



Plataforma de gestão de energia para o Campus do IST

Modelação e representação dos consumos de energia

Ana Filipa Gonçalves Mendes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Carlos Augusto Santos Silva

Júri

Presidente: Prof. Edgar Caetano Fernandes

Orientador: Prof. Carlos Augusto Santos Silva

Vogal: Dr. Rui Pedro da Costa Neto

Junho 2019

AGRADECIMENTOS

Pela importância que tiveram e que dou a todas as pessoas que me acompanharam nesta etapa da minha vida, quero fazer um agradecimento especial, a todos.

Ao meu orientador, Professor Carlos Santos Silva, deixar um agradecimento é pouco. Acho que nunca terei palavras para agradecer, mas é o agradecimento mais genuíno que me é possível fazer e que nada teria sido possível sem a sua orientação.

Ao Eng. Francisco Pires Costa, pela incrível dedicação e ajuda através do desenvolvimento e utilização da sua plataforma.

Ao Projeto Campus Sustentável, em particular ao Eng. Mário de Matos, ao Eng. Sören Friedrichs e ao Eng. Rui Pedro Pereira, pela ajuda e cedência de todos os dados que permitiram este trabalho.

Ao Rúben Marques, pelas luzes de programação que permitiram conseguir ter o programa operacional.

Ao GASTagus, por ser uma motivação na minha vida!

Às minhas pessoas do coração e às pessoas que se fizeram sentir nesta fase, obrigada de coração por acreditarem em mim!

À minha família, e em especial à minha Mãe e ao meu Pai, pelo apoio, por serem a minha base!

A todos, obrigada por tornarem esta fase mais leve e bonita.

ABSTRACT

Knowing that in Europe buildings are responsible for 40% of total energy consumption, and that this sector presents itself as one with some of the highest consumption in cities, it is proved to be of great importance to reduce the consumption in buildings. In this context, urban building energy modelling presents itself as an essential key to improve the design, retrofit and operation of buildings. Further, there is also a concern about the energy impact caused by large consumers geographically concentrated, such as hospital or university campuses, in big cities.

The present dissertation has the objective of contributing to the development of an energy management platform for the IST Alameda Campus. In particular, the thesis focus on the energy modelling, representation and analysis of the electricity consumption of four of its buildings (which represent more than 50% of the total consumption) and taking into considerations the proposals and measures of energy efficiency designed for these buildings.

In the scope of this dissertation, various analyses referring to the four target study buildings were performed, using real data and simulation results obtained from EnergyPlus models. In addition to these, analyses were also done to estimated consumption after the lighting replacement and the implementation of photovoltaic panels as an energy efficiency measure.

Knowing that GIS visualization is an important stage to understand the problem and making decisions about energy consumption, this thesis presents a visualization of the four buildings in ArcGIS and the modelling and animated visualization of the obtained results are presented in an IST energy management platform currently under development. It was also tested the urban building energy modelling, using the CEA tool, but some challenges and simulation errors were found, so it was not possible to make a comparison between the two visualization tool proposals. It was also concluded that, due to the simple access of the real data of the consumption of the buildings, the proposal of real analysis and visualization in the energy management platform would be more viable in this work.

From the final results, it can be understood that the four buildings chosen are responsible for 50% of the campus' total energy consumption and that there is a high consumption associated with interior equipment and lighting, between other. Regarding the replacement of one type of lighting equipment, it allows a reduction of approximately 11% for two buildings and it is estimated that up 3.35% in total annual energy consumption of the campus. Regarding the implementation of photovoltaic panels, the conclusion was that this measure allows for a reduction of electricity consumption in approximately 9%, accounting for the four buildings and it is estimated that up to 4.44% in total annual energy consumption of the campus.

Key-words: Urban Building Energy Modelling, City Energy Analyst, ArcGIS, EnergyPlus, energy efficiency

RESUMO

Sabendo que na Europa os edifícios são responsáveis por 40% do consumo total de energia e que este é um dos sectores com maior consumo energético nas cidades, é de grande importância a redução deste consumo. Neste contexto, a modelação do consumo de energia apresenta-se como uma chave fulcral para o desenvolvimento e implementação de medidas para a melhoria do desempenho energético dos edifícios. Atualmente, encontra-se também identificada uma preocupação relativamente ao impacto energético que grandes consumidores geograficamente concentrados, como campi hospitalares ou universitários, apresentam nas grandes cidades.

Assim, a presente dissertação apresenta como objetivo a contribuição no desenvolvimento de uma plataforma de gestão de energia para o Campus da Alameda do IST, e em particular a modelação, representação e a análise do consumo de energia elétrica dos quatro edifícios que representam mais de 50% do consumo total, tendo em consideração os consumos atuais e as propostas e medidas de eficiência energética pensadas para estes edifícios.

Assim, efetuou-se diversas análises referentes ao consumo de quatro edifícios alvos de estudo, através de dados reais e de resultados obtidos através de modelos EnergyPlus, e referentes ao consumo, após a implementação de medidas de eficiência energética, como seja a substituição de iluminação e a instalação de painéis fotovoltaicos.

Sabendo que a visualização GIS apresenta-se como uma etapa importante na compreensão e tomada de decisões relativamente ao consumo dos edifícios, apresenta-se uma visualização dos quatro edifícios no ArcGIS e a modelação e visualização animada dos resultados obtidos numa plataforma de gestão de energia do IST atualmente em desenvolvimento. Foi ainda testada a modelação de energia com a ferramenta CEA, mas foram encontrados diversos desafios e erros de simulação, pelo que não foi possível efetuar uma eventual comparação entre as duas propostas de ferramentas de visualização. Chegou-se também à conclusão de que, pelo acesso fácil dos dados reais dos consumos dos edifícios, a proposta de análises reais e visualização na plataforma de gestão de energia apresentaria maior fiabilidade neste estudo.

Dos resultados finais, conclui-se que os quatro edifícios são responsáveis por 50% do consumo total anual de energia do Campus e que existe um consumo elevado associado aos equipamentos interiores e iluminação, entre outros. Relativamente à substituição de um tipo de equipamento de iluminação, permite uma redução de aproximadamente 11% nos dois edifícios em estudo e estima-se que 3,35% no consumo total anual do Campus. Em relação à implementação de painéis fotovoltaicos, permite uma redução de aproximadamente 9% nos quatro edifícios e estima-se que 4,44% no consumo total anual do Campus.

Palavras-chave: Modelação de energia em ambiente urbano, *City Energy Analyst*, ArcGIS, EnergyPlus, eficiência energética

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	II
ABSTRACT.....	IV
RESUMO.....	VI
ÍNDICE.....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE TABELAS.....	XIV
1 Introdução.....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos.....	1
1.3 Contribuições.....	2
1.4 Estrutura da Dissertação.....	2
2 Revisão Bibliográfica.....	4
2.1 Modelação de energia em ambiente urbano (UBEM).....	4
2.2 Ferramentas para implementação.....	6
2.2.1 <i>Urban Modelling Interface</i> - UMI.....	7
2.2.2 <i>City Building Energy Saver</i> - CityBES.....	8
2.2.3 <i>City Energy Analyst</i> - CEA.....	9
2.2.4 Comparação.....	10
2.2.5 CogUBEM – Modelação cognitiva de energia em ambiente urbano.....	11
2.3 Aplicações.....	11
2.3.1 Projeto Suscity.....	11
2.3.2 Campus Universitários.....	12
2.4 Ferramentas de Apoio.....	13
2.4.1 Programa EnergyPlus (E+).....	13
2.4.2 Programa ArcGIS.....	15
3 Caso de Estudo.....	17
3.1 Campus Universitário da Alameda do IST.....	17
3.2 Metodologia.....	18

3.2.1	Ferramentas de implementação UBEM.....	18
3.2.2	Análise dos dados de consumo de energia elétrica.....	19
3.2.3	Análise dos modelos EnergyPlus	20
3.2.4	Análise da implementação de medidas de eficiência energética	20
4	Modelo de visualização de energia para o IST.....	22
4.1	Visualização do IST no ArcGIS.....	22
4.2	Modelação com o <i>City Energy Analyst</i>	24
4.2.1	Dados.....	25
4.2.2	Método.....	25
4.2.3	Alterações no <i>City Energy Analyst</i>	27
4.2.4	<i>CEA Dashboard</i>	28
4.3	Plataforma de gestão de energia do IST.....	29
5	Dados atuais do Campus da Alameda do IST.....	32
5.1	Análise do consumo de eletricidade dos quatro edifícios.....	33
5.1.1	Consumo anual.....	33
5.1.2	Consumo mensal	34
5.1.3	Consumo diário.....	39
5.1.4	Visualização de resultados na Plataforma	47
5.2	Impacto dos quatro edifícios no Campus.....	47
5.3	Análise dos modelos EnergyPlus	48
5.3.1	Pavilhão Central.....	49
5.3.2	Pavilhão de Civil.....	51
5.3.3	Torre Norte.....	52
5.3.4	Torre Sul	54
5.3.5	Visualização de resultados na Plataforma	56
5.4	Validação.....	57
6	Eficiência energética e Medidas de Poupança	61
6.1	Proposta de alterações.....	61
6.2	Medidas de eficiência energética.....	61
6.2.1	Iluminação	62

6.2.2	Painéis fotovoltaicos.....	66
6.3	Visualização de resultados na Plataforma.....	72
7	Conclusões.....	73
7.1	Trabalho futuro	74
	REFERÊNCIAS.....	75
	ANEXOS	78
	Anexo A – Instalação do <i>City Energy Analyst</i> (CEA)	78
	Anexo B – Consumo de eletricidade.....	81
	Anexo C – Consumo de eletricidade referente aos modelos EnergyPlus	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desafios da modelação de energia em ambiente urbano.....	6
Figura 2 - Etapas de modelação de energia em ambiente urbano.....	6
Figura 3 - Capacidade de análise da ferramenta UMI segundo (Reinhart <i>et al.</i> , 2013).....	8
Figura 4 - Etapas e <i>Softwares</i> utilizados no CityBES adaptado de (Chen <i>et al.</i> , 2017)	9
Figura 5 - Análises possíveis através do CityBES adaptado de (Hong <i>et al.</i> , 2018).....	9
Figura 6 - Estrutura do CEA adaptado de (Fonseca <i>et al.</i> , 2016)	10
Figura 7 - Análises possíveis através do CEA adaptado de (Fonseca <i>et al.</i> , 2016).....	10
Figura 8 - Metodologia para Simulação de Edifícios adaptado de (Aelenei <i>et al.</i> , 2016)	12
Figura 9 - Ferramenta do EnergyPlus denominada de IDF-Editor	14
Figura 10 - Ferramenta do EnergyPlus denominada de EP-Launch.....	14
Figura 11 - Componentes para a modelação de energia em ambiente urbano adaptado de (Chen and Hong, 2018)	15
Figura 12 - Funcionalidades do programa ArcGIS	15
Figura 13 - Componente ArcMap no programa ArcGIS.....	16
Figura 14 – <i>Toolbox</i> CEA no ArcGIS	16
Figura 15 - Campus da Alameda do Instituto Superior Técnico e representação dos quatro edifícios alvo de estudo	17
Figura 16 - Propostas de metodologia para o caso de estudo	18
Figura 17 – Metodologia de modelação de energia para o caso de estudo.....	21
Figura 18 - Representação do Campus da Alameda do IST no ArcMap	22
Figura 19 - Representação de todos os edifícios do Campus da Alameda do IST no ArcMap.....	22
Figura 20 - Edifícios em estudo assinalados no <i>shapefile</i>	23
Figura 21 - Edifícios alvo de estudo e <i>shapefile</i> do Campus.....	23
Figura 22 - Campus da Alameda do IST em 3D no ArcScene	23
Figura 23 - Edifícios alvo de estudo em 3D no ArcScene.....	24
Figura 24 - Representação das torres no ArcScene	24
Figura 25 - Dados referentes ao Pavilhão de Civil no ArcGIS	24
Figura 26 - <i>Inputs</i> detalhados do modelo pela ferramenta CEA.....	26
Figura 27 - <i>Outputs</i> detalhados do modelo pela ferramenta CEA.....	26
Figura 28 - Criação de um novo projeto CEA no PyCharm	27
Figura 29 - Criação de um novo projeto CEA no ArcGIS	27
Figura 30 - Criação de um novo projeto CEA.....	27
Figura 31 - Interfaces do <i>City Energy Analyst</i> no PyCharm	28
Figura 32 - Interface CEA <i>Dashboard</i>	28
Figura 33 - Exemplo do <i>Input zone</i> no CEA <i>Dashboard</i>	29
Figura 34 - Visualização do Campus do IST no CEA <i>Dashboard</i>	29

Figura 35 - Criação de gráficos com os resultados no <i>CEA Dashboard</i>	29
Figura 36 - Visualização de gráficos no <i>CEA Dashboard</i>	29
Figura 37 - Plataforma de gestão de energia do IST com os quatro edifícios alvos de estudo	30
Figura 38 - Dados do Pavilhão Central incluídos nos três cenários	30
Figura 39 - Variáveis que influenciam o consumo dos edifícios	32
Figura 40 - Consumo anual de eletricidade dos quatro edifícios	34
Figura 41 - Consumo mensal do Pavilhão Central nos anos 2017 e 2018	35
Figura 42 - Consumo mensal do Pavilhão de Civil nos anos 2017 e 2018	35
Figura 43 - Consumo mensal da Torre Norte nos anos 2017 e 2018	36
Figura 44 - Consumo mensal da Torre Sul nos anos 2017 e 2018	37
Figura 45 - Consumo mensal dos quatro edifícios no ano de 2017.....	38
Figura 46 - Consumo mensal dos quatro edifícios no ano de 2018.....	38
Figura 47 - Consumo no mês de setembro de 2018 na Torre Sul	39
Figura 48 - Consumo diário dos dias de maior consumo no Pavilhão Central	39
Figura 49 - Perfil de consumo diário de 26 a 30 de setembro no Pavilhão Central	40
Figura 50 - Perfil de consumo diário de 4 a 8 de abril no Pavilhão Central.....	40
Figura 51 - Perfil médio semanal de consumo no Pavilhão Central	41
Figura 52 - Consumo diário dos dias de maior consumo no Pavilhão de Civil	41
Figura 53 - Perfil de consumo diário de 26 a 30 de setembro para o Pavilhão de Civil	42
Figura 54 - Perfil de consumo diário de 4 a 8 de abril no Pavilhão de Civil.....	42
Figura 55 - Perfil médio semanal de consumo no Pavilhão de Civil	43
Figura 56 - Consumo diário dos dias de maior consumo na Torre Norte.....	43
Figura 57 - Perfil de consumo diário de 26 a 30 de setembro para a Torre Norte.....	44
Figura 58 - Perfil de consumo diário de 4 a 8 de abril na Torre Norte	44
Figura 59 - Perfil médio semanal de consumo na Torre Norte	45
Figura 60 - Consumo diário dos dias de maior consumo na Torre Sul	45
Figura 61 - Perfil de consumo diário de 26 a 30 de setembro para a Torre Sul	46
Figura 62 - Perfil de consumo diário de 4 a 8 de abril na Torre Sul.....	46
Figura 63 - Perfil médio semanal de consumo na Torre Sul	46
Figura 64 - Representação do consumo de eletricidade por gama de valores no primeiro cenário.....	47
Figura 65 - Consumo mensal de eletricidade dos quatro edifícios e do Campus do IST	47
Figura 66 - Percentagem do consumo de eletricidade de cada edifício no Campus.....	48
Figura 67 - Objetos criados no modelo E+ do Pavilhão Central	49
Figura 68 - Resultados da simulação E+ para o Pavilhão Central	49
Figura 69 - Tipos de utilização de energia elétrica no Pavilhão Central	50
Figura 70 - Objetos criados no modelo E+ do Pavilhão de Civil.....	51
Figura 71 - Resultados da simulação E+ para o Pavilhão de Civil	51
Figura 72 - Tipos de utilização de energia elétrica no Pavilhão de Civil	52

Figura 73 - Objetos criados no modelo E+ da Torre Norte.....	52
Figura 74 - Resultados da simulação E+ para a Torre Norte.....	53
Figura 75 - Tipos de utilização de energia elétrica na Torre Norte	53
Figura 76 - Objetos criados no modelo E+ da Torre Sul	54
Figura 77 - Resultados da simulação E+ para a Torre Sul.....	55
Figura 78 - Tipos de utilização de energia elétrica na Torre Sul.....	55
Figura 79 - Tipo de utilização com maior consumo em cada edifício no primeiro cenário	56
Figura 80 - Tipo de utilização com maior consumo de um edifício no primeiro cenário	56
Figura 81 - Comparação entre o modelo e o valor real do consumo no Pavilhão Central	58
Figura 82 - Comparação entre o modelo e o valor real do consumo no Pavilhão de Civil	58
Figura 83 - Comparação entre o modelo e o valor real do consumo na Torre Norte	59
Figura 84 - Comparação entre o modelo e o valor real do consumo na Torre Sul.....	59
Figura 85 - Potência total da iluminação de cada zona térmica no EnergyPlus	62
Figura 86 - Comparação do consumo mensal total após a alteração da iluminação (E+) no Pavilhão Central.....	63
Figura 87 - Comparação do consumo mensal referente à iluminação (E+) no Pavilhão Central	63
Figura 88 - Percentagem referente à iluminação no Pavilhão Central após as alterações	64
Figura 89 - Comparação do consumo mensal total após a alteração da iluminação (E+) no Pavilhão de Civil	64
Figura 90 - Comparação do consumo mensal referente à iluminação (E+) no Pavilhão de Civil.....	64
Figura 91 - Percentagem referente à iluminação no Pavilhão de Civil após as alterações	65
Figura 92 - Comparação do consumo mensal após a implementação dos painéis fotovoltaicos no Pavilhão Central	66
Figura 93 - Perfil de consumo diário da amostra de 26 a 30 de setembro, antes e após FV, no Pavilhão Central.....	66
Figura 94 - Comparação do consumo mensal após a implementação de painéis fotovoltaicos no Pavilhão de Civil	67
Figura 95 - Perfil de consumo diário da amostra de 26 a 30 de setembro, antes e após FV, no Pavilhão de Civil.....	67
Figura 96 - Comparação do consumo mensal após a implementação de painéis fotovoltaicos na Torre Norte ..	68
Figura 97 - Perfil de consumo diário da amostra de 26 a 30 de setembro, antes e após FV, na Torre Norte.....	68
Figura 98 - Comparação do consumo mensal após a implementação de painéis fotovoltaicos na Torre Sul.....	68
Figura 99 - Perfil diário da amostra de 26 a 30 de setembro, antes e após FV, na Torre Sul.....	69
Figura 100 - Comparação dos resultados antes e após implementação de FV nos quatro edifícios	69
Figura 101 - Comparação entre os dois primeiros cenários	72
Figura 102 - Terceiro cenário com a poupança de energia	72
Figura 103 - Download do projeto CEA	78
Figura 104 - Ambiente de instalação do CEA.....	79
Figura 105 - Instalação do CEA no PyCharm.....	80
Figura 106 - Instalação e lista de bibliotecas existentes.....	80
Figura 107 - Instalação de novas bibliotecas Python.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estudos realizados para melhoria dos UBEMs.....	5
Tabela 2 - Casos de estudo e criação de ferramentas para implementação de UBEM.....	7
Tabela 3 - Vantagens e desafios das ferramentas de implementação UBEM	11
Tabela 4 - Função das ferramentas do EnergyPlus.....	13
Tabela 5 - Dados necessários inicialmente para a criação de um novo projeto CEA	25
Tabela 6 - Fatores de conversão de unidades para cada edifício.....	33
Tabela 7 - Consumo anual de eletricidade dos quatro edifícios.....	33
Tabela 8 - Meses de menor e maior consumo de eletricidade no Pavilhão Central	34
Tabela 9 - Meses de menor e maior consumo de eletricidade no Pavilhão de Civil	35
Tabela 10 - Meses de menor e maior consumo de eletricidade na Torre Norte.....	36
Tabela 11 - Meses de menor e maior consumo de eletricidade na Torre Sul	36
Tabela 12 - Dias de menor e maior consumo diário no Pavilhão Central.....	39
Tabela 13 - Dias de menor e maior consumo de eletricidade no Pavilhão de Civil.....	41
Tabela 14 - Dias de menor e maior consumo de eletricidade na Torre Norte	43
Tabela 15 - Dias de menor e maior consumo de eletricidade na Torre Sul.....	45
Tabela 16 - Consumo de eletricidade do Campus e dos edifícios de estudo no ano de 2017.....	48
Tabela 17 - Consumo de eletricidade resultante do modelo E+ do Pavilhão Central e comparação de dados	50
Tabela 18 - Consumo de eletricidade resultante do modelo E+ do Pavilhão de Civil e comparação de dados	52
Tabela 19 - Consumo de eletricidade resultante do modelo E+ da Torre Norte e comparação de dados.....	53
Tabela 20 - Consumo de eletricidade resultante do modelo E+ da Torre Sul e comparação de dados	55
Tabela 21 - Resultados dos modelos E+ para os quatro edifícios.....	56
Tabela 22 - Erro relativo entre o valor real de consumo anual e do modelo no Pavilhão Central.....	58
Tabela 23 - Erro relativo entre o valor real de consumo anual e do modelo no Pavilhão de Civil.....	59
Tabela 24 - Erro relativo entre o valor de consumo anual e do modelo na Torre Norte	59
Tabela 25 - Erro relativo entre o valor real de consumo anual e do modelo na Torre Sul.....	60
Tabela 26 - Medidas de poupança para os edifícios do IST	61
Tabela 27 - Dados reais de iluminação de uma zona térmica do Pavilhão de Civil	63
Tabela 28 - Número de lâmpadas substituídas no presente estudo	63
Tabela 29 - Redução no consumo de eletricidade após alterações de iluminação no Pavilhão Central.....	64
Tabela 30 - Redução no consumo de eletricidade após alterações de iluminação no Pavilhão de Civil.....	65
Tabela 31 - Comparação entre os dados reais e dos modelos referente à iluminação.....	65
Tabela 32 - Redução no consumo total dos edifícios após a substituição da iluminação	65
Tabela 33 - Impacto da substituição de iluminação no consumo total do Campus	65
Tabela 34 - Produção de energia fotovoltaica nos quatro edifícios no ano de 2018	69
Tabela 35 - Sistemas fotovoltaicos dos quatro edifícios	70
Tabela 36 - Impacto da implementação de FV no consumo total dos quatro edifícios em 2018	71

Tabela 37 - Produção de energia fotovoltaica nos quatro edifícios no ano de 2017	71
Tabela 38 - Impacto da implementação de FV no consumo total dos quatro edifícios em 2017	71
Tabela 39 - Impacto da implementação de FV no consumo total do Campus	71
Tabela 40 - Consumo mensal do Pavilhão Central	81
Tabela 41 - Consumo mensal do Pavilhão de Civil	81
Tabela 42 - Consumo mensal da Torre Norte.....	82
Tabela 43 - Consumo mensal da Torre Sul	82
Tabela 44 - Consumo mensal do Campus da Alameda em 2017	82
Tabela 45 - Resultados da simulação dos modelos EnergyPlus para o consumo de eletricidade.....	83

1 Introdução

1.1 Motivação

Atualmente, mais de metade da população mundial vive em áreas urbanas e as cidades são responsáveis por mais de dois terços do consumo de energia primária e por mais de 70% das emissões globais de gases de efeito de estufa (GEE) (Chen and Hong, 2018). Na Europa, de acordo com a Comissão Europeia, os edifícios são responsáveis por 40% do consumo total de energia (Monteiro *et al.*, 2017). A redução de energia neste sector tem então um especial interesse para a redução do consumo global de energia e das emissões de gases de efeito de estufa, fazendo assim parte da estratégia para alcançar as metas globais de energia e ambiente (Hong *et al.*, 2018).

Atualmente, tornar os bairros energeticamente mais eficientes é uma oportunidade de melhoria contínua, tanto para a redução das emissões, como para um desenvolvimento sustentável (Reinhart *et al.*, 2013). Assim, nos últimos anos, vários estudos concentraram-se em planear e avaliar estratégias de reabilitação para os edifícios (Hong *et al.*, 2016).

