmica do edifício. Não significa que seja o que acontece na realidade, mas o facto do modelo R2C2 possuir como parâmetros valores demasiado elevados leva a que o comportamento da temperatura de envolvente seja constante, impedindo qualquer tentativa de moldar a sua temperatura consoante o cenário mais vantajoso seja mais

vantajoso a fim de tirar partido das diversas tarifas. Assim sendo, a climatização tem de ser feita no momento sendo bastante difícil beneficiar das tarifas de múltiplos preços visto que a necessidade de climatização coincide, muitas vezes, com as horas de pontas das mesmas. Posto tudo isto, é natural que os cenários mais baratos sejam os de tarifa simples. A fim de tentar beneficiar da inércia térmica de uma melhor maneira, seria necessário construir um modelo que retratasse de uma maneira mais realista o comportamento da envolvente mantendo a eficácia que este modelo apresenta ao acompanhar a temperatura interior.

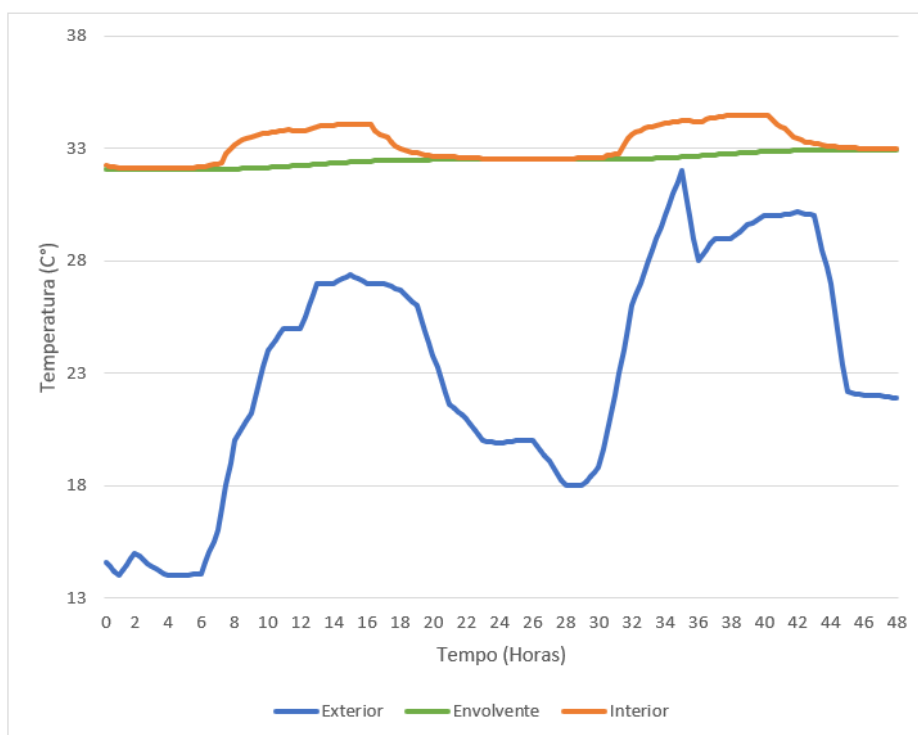


**Figura 76** - Comportamento geral da temperatura da envolvente

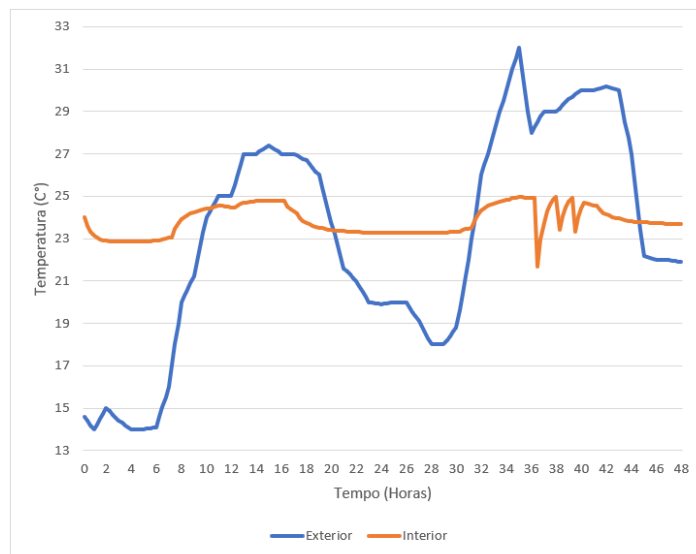


**Figura 77** - Dificuldade de aproveitamento da inércia térmica

Por fim, o segundo fator que impossibilitou a obtenção de melhores resultados foi o tempo de computação. A fim de chegar a todos os resultados que são apresentados neste documento, foram necessárias várias simulações de teste com o objetivo de calibrar o modelo RC e algoritmo de otimização e chegar as condições iniciais ideais. Apesar de cada simulação demorar no mínimo 20/25 minutos, dependentemente das condições impostas ao modelo e ao algoritmo de otimização, houve momentos em que este processo foi bem mais demoroso, chegando a atingir valores próximos dos 90 minutos.



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo procura fazer uma revisão geral do trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação, tendo um especial foco nas contribuições originais oferecidas à comunidade científica e a sugestão de trabalhos futuros partindo do mesmo.

### 5.1 Revisão Geral

O trabalho desenvolvido teve como principal motivação a necessidade de exploração da flexibilidade energética dos edifícios. Esta necessidade é vista como essencial uma vez que os edifícios pertencem ao setor que mais energia consome (cerca de 33% da energia global produzida), e, uma vez que a energia é essencial para o desenvolvimento de qualquer economia, prevê-se que a procura da mesma aumentará. Se nada se fizer, este aumento na procura da energia pode ter um enorme impacto no planeta.