Para além dos vários tipos de edifícios, incluindo os habitacionais, existe uma preocupação relativamente aos grandes campus, incluindo campus universitários. Esta preocupação passa por determinar estratégias mais eficazes na redução da pegada ecológica (Nagpal and Reinhart, 2018), pois estes apresentam-se como uma grande percentagem do consumo energético nas cidades. Em 2014, o consumo de eletricidade do Campus da Alameda do IST representou 0,4% do consumo total da cidade de Lisboa (Lisboa E-Nova, 2016). E estima-se que o Campus tem uma área de 40000 m², portanto em comparação com a área de 100 km² da cidade de Lisboa, apresenta um rácio de 0,04%, ou seja, a percentagem do consumo apresenta um valor de uma ordem de grandeza acima e seria expectável um menor consumo em comparação à área. Com isto, existe uma necessidade de redução do consumo de energia elétrica do Campus.

1.2 Objetivos

Sabendo o impacto que um campus universitário pode ter numa cidade, os principais objetivos da presente dissertação são o estudo dos consumos de eletricidade de um campus, a avaliação do impacto da implementação de medidas de poupança e a respetiva representação em 2D e 3D numa plataforma de gestão de energia por forma a facilitar a comunicação com diferentes *stakeholders*.

Através de um estudo intensivo sobre modelação de energia em ambiente urbano e a representação 2D e 3D do campus, outro objetivo é testar diferentes ferramentas de implementação de UBEMs e a criação de um modelo de energia para o campus para visualização de todos os dados: históricos de consumos de eletricidade, histórico de consumo após uma medida de eficiência energética e informações relevantes dos edifícios.

1.3 Contribuições

O presente trabalho contribuiu com diversos estudos para analisar o consumo atual do Campus do IST e avaliação de uma proposta de melhoria da eficiência energética. Para além do caso de estudo, o trabalho apresenta uma visão alargada sobre a modelação de energia em ambiente urbano, permitindo que num futuro próximo este tipo de aplicação possa continuar a ser desenvolvido e, posteriormente, utilizado em vários edifícios e em vários campus universitários.

Sintetizando o presente trabalho, este demonstra as seguintes contribuições:

- ✓ Revisão bibliográfica de modelação de energia em ambiente urbano (UBEM);
- ✓ Representação e visualização 2D e 3D do Campus e dos edifícios em estudo;
- ✓ Estudo e implementação de uma ferramenta de modelação de energia em ambiente urbano;
- ✓ Desafios da implementação de um UBEM;
- ✓ Visualização numa plataforma de gestão de energia dos históricos de consumos, dos tipos de utilização de energia e de uma proposta de medida de eficiência energética para quatro edifícios do Campus;
- ✓ Análise do consumo de eletricidade de diferentes edifícios do Campus universitário da Alameda do Instituto Superior Técnico;
- ✓ Análise de resultados dos modelos EnergyPlus dos edifícios comparativamente aos dados reais;
- ✓ Análise do impacto dos edifícios em estudo no consumo total anual do Campus;
- ✓ Análise do impacto da substituição de iluminação em dois edifícios;
- ✓ Análise do impacto da instalação de painéis fotovoltaicos nos quatro edifícios.

1.4 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está estruturada em sete capítulos. Este primeiro capítulo apresenta a introdução, os principais objetivos e contribuições da dissertação.

O segundo capítulo introduz o conceito de modelação de energia em ambiente urbano e apresenta uma revisão bibliográfica do tema, dos principais desafios, e os desenvolvimentos alcançados nos últimos tempos. Apresenta e descreve três ferramentas existentes para a implementação dos modelos de energia e um novo conceito associado aos UBEMs. O final do capítulo é dedicado à descrição de programas utilizados como ferramentas de apoio à implementação.

O terceiro capítulo apresenta o caso de estudo e uma breve descrição do mesmo. De uma forma simplificada, é apresentada a metodologia utilizada para se atingir os objetivos propostos.

O quarto capítulo apresenta propostas para o modelo de energia para o Campus do IST. Neste capítulo encontra-se a representação do Campus no ArcGIS, em 2D e 3D, e os edifícios alvos de estudo. Relativamente ao modelo de energia, em primeira análise, apresenta a ferramenta *City Energy Analyst*, depois a plataforma de gestão de energia com os cenários para representar os dados obtidos na dissertação. A implementação da ferramenta CEA é descrita sucintamente, sendo que muitos dos passos apresentados são transversais ao desenvolvimento de UBEMs.

O quinto capítulo constitui os dados atuais do Campus, onde se encontra uma análise intensiva do consumo de eletricidade e os resultados das simulações dos modelos EnergyPlus. A análise do consumo tem em consideração resoluções horárias, apresentando perfis de consumos diários, consumos mensais e anuais. É também apresentada uma comparação entre os dados reais e os dados retirados dos modelos EnergyPlus, e os principais resultados representados na plataforma de gestão de energia.

O sexto capítulo apresenta propostas de alteração e medidas de poupança para os edifícios do Campus. Apresenta também um estudo do impacto no consumo de energia elétrica após a substituição de um tipo de equipamento de iluminação e após a implementação de painéis fotovoltaicos. No final do capítulo, são apresentados resultados na plataforma.

O sétimo capítulo apresenta as principais conclusões da presente dissertação, com propostas de trabalho futuro.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Modelação de energia em ambiente urbano (UBEM)

O consumo energético dos edifícios representa 30% do consumo total de energia no mundo (Ding *et al.*, 2019). E nas cidades, os edifícios podem ser responsáveis até 70% do uso¹ total de energia primária (Hong *et al.*, 2018). Sabendo que as Nações Unidas estimam que o número de habitantes nas cidades vai aumentar ao longo dos anos (Reinhart and Cerezo Davila, 2016), este aumento populacional vai alterar o consumo energético atual com o aumento da construção de edifícios e das necessidades de mobilidade, o que terá um enorme impacto nas emissões de gases de efeito de estufa, entre outros aspetos.

Sendo o setor da construção um dos grandes responsáveis por estas emissões, é fundamental desenvolver ferramentas que nos auxiliem a compreender melhor os seus consumos energéticos e consequentemente as principais causas de emissões, mas também de que forma é possível alterar e melhorar na construção dos edifícios. Os modelos de energia em edifícios (doravante designados por BEM como acrónimo da expressão inglesa *Building Energy Models*) apresentam-se como uma ferramenta importante para a avaliação do desempenho energético. Estes modelos têm sido até hoje utilizados para a análise individual de edifícios, mas é fundamental o desenvolvimento de modelos à escala multi-edifício e até urbana, por forma a analisar os impactos integrados ao nível da cidade.

A análise dos consumos energéticos dos edifícios pode ser realizada através de duas abordagens, uma abordagem *top-down* e uma abordagem *bottom-up* (Swan and Ugursal, 2009). Os modelos *top-down* utilizam a estimativa do consumo total de energia como forma de caracterizar o consumo característico dos edifícios (Swan and Ugursal, 2009) e não são adequados para a identificação de melhorias para os edifícios em ambiente urbano (Moghadam *et al.*, 2018). Os modelos *bottom-up* calculam o consumo de energia de grupos de edifícios ou individualmente e extrapolam esses resultados para representar uma região (Swan and Ugursal, 2009). Nas últimas décadas, um número significativo de modelos *bottom-up* têm sido desenvolvidos para edifícios em ambiente urbano (Fonseca and Schlueter, 2015a). Surgiu assim uma nova classe de modelos, os modelos de energia em ambiente urbano (UBEMs), que se baseiam numa abordagem *bottom-up*, e representam uma ferramenta essencial ao nível de projeto à escala urbana (Reinhart and Cerezo Davila, 2016).

Atualmente, ao nível do edifício individual, os modelos BEM já são amplamente utilizados no desenvolvimento de novos projetos ou de reabilitação, e o tempo de modelação é menos de um terço do tempo que era necessário anteriormente. Quando aplicados a escalas maiores, em contexto urbano, com um elevado número de edifícios, este processo não é tão viável, pois requer muito tempo de modelação e computação (e consequentemente maiores custos). Com a necessidade de uma expansão para o ambiente urbano, os UBEM surgem assim como uma ferramenta de apoio à decisão por parte dos intervenientes de um projeto para a

¹ Uso de Energia, termo em inglês “Energy Use”, representa o consumo de energia em diversos setores, como a indústria, transportes e os edifícios, que são os principais setores nas cidades (Thorin, 2014).

previsão do consumo de energia e das condições ambientais internas e externas ao edifício (Reinhart and Cerezo Davila, 2016).

Para diminuir o tempo de modelação e computação em escalas maiores, uma das soluções adotadas passa pela criação de arquétipos de edifícios. O conceito de arquétipo consiste em definir um edifício único que representa um conjunto de edifícios com propriedades semelhantes, tais como a idade, a utilização, o clima, os sistemas utilizados, propriedades térmicas, entre outras que podem ser selecionadas. A caracterização de um arquétipo de edifícios pode ser baseada num único edifício do conjunto, através de uma auditoria energética, ou através da geração de um edifício virtual formulado através de opiniões de especialistas e dados estatísticos (Ballarini *et al.*, 2014).

Esta divisão de edifícios em arquétipos constitui um passo determinante relativamente à fiabilidade dos UBEMs, devido ao processo ser tipicamente realizado por suposições genéricas. Uma razão para a utilização destas suposições é o insuficiente acesso a dados necessários, como o consumo de energia real de cada edifício e das propriedades térmicas dos edifícios (Reinhart and Cerezo Davila, 2016). Sendo que para planear e avaliar estratégias de reabilitação para edifícios é necessário um elevado conhecimento das características do mesmo (Hong *et al.*, 2016), a utilização de UBEMs para o estabelecimento de estratégias deve ser utilizado atualmente para identificar as linhas orientadoras das estratégias de reabilitação mas não podem ainda substituir o projeto detalhado. Contudo, e relativamente à validação destes modelos, existe ainda uma discrepância entre o consumo de energia simulado e o medido devido a incertezas de taxas de infiltração, cargas dos equipamentos e comportamento dos ocupantes nos edifícios (Reinhart and Cerezo Davila, 2016).

Nos últimos anos diversos autores desenvolveram estudos, mencionados na tabela 1, para encontrar soluções para vários os obstáculos no desenvolvimento de UBEMs, devido a um conhecimento ainda insuficiente.

Tabela 1 - Estudos realizados para melhoria dos UBEMs

Autores	Estudo	Resultados
C. Cerezo, C.F. Reinhart	Utilização de Energia ²	Metodologias de Análise de Ciclo de Vida (LCA) e nova ferramenta CAD para análise energética.
T. Dogan, C.F. Reinhart, P. Michalatos	Disponibilidade de iluminação natural	Ferramenta para avaliação e simulação da iluminação natural.
T. Rakha, C.F. Reinhart	<i>Walkability</i> ³	Ferramenta para simulação de transporte urbano sustentável.
U. Wilke, F. Haldi, J. Scartezzini, D. Robinson	Comportamento dos ocupantes	Metodologia para prever o comportamento dos ocupantes.

Existem vários dados importantes para a criação de um modelo de energia. Numa primeira análise, a geometria do edifício, a sua altura, características do envelope e a identificação de zonas térmicas e numa segunda análise os sistemas existentes no edifício e as suas condições de operação, como os sistemas de iluminação interior e exterior, os sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) e de águas quentes sanitárias (AQS) (Chen and Hong, 2018).

² Utilização de energia – Na presente dissertação, esta nomenclatura refere-se aos tipos de utilização de energia num edifício, nomeadamente referente a equipamentos, iluminação, AVAC, entre outros.

³ *Walkability* – Índice de caminhabilidade urbana, conceito de medida para quanto uma zona é favorável e amigável para caminhar (Reinhart *et al.*, 2013).

Apesar de parecer improvável ter uma elevada fiabilidade nos UBEMs, devido aos diferentes resultados das previsões individuais BEM, quando se compara com o consumo anual de energia, os erros tendem a diminuir. Como seria de esperar a precisão tende a diminuir à medida que os resultados são analisados ao nível individual (Reinhart and Cerezo Davila, 2016). Na figura 1, encontram-se esquematizados os principais desafios encontrados.

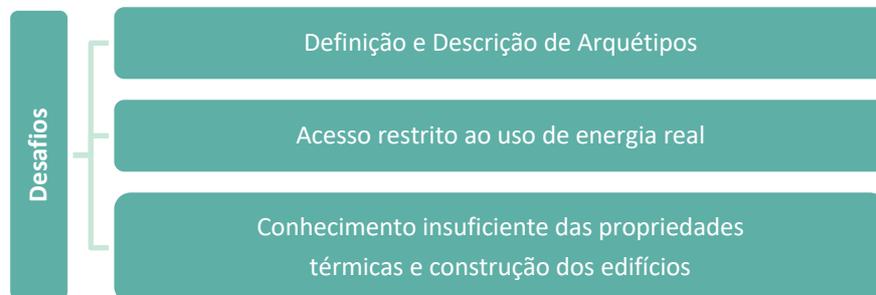


Figura 1 - Desafios da modelação de energia em ambiente urbano

Devido às preocupações crescentes com o acesso aos dados por causa da privacidade dos utilizadores, algumas empresas começam a utilizar UBEMs para prever perfis futuros. Assim os modelos arquétipos resultantes não infringem a privacidade (Reinhart and Cerezo Davila, 2016), embora isso possa acontecer no estudo de um edifício apenas.

Existem três grandes etapas para a modelação de energia em UBEMs: a organização dos dados de entrada para a simulação, onde está englobada a criação de arquétipos; a criação e execução de um modelo térmico (definição das zonas térmicas); e a validação do processo (Reinhart and Cerezo Davila, 2016). Em todas as etapas, que se encontram esquematizadas na figura 2, diversas opções de projeto têm que ser tomadas, incluindo as ferramentas para implementar os modelos de energia.



Figura 2 - Etapas de modelação de energia em ambiente urbano

2.2 Ferramentas para implementação

Diversas ferramentas podem ser seleccionadas para a implementação dos modelos de energia em ambiente urbano, tendo sido desenvolvidos diversos estudos ao longo das últimas décadas. Em seguida com maior detalhe são apresentadas na tabela 2, três ferramentas utilizadas atualmente, sendo também indicados os autores e as respetivas instituições.

Todas estas ferramentas assentam na utilização de um motor dinâmico de simulação térmica, o EnergyPlus, sendo este um dos mais utilizados a nível mundial. O EnergyPlus é o programa de simulação de

energia em edifícios que permite modelar o consumo de energia (como AVAC, iluminação e cargas) mais utilizado a nível mundial (Hong *et al.*, 2016).

Tabela 2 - Casos de estudo e criação de ferramentas para implementação de UBEM

Ferramenta	Instituição	Autores de Estudo	Casos de Estudos
UMI	MIT	Christoph Reinhart e Carlos Cerezo	Boston, Massachusetts
CityBES	LBNL	Yixing Chen e Tianzhen Hong	São Francisco, Califórnia
City Energy Analyst	ETH Zurich	Jimeno A. Fonseca	Singapura e Zurique, Suíça

Existe outra ferramenta semelhante à UMI, que não está disponível publicamente, criada por D. Robinson e denominada de SUNTool (Reinhart *et al.*, 2013).

2.2.1 *Urban Modelling Interface - UMI*

Uma das ferramentas utilizadas, denominada de UMI (*Urban Modelling Interface*), é uma plataforma de projeto de modelação em ambiente urbano. Tem como objetivo a avaliação do consumo energético dos edifícios, da mobilidade, a iluminação natural e conforto nas cidades (Reinhart *et al.*, 2013).

Esta ferramenta funciona como um Plug-in para um software de modelação CAD (Rhinoceros 3D), para desenvolvimento de modelos urbanos 3D, sendo possível exportá-los e executados no EnergyPlus (Reinhart and Cerezo Davila, 2016). Através desta ferramenta é possível construir um modelo de um bairro ou cidade, representando elementos como árvores, objetos sombreados, ruas, infraestruturas, entre outros. Verifica-se ao longo dos anos, uma melhoria na transferência de dados GIS para CAD, o que melhora a criação dos modelos (Reinhart *et al.*, 2013).

Para os modelos *bottom-up* todos os edifícios do mesmo tipo são idênticos para fins estatísticos. A principal diferença da ferramenta UMI para outras é que esta tem em consideração as diferenças no consumo de energia dos edifícios devido às condições climáticas locais, como por exemplo para existência de sombreamento entre edifícios. Existe uma forte ligação entre os modelos e a ferramenta UMI, uma vez que os primeiros fornecem informações importantes sobre a construção, taxas de infiltração e outros dados típicos de edifícios (Reinhart *et al.*, 2013). A principal diferença entre as duas ferramentas, UMI e SUNTOOL apresentadas na secção anterior, é que na construção da ferramenta UMI baseou-se em motores de simulação já existentes, sendo que os utilizadores desta ferramenta beneficiam desta forma de desenvolvimentos passados e futuros e existe uma maior probabilidade do utilizador estar familiarizado com o EnergyPlus (Reinhart *et al.*, 2013).

As diferentes análises possíveis através desta ferramenta permitem melhorar sectores que se constituem como os grandes responsáveis por emissões de carbono e avaliar indicadores de conforto (Reinhart *et al.*, 2013). Desta forma, os modelos desenvolvidos e posteriormente executados no EnergyPlus oferecem também dados de iluminação natural, ciclo de vida e mobilidade, permitindo a análise dos mesmos (Reinhart and Cerezo Davila, 2016).

Na figura 3, estão apresentados alguns módulos de análise da ferramenta UMI. Ainda se encontram a ser desenvolvidos estudos para a criação de outros módulos, nomeadamente, a análise das emissões de carbono resultantes dos transportes e edifícios (Reinhart *et al.*, 2013).

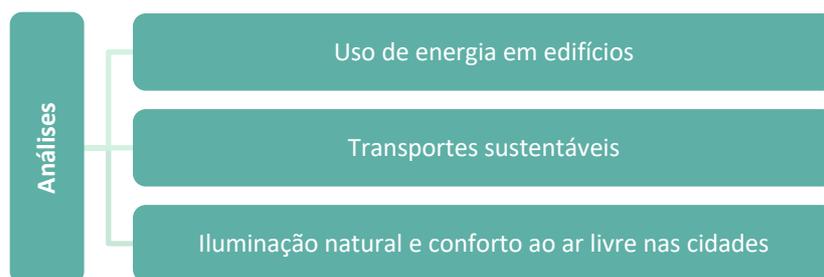


Figura 3 - Capacidade de análise da ferramenta UMI segundo (Reinhart *et al.*, 2013)

A ferramenta tem vindo a ser utilizada em âmbito universitário e dessa experiência sabe-se que, em geral, os alunos compreendem os resultados e a utilização da ferramenta, o que contribuía para a tomada de decisão em projetos (Reinhart *et al.*, 2013).

Em suma, esta ferramenta fornece dados para melhorar o desempenho dos edifícios e planeamento urbano.

2.2.2 *City Building Energy Saver* - CityBES

Outra ferramenta atualmente utilizada, denominada de CityBES, *City Building Energy Saver*, é uma plataforma aberta de dados disponível na internet. Apresenta também como objetivo a modelação de energia em ambiente urbano, permitindo uma análise de desempenho e de possíveis melhorias (Hong *et al.*, 2016). O CityBES surge através do CBES (*Commercial Building Energy Saver*) para criar modelos de energia no EnergyPlus para edifícios (Chen and Hong, 2018). Esta ferramenta utiliza um padrão internacional CityGML⁴ para representar os edifícios nas cidades em três dimensões e o CBES, que contém um banco de dados de edifícios protótipos, dados de edifícios para diversas áreas climáticas e dados de custos e desempenho para diversas medidas de conservação de energia (ECM) (Hong *et al.*, 2016).

O CityBES tem capacidade de modelar mais de 10000 edifícios e identificar possíveis economias de energia entre 30% a 50%. Um esforço importante do CityBES é a possibilidade de visualização de um mapa energético de edifícios numa cidade, com o consumo real de energia e as melhorias possíveis e necessárias. Apresenta a possibilidade de avaliar o impacto das mudanças climáticas, os sistemas utilizados e a utilização de energias renováveis, como painéis fotovoltaicos nos edifícios (Hong *et al.*, 2016). As etapas deste processo encontram-se esquematizadas na figura 4.

⁴ CityGML é um padrão internacional de dados aberto do *Open Geospatial Consortium* (OGC) para representação e troca de modelos 3D de cidades (Hong *et al.*, 2016).

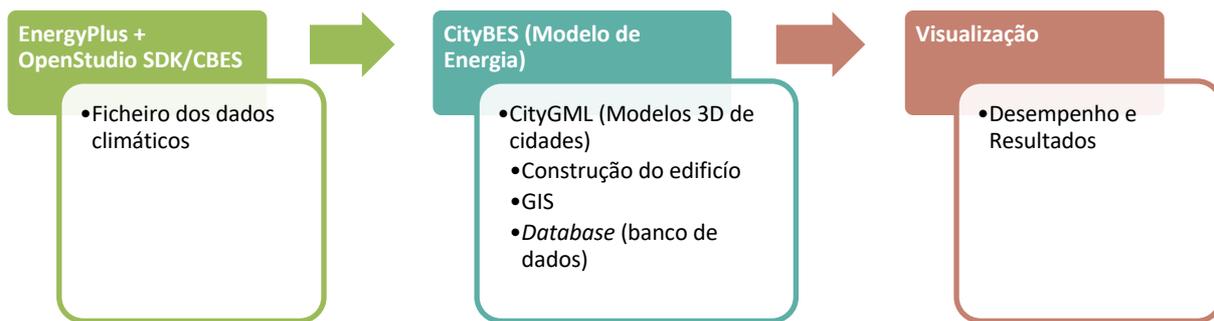


Figura 4 - Etapas e *Softwares* utilizados no CityBES adaptado de (Chen *et al.*, 2017)

Esta ferramenta fornece um conjunto de dados e recursos para planeamento urbano, pesquisas, gestores e consultores de energia, proprietários de edifícios e serviços públicos (Hong *et al.*, 2016). A ferramenta ainda apresenta alguns desafios, como a melhoria na criação de modelos com o CityGML, na aquisição de dados de uso real de energia e na modelação no EnergyPlus de acordo com as medidas de reabilitação. Pretende-se ainda melhorar a modelação das alterações climáticas locais e na possibilidade de serem modelados ainda mais edifícios para além da quantidade que é possível (Hong *et al.*, 2016).

Na figura 5, encontram-se representadas as principais vertentes da ferramenta, comprovando que esta ferramenta é capaz de gerar análises de volume considerável.

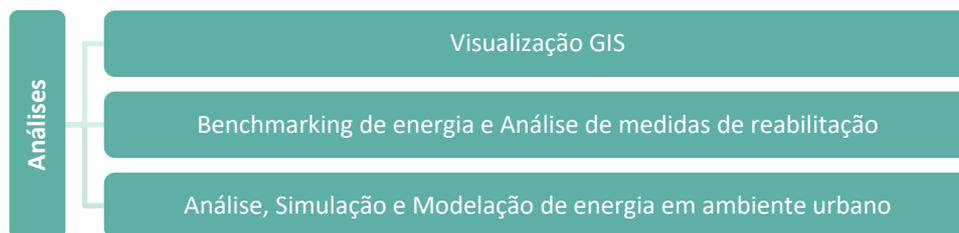


Figura 5 - Análises possíveis através do CityBES adaptado de (Hong *et al.*, 2018)

2.2.3 *City Energy Analyst - CEA*

O *City Energy Analyst*, CEA, foi desenvolvido no ETH Zurich. Apresenta uma abordagem de Plug-in, integrada para o ArcGIS (Reinhart and Cerezo Davila, 2016), que foi descontinuada durante o desenvolvimento desta dissertação. Esta ferramenta utiliza métodos dependentes do tempo para a simulação de desempenho de energia (Fonseca *et al.*, 2016), portanto é capaz de produzir resultados em múltiplas escalas espaciais e temporais (Reinhart and Cerezo Davila, 2016).

Em contraste com outras abordagens, o CEA desenvolve numa única interface vários modelos detalhados e com baixo tempo de simulação (Fonseca and Schlueter, 2015b). Na figura 6, encontra-se a estrutura desta ferramenta.

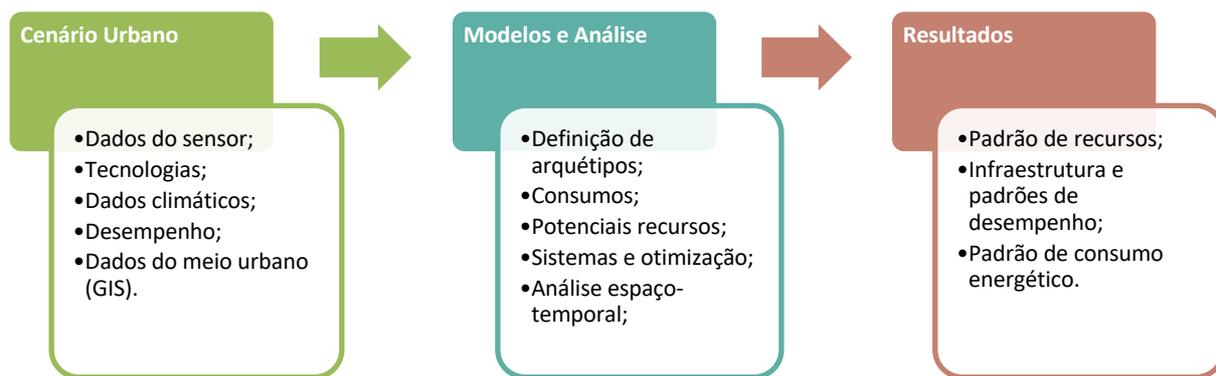


Figura 6 - Estrutura do CEA adaptado de (Fonseca *et al.*, 2016)

Torna-se assim possível o armazenamento, análise e visualizações de informações em diferentes escalas espaciais e temporais. Através dos dados do cenário urbano, são possíveis análises horárias aos serviços de energia e temperatura nos edifícios. Neste processo é utilizada uma interface 4D que facilita a análise temporal e visualização espacial dos serviços de energia (Fonseca and Schlueter, 2015b). Algumas das análises e resultados possíveis de alcançar através desta ferramenta encontram-se indicadas na figura 7.

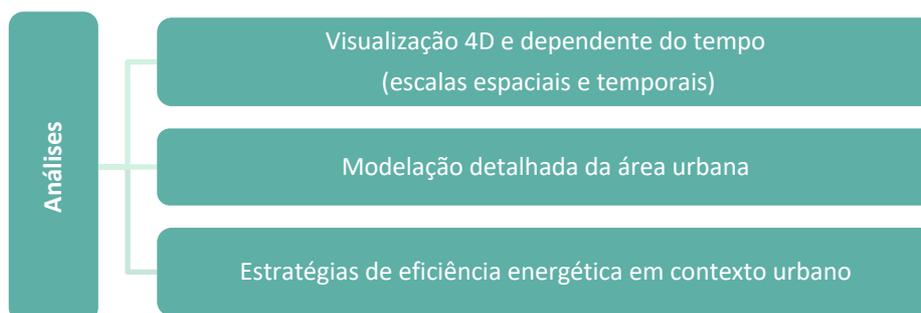


Figura 7 - Análises possíveis através do CEA adaptado de (Fonseca *et al.*, 2016)

A interface visual permite uma melhor compreensão da qualidade e quantidade de serviços presentes nos edifícios em estudo. Para fins académicos, a visualização pode resultar numa melhor compreensão das análises energéticas dos edifícios, por exemplo, a variação de temperatura e consumo de energia no tempo, sendo esta uma ferramenta intuitiva (Fonseca and Schlueter, 2015b).

2.2.4 Comparação

Comparando e analisando as três ferramentas acima descritas todas elas são bastante similares e de objetivos e funções idênticas. Na tabela 3, encontra-se uma análise ao encontro das diferenças de cada uma, com uma perspetiva de vantagens.

Tabela 3 - Vantagens e desafios das ferramentas de implementação UBEM

Ferramenta	Vantagens	Desafios
UMI	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Análise do impacto das condições climáticas no edifício; ✓ Facilidade na compreensão dos resultados por parte do utilizador; ✓ Melhoria da transferência de bancos de dados GIS para CAD; 	<ul style="list-style-type: none"> - Necessidade de mais módulos de análises; - Limitado a aplicações específicas e não apresenta padrões abertos à comunidade científica;
CityBES	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Disponível publicamente na internet; ✓ Utilização do padrão internacional CityGML, sendo desta forma possível uma partilha e desenvolvimento de estudo; ✓ Visualização de várias métricas de desempenho (com cores e em 3D) dos edifícios nas cidades. 	<ul style="list-style-type: none"> - Criação de modelos 3D com o CityGML; - Aquisição dos dados do uso real de energia dos edifícios; - Melhorar a consideração das condições climáticas; - Modelação de acordo com todas as medidas de reabilitação no EnergyPlus;
CEA	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Baixa complexidade do modelo; ✓ Baixo tempo de simulação; ✓ Simulação temporal dos serviços energéticos; ✓ Visualização 4D; ✓ Vários modelos numa única interface; ✓ Disponível publicamente e com partilha na comunidade científica. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aumentar a capacidade de análise para incluir a rede, recursos e otimização de transportes urbanos e simulação de transportes elétricos; - Instalação e utilização.

2.2.5 CogUBEM – Modelação cognitiva de energia em ambiente urbano

No âmbito de um projeto de doutoramento do Eng. Francisco Pires Costa, orientado pelo Professor Carlos Santos Silva, está a ser desenvolvida uma plataforma de gestão de energia, denominada de “*CogUBEM Platform*”.

Esta plataforma introduz um conceito denominado *CogUBEM (Cognitive Urban Building Energy Modelling)*. Este conceito surge do conceito UBEM, com a diferença que a simulação é apenas uma etapa num processo cíclico. Esta etapa consiste numa recolha e tratamento de dados, simulação e representação UBEM.

2.3 Aplicações

2.3.1 Projeto Suscity

O projeto *Suscity* é um projeto de investigação financiado no âmbito do programa MIT-Portugal pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT). Este projeto apresenta como principal objetivo a promoção da compreensão dos sistemas energéticos urbanos, sendo aplicado ao caso de estudo de Lisboa, mais concretamente nas zonas do Parque das Nações. O objetivo final do projeto passa por desenvolver um *Urban Systems Simulator Dashboard (USD)* e desenvolver edifícios urbanos sustentáveis.

Neste projeto é utilizada uma abordagem *bottom-up* e desenvolvem-se modelos para edifícios habitacionais que visam testar vários cenários de melhoria e implementação de energias renováveis (Aelenei *et al.*, 2016). Sendo um projeto desenvolvido numa cidade, a análise requer um processo de simplificação para

caracterizar conjuntos de edifícios em ambiente urbano. Como tal, a modelação é baseada na construção de arquétipos de edifícios, sendo considerada uma ferramenta crucial para reduzir os recursos utilizados e as emissões para a atmosfera. Desta forma torna-se igualmente útil para previsões futuras (Aelenei *et al.*, 2016).

Neste projeto foi desenvolvida uma nova metodologia para a caracterização de arquétipos. Após a definição do objetivo, todos os parâmetros necessários à modelação são identificados e armazenados num banco de dados GIS. Posteriormente, identifica-se os parâmetros idênticos para proceder-se à construção de uma árvore de dados arquetípica. De forma a descrever em detalhe, as características de construção e operação de cada um dos arquétipos, existe uma caracterização exaustiva. Por fim, os edifícios são atribuídos a cada arquétipo resultando um mapa GIS, com base nas características anteriormente identificadas (Aelenei *et al.*, 2016).

A metodologia para a simulação de edifícios que se encontra intrínseca neste projeto é apresentada na figura 8.

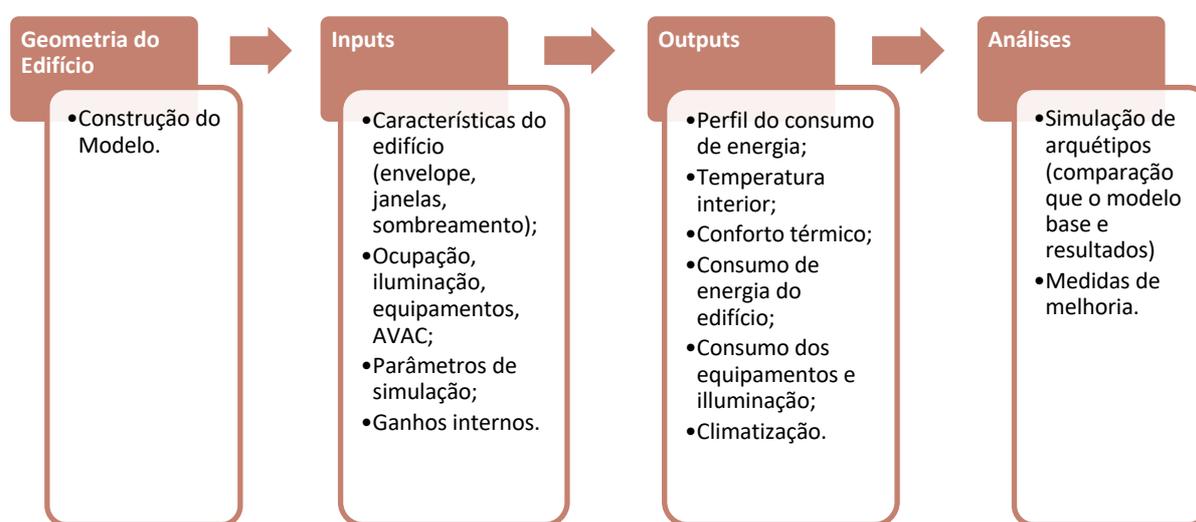


Figura 8 - Metodologia para Simulação de Edifícios adaptado de (Aelenei *et al.*, 2016)

Este projeto revela a importância das cidades sustentáveis e a necessidade de transformar e caminhar na direção de cidades inteligentes. Tendo sido seguida uma abordagem experimental em várias habitações em zonas de Lisboa, foi possível definir valores padrão do consumo e do conforto dos habitantes para a criação do modelo base (Aelenei *et al.*, 2016).

2.3.2 Campus Universitários

Comparando grandes campus universitários com bairros e habitações, os primeiros apresentam algumas vantagens para a modelação, como um maior período de tempo de taxa de ocupação e apresentarem uma maior obrigação social relativamente às emissões de gases de efeito de estufa (Nagpal and Reinhart, 2018).

Um aspeto a ter em consideração são as diferenças que existem no consumo de energia num campus universitário. Devido às diferentes áreas existentes com necessidades distintas, desde laboratórios, salas de aulas, cantinas, entre outras, pode ser difícil a criação dos arquétipos.

No campus do MIT, em Cambridge, Massachusetts, já foram realizados vários estudos e implementação de modelos de energia. Um UBEM para o campus do MIT foi desenvolvido pelo Laboratório de Design Sustentável

do MIT, com o objetivo de prever o impacto do campus e a sua modernização. Neste projeto é defendido que o consumo dos edifícios depende de diversos aspetos, tais como o tipo de edifício, o envelope e a construção, iluminação, sistemas mecânicos e o comportamento dos ocupantes, dados climáticos e que o modelo deve ser adaptado a estes dados de cada edifício. Foi utilizado um banco de dados GIS para todo o campus.

Este estudo revela que o próximo passo é a redução de tempo e o esforço necessário na calibração de um UBEM para um campus universitário. Desta forma, o tempo de criação e implementação do UBEM diminuiria e capacitava o campus de avaliação das políticas de redução de carbono e consumo energético em tempo real (Nagpal and Reinhart, 2018).

2.4 Ferramentas de Apoio

2.4.1 Programa EnergyPlus (E+)

O programa que foi mencionado nas secções anteriores, o EnergyPlus, é um programa com capacidade para analisar o consumo energético de edifícios. Para tal, o utilizador do programa necessita de vários dados, como a localização, dados climáticos, características do edifício, os ganhos internos (como ocupação, iluminação e equipamentos), sistemas de AVAC, entre outros dados (Yu et al., 2015). Este programa, entre muitos testes que apresenta como possibilidade, permite a modelação e a análise de consumos, com resoluções horárias, mensais e anuais.

Segundo a documentação oficial presente no site (EnergyPlus, 2019), onde o programa está disponível em várias versões para download, a instalação do EnergyPlus acopla outras ferramentas, como o IDF-Editor, representando na figura 9, EP-Launch, representado na figura 10, e o EP-Compare. Na tabela 4 são apresentadas as funções de cada uma destas ferramentas. O EnergyPlus é um programa capacitado para ler ficheiros de entrada e gravar ficheiros de saída.

Tabela 4 - Função das ferramentas do EnergyPlus

Ferramenta do EnergyPlus	Função
IDF-Editor	Criação dos ficheiros de entrada (.idf); Criação e alterações de objetos do ficheiro de entrada;
EP-Launch	Introdução de ficheiros de entrada (<i>Input File</i>); Introdução do <i>weather file</i> ; Simulações; Visualização de erros; Visualização do desenho 2D; Acesso a ficheiros de saída (outputs);
EP-Compare	Comparação entre duas ou mais simulações.

A partir do editor do IDF-Editor são inseridos todos os dados e informações relevantes do edifício em análise. Existe a possibilidade de criação de novos objetos com informações novas. Após o ficheiro IDF estar concluído e com todas as informações referidas, é possível executar o modelo no EP-Launch, com o ficheiro IDF e o ficheiro “*weather file*” (.epw) com os dados climáticos presentes, estes são colocados nos dois primeiros espaços respetivamente, representados pelas caixas azuis na figura 10. Depois de executado, é possível fazer a visualização dos resultados dos modelos e de eventuais erros, como se pode observar na figura 10, nos espaços

representados pelas caixas verdes respetivamente. Caso ocorram erros no programa existe a possibilidade de alteração e voltar a executar o programa (Yu *et al.*, 2015). Este processo pode ser repetido sucessivamente e vários estudos diferentes também.

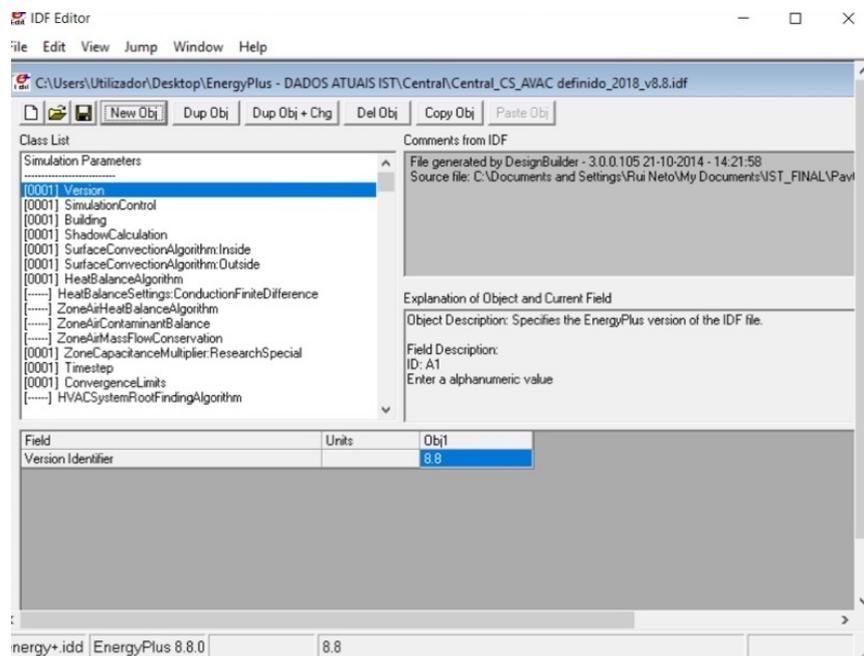


Figura 9 - Ferramenta do EnergyPlus denominada de IDF-Editor

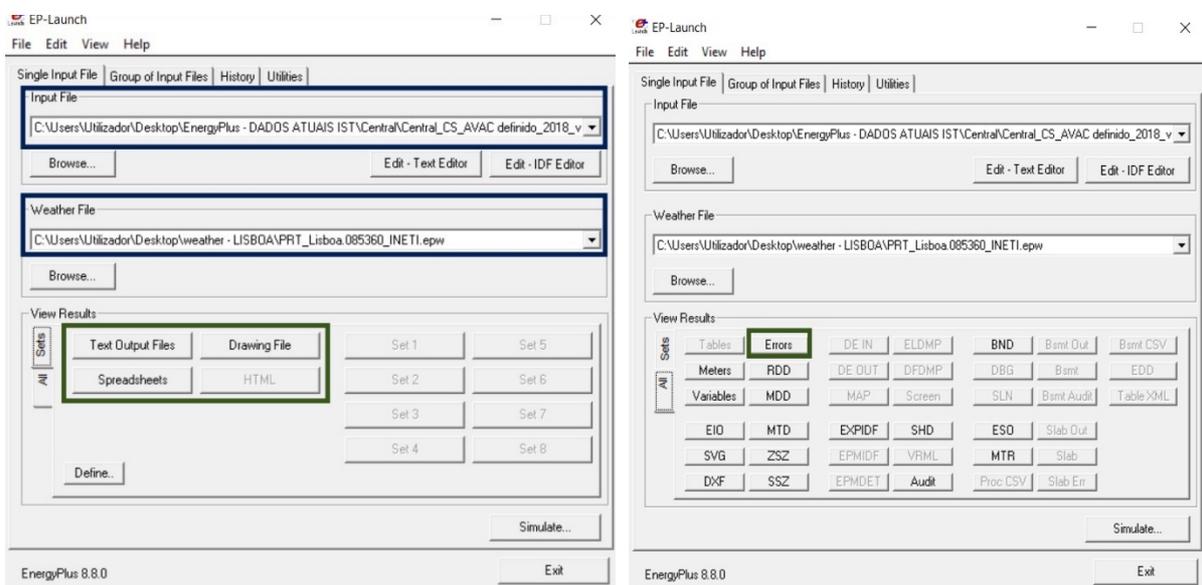


Figura 10 - Ferramenta do EnergyPlus denominada de EP-Launch

Fazendo a ponte entre o programa E+ e os UBEMs, percebendo a importância que este programa tem na construção de modelos de energia, a figura 11 apresenta esta ligação, retirada de um caso de estudo que utiliza a ferramenta CityBES.



Figura 11 - Componentes para a modelação de energia em ambiente urbano adaptado de (Chen and Hong, 2018)

2.4.2 Programa ArcGIS

Segundo o site oficial do programa ArcGIS, este apresenta-se como uma base de um SIG, Sistemas de Informação Geográfica (ou GIS em inglês), sendo possível a criação de mapas, e análises espaciais de dados. Para a utilização do programa é necessária uma licença, mas existe uma versão online (ArcGIS Online) para a visualização de mapas. Na figura 12, encontram-se algumas funcionalidades importantes do programa.

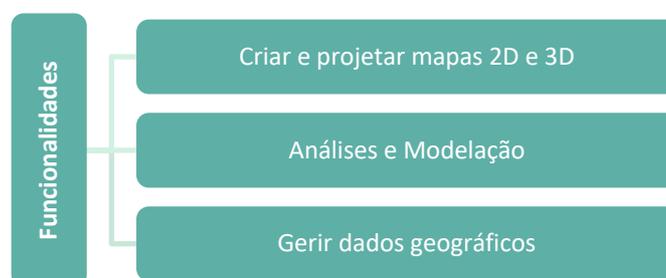


Figura 12 - Funcionalidades do programa ArcGIS

O programa ArcGIS Desktop apresenta cinco componentes, nomeadamente o ArcCatalog, ArcMap, ArcScene, ArcGlobe e ArcToolbox. Este último apresenta-se inserido nos restantes, sendo uma caixa de ferramentas capaz de diversas análises.

Para além de todas as capacidades, o programa ArcGIS apresenta-se como uma interface para integrar com outras ferramentas, como por exemplo o CEA. O *City Energy Analyst* surge como uma *toolbox* dentro do ArcGIS, que pode ser encontrada no separador “Catalog”, representado pela caixa azul na figura 13, em “My Toolboxes”, representado pela caixa verde na mesma figura. Na figura 14, encontram-se em detalhe as componentes do CEA.

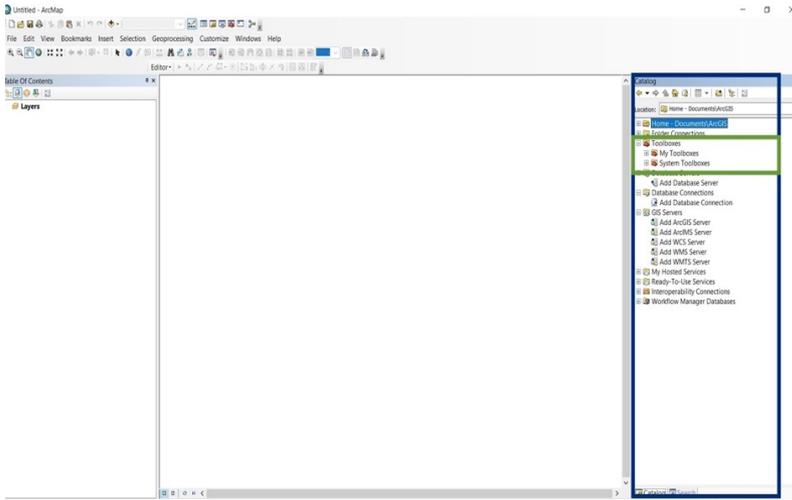


Figura 13 - Componente ArcMap no programa ArcGIS

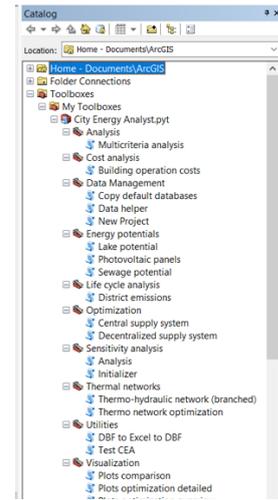


Figura 14 – Toolbox CEA no ArcGIS

3 Caso de Estudo

3.1 Campus Universitário da Alameda do IST

A presente dissertação apresenta como caso de estudo o Campus Universitário do Instituto Superior Técnico (IST) na Alameda. Fundado a 23 de Maio de 1911, por Alfredo Bensaúde, esta instituição encontra-se localizada na Alameda desde 1932. O Campus da Alameda é constituído por 26 edifícios, como se pode observar na figura 15, nos quais se desenvolvem diversas atividades. Existe uma grande diversidade de espaços no Campus, desde cantinas, a salas de aulas, a laboratórios, uma piscina e um campo de futebol, entre outros. Para além da diversidade de espaços, os próprios edifícios apresentam construções (em anos diferentes) e sistemas (por exemplo, de AVAC) diferentes.

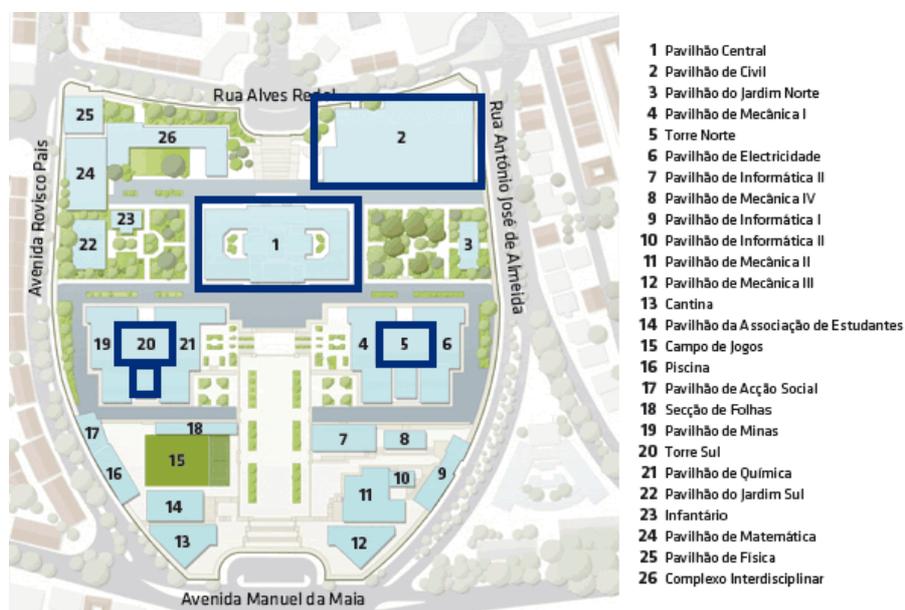


Figura 15 - Campus da Alameda do Instituto Superior Técnico e representação dos quatro edifícios alvo de estudo

O presente estudo foca-se nos quatro edifícios que provavelmente apresentam maior consumo energético, o Pavilhão Central, o Pavilhão de Civil, a Torre Norte e a Torre Sul. Estes edifícios estão assinalados a azul e com os números 1, 2, 5 e 20 respetivamente, na figura 15.