O algoritmo de otimização desenvolvido procura explorar a flexibilidade energética dos edifícios de escritórios, com o objetivo de favorecer-se da mesma a fim de reduzir os custos associados ao consumo de energia elétrica de cada escritório considerando, a cada momento, as tarifas aplicadas e o pico de potência total de forma que o custo de potência contratada de todo o edifício seja também reduzido.

Tendo por base o algoritmo de otimização, é feito um estudo considerando três distintos cenários: cenário 1, que diz respeito ao comportamento base, cenário 2, onde se procura otimizar apenas os custos, e o cenário 3 onde realmente se aplica o algoritmo desenvolvido. Posto isto, é possível concluir que, apesar de atingidos todos os objetivos propostos, uma vez que o custo da potencia contratada possui um impacto pouco significativo, o mais vantajoso economicamente é optar pelo cenário 2.

## 5.2 Contribuições Originais

O trabalho desenvolvido oferece, à comunidade científica, diversas contribuições originais, tais como:

- O desenvolvimento de um algoritmo de otimização multiobjectivo a fim de reduzir os custos de energia e o pico de potência total, considerando a variação no tempo das tarifas e diversos escritórios presentes no mesmo edifício;
- O estudo desenvolvido, onde foram comparados três cenários próximos da realidade considerando o contexto português, procurando contribuir para o enriquecimento nesse mesmo contexto no que diz respeito à flexibilidade energética;
- A análise e discussão do comportamento dos sistemas de climatização aquando considerados diversos objetivos, tais como a redução dos custos de energia e pico de potência total, normalmente analisados em separado.

## 5.3 Trabalhos Futuros

Uma vez que o trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação pertence a uma área de investigação recente e pouco explorada no contexto português, existem diversos trabalhos futuros a realizar dentro da área. Tendo como ponto de partida o algoritmo de otimização desenvolvido, é possível desenvolver os seguintes trabalhos:

- Melhorar o algoritmo de otimização desenvolvido através do aprimoramento do modelo RC de modo a captar melhor as variações da temperatura da envolvente;
- Melhoria do processo de otimização a fim de chegar a resultados mais otimizados com um menor tempo de computação;
- Procurar o algoritmo de otimização desenvolvido num caso real;
- Analisar a influência de um sistema de painéis solares no caso de estudo;
- Procurar estudar a influência que a ventilação natural poderá ter no arrefecimento dos espaços no caso de estudo.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] The World Counts, "Tons of CO2 emitted into the atmosphere," [Online]. Available: <https://www.theworldcounts.com/challenges/climate-change/global-warming/global-co2-emissions/story>. [Acedido em 23 fevereiro 2022].
- [2] NASA's Goddard Institute for Space Studies, "Global Temperature," [Online]. Available: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>. [Acedido em 23 fevereiro 2022].
- [3] NASA, "The Effects of Climate Change," [Online]. Available: <https://climate.nasa.gov/effects/>. [Acedido em 23 fevereiro 2022].
- [4] Comissão Europeia, "Paris Agreement," [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/clima/eu-action/international-action-climate-change/climate-negotiations/paris-agreement\\_pt](https://ec.europa.eu/clima/eu-action/international-action-climate-change/climate-negotiations/paris-agreement_pt). [Acedido em 13 fevereiro 2022].
- [5] European Comiission, *Clean Energy For All Europeans*, 2016.
- [6] European Commission, *Europe on the Move: Commission completes its agenda for safe, clean and connected mobility*, 2018.
- [7] República Portuguesa, *Plano Nacional Energia e Clima 2021-2030 - PNEC*, 2019.
- [8] Agência Europeia do Ambiente, [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/pt/themes/energy/intro>. [Acedido em 15 fevereiro 2022].
- [9] G. Reynders, R. A. Lopes, A. Marszal-Pomianowska, D. Aelenei, J. Martins e D. Saelens, "Energy flexible buildings: An evaluation of definitions and quantification methodologies applied to thermal storage," *Energy and Buildings*, 166, 372-390, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.040>
- [10] Iberdrola, "Energy storage: the key to a decarbonised future," [Online]. Available: <https://www.iberdrola.com/sustainability/efficient-energy-storage>. [Acedido em 24 fevereiro 2022].

- [11] T. Correia, "Avaliação do impacto das pontes térmicas no desempenho térmico dos edifícios do Campus da FCT/UNL - análise numérica," 2011.
- [12] International Energy Agency, "Transition to Sustainable Buildings," 2013.
- [13] Orlando Utilities Commission, "Small and Midsize Offices," [Online]. Available: [https://ouc.bizenergyadvisor.com/article/large-offices?fbclid=IwAR2p2f7AX4G1mjfxk12lqOoT5SA7QzF07jMK0ejZeMeMTPBO-QnT\\_MXqM3E](https://ouc.bizenergyadvisor.com/article/large-offices?fbclid=IwAR2p2f7AX4G1mjfxk12lqOoT5SA7QzF07jMK0ejZeMeMTPBO-QnT_MXqM3E). [Acedido em 23 fevereiro 2022].
- [14] R. Correia, "Revista Sustentável," [Online]. Available: <https://www.revistasustentavel.pt/descarbonizacao/flexibilidade-energetica-e-considerada-critica-para-alcancar-objetivos-renovaveis-de-2030/>. [Acedido em 15 fevereiro 2022].
- [15] S. Ø. Jensen, A. Marszal-Pomianowska, R. Lollini, W. Pasut, A. Knotzer, P. Engelmann, A. Stafford e G. Reynders, "IEA EBC Annex 67 Energy Flexible Buildings," *Energy and Buildings*, 155, 25-34, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.044>
- [16] D. Six, J. Desmedt, D. Vanhoudt e J. V. Bael, "Exploring the Flexibility Potential of Residential Heat Pumps Combined with Thermal Energy Storage for Smart Grids," 2011.
- [17] J. L. Dreau e P. Heiselberg, "Energy flexibility of residential buildings using short term heat storage in the thermal mass," *Energy*, 111, 991-1002, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.076>
- [18] F. Oldewurtel, A. Ulbig, A. Parisio, G. Andersson e M. Morari, "Reducing Peak Electricity Demand in Building Climate Control using Real-Time Pricing and Model Predictive Control," *49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1109/CDC.2010.5717458>
- [19] T. Nuytten, B. Claessens, K. Paredis, J. V. Bael e D. Six, "Flexibility of a combined heat and power system with thermal energy storage for district heating," *Applied Energy*, 104, 583-591, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.029>
- [20] R. D'hulst, W. Labeeuw, B. Beusen, S. Claessens, G. Deconinck e K. Vanthournout, "Demand response flexibility and flexibility potential of residential smart appliances: Experiences from large pilot test in Belgium," *Applied Energy*, 155, 79-90, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.101>

- [21] T. Crosbie, J. Broderick, M. Short, R. Charlesworth e M. Dawood, "Demand Response Technology Readiness Levels for Energy Management in Blocks of Buildings," *Buildings*, 8(2), 13, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings8020013>
- [22] S. Stinner, K. Huchtemann e D. Müller, "Quantifying the operational flexibility of building energy systems with thermal energy storages," *Applied Energy*, 181, 140-154, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.055>
- [23] F. Oldewurtel, D. Sturzenegger, G. Andersson, M. Morari e R. S. Smith, "Towards a Standardized Building Assessment for Demand Response," *52th IEEE Conference on Decision and Control*, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/CDC.2013.6761012>
- [24] R. D. Coninck e L. Helsen, "Quantification of flexibility in buildings by cost curves – Methodology and application," *Applied Energy*, 162, 653-665, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.114>
- [25] R. D. Coninck e L. Helsen, "Bottom-Up Quantification of the Flexibility Potential of Buildings," *Building Simulation Conference Proceedings*, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.26868/25222708.2013.1119>
- [26] G. Reynders, "Quantifying the impact of building design on the potential of structural storage for active demand response in residential buildings," 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.3630.2805>
- [27] ADEME, "Electricity Consumption in Offices," [Online]. Available: <https://www.odysseemure.eu/publications/efficiency-by-sector/services/offices-specific-energy-and-electricity-consumption.html>. [Acedido em 13 fevereiro 2022].
- [28] N. Majdalani, D. Aelenei, R. A. Lopes e C. A. S. Silva, "The potential of energy flexibility of space heating and cooling in Portugal," *Utilities Policy*, 66, 101086, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jup.2020.101086>
- [29] E. Barradas, "Estudo da flexibilidade energética em edifícios através da inércia térmica," 2017.
- [30] D. Aelenei, R. A. Lopes, L. Aelenei e H. Gonçalves, "Investigating the potential for energy flexibility in an office building with a vertical BIPV and a PV roof system," *Renewable Energy*, 137, 189-197, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.140>
- [31] F. Lu, Z. Yu, Y. Zou e X. Yang, "Cooling system energy flexibility of a nearly zero-energy office building using building thermal mass: Potential evaluation and parametric analysis," *Energy and Buildings*, 110763, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110763>

- [32] "European Commission," [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-buildings\\_en](https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-buildings_en). [Acedido em 2 dezembro 2021].
- [33] M. Liu e P. Heiselberg, "Energy flexibility of a nearly zero-energy building with weather predictive control on a convective building energy system and evaluated with different metrics," *Applied Energy*, 233-234, 764-775, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.10.070>
- [34] J. Hu, W. Zheng, S. Zhang, H. Li, Z. Liu, G. Zhang e X. Yang, "Thermal load prediction and operation optimization of office building with a zone-level artificial neural network and rule-based control," *Applied Energy*, 300, 117429, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117429>
- [35] J. Wang, Encyclopedia of Business Analytics and Optimization, IGI Global, 2014.
- [36] X. Li e A. Malkawi, "Multi-objective optimization for thermal mass model predictive control in small and medium size commercial buildings under summer weather conditions," *Energy*, 112, 1194-1206, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.021>
- [37] do-mpc, "Basics of model predictive control," [Online]. Available: [https://www.do-mpc.com/en/v4.1.1/theory\\_mpc.html](https://www.do-mpc.com/en/v4.1.1/theory_mpc.html). [Acedido em 17 janeiro 2022].
- [38] MathWorks, "Understanding Model Predictive Control," [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/videos/series/understanding-model-predictive-control.html>. [Acedido em 17 janeiro 2022].
- [39] Y. Xu e A. Asgari, "Prediction and optimization of heating and cooling loads in a residential building based on multi-layer perceptron neural network and different optimization algorithms," *Energy*, 240, 122692, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122692>
- [40] Energy Models, "What is Energy Modeling & Building Simulation," [Online]. Available: <https://energy-models.com/what-is-energy-modeling-building-simulation>. [Acedido em 14 fevereiro 2022].
- [41] Extergy, [Online]. Available: <http://extergy.com/energy-modelling/>. [Acedido em 14 fevereiro 2022].