Os dados do consumo de eletricidade referentes a cada um destes edifícios e os respetivos modelos do EnergyPlus foram cedidos pelo Projeto Campus Sustentável do Instituto Superior Técnico (Projeto Campus Sustentável, 2019). Este projeto do IST tem como principal objetivo, de acordo com o site oficial, a “conceção de um projeto de melhoria da eficiência energética para as instalações do IST visando um melhor desempenho energético dos campi e, simultaneamente, a consolidação do reforço de competências em matérias de gestão do uso da energia e da eficiência energética.”.

Sendo esta uma universidade situada no centro da cidade de Lisboa e tendo em consideração a preocupação atual na redução da pegada nas grandes cidades, a redução da pegada do IST e a redução do seu consumo é uma temática com elevada importância.

3.2 Metodologia

Relativamente ao método de estudo implícito na presente dissertação, duas propostas de simulação UBEM são apresentadas na figura 16, baseadas em abordagens *top-down* e *bottom-up*.

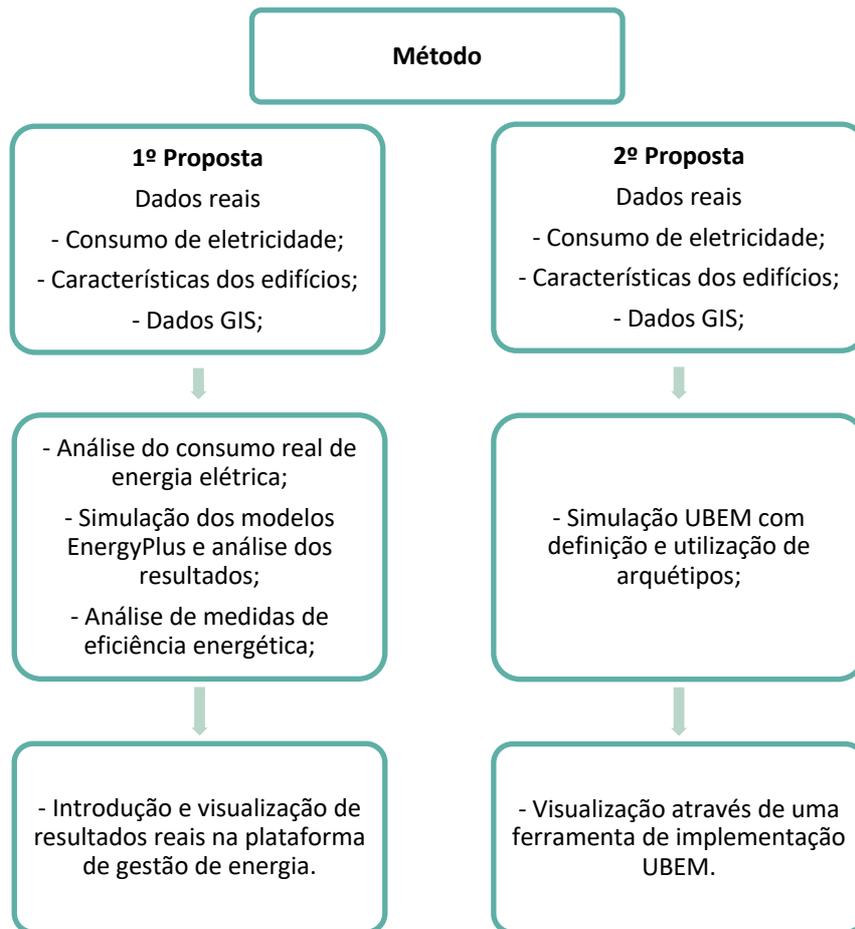


Figura 16 - Propostas de metodologia para o caso de estudo

Nos capítulos seguintes será detalhadamente exposta o decorrer da metodologia utilizada e os resultados referentes a cada uma das análises.

3.2.1 Ferramentas de implementação UBEM

Após um estudo intensivo sobre a modelação de energia em ambiente urbano, apresentado no capítulo anterior, procedeu-se à criação de um modelo de energia.

Relativamente às três ferramentas analisadas no capítulo 2, a primeira escolha incidiu sobre a ferramenta *City Energy Analyst*. Apesar de todas as ferramentas apresentarem características e objetivos semelhantes, esta ferramenta apresenta algumas vantagens face as restantes, principalmente pela capacidade

de desenvolver modelos numa só interface. Para além disto, o CEA funciona como uma *toolbox* no programa ArcGIS, sendo este um programa intuitivo e do qual existem licenças para o presente caso de estudo, pelo que esta escolha se apresenta como a mais completa. Através da utilização do programa ArcGIS tornar-se-ia possível a visualização do Campus e dos edifícios alvos de estudo, sendo que uma interface visual permite uma melhor compreensão e apoio para a tomada de decisão. Para a criação de UBEMs, são necessários vários dados iniciais e as ferramentas são capazes de originar diversos resultados. No capítulo seguinte, encontra-se em detalhe todo o processo de criação.

Para além da proposta de simulação UBEM, uma plataforma de gestão de energia é apresentada no presente trabalho como alternativa para os objetivos serem concretizados.

De facto, pelo caso de estudo se tratar de um campus universitário, muitos dos desafios apresentados no capítulo 2 deixam de existir. Nomeadamente, os insuficientes dados sobre os edifícios e o acesso restrito dos consumos reais. Todos estes dados e informações são facilmente cedidos num campus universitário. Como tal, no presente estudo é possível analisar todos os dados reais e visualizar na plataforma.

Portanto, todos os dados que são apresentados na plataforma, são resultados das análises que se encontram nos capítulos 5 e 6 da presente dissertação. A vantagem da visualização dos dados de energia referentes ao Campus é a mesma apresentada acima para o caso do CEA no ArcGIS. Na plataforma são apresentados três cenários, um por cada interface.

Para simplificar o processo de modelação e devido ao desafio associado à definição de arquétipos, pelas diferentes funcionalidades de cada espaço do Campus, cada edifício do caso de estudo é estudado como um único.

3.2.2 Análise dos dados de consumo de energia elétrica

Paralelamente à criação do modelo de energia, foi necessário a analisar os consumos de eletricidade do Campus. Os dados do consumo de eletricidade para os quatro edifícios, cedidos pelo Projeto Campus Sustentável, são dos anos de 2017 e 2018, por serem os anos completos mais recentes.

Inicialmente realizou-se um tratamento destes dados, sendo que estes se apresentavam com uma resolução horária, e procedeu-se aos cálculos mensais e anuais dos quatro edifícios. Posteriormente, procedeu-se a uma análise de vários perfis de consumo de eletricidade. Na presente análise algumas considerações relativamente aos dias típicos de verão e inverno são apresentadas, tal como os horários do Campus, alturas de aulas e férias.

Em suma, para cada edifício apresenta-se:

- ✓ Consumo anual;
- ✓ Consumo mensal e os meses de menor e maior consumo;
- ✓ Dias de menor e maior consumo;
- ✓ Perfil diário dos dias de maior consumo;
- ✓ Perfil de consumo diário de uma amostra de cinco dias de um mês com picos de consumo;
- ✓ Perfil de consumo diário de uma amostra de cinco dias de um mês de menor consumo;
- ✓ Perfil médio semanal no verão e no inverno.

A partir destes resultados, torna-se possível apresentar a informação de forma animada na plataforma de gestão de energia.

Através dos dados do consumo anual do Campus, determinou-se o impacto dos edifícios alvos de estudo no valor total do consumo do Campus e desta forma, compreende-se a necessidade de melhorar a eficiência energética destes edifícios.

3.2.3 Análise dos modelos EnergyPlus

Através dos modelos do EnergyPlus de cada edifício alvo de estudo, cedidos pelo Projeto Campus Sustentável, tornou-se possível realizar um estudo mais detalhado para cada um.

Através da simulação destes modelos obteve-se resultados referentes ao consumo de energia elétrica e aos tipos de utilização da energia (serviços de energia) e a percentagem de cada uma no consumo total, como por exemplo referente à iluminação, equipamentos, AVAC, entre outros. Para a realização de mais análises relativamente à implementação de medidas de eficiência energética, revelou-se a necessidade de alterar os modelos. Estas alterações são apresentadas no capítulo respetivo.

A visualização de resultados desta análise é possível através da plataforma de gestão de energia.

Com a existência de dados reais e dados resultantes do modelo, torna-se possível uma comparação dos resultados e uma respetiva validação dos modelos.

Por fim, paralelamente à criação do modelo de energia, através destes modelos E+ torna-se também possível obter ficheiros CAD de cada edifício (.dwg) que permitiram à criação de ficheiros importantes para a representação visual do Campus do ArcGIS, através de pontos, polígonos e linhas.

3.2.4 Análise da implementação de medidas de eficiência energética

Tendo em consideração o plano de eficiência energética para 2020, realizou-se uma análise onde foi estudado o impacto que teria no consumo a implementação de painéis fotovoltaicos e a substituição de iluminação dos edifícios do Campus. Sintetizando para cada edifício apresenta-se nesta dissertação:

- ✓ Comparação do consumo após a alteração da iluminação em dois pavilhões;
- ✓ Redução do consumo referente à iluminação;
- ✓ Comparação do consumo após a implementação de painéis;
- ✓ Comparação com a amostra de cinco dias de consumo diário;
- ✓ Produção de energia fotovoltaica;
- ✓ Razão de autoconsumo e autossuficiência.

No final, realizou-se uma previsão para o real impacto na redução do consumo dos edifícios em estudo e do Campus.

Observa-se na figura 17, toda a metodologia sintetizada do presente trabalho.

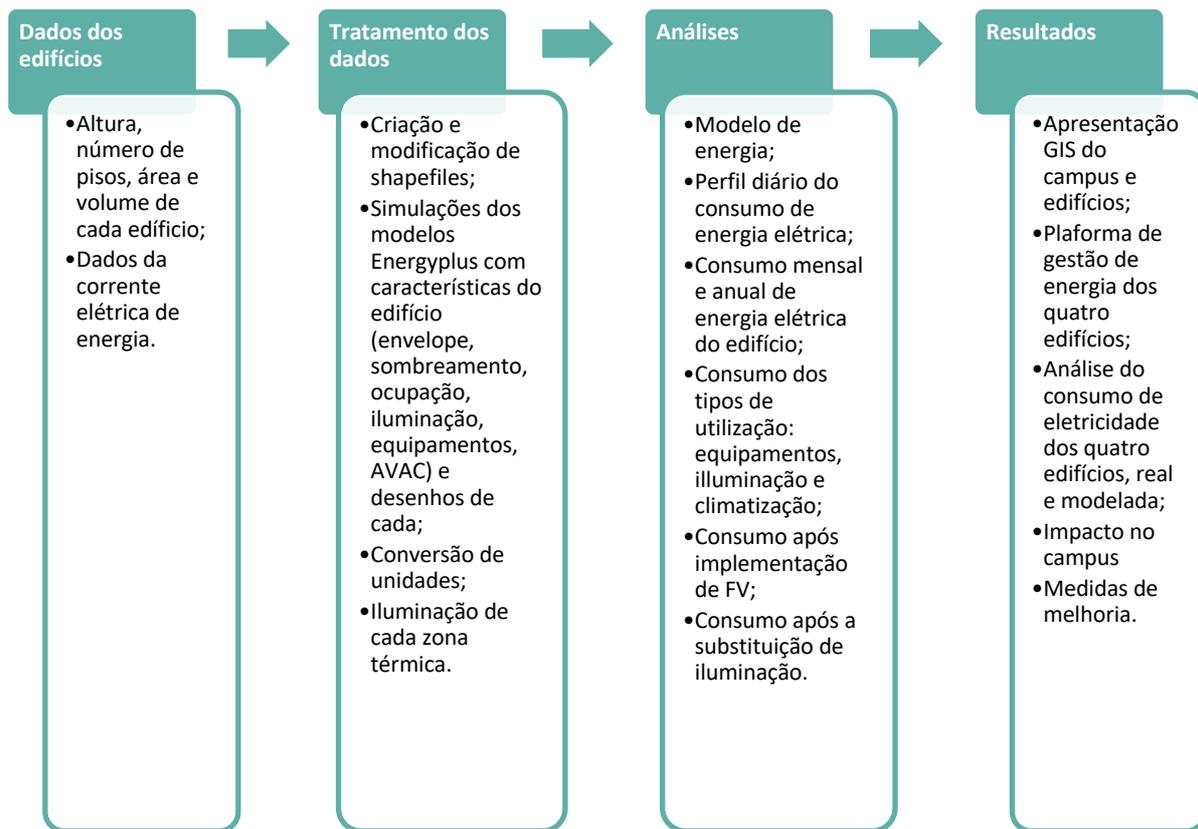


Figura 17 – Metodologia de modelação de energia para o caso de estudo

4 Modelo de visualização de energia para o IST

A criação de uma plataforma de modelação de energia ou um modelo de energia para o IST, capaz de disponibilizar dados referentes à utilização da energia, ao consumo energético e dados de construção e geométricos dos edifícios envolvente, permite um estudo intensivo e uma melhor compreensão, com uma melhor visualização do impacto na eficiência energética das melhorias a implementar no Campus.

4.1 Visualização do IST no ArcGIS

A primeira etapa realizou-se no programa ArcGIS, tornando-se possível a visualização do Campus do IST. Através de ficheiros retirados dos Censos do Instituto Nacional de Estatística com dados geográficos de Lisboa (INE, 2019), em formato pdf, criou-se um ficheiro .tiff, que é um formato para imagens digitais. Desta forma representou-se o Campus da Alameda no ArcMap, como se pode observar na figura 18.

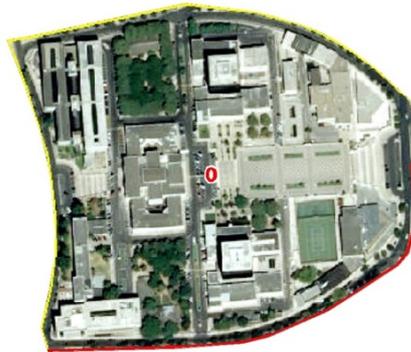


Figura 18 - Representação do Campus da Alameda do IST no ArcMap

Segundo a documentação oficial do ArcGIS, um *shapefile* é um formato de armazenamento da localização geográfica e com informação das características geográficas, e a representação pode ser através de pontos, linhas ou polígonos (Desktop ArcGIS, 2019). Através desse *shapefile* é possível a criação de um segundo *shapefile* apenas do Campus, com os dados e características referentes a este e aos seus edifícios constituintes.

Assim, através do *shapefile* do distrito de Lisboa, tornou-se possível representar e criar, no ArcMap, um *shapefile* com cada edifício constituinte do Campus, este encontra-se na figura 19.

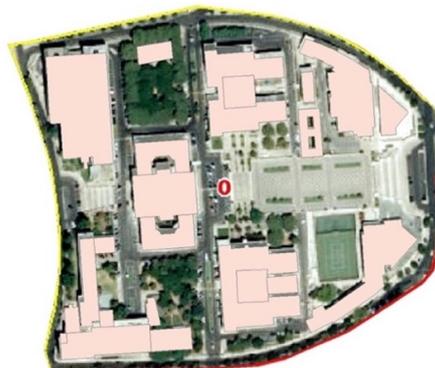


Figura 19 - Representação de todos os edifícios do Campus da Alameda do IST no ArcMap

Como é possível observar nas figuras 20 e 21, os edifícios alvo de estudo estão representados por diferentes cores. A cada um destes edifícios encontram-se associados vários dados como a altura, a área, o volume, entre outros dados referentes ao edifício.

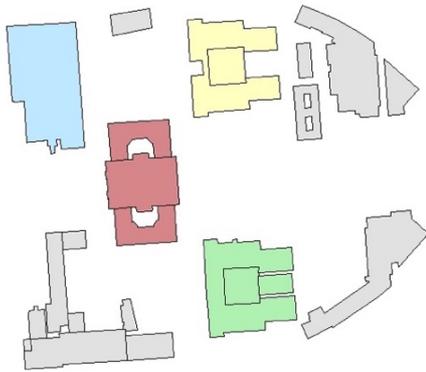


Figura 20 - Edifícios em estudo assinalados no *shapefile*

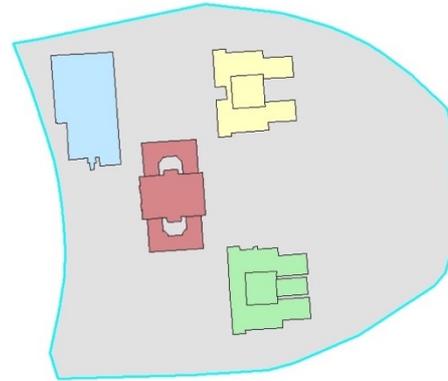


Figura 21 - Edifícios alvo de estudo e *shapefile* do Campus

Para além da representação em 2D no ArcMap, também foi realizada a representação em 3D dos edifícios do Campus no ArcScene, como se pode observar na figura 22.

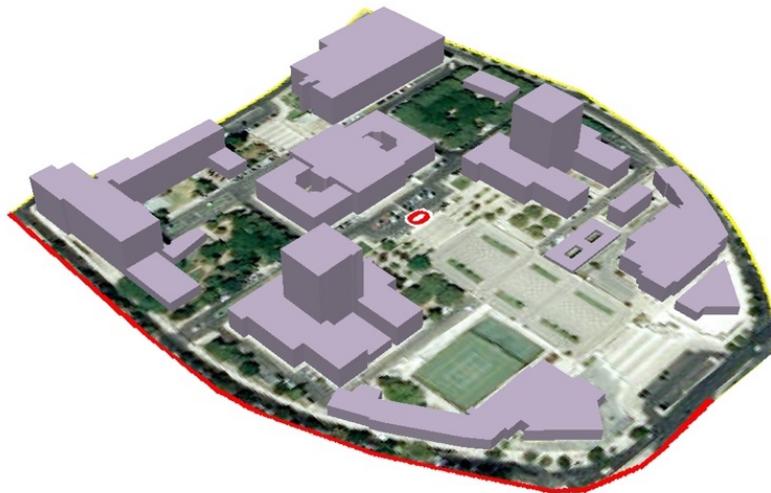


Figura 22 - Campus da Alameda do IST em 3D no ArcScene

É de notar que no presente caso de estudo, tal como mencionado no capítulo anterior, os dados analisados são apenas das duas torres, como representado na figura 24. Mas sabendo que a construção das torres se encontra influenciada pela construção dos outros edifícios base, a representação na figura 23 também foi realizada, tal como no caso do 2D. E desta forma, serão analisados como um único edifício. Portanto, a figura 23 representa o presente caso de estudo.



Figura 23 - Edifícios alvo de estudo em 3D no ArcScene

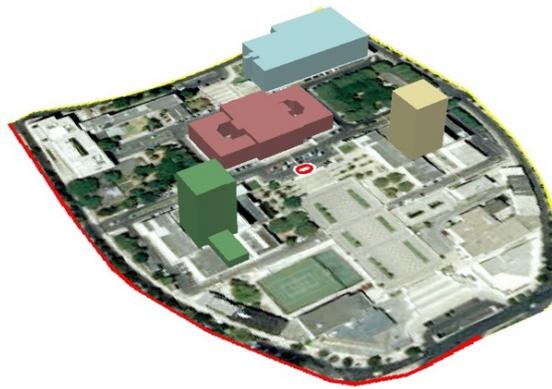


Figura 24 - Representação das torres no ArcScene

É possível observar os dados associados a cada edifício numa tabela denominada “*Open Attribute Table*”, representada como exemplo para o caso do Pavilhão de Civil na figura 25. Este pavilhão encontra-se representado a azul na figura 23.

OBJECTID *	Shape *	Altura	AreaEdv8	VolumeEdv8	Shape Leng	NPisos	NPisos 35m	NPisos int	Floor Area	Shape Length	Shape Area
1	Polygon	20	4942.84	98856.7	331.521741	7	5.714286	5	34599.9	331.521741	4942.836142

Figura 25 - Dados referentes ao Pavilhão de Civil no ArcGIS

4.2 Modelação com o *City Energy Analyst*

É de notar que no presente subcapítulo, apesar do foco ser a ferramenta CEA, muitas das etapas da implementação e criação do modelo são inerentes, ou pelo menos semelhantes, para qualquer ferramenta UBEM.

É de realçar também que a terminologia no presente capítulo se encontra em inglês, pelo facto de se encontrar assim na ferramenta original.

Numa primeira fase, foram instalados os dois programas utilizados no presente estudo, o ArcGIS e o PyCharm, e posteriormente procedeu-se à instalação do CEA.

A escolha do ArcGIS para o presente trabalho deve-se à possibilidade de uma representação visual de mapas e edifícios e a apresentação de informação espacial, neste caso do Campus da Alameda do Instituto Superior Técnico. A escolha do PyCharm é o fácil acesso a todo o código do CEA e a possibilidade de alterar possíveis erros de código (pela ferramenta ainda estar em desenvolvimento) e a colaboração da instalação da *toolbox* no ArcGIS. Ambas permitem a criação de um mesmo novo projeto e a obtenção de resultados, apenas se diferenciam na forma como se chega a esses resultados e o ArcGIS permitir uma representação visual dos edifícios e do terreno. Mas ambas necessitam dos mesmo dados iniciais. A linguagem de código utilizada é o *Python*.

4.2.1 Dados

Relativamente aos dados e ao funcionamento do CEA foi utilizada a bibliografia disponibilizada pelos programadores e que está disponível no site oficial (City-energy-analyst.readthedocs.io, 2019). Os dados necessários em primeira fase e fundamentais para a criação de um projeto CEA (“*primary input databases*”) encontram-se na tabela 5 e os respetivos formatos.

O mínimo imprescindível de dados para começar são os *shapefile* com a geometria dos edifícios (do distrito e da zona) e as suas envolventes, com as estradas e caminhos e um ficheiro *.tiff* (*terrain*). Para além destes primeiros dados, outros são necessários à construção do projeto, nomeadamente dados relativamente à arquitetura dos edifícios, às cargas térmicas (internas e externas), o conforto interior e sistemas de AVAC. Todos estes dados estão no formato *.dbf* (*databasefile*). Os ficheiros *shapefile* do Campus IST já foram apresentados anteriormente nesta dissertação.

Tabela 5 - Dados necessários inicialmente para a criação de um novo projeto CEA

Dados	Formato
<i>Zone Geometry</i>	<i>Shapefile (.shp)</i>
<i>Zone Age</i>	<i>DataBase (.dbf)</i>
<i>Zone Occupancy</i>	<i>DataBase (.dbf)</i>
<i>Zone Weather</i>	<i>Eplus file (.epw)</i>
<i>District Geometry</i>	<i>Shapefile (.shp)</i>
<i>District Terrain</i>	<i>Raster image (.tiff)</i>
<i>Zone Supply</i>	<i>DataBase (.dbf)</i>

Em suma, um projeto CEA apresenta sete conjuntos de dados primários e quatro conjuntos de dados secundários. Para além destes, existem os chamados bancos de dados padrão, sendo que o CEA tem uma funcionalidade que permite ir buscar estes dados automaticamente. Atualmente ainda só existe dados relativamente a Singapura e Suíça, portanto é necessária a criação de um cenário com dados personalizados, alterando os mesmos no ficheiro. Existem sete conjuntos de dados padrão, relativamente aos arquétipos, ao ciclo de vida dos sistemas e edifícios, às propriedades de construção e envelope, às emissões e aos dados incertos. De seguida estes dados serão esquematizados e detalhados.