- [42] Direção-Geral de Energia e Geologia, "Perguntas e Respostas – Nova Legislação dos Edifícios 2020," 2021.
- [43] Diário da Republica, *1.ª série — N.º 24 — 4 de fevereiro de 2016, Portaria n.º 17-A/2016*, 2016.
- [44] H. Lim e Z. Zhai, "Review on stochastic modeling methods for building stock energy prediction," *Building Simulation*, 10(5), 607-624, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12273-017-0383-y>
- [45] J. Ligade, D. Sebastian e A. Razban, "Challenges of Creating a Verifiable Building Energy Model," 2019. DOI: <https://hdl.handle.net/1805/23865>
- [46] M. Korovina, "Building energy model detail level," *Construction of Unique Buildings and Structures*, 62(11), 93-102, 2017. DOI: <https://doi.org/10.18720/CUBS.62.8>
- [47] S. Pfenninger, A. Hawkes e J. Keirstead, "Energy systems modeling for twenty-first century energy challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 74-86, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.003>
- [48] P. Lopion, P. Markewitz, M. Robinius e D. Stolten, "A review of current challenges and trends in energy systems modeling," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 156-166, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.045>
- [49] NASA's Jet Propulsion Laboratory, "The Atmosphere: Getting a Handle on Carbon Dioxide," [Online]. Available: <https://climate.nasa.gov/news/2915/the-atmosphere-getting-a-handle-on-carbon-dioxide/>. [Acedido em 26 fevereiro 2022].
- [50] Local Energy Oxfordshire, "Benefits of flexibility services," [Online]. Available: <https://project-leo.co.uk/the-energy-challenge/understanding-flexibility/>. [Acedido em 16 fevereiro 2022].
- [51] Instituto Português do Mar e da Atmosfera, [Online]. Available: <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/?print=true>. [Acedido em 14 fevereiro 2022].
- [52] T. Q. Péan, J. Salom e J. Ortiz, "Potential and optimization of a price-based control strategy for improving energy flexibility in Mediterranean buildings," *Energy Procedia*, 122, 463-468, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.292>
- [53] K. Bamdad, M. E. Cholette, L. Guan e J. Bell, "Ant colony algorithm for building energy optimisation problems and comparison with benchmark algorithms," *Energy and Buildings*, 154, 404-414, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.071>

- [54] H. Iftikhar, S. Asif, R. Maroof, K. Ambreen, H. N. Khan e N. Javaid, "Biogeography Based Optimization for Home Energy Management in Smart Grid," *Advances in Network-Based Information Systems*, 177-190, 2018. DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-65521-5\\_16](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-65521-5_16)
- [55] D. Kong, X. Yin, X. Ding, N. Fang e P. Duan, "Global optimization of a vapor compression refrigeration system with a self-adaptive differential evolution algorithm," *Applied Thermal Engineering*, 197, 117427, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117427>
- [56] H. Song, M. Cai, J. Cen, C. Xu e Q. Zeng, "Research on Energy Saving Optimization Method of Electric Refrigerated Truck Based on Genetic Algorithm," *International Journal of Refrigeration*, 137, 62-69, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.02.003>
- [57] Z. Yong, Y. Li-juan, Z. Qian e S. Xiao-yan, "Multi-objective optimization of building energy performance using a particle swarm optimizer with less control parameters," *Journal of Building Engineering*, 32, 101505, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101505>
- [58] K. A. Folly, "Performance evaluation of power system stabilizers based on Population-Based," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 33(7), 1279-1287, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2011.05.004>
- [59] Departamento de Energia dos Estados Unidos da América, "EnergyPlus," [Online]. Available: <https://energyplus.net/>. [Acedido em 22 setembro 2022].
- [60] C. A. P. d. Santos e L. Matias, "ITE 50," *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios*, 2006.
- [61] Z. Wang, Y. Chen e Y. Li, "Development of RC model for thermal dynamic analysis of buildings through model structure simplification," *Energy and Buildings*, 195, 51-67, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.042>
- [62] F. Smarra, A. Jain, T. d. Rubeis, D. Ambrosini, A. D'Innocenzo e R. Mangharam, "Data-driven model predictive control using random forests for building energy optimization and climate control," *Applied Energy*, 226, 1252-1272, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.126>