4.2.2 Método

Relativamente ao funcionamento, a ferramenta CEA é testada com o modelo exemplo (denominado de “*reference-case*”), disponível online, e depois procede-se a alterações desses dados pelos dados do novo projeto. Depois de introduzir os dados necessários, procede-se à criação e simulação de um novo projeto, através da criação automática de uma pasta no computador para o novo projeto.

Destá forma qualquer projeto criado através da ferramenta terá a mesma estrutura que o modelo exemplo disponibilizado. A estrutura encontra-se na figura 26, com todos os dados iniciais mencionados (estes encontram-se divididos por pastas na pasta do novo projeto), com os ficheiros existentes (em cada uma das pastas) e os formatos respetivos. Cada pasta do novo projeto encontra-se dividida em *inputs* e *outputs*.

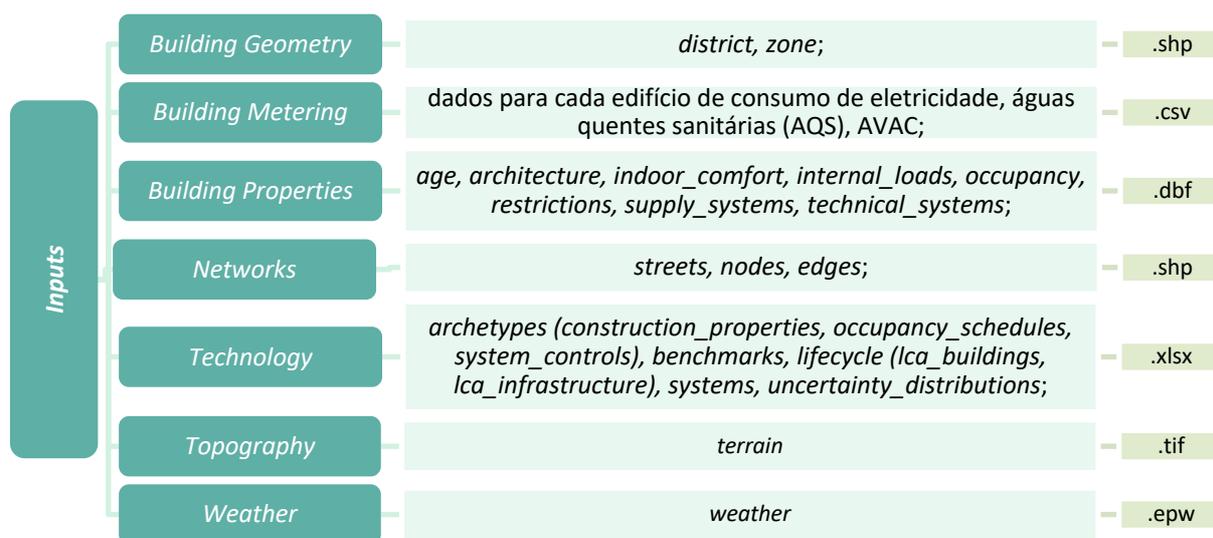


Figura 26 - *Inputs* detalhados do modelo pela ferramenta CEA

Relativamente aos resultados obtidos, encontram-se na figura 27 alguns dos possíveis resultados. Também estes encontram-se divididos por pastas na pasta do projeto novo. A ferramenta é capaz de analisar os mais variados aspetos de um edifício, apesar de apenas estarem alguns exemplos na figura 27.

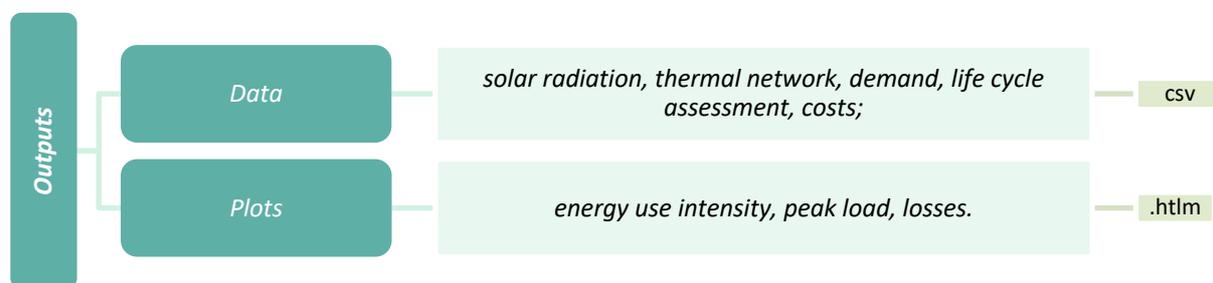


Figura 27 - *Outputs* detalhados do modelo pela ferramenta CEA

Tanto no PyCharm como no ArcGIS é possível analisar estes aspetos com os mesmos inputs, a diferença está apenas na interface utilizada, sendo que a utilização do ArcGIS é mais benéfica pela visualização. Os resultados obtidos pelas duas interfaces encontram-se na mesma pasta com uma determinada localização no computador.

A criação de um novo projeto nas duas interfaces encontra-se exemplificada na figura 28 e 29. Todos os outros módulos para testar as mais diversas variáveis encontram-se no mesmo local em ambos, como se pode visualizar por exemplo, na figura 28, à esquerda.

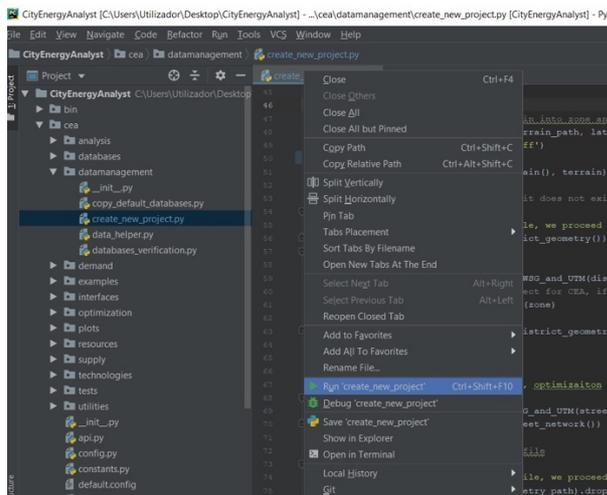


Figura 28 - Criação de um novo projeto CEA no PyCharm

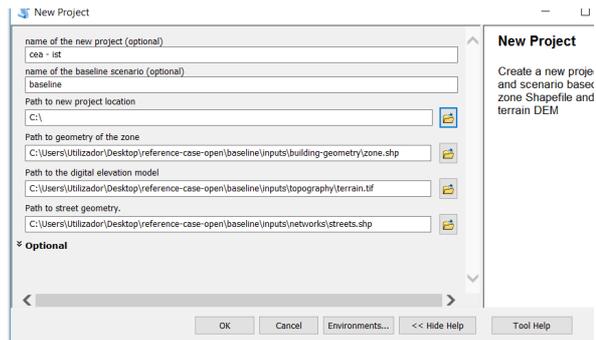


Figura 29 - Criação de um novo projeto CEA no ArcGIS

Por fim, o método utilizado encontra-se esquematizado na figura 30.

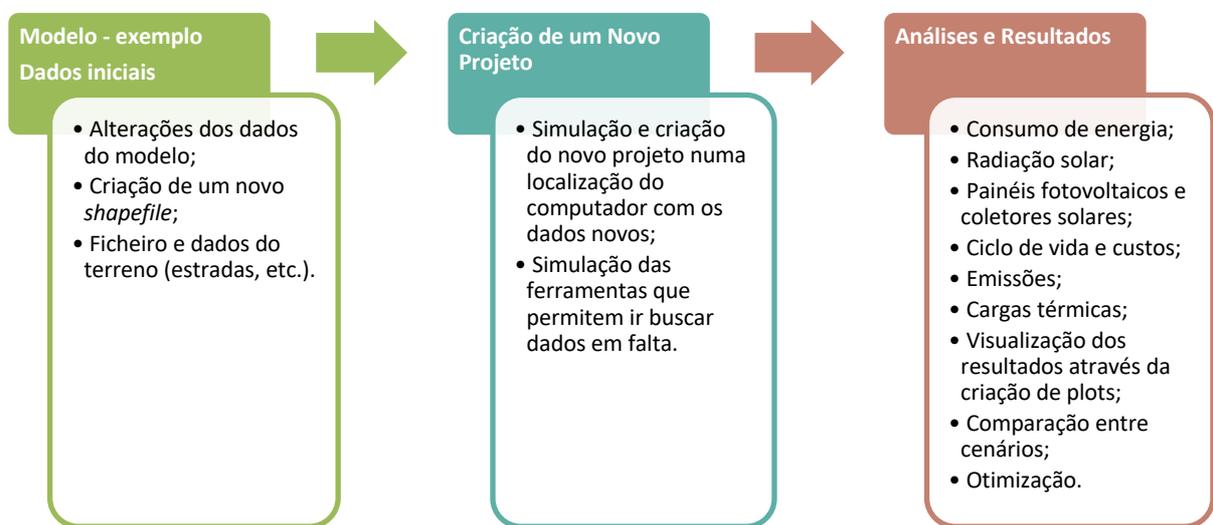


Figura 30 - Criação de um novo projeto CEA

4.2.3 Alterações no *City Energy Analyst*

Durante esta dissertação, esta ferramenta continua ativamente a ser desenvolvida, e como tal algumas alterações foram verificadas. Uma das principais é que a interface ArcGIS deixou de ser utilizada pelos programadores e haverá uma interrupção na informação e acompanhamento para esta interface, a partir do dia 1 de Maio de 2019. Outras hipóteses para implementar o CEA foram criadas e estão no presente momento a ser desenvolvidas nomeadamente: *“The command line interface”*, *“The dashboard”* e *“The Rhino/Grasshopper interface”*.

Outra alteração na ferramenta CEA, neste caso na interface PyCharm, foi deixar de existir o módulo *“config_editor”*, cuja funcionalidade era a alteração de dados para um novo projeto. A nova ferramenta vai ao encontro do *“Dashboard”*, acima mencionado, que se apresenta como uma plataforma aberta online. Esta nova interface, estando implementada online, permite a qualquer utilizador ter a equipa do CEA disponível para

suporte de dúvidas. Relativamente ao código de cada módulo também este tem vindo a sofrer alterações e atualizações.

Existe duas hipóteses para aceder ao *Dashboard*, uma é a partir do PyCharm, simulando o módulo respetivo, apresentado na caixa azul da figura 31. A outra, é a partir da instalação do CEA através do site oficial, a mais recente alteração e bastante mais intuitiva. “*The command line interface*” e “*The dashboard*” são as duas interfaces disponíveis no ficheiro de instalação do CEA. Todas as outras interfaces requerem outros passos de instalação específicos de cada interface, tal como acontecia para o ArcGIS. O PyCharm também colabora na instalação do CEA através dos módulos para simulação e criação da toolbox CEA nas interfaces ArcGIS e Rhino/Grasshopper, como se pode observar pelas caixas verdes representadas na figura 31.

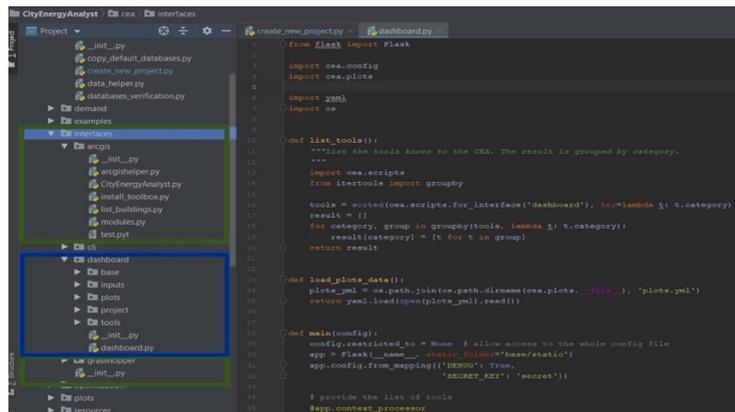


Figura 31 - Interfaces do *City Energy Analyst* no PyCharm

Foram encontrados alguns desafios associados à implementação através do ArcGIS, sendo que o principal deles é o ArcGIS deixar de ser uma interface proposta pela equipa do CEA. Apesar da possibilidade de se continuar a utilizar através deste programa existem ainda muitos erros na simulação desta ferramenta. Portanto, existindo uma interrupção no desenvolvimento e correção dos mesmos, deixou de se tornar viável a utilização do CEA através do ArcGIS, que tinha sido a alternativa inicialmente escolhida.

4.2.4 CEA Dashboard

Relativamente à mais recente interface, o *Dashboard*, esta permite de uma forma intuitiva a criação de um novo projeto e permite igualmente a simulação UBEM. A interface encontra-se na figura 32.

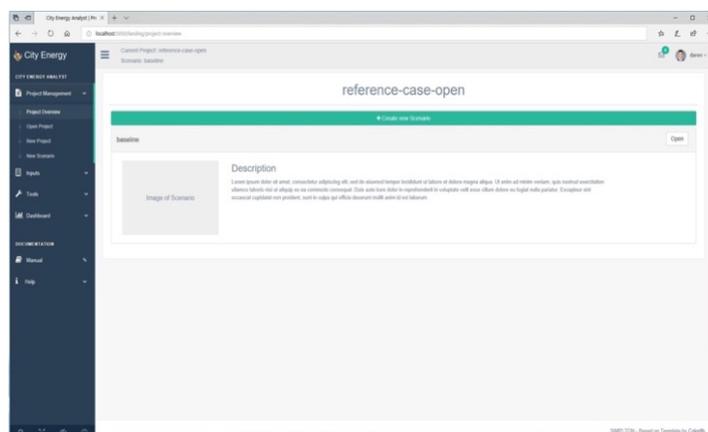


Figura 32 - Interface CEA *Dashboard*

Neste caso, é possível a alteração direta dos dados iniciais na própria interface. Como por exemplo, alterar o número de pisos e altura dos edifícios no *input zone* apresentado na figura 33, ou por exemplo alterar a idade de construção dos edifícios. Portanto a base deste método será os arquétipos, que estão pré-definidos no programa.

Pela possibilidade de criação de novos projetos, igualmente é possível observar-se no mapa o caso de estudo, tal como se observa na figura 34.

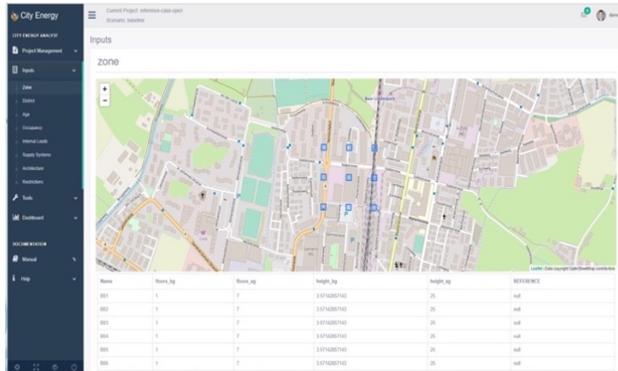


Figura 33 - Exemplo do *Input zone* no *CEA Dashboard*

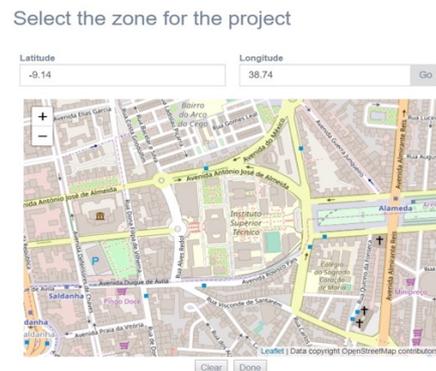


Figura 34 - Visualização do Campus do IST no *CEA Dashboard*

Nesta interface é possível a visualização dos resultados através da criação de gráficos como se encontra nas figuras 35 e 36.

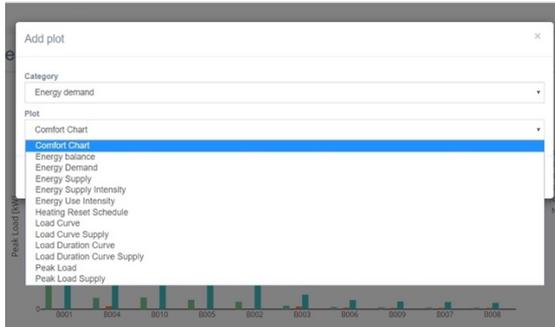


Figura 35 - Criação de gráficos com os resultados no *CEA Dashboard*



Figura 36 - Visualização de gráficos no *CEA Dashboard*

Desta forma se conclui, que apesar desta ser uma ferramenta muito importante, como os resultados são baseados em arquétipos definidos e no presente caso de estudo existem valores reais e modelos calibrados e próximos do real, as análises reais e a visualização de resultados através da plataforma teriam uma fiabilidade maior na modelação de energia no Campus.

4.3 Plataforma de gestão de energia do IST

A visualização animada dos resultados obtidos nesta dissertação tornou-se possível através de uma plataforma de gestão de energia do IST, denominada de *CogUBEM Platform* e desenvolvida pelo Eng. Francisco Pires Costa, que será apresentada no âmbito de um projeto de doutoramento orientada pelo Prof. Carlos Silva.

Pelos desafios associados à ferramenta UBEM escolhida e pela abordagem da primeira proposta de método apresentada no capítulo anterior estar mais próxima do real, o método escolhido para esta dissertação é a utilização desta plataforma para a visualização dos resultados.

A plataforma com o caso de estudo encontra-se na figura 37.



Figura 37 - Plataforma de gestão de energia do IST com os quatro edifícios alvos de estudo

Nesta plataforma encontram-se três cenários e referentes aos resultados do ano 2018. Os três cenários são os seguintes:

- ✓ “IST Business as Usual - Electricity consumption in 2018” que representa os dados referentes ao consumo de eletricidade real;
- ✓ “IST BAU with PV” que representa os dados de consumo de eletricidade após a implementação de painéis fotovoltaicos;
- ✓ “IST BAU with PV - Savings” que representa apenas a redução no consumo.

Em cada cenário é possível visualizar a gama de valores referentes ao consumo de eletricidade de cada edifício, os valores totais, os valores por soma de edifícios e o tipo de utilização com maior consumo em cada edifício.

Para cada edifício existe uma lista de dados, por exemplo como a lista que se encontra representada na figura 38 para o Pavilhão Central.

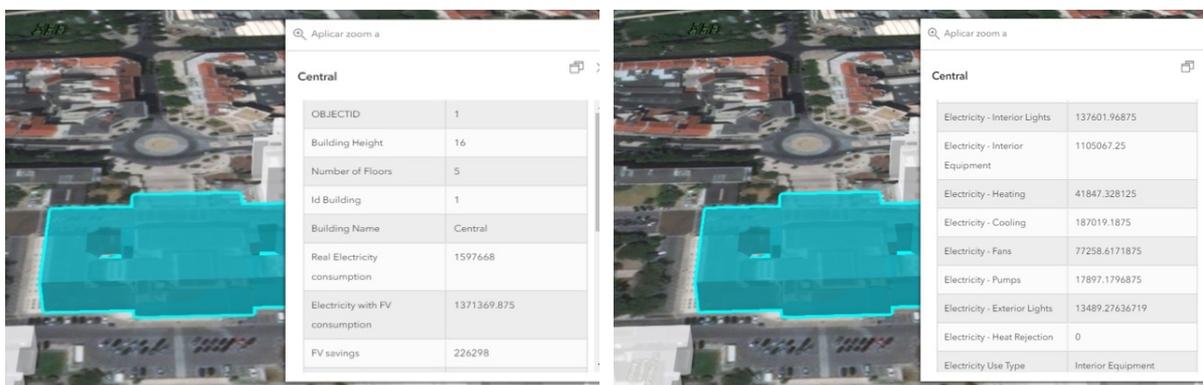


Figura 38 - Dados do Pavilhão Central incluídos nos três cenários

No presente trabalho, fica demonstrado que a utilização de uma plataforma para a representação dos dados de energia de um campus pode ser uma ferramenta poderosa, pois permite não só a rápida visualização do consumo atual, como do impacto de medidas futuras de eficiência energética, bem como da observação de características específicas de cada edifício e até de cada zona dentro do edifício. Essa é de facto a maior valia dos UBEMs 3D, pois permitem ao utilizador ver o detalhe de informação ao nível da sala, andar para cada edifício.

De qualquer das formas, o sucesso da visualização depende sempre dos modelos que geram a informação, e neste caso particular, dos modelos de energia, que são apresentados no próximo capítulo.

Nos próximos capítulos também é possível observar figuras da plataforma com alguns dos resultados obtidos e os três cenários especificados anteriormente.

5 Dados atuais do Campus da Alameda do IST

Tal como referido anteriormente, os dados e resultados apresentados neste capítulo encontram-se representados na plataforma de gestão de energia do IST. Em primeira análise estudou-se os consumos históricos de eletricidade de cada edifício alvo de estudo. Posteriormente, estudou-se os resultados das simulações dos modelos do EnergyPlus para cada edifício.

Para a realização de um estudo são necessárias algumas considerações face às várias variáveis envolventes e que influenciam diretamente o consumo de um edifício. Neste presente caso, algumas das variáveis em consideração encontram-se esquematizadas na figura 39.

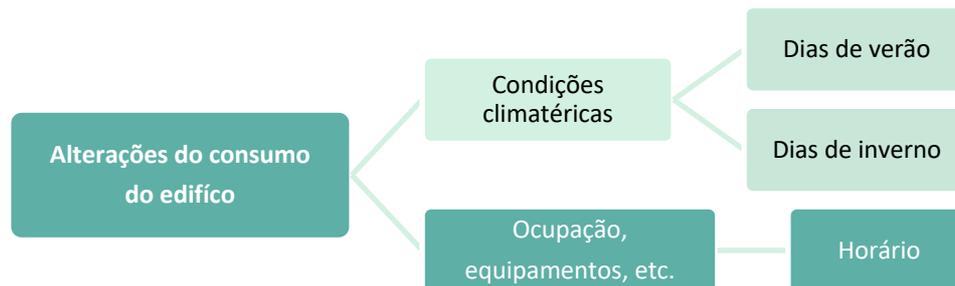


Figura 39 - Variáveis que influenciam o consumo dos edifícios

Sabendo que os dias de verão e os dias de inverno implicam que o edifício apresente necessidades energéticas diferentes, revelou-se a necessidade de estudar as diferenças no consumo face a estas duas alturas. Para garantir a consistência com os modelos do EnergyPlus, assumiu-se como padrão os mesmos que estão assumidos nos modelos. Analisando as necessidades térmicas, e assumindo os dias de verão para caracterizar as necessidades de arrefecimento e os dias de inverno para as necessidades de aquecimento, na presente dissertação os meses assumidos são os seguintes:

- Dias de Verão: Julho
- Dias de Inverno: Janeiro

Outra variável que influencia o consumo é o horário de ocupação e o comportamento dos ocupantes. Esta variável apresenta um peso elevado relativamente ao impacto dos dias de verão ou inverno no presente caso de estudo, face por exemplo aos dados climáticos, como a temperatura. A principal razão depara-se com o facto de, por exemplo, apesar de agosto tratar-se de um mês com elevada temperatura, devido à baixa ocupação deste mês, é expectável que os edifícios tenham um consumo reduzido. Portanto, mais do que analisar a altura do ano (verão ou inverno), é importante observar-se o horário de ocupação, as alturas de exames e de férias, entre outros. Torna-se também expectável que durante a noite o consumo seja significativamente menor do que durante o dia devido à baixa ocupação e utilização de equipamentos, iluminação, entre outros aspetos. Ao longo deste capítulo será apresentada esta diferença.

5.1 Análise do consumo de eletricidade dos quatro edifícios

Um dos primeiros passos constituiu o tratamento de dados e a conversão de unidades. Os fatores de conversão utilizados para os valores históricos de consumo encontram-se na tabela 6. Os sensores instalados na generalidade dos edifícios medem apenas a corrente, pelo que é necessário assumir um valor médio de tensão (230V), bem como um fator de potência, que é diferente para cada edifício (variando entre 0,83 para o Pavilhão de Civil e 0,96 para a Torre Sul). Segundo o Projeto Campus Sustentável, estima-se que a incerteza associada à medição de corrente elétrica não ultrapassa os 5%.

Tabela 6 - Fatores de conversão de unidades para cada edifício

Pavilhão Central [kWh]	$[Ah] \times 230 \times \frac{0,91}{1000}$
Pavilhão de Civil [kWh]	$[Ah] \times 230 \times \frac{0,83}{1000}$
Torre Norte [kWh]	$[Ah] \times 230 \times \frac{0,95}{1000}$
Torre Sul [kWh]	$[Ah] \times 230 \times \frac{0,96}{1000}$

5.1.1 Consumo anual

Após o tratamento de dados, realizou-se o estudo do consumo anual dos quatro edifícios. Os resultados do consumo anual de eletricidade para cada edifício encontram-se na tabela 7. Torna-se possível retirar desta informação que os pavilhões de maior consumo no ano de 2017 foram o Pavilhão Central e a Torre Sul, e em 2018 foram o Pavilhão de Civil e o Pavilhão Central, seguidos de perto pela Torre Sul. Em qualquer dos casos, é notável que apresentam um consumo substancialmente mais alto que a Torre Norte. Pode-se também observar que o Pavilhão Central e a Torre Sul decresceram os consumos de 2017 para 2018, enquanto o Pavilhão de Civil e a Torre Norte aumentaram.

Tabela 7 - Consumo anual de eletricidade dos quatro edifícios

	Ano	Consumo Anual [Ah]	Consumo Anual [kWh]
Pavilhão Central	2017	7920555,160	1657772,195
	2018	7633387,267	1597667,955
Pavilhão de Civil	2017	7541074,223	1439591,069
	2018	8409485,135	1605370,712
Torre Norte	2017	4110211,004	898081,104
	2018	4586363,934	1002120,520
Torre Sul	2017	7118493,125	1571763,282
	2018	6972183,320	1539458,077

Na figura 40, é possível observar com maior percepção os consumos de cada edifício.

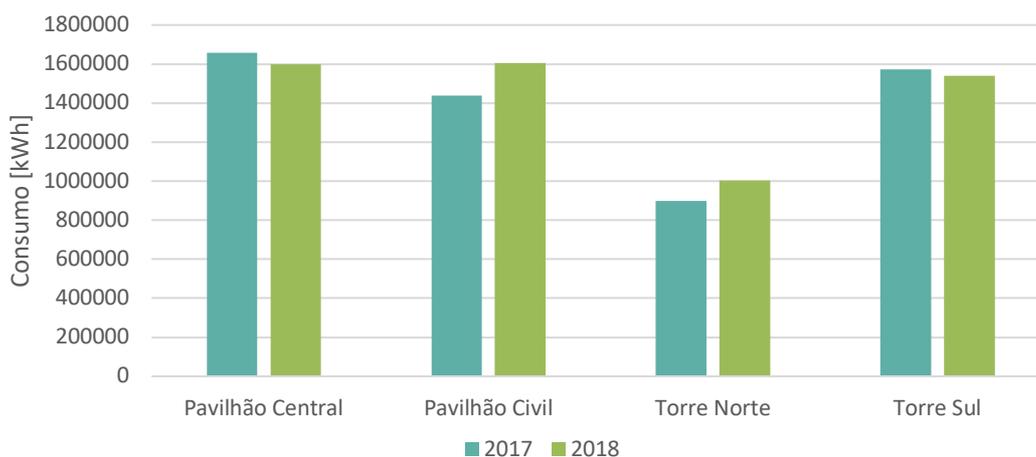


Figura 40 - Consumo anual de eletricidade dos quatro edifícios

5.1.2 Consumo mensal

Realizada a análise do consumo anual, torna-se importante aprofundar mais o estudo, procedendo-se à análise do consumo mensal.

5.1.2.1 Pavilhão Central

Os meses de menor e maior consumo encontram-se na tabela 8. Os dois meses de maior consumo apresentam necessidades de arrefecimento, sendo meses de verão.

Tabela 8 - Meses de menor e maior consumo de eletricidade no Pavilhão Central

Ano	Mês de menor consumo	[kWh]	Mês de maior consumo	[kWh]
2017	agosto	121027,214	julho	155831,138
2018	agosto	125681,365	setembro	144482,224

O mês de menor consumo é o mês de agosto em ambos os anos, tratando-se este de um mês de férias onde o Campus se encontra encerrado durante duas semanas, torna-se bastante coerente esta diminuição de consumo. Tal como referido anteriormente, o horário de ocupação, a utilização dos equipamentos, entre outros aspetos influencia o consumo, tal como as épocas, por exemplo, de férias.

Os dados do consumo mensal para o Pavilhão Central encontram-se na figura 41. Repara-se na figura que os meses de dezembro, fevereiro e abril, meses que apresentam férias, apresentam um menor consumo. Retira-se também que janeiro (em 2017) e março (em 2018) também apresentam um elevado consumo e, neste caso, apresentam necessidades de aquecimento.

Em 2017, existiu um maior consumo de energia elétrica em praticamente todos os meses do ano, relativamente ao ano seguinte, o que significa que houve um aumento de eficiência.

No geral, torna-se claro que os meses de temperaturas mais amenas não se apresentam como meses de maior consumo. Neste pavilhão, o consumo apresenta-se equilibrado para o caso de aquecimento e arrefecimento, apesar da possibilidade de um consumo maior quando existem necessidades de arrefecimento.

Este facto pode advir pela existência do *data center* neste pavilhão, que gere cargas térmicas internas elevadas, pelo que as necessidades de arrefecimento são sempre superiores às de aquecimento.

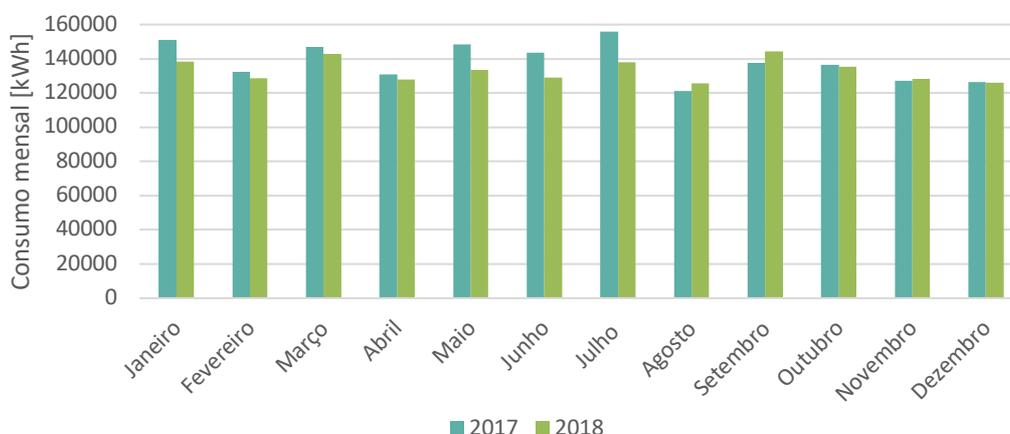


Figura 41 - Consumo mensal do Pavilhão Central nos anos 2017 e 2018

5.1.2.2 Pavilhão de Civil

Relativamente ao consumo mensal no Pavilhão de Civil, os meses de menor e maior consumo apresentam-se na tabela 9. Tal como no caso anterior, o mês de menor consumo é agosto, mas já os meses de maior consumo são janeiro, mês de aquecimento, e outubro, que segundo o IPMA (Instituto Português do Mar e da Atmosfera) este mês apresentou temperaturas elevadas em 2018 face ao normal.

Tabela 9 - Meses de menor e maior consumo de eletricidade no Pavilhão de Civil

Ano	Mês de menor consumo	[kWh]	Mês de maior consumo	[kWh]
2017	agosto	81168,316	janeiro	144786,527
2018	agosto	97401,025	outubro	152742,502

O consumo mensal deste edifício encontra-se na figura 42.

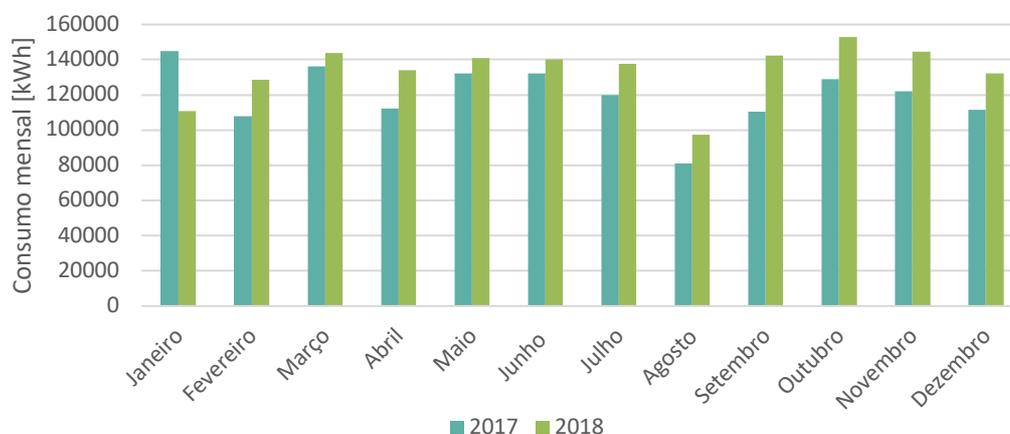


Figura 42 - Consumo mensal do Pavilhão de Civil nos anos 2017 e 2018

Em 2017, o mês de fevereiro também apresenta um baixo consumo e em 2018, o mês de janeiro. Os períodos de maior consumo em 2017, são janeiro e março. Em 2018, são outubro e novembro. Para este pavilhão alguns dos meses de inverno apresentam maior consumo, o que revela que há um maior consumo nas épocas com necessidades de aquecimento, apesar de se encontrar relativamente equilibrado face às necessidades de arrefecimento.

Contrariamente ao que acontece no Pavilhão Central, neste pavilhão existe um aumento de consumo em praticamente todos os meses de um ano para o outro (à exceção do mês de janeiro).

5.1.2.3 Torre Norte

Relativamente à Torre Norte, os meses de menor e maior consumo encontram-se na tabela 10.

Tabela 10 - Meses de menor e maior consumo de eletricidade na Torre Norte

Ano	Mês de menor consumo	[kWh]	Mês de maior consumo	[kWh]
2017	agosto	55523,199	outubro	87363,479
2018	fevereiro	58493,745	outubro	100014,631

Os meses de menor consumo, apresentam-se como meses de férias, como de esperar. Os dados do consumo mensal encontram-se na figura 43. Através da visualização da figura 43 torna-se claro que nos meses com necessidades de arrefecimento existem consumos elevados, relativamente aos meses de aquecimento. É de notar, que ao contrário dos pavilhões anteriores, na Torre Norte o aquecimento é feito através de caldeiras a gás.

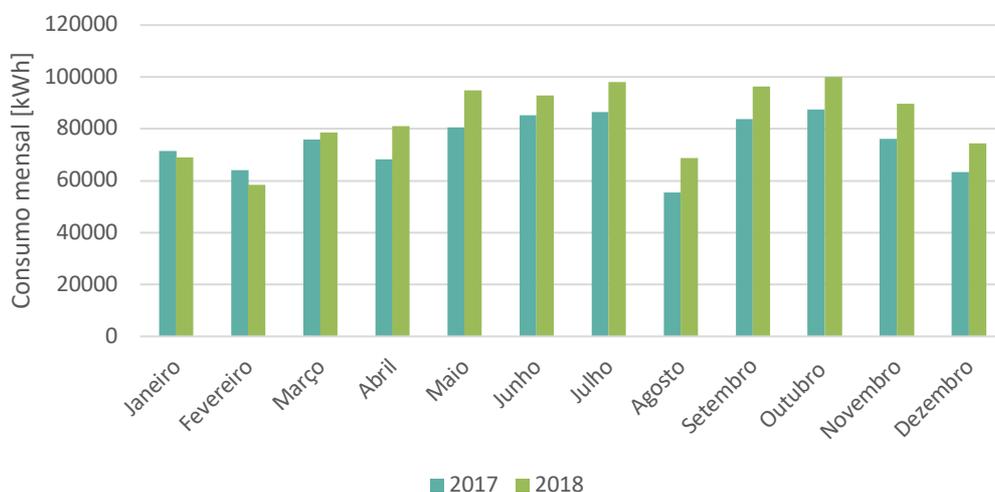


Figura 43 - Consumo mensal da Torre Norte nos anos 2017 e 2018

5.1.2.4 Torre Sul

Por fim, na tabela 11, encontram-se os meses de menor e maior consumo para a Torre Sul.

Tabela 11 - Meses de menor e maior consumo de eletricidade na Torre Sul

Ano	Mês de menor consumo	[kWh]	Mês de maior consumo	[kWh]
2017	dezembro	101844,788	julho	161347,291
2018	dezembro	104561,981	setembro	166446,900

Na figura 44, encontra-se os dados referentes ao consumo mensal deste edifício. Relativamente aos meses de maior consumo são julho, setembro e outubro. Tal como a Torre Norte, a Torre Sul também apresenta maior consumo nos meses com necessidade de arrefecimento, ou seja, nos meses de verão, excetuando o mês de agosto pelo facto do aquecimento ser feito a gás neste edifício.

Relativamente ao mês de menor consumo, contrariamente a praticamente todos os casos anteriores, não é agosto. Este facto pode ser derivado da Torre Sul se tratar de um edifício com um maior número de atividades que envolvem laboratórios, que para além de apresentarem um elevado consumo, encontram-se em ativo nos meses de férias escolares.

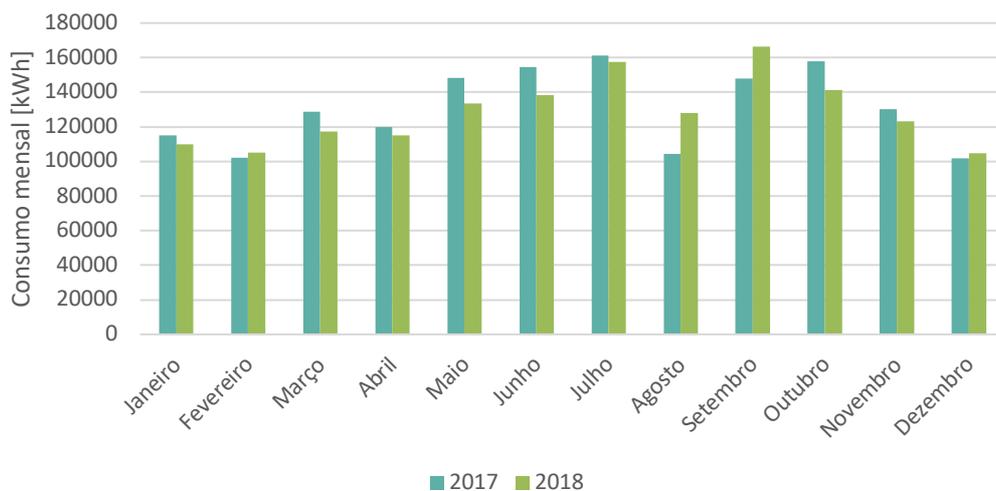


Figura 44 - Consumo mensal da Torre Sul nos anos 2017 e 2018

5.1.2.5 Análise comparativa dos edifícios

Analisados todos os consumos mensais, torna-se possível afirmar que em geral para todos os edifícios, os meses de menor consumo são fevereiro, agosto e dezembro, todos meses com férias escolares. E os meses de maior consumo são janeiro, julho, setembro e outubro, que são meses de aulas ou exames. Comprova-se que efetivamente a taxa de ocupação e os períodos de aulas ou férias apresentam um maior impacto no consumo dos edifícios do que condições climáticas.

Comparando o consumo dos quatro edifícios no ano de 2017, e tal como referido anteriormente, a Torre Norte apresenta um consumo substancialmente menor comparativamente aos restantes edifícios, como se pode observar na figura 45. É de notar uma tendência semelhante nas quatro linhas referentes a cada edifício, visto que a ocupação dos edifícios é semelhante, face a cada mês. Em todos os edifícios existe um decréscimo no mês de agosto, sendo este o mês de menor ocupação e utilização de equipamentos, tal como de janeiro para fevereiro há um decréscimo, sendo que em fevereiro existem as férias entre semestres, o mesmo acontece em dezembro (férias de natal) e em abril (férias da páscoa).

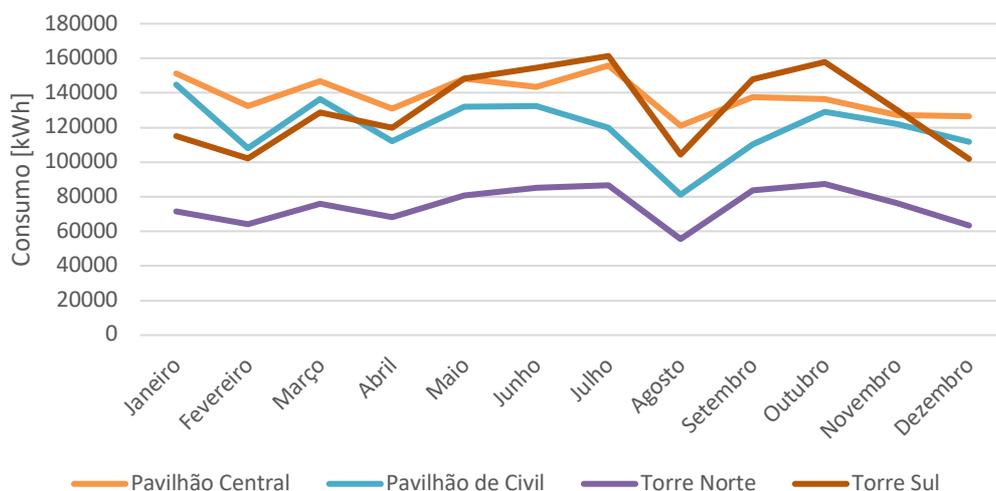


Figura 45 - Consumo mensal dos quatro edifícios no ano de 2017

Comparando o consumo dos quatro edifícios no ano de 2018, como se pode observar na figura 46, igualmente como acontece em 2017, a Torre Norte apresenta um consumo menor.

É possível observar também que apesar do consumo anual ser maior no Pavilhão de Civil e Central comparativamente à Torre Sul, em 2018 o pico de maior consumo é na Torre Sul no mês de setembro, e em 2017 o pico de maior consumo também se fez sentir na Torre Sul, mas no mês de julho. Observam-se tendências semelhantes, também em 2018, como haver um decréscimo significativo no mês de agosto.

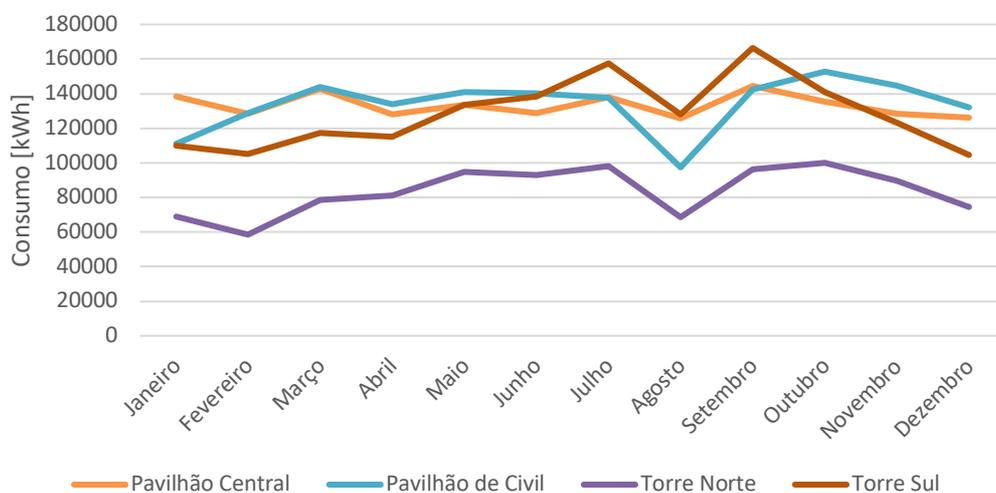


Figura 46 - Consumo mensal dos quatro edifícios no ano de 2018

Escolhendo como amostra o mês de setembro de 2018 na Torre Sul, por haver um pico do valor de consumo relativamente a todos os edifícios, estudou-se as alterações ao longo deste mês, que podem ser observadas na figura 47. É de notar que cada decréscimo representa um fim de semana e cada pico de aumento um dia de semana. Tornando-se visível o impacto que tem no consumo um dia útil comparativamente a um sábado ou domingo. O mês de setembro é o mês de início de aulas de um novo ano letivo, encontrando-se claro na figura 47 este aumento de consumo a partir de meio do mês, quando se iniciam as aulas.



Figura 47 - Consumo no mês de setembro de 2018 na Torre Sul

5.1.3 Consumo diário

5.1.3.1 Pavilhão Central

Os dias de menor e maior consumo e os respetivos valores encontram-se na tabela 12.

Tabela 12 - Dias de menor e maior consumo diário no Pavilhão Central

Ano	Dia de menor consumo	[kWh]	Dia de maior consumo	[kWh]
2017	13 de agosto (domingo)	2467,93	13 de julho (quinta-feira)	6534,61
2018	18 de novembro (domingo)	2656,91	27 de setembro (quinta-feira)	6114,10

Considerando como amostra estes dois dias de maior consumo, criaram-se dois perfis de consumo diário referentes a cada um destes dias, como se pode observar na figura 48. Os dois dias representam dias úteis como mencionado na tabela 12.

Em ambos os dias se verifica um pico ao início da tarde, às 15:00h e 16:00h, e baixos consumos durante a noite, como expectável devido à baixa ocupação nessas horas. É de notar também a semelhança entre os dois casos, com o início do aumento do consumo por volta das 7:00h e a partir das 20:00h um consumo constante baixo. Por norma, a esta hora a ocupação no Campus torna-se reduzida principalmente pelo horário das aulas, isto é, por já não haver aulas a partir desta hora, bem como pelo encerramento dos serviços administrativos.

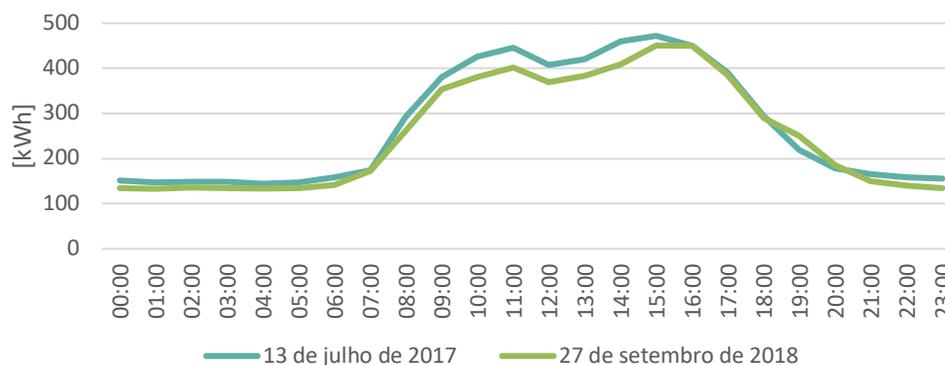


Figura 48 - Consumo diário dos dias de maior consumo no Pavilhão Central

Utilizando uma amostra de cinco dias do mês onde se observou um maior pico de consumo observa-se, na figura 49, um perfil diário de consumo. A amostra escolhida é de 26 a 30 de setembro, por corresponder à segunda semana de aulas e onde se registaram temperaturas máximas acima dos 30°C. Esta amostra será a mesma para os quatro edifícios em estudo, sendo que é um pico de maior consumo para todos eles como será apresentado.

Em 2017, estes dias correspondem uma terça-feira a sábado e em 2018, correspondem uma quarta-feira a domingo, pelo que nos últimos dias observa-se um baixo consumo. Existe uma diferença entre os dias úteis e fins de semana, pela diminuição de grande parte da utilização de energia nos fins de semana. O consumo à noite é bastante semelhante para todos os dias. É possível também observar um padrão perto da hora do almoço (12:00h) onde se encontra um decréscimo do consumo.

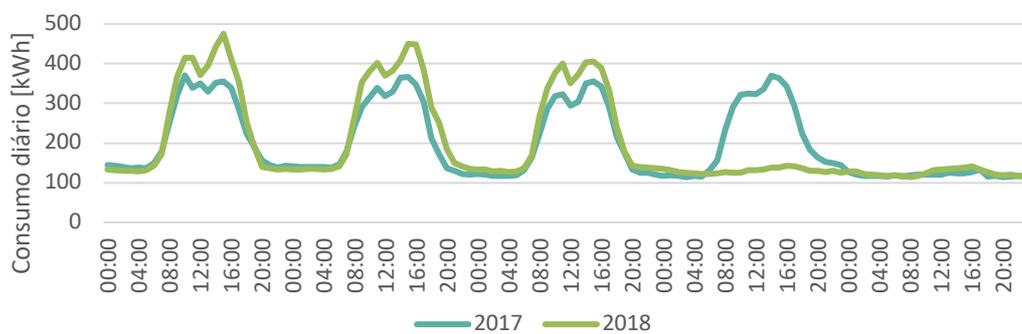


Figura 49 - Perfil de consumo diário de 26 a 30 de setembro no Pavilhão Central

Paralelamente e utilizando também uma amostra de cinco dias, neste caso é apresentada uma amostra de menor consumo. Escolheram-se cinco dias do mês de abril, por este se tratar de um dos meses de menor consumo para todos os edifícios, mas ainda com alguma atividade face por exemplo, ao mês de agosto. A amostra escolhida é de 4 a 8 de abril e encontra-se na figura 50. Este período já é posterior às férias da Páscoa e as temperaturas foram relativamente baixas, sendo as máximas inferiores a 15°C. Em 2018 a amostra é de quarta-feira a domingo e em 2017 de terça-feira a sábado.

Esta será a amostra utilizada para o estudo do perfil diário de todos os edifícios.



Figura 50 - Perfil de consumo diário de 4 a 8 de abril no Pavilhão Central

Por fim, de modo a analisar na mesma figura, o impacto dos dias úteis e fim de semana e os períodos de verão e inverno, observa-se na figura 51, o perfil médio semanal, sendo que a amostra para o verão é o mês de julho e para o inverno é janeiro. Em geral são ambos meses de elevado consumo.

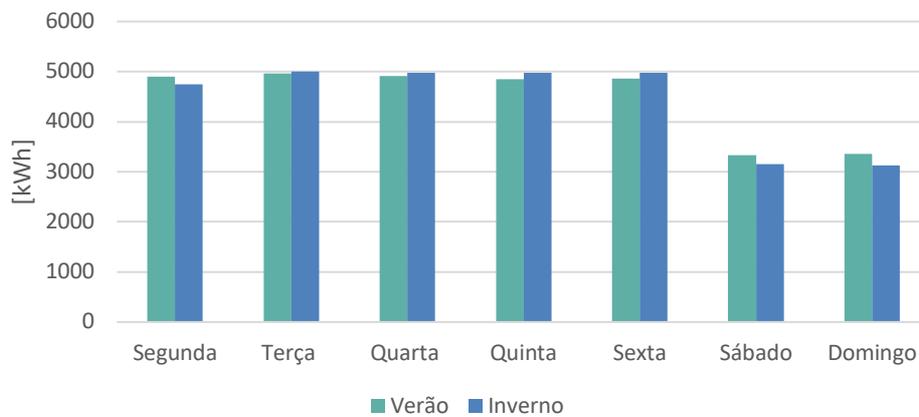


Figura 51 - Perfil médio semanal de consumo no Pavilhão Central

5.1.3.2 Pavilhão de Civil

Para o Pavilhão de Civil foram igualmente foram identificados os dias de menor e maior consumo, bem como os respetivos valores, que se encontram na tabela 13.

Tabela 13 - Dias de menor e maior consumo de eletricidade no Pavilhão de Civil

Ano	Dia de menor consumo	[kWh]	Dia de maior consumo	[kWh]
2017	8 de abril (sábado)	1320,56	19 de junho (segunda-feira)	6781,10
2018	12 de agosto (domingo)	1690,95	28 de setembro (sexta-feira)	6658,13

À semelhança do caso anterior, todas as análises foram repetidas para o caso do Pavilhão de Civil. Inicialmente criaram-se dois perfis de consumo diário referentes a cada um dos dias de maior consumo, como se pode observar na figura 52.

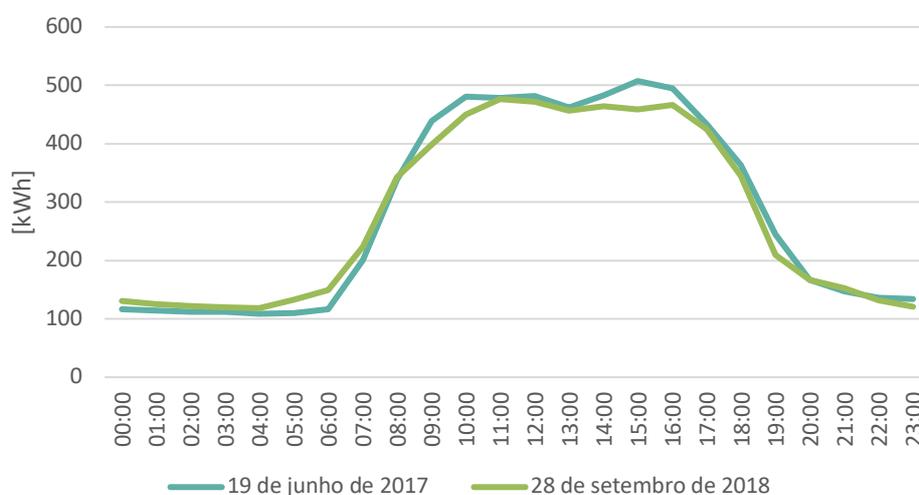


Figura 52 - Consumo diário dos dias de maior consumo no Pavilhão de Civil

Posteriormente, utilizando a amostra de 26 a 30 de setembro, encontra-se na figura 53 o perfil de consumo diário.

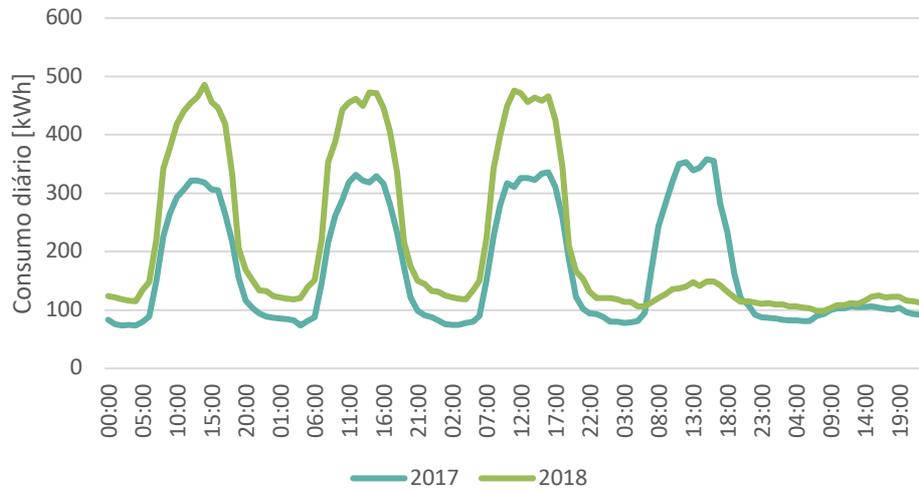


Figura 53 - Perfil de consumo diário de 26 a 30 de setembro para o Pavilhão de Civil

Relativamente à amostra de menor consumo, de 4 a 8 de abril, esta encontra-se na figura 54. Tendo em conta que no ano de 2017 o dia onde foi verificado o menor consumo foi o dia 8 de abril, facilmente observa-se esse significativo decréscimo no final da mesma figura (provavelmente provocado por alguma intervenção de manutenção, pois o consumo foi anormalmente baixo).

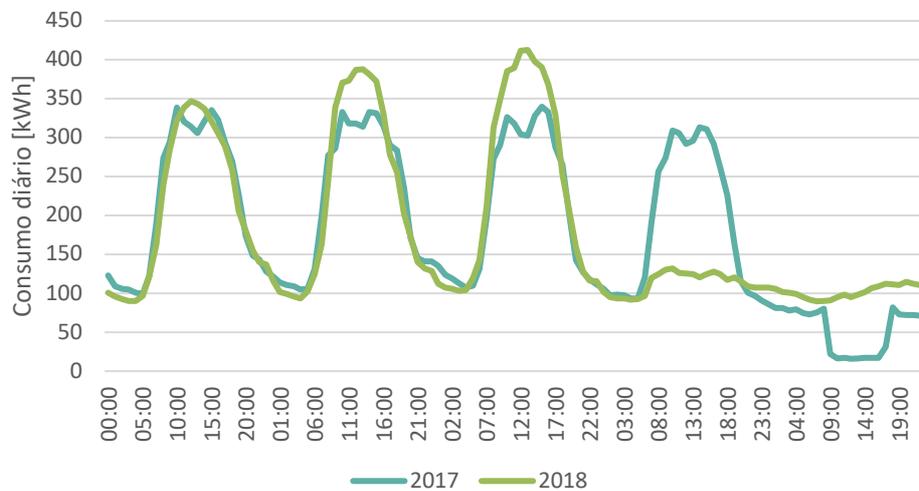


Figura 54 - Perfil de consumo diário de 4 a 8 de abril no Pavilhão de Civil

Realizada a mesma análise relativamente ao perfil semanal, para os dias de verão e inverno, esta encontra-se representada na figura 55.

Em comparação ao Pavilhão Central, este apresenta maior consumo nos dias úteis, mas um menor consumo ao fim de semana, explicado pelo facto de o pavilhão central ter a carga constante relativa ao *data center*.

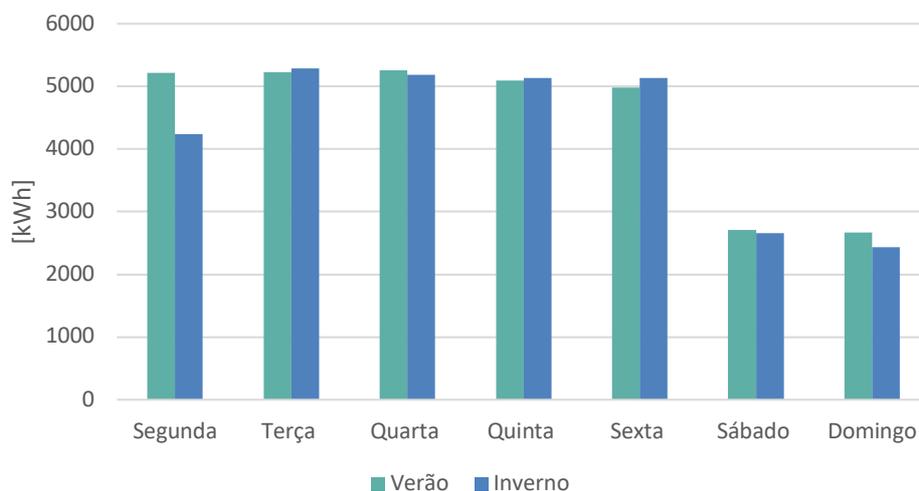


Figura 55 - Perfil médio semanal de consumo no Pavilhão de Civil

5.1.3.3 Torre Norte

Os dias de menor e maior consumo também foram identificados para a Torre Norte, conforme descrito na tabela 14.

Tabela 14 - Dias de menor e maior consumo de eletricidade na Torre Norte

Ano	Dia de menor consumo	[kWh]	Dia de maior consumo	[kWh]
2017	6 de agosto (sábado)	826,25	5 de julho (quarta-feira)	3881,20
2018	12 de agosto (domingo)	1012,85	27 de setembro (quinta-feira)	4584,47

Realizou-se as mesmas análises para o caso da Torre Norte. Os perfis diários dos dias de maior consumo encontram-se na figura 56.

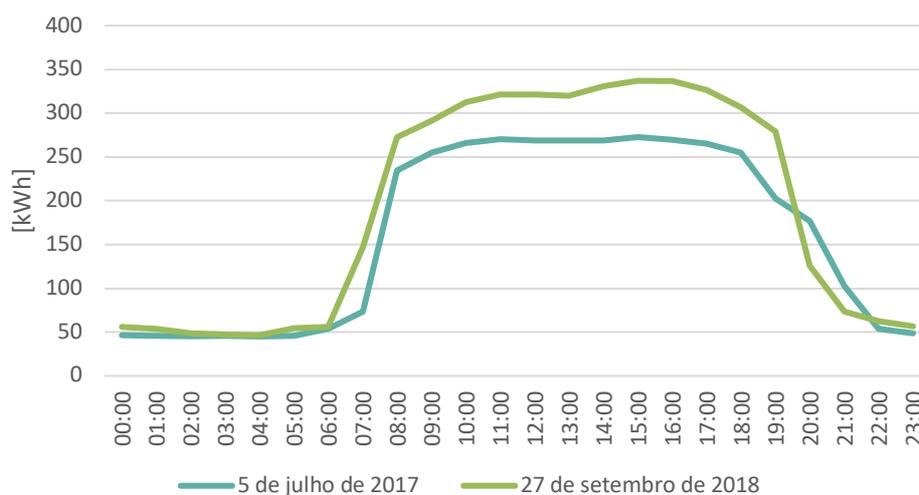


Figura 56 - Consumo diário dos dias de maior consumo na Torre Norte

Na figura 57, encontra-se o perfil de consumo diário dos dias 26 a 30 de setembro para a Torre Norte.

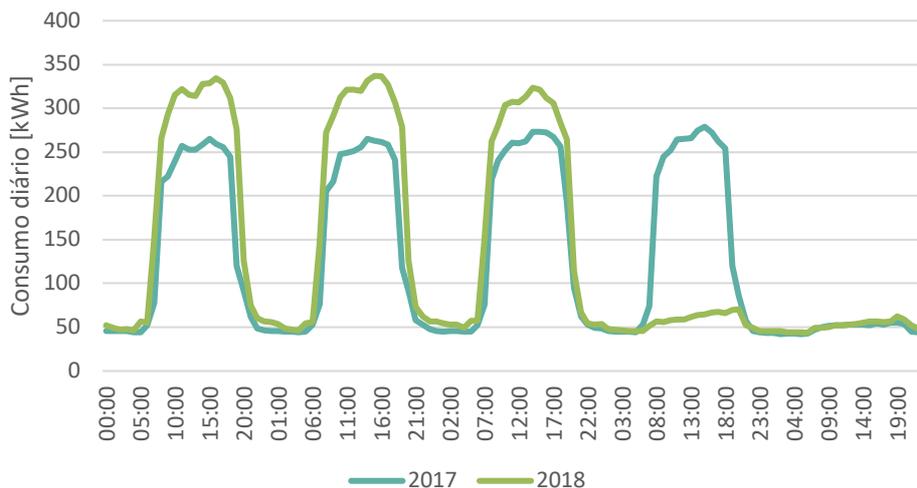


Figura 57 - Perfil de consumo diário de 26 a 30 de setembro para a Torre Norte

Observam-se as mesmas conclusões retiradas para os casos anteriores. Contudo, no presente caso, são verificados valores de consumo menores e um perfil mais regular. De notar que não se observam os decréscimos acentuados à hora do almoço (12:00h), como se observa no Pavilhão Central.

Na figura 58, encontra-se o perfil de consumo diário da amostra de 4 a 8 de abril. Face aos casos já apresentados este apresenta valores de consumo menores.

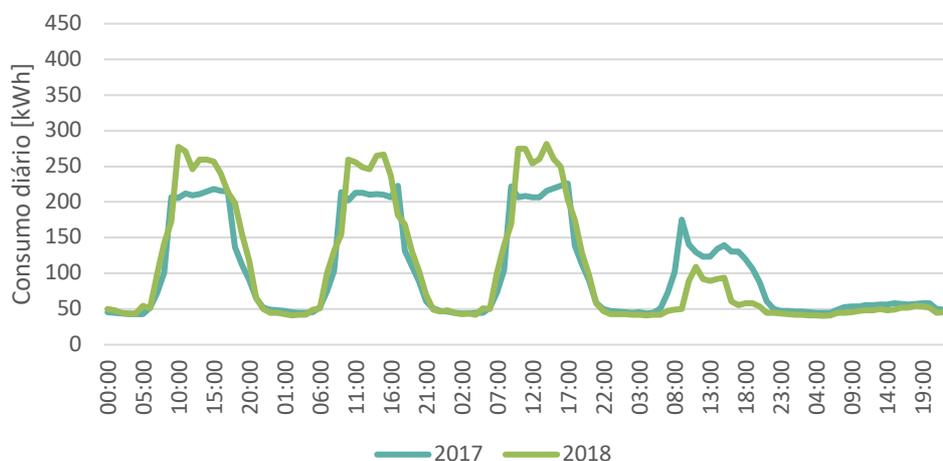


Figura 58 - Perfil de consumo diário de 4 a 8 de abril na Torre Norte

Por fim, relativamente à análise do perfil semanal, este encontra-se na figura 59. É de elevada relevância observar que os valores do consumo no verão são consideravelmente mais altos do que no inverno. Este facto comprova novamente que neste edifício as alturas do ano com necessidades de arrefecimento apresentam consumos elevados. Esta diferença observa-se apenas nos dias úteis devido à ocupação e utilização de energia associada a estes dias.

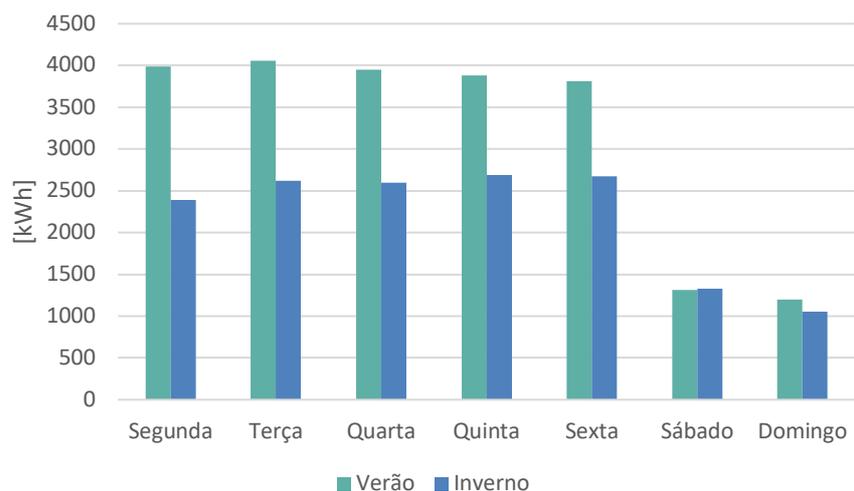


Figura 59 - Perfil médio semanal de consumo na Torre Norte

5.1.3.4 Torre Sul

Na Torre Sul os dias de menor e maior consumo foram igualmente identificados e encontram-se na tabela 15.

Tabela 15 - Dias de menor e maior consumo de eletricidade na Torre Sul

Ano	Dia de menor consumo	[kWh]	Dia de maior consumo	[kWh]
2017	13 de agosto (domingo)	1502,24	4 de julho (terça-feira)	7802,92
2018	30 de dezembro (domingo)	2092,93	26 de setembro (quarta-feira)	8447,11

Os perfis dos dois dias de maior consumo encontram-se na figura 60.

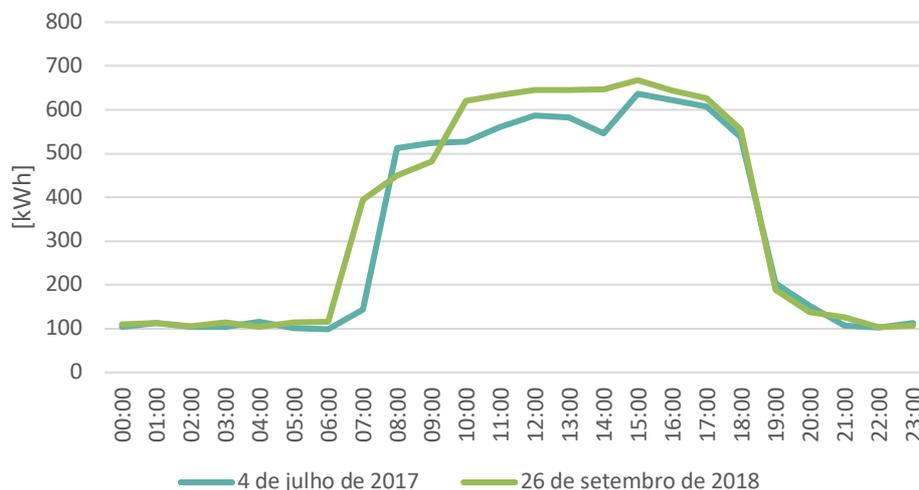


Figura 60 - Consumo diário dos dias de maior consumo na Torre Sul

O pico de maior consumo é novamente no mês de setembro e o perfil obtido encontra-se na figura 61. A amostra escolhida mantém-se igual às anteriores, de 26 a 30 de setembro. Algumas irregularidades são apresentadas neste perfil motivadas pelas respostas dos equipamentos às condições climáticas (recorde-se que em 2018 a temperatura foi muito elevada).

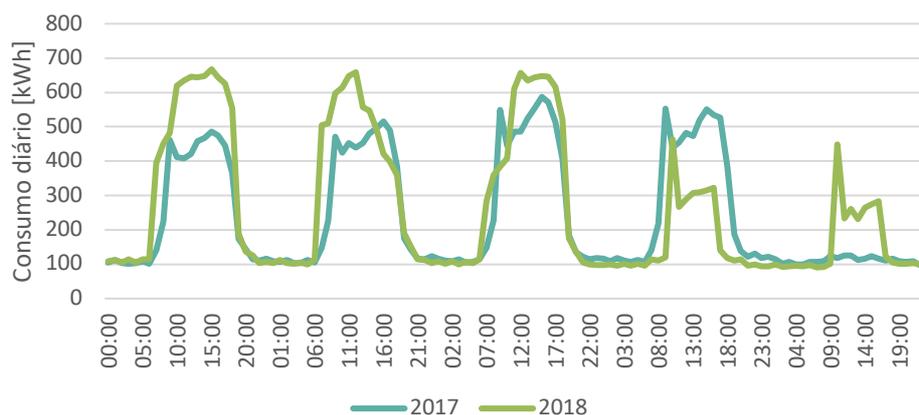


Figura 61 - Perfil de consumo diário de 26 a 30 de setembro para a Torre Sul

Relativamente à amostra de menor consumo, o perfil encontra-se na figura 62. É possível observar consumos substancialmente mais baixos relativamente à figura 61. No ano de 2018 é observado um perfil mais regular em relação ao ano de 2017.

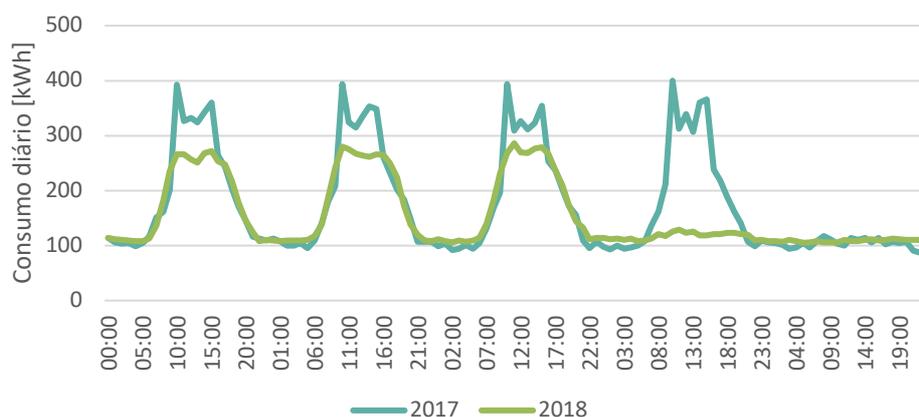


Figura 62 - Perfil de consumo diário de 4 a 8 de abril na Torre Sul

Por fim, relativamente à análise do perfil semanal, esta encontra-se na figura 63. Para o caso da Torre Sul, tal como na Torre Norte, também os dias com necessidades de arrefecimento apresentam consumos substancialmente mais elevados, tal como mencionado na análise mensal para este edifício.

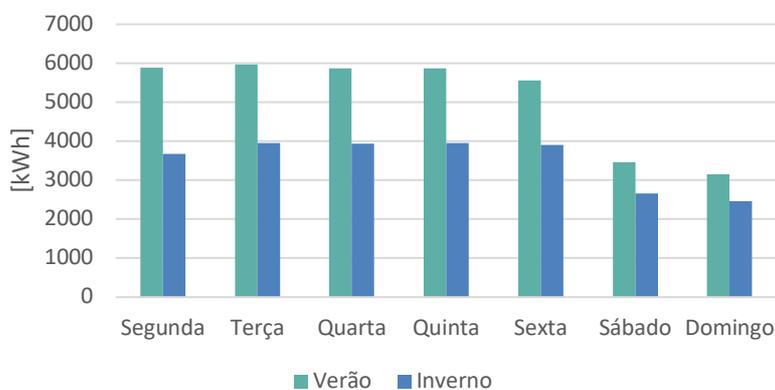


Figura 63 - Perfil médio semanal de consumo na Torre Sul

5.1.4 Visualização de resultados na Plataforma

Após a análise do consumo anual, os resultados do consumo de eletricidade em 2018 foram introduzidos na plataforma “CogUBEM Platform”.

Na figura 64, encontram-se representados os edifícios por gama de valores de consumo de eletricidade. Nessa figura pode-se verificar que os Pavilhões de Civil e Central têm consumos anuais entre 1,56 e 1,67 GWh/ano, a Torre Sul entre 1,44 e 1,56 GWh/ano e a Torre Norte consumos entre os 0,96 e 1,1 GWh/ano.

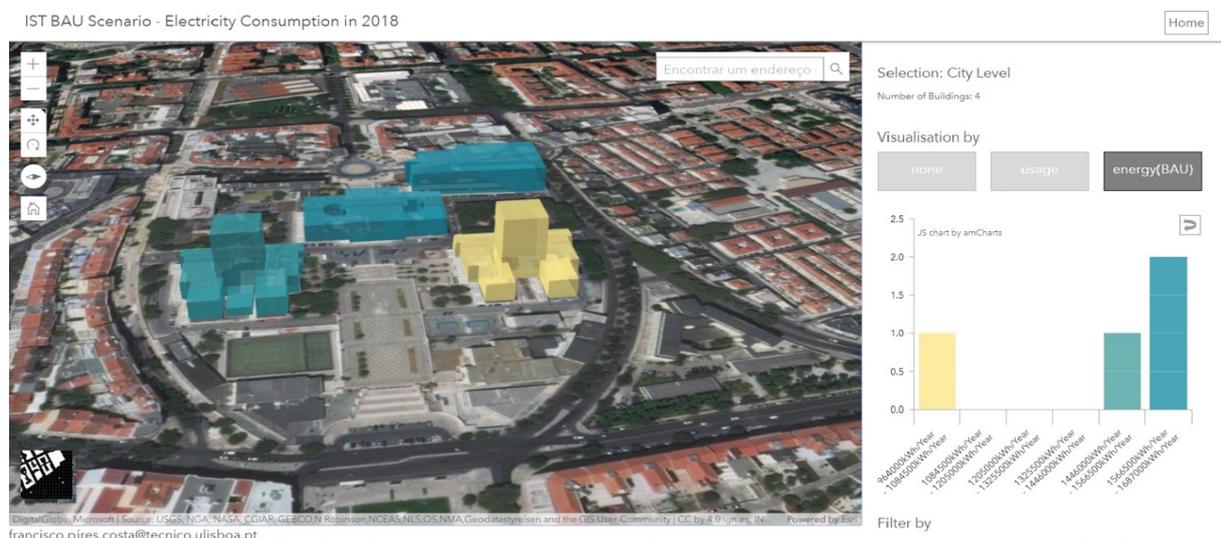


Figura 64 - Representação do consumo de eletricidade por gama de valores no primeiro cenário

5.2 Impacto dos quatro edifícios no Campus

A partir dos dados do consumo anual do Campus referentes ao ano de 2017, tornou-se possível verificar o elevado impacto que os quatro edifícios em estudo apresentam no consumo total do Campus. Na figura 65, encontra-se o consumo mensal de eletricidade dos quatro edifícios e o total do Campus no ano de 2017.

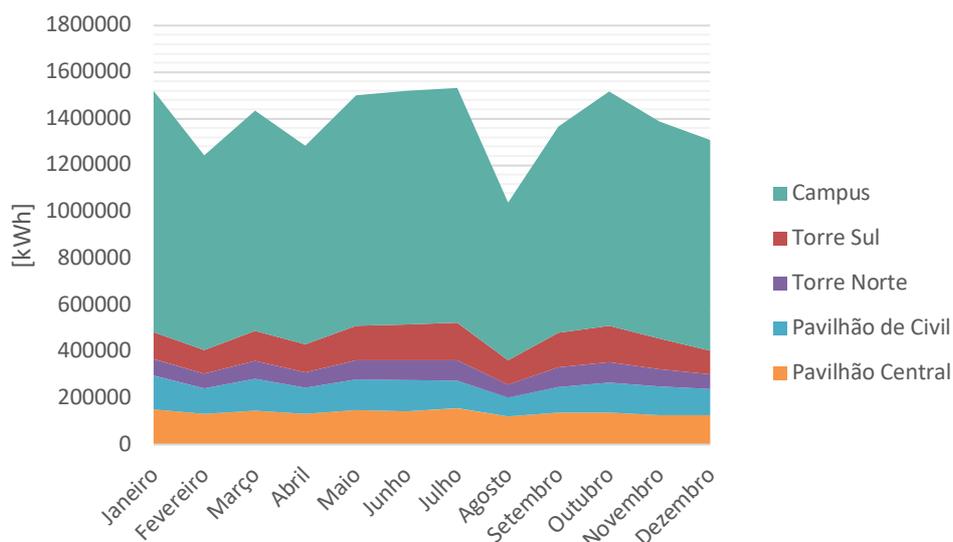


Figura 65 - Consumo mensal de eletricidade dos quatro edifícios e do Campus do IST

Na tabela 16, encontram-se novamente os dados do consumo anual dos quatro edifícios, mas desta vez acrescentando o valor referente ao consumo total anual do Campus para o ano de 2017.

Tabela 16 - Consumo de eletricidade do Campus e dos edifícios de estudo no ano de 2017

	Pavilhão Central	Pavilhão de Civil	Torre Norte	Torre Sul	Campus
[kWh]	1657772,2	1439591,1	898081,1	1571763,3	11079063,0
%	15%	13%	8%	14%	100%

Através da figura 66, é perceptível o elevado impacto que estes edifícios têm no consumo total do Campus, observando que representam 50,24% do consumo total, ainda mais sabendo que o IST possui 26 edifícios.

Tal como verificado anteriormente, a Torre Norte apresenta uma menor percentagem no consumo em relação aos restantes edifícios analisados.

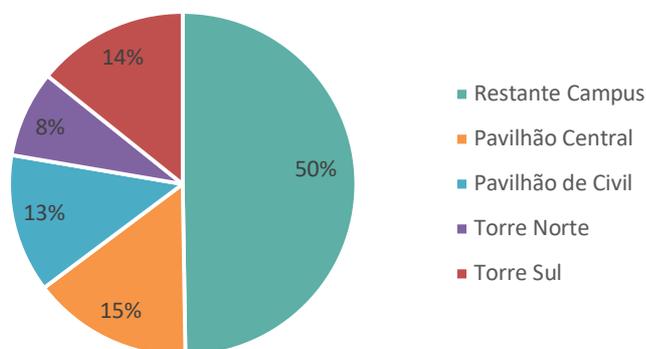


Figura 66 - Percentagem do consumo de eletricidade de cada edifício no Campus

5.3 Análise dos modelos EnergyPlus

Os modelos EnergyPlus dos quatro edifícios foram complementados com o ficheiro “.epw”, denominado de *weather file* que contem os dados climáticos de Lisboa para um ano típico. Este ficheiro é da autoria do INETI (Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação) e encontra-se no site oficial do programa EnergyPlus (INETI, 2019).

Vários resultados foram obtidos através dos modelos do EnergyPlus, nomeadamente referentes ao consumo de eletricidade e aos tipos de utilização de energia elétrica para cada um dos edifícios. Para a obtenção destes resultados efetuou-se alterações nos objetos *outputs* dos modelos. Os resultados originalmente em Joule foram todos convertidos para kWh para a comparação ser consistente com os dados reais do consumo de eletricidade.

5.3.1 Pavilhão Central

O modelo E+ do Pavilhão Central encontra-se na figura 67, onde estão representados todos os dados (objetos) referentes a este pavilhão e os respetivos testes (para criar ficheiros outputs) que foram realizados. Este modelo encontra-se atualizado até ao ano de 2018.

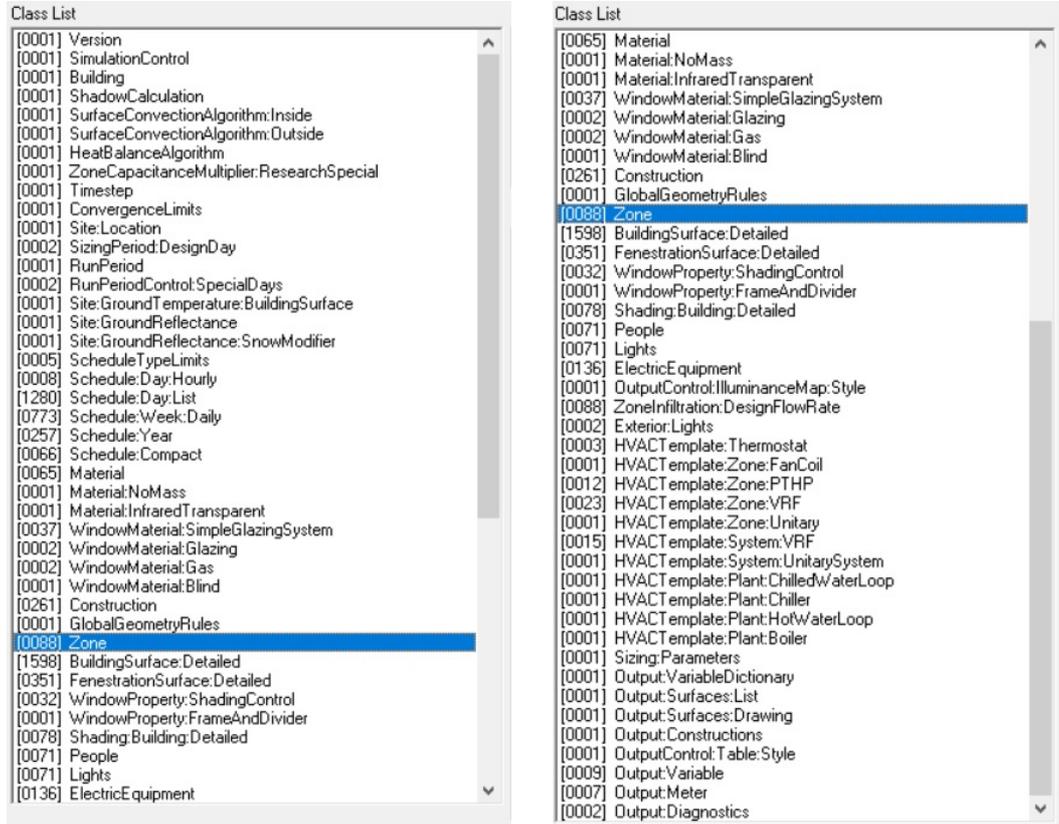


Figura 67 - Objetos criados no modelo E+ do Pavilhão Central

Depois de realizada a simulação deste modelo, foi possível um estudo dos resultados obtidos relativamente ao consumo de eletricidade e à sua utilização, que se encontram representados na figura 68.

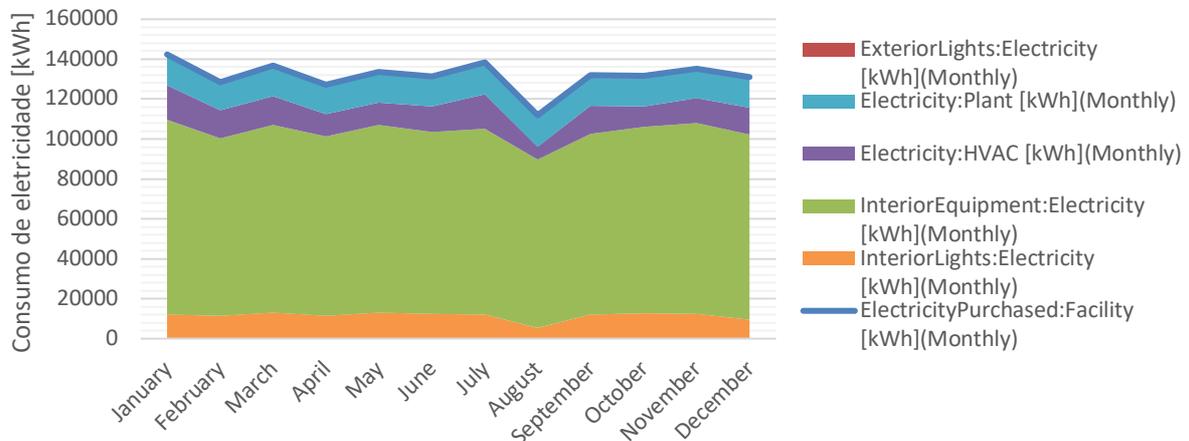


Figura 68 - Resultados da simulação E+ para o Pavilhão Central

Através da equação (1), podemos observar que o resultado “*ElectricityPurchased: Facility*”, presente na legenda da figura 68, é um somatório de várias componentes presentes na mesma figura e representa o consumo total do edifício. Esta informação encontra-se em documentação do programa (LLC, 2019).

$$Facility = \sum (Building + HVAC + Plant + Exterior) \quad (1)$$

A componente “*Building*” é o somatório dos consumos de cada zona térmica existente no modelo do edifício, portanto neste caso referente aos equipamentos e iluminação interior das zonas térmicas.

Na figura 69, os resultados de vários tipos de utilização encontram-se esquematizados e divididos por percentagem, para uma visualização mais precisa do real impacto de cada utilização de energia elétrica. Os respetivos valores encontram-se na tabela 17.

Tabela 17 - Consumo de eletricidade resultante do modelo E+ do Pavilhão Central e comparação de dados

	[kWh]
<i>Interior Lights</i>	137601,97
<i>Interior Equipment</i>	1105067,20
<i>Heating</i>	41847,33
<i>Cooling</i>	187019,18
<i>Fans</i>	77258,62
<i>Pumps</i>	17897,18
<i>Exterior Lights</i>	13489,27
Consumo total (E+)	1580180,75
<i>Purchased: Facility</i>	
Total Real 2017	1657772,20
Erro	4,68%
Total Real 2018	1597667,96
Erro	1,1%

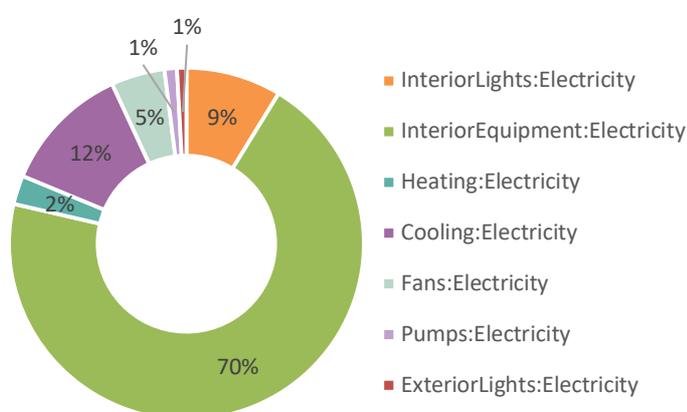


Figura 69 - Tipos de utilização de energia elétrica no Pavilhão Central

De notar que o somatório dos resultados, *heating*, *cooling*, *fans* e *pumps* presentes na tabela 17, é igual ao somatório dos resultados *HVAC* e *plant* presentes na figura 68. O que se torna coerente com as informações retiradas dos modelos EnergyPlus presentes nas equações (2) e (3), e portanto todas estas variáveis são contabilizadas no valor do “*ElectricityPurchased: Facility*”.

$$Electricity:HVAC = Fans + Cooling Coils + Heating Coils \quad (2)$$

$$Electricity: Plant = Chiller + Condenser Fan + Supply Pumps \quad (3)$$

Na tabela 17, observa-se que o somatório de todos os dados é igual ao consumo total de energia elétrica para este pavilhão.

Torna-se possível afirmar que os equipamentos são os principais consumidores de eletricidade neste pavilhão. E em consistência com os resultados apresentados anteriormente para este edifício, o valor referente ao aquecimento (*heating*) é menor do que o arrefecimento (*cooling*). A iluminação apresenta alguma

percentagem do consumo, apesar de não ser elevada neste caso. Também se observa neste modelo através da figura 68, o impacto da ocupação, as alturas das férias e os períodos de aulas.

5.3.2 Pavilhão de Civil

Relativamente aos objetos existentes no modelo E+ do Pavilhão de Civil, encontram-se na figura 70. Este modelo não se encontra atualizado até 2018.

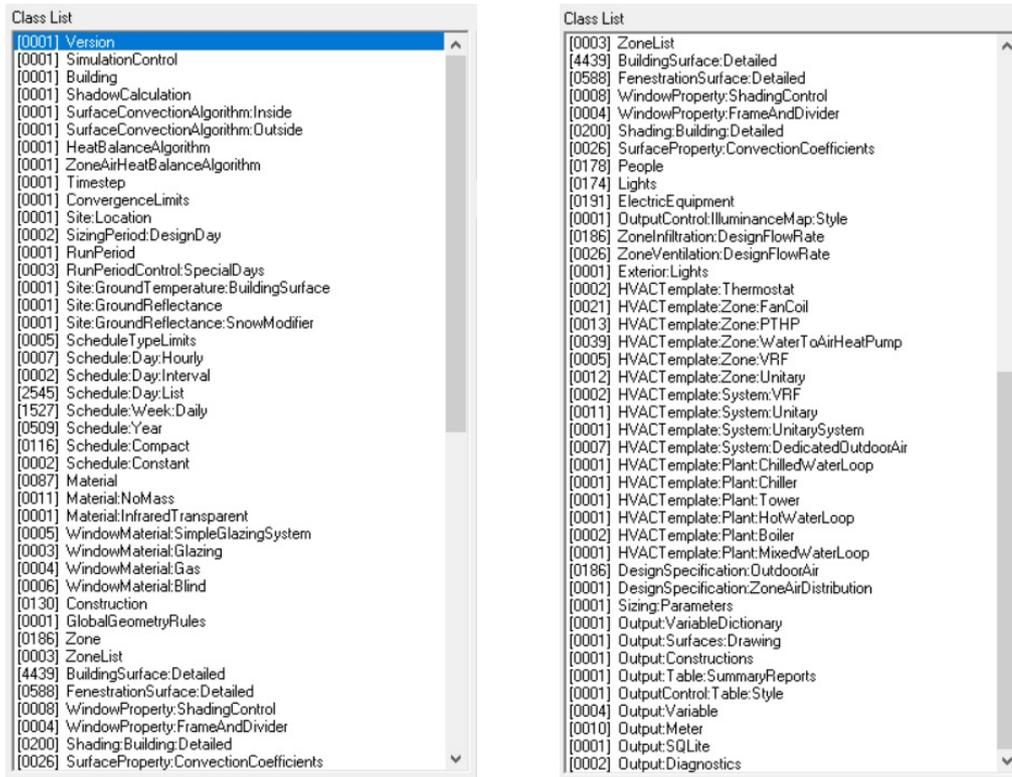


Figura 70 - Objetos criados no modelo E+ do Pavilhão de Civil

Os resultados referentes ao consumo de eletricidade encontram-se na figura 71. Nesta figura observa-se uma ligeira diferença no somatório das várias componentes face ao resultado do consumo total, possivelmente por uma diferença na modelação e valores dos equipamentos ou iluminação.

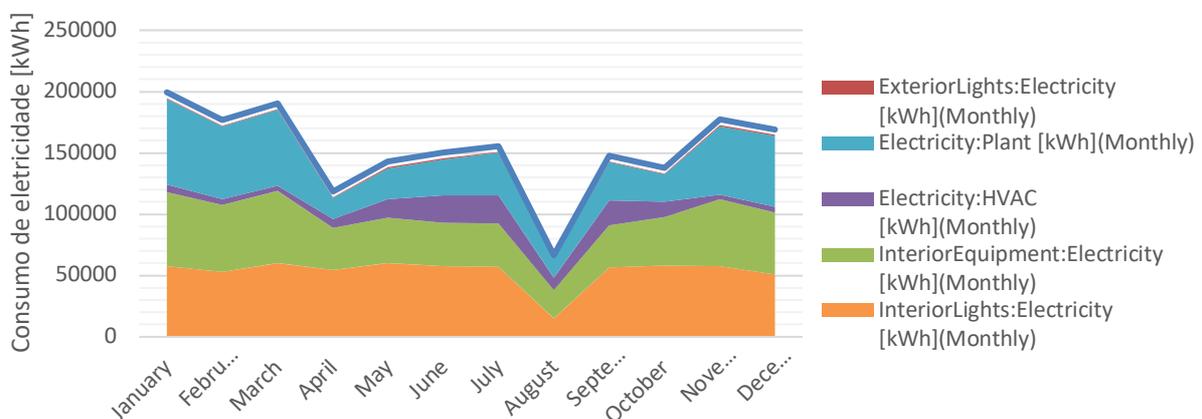


Figura 71 - Resultados da simulação E+ para o Pavilhão de Civil

Os tipos de utilização avaliados encontram-se em percentagem na figura 72. E os respetivos valores na tabela 18. Neste caso, a componente que consome mais eletricidade é a iluminação interior. Os equipamentos também apresentam uma considerável percentagem do consumo total. O aquecimento apresenta um maior consumo, apesar da percentagem ser semelhante, o que se encontra consistente com as conclusões retiradas dos dados reais, anteriormente apresentadas.

Tabela 18 - Consumo de eletricidade resultante do modelo E+ do Pavilhão de Civil e comparação de dados

	[kWh]
<i>Interior Lights</i>	638655,56
<i>Interior Equipment</i>	517915,88
<i>Heating</i>	240907,76
<i>Cooling</i>	173394,19
<i>Fans</i>	96172,87
<i>Pumps</i>	151941,51
<i>Exterior Lights</i>	8402,73
<i>Heat Rejection</i>	5545,32
Consumo total (E+) Purchased: Facility	1832935,82
Total Real 2017	1439591,07
Erro	27,3%
Total Real 2018	1605370,71
Erro	14,17%

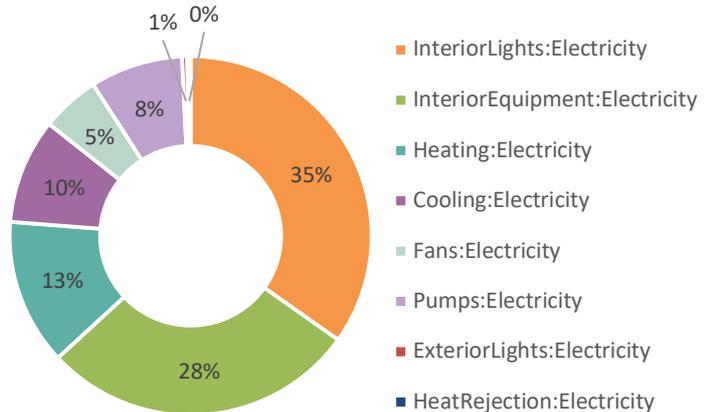


Figura 72 - Tipos de utilização de energia elétrica no Pavilhão de Civil

5.3.3 Torre Norte

Relativamente aos objetos existentes no modelo E+ da Torre Norte, encontram-se na figura 73.