- [63] J. Wang, S. Li, H. Chen, Y. Yuan e Y. Huang, "Data-driven model predictive control for building climate control: Three case studies on different buildings," *Building and Environment*, 160, 106204, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106204>
- [64] W. Turner, A. Staino e B. Basu, "Residential HVAC fault detection using a system identification approach," *Energy and Buildings*, 151, 1-17, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.008>
- [65] C. Deb e A. Schlueter, "Review of data-driven energy modelling techniques for building retrofit," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 110990, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110990>
- [66] Z. Wang e Y. Chen, "Data-driven modeling of building thermal dynamics: Methodology and state of the art," *Energy and Buildings*, 203, 109405, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109405>
- [67] M. Rainho, "Comparação dos métodos RC para o cálculo horário das necessidades de energia para aquecimento e arrefecimento na EN ISO 13790 e na proposta normativa ISO 52016-1," 2015.
- [68] E. C. f. S. a. I. O. f. Standardization, "EN ISO 13790, Energy Performance of Buildings - Calculation of Energy Use for Space Heating and Cooling," 2008.
- [69] M. J. O. Panão, C. A. Santos, N. M. Mateus e G. C. d. Graça, "Validation of a lumped RC model for thermal simulation of a double skin natural and mechanical ventilated test cell," *Energy and Buildings*, 121, 92-103, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.054>
- [70] S. Rouchier e M. Rabouille, "Calibration of simplified building energy models for parameter estimation and forecasting: Stochastic versus deterministic modelling," *Building and Environment*, 134, 181-190, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.043>
- [71] K. K. Andersen, H. Madsen e L. H. Hansen, "Modelling the heat dynamics of a building using stochastic differential equations," *Energy and Buildings*, 31(1), 13-24, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00069-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00069-3)
- [72] S. Rouchier, "Building energy statistical modelling," [Online]. Available: <https://buildingenergygeeks.org/a-simple-rc-model-python.html>. [Acedido em 26 maio 2022].

- [73] J. D'Errico, "<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/8277-fminsearchbnd-fminsearchcon>," [Online]. [Acedido em 5 junho 2022].
- [74] M. Amorim, "Aplicação Móvel para Circuitos Turísticos Baseada em Algoritmos de Otimização de Percursos," 2019.
- [75] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, 1975.
- [76] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, 1989.
- [77] T. Back e H.-P. Schwefel, "An Overview of Evolutionary Algorithms for Parameter Optimization," 1993.
- [78] Diário da República, *Portaria n.º 349-D/2013, de 2 de dezembro*, 2013.
- [79] J. A. Clarke, P. P. Yaneske e A. A. Pinney, *The Harmonisation of Thermal Properties of Building Materials*, 1990.
- [80] M. Kummert, P. André e J. Nicolas, "Optimised thermal zone controller for integration within a Building Energy Management System," 1997.
- [81] V. Gomes, "Projeto de AVAC de um Edifício com Multiutilização," 2013.
- [82] Diário da República, *Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de Abril*, 2006.
- [83] SU Eletricidade, "Tarifas baixa tensão normal," [Online]. Available: <https://sueletricidade.pt/pt-pt/page/601/tarifas-baixa-tensao-normal>. [Acedido em 6 junho 2022].
- [84] LuzeGas.pt by Selectra, "Ciclo horário EDP: diferença entre horas de vazio, cheias e ponta EDP," [Online]. Available: <https://luzegas.pt/fornecedores-energia/edp/ciclos-horarios#precos-bi-horario>. [Acedido em 5 junho 2022].





2022

JOÃO PATRÍCIO

GESTÃO DE FLEXIBILIDADE ENERGÉTICA EM EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS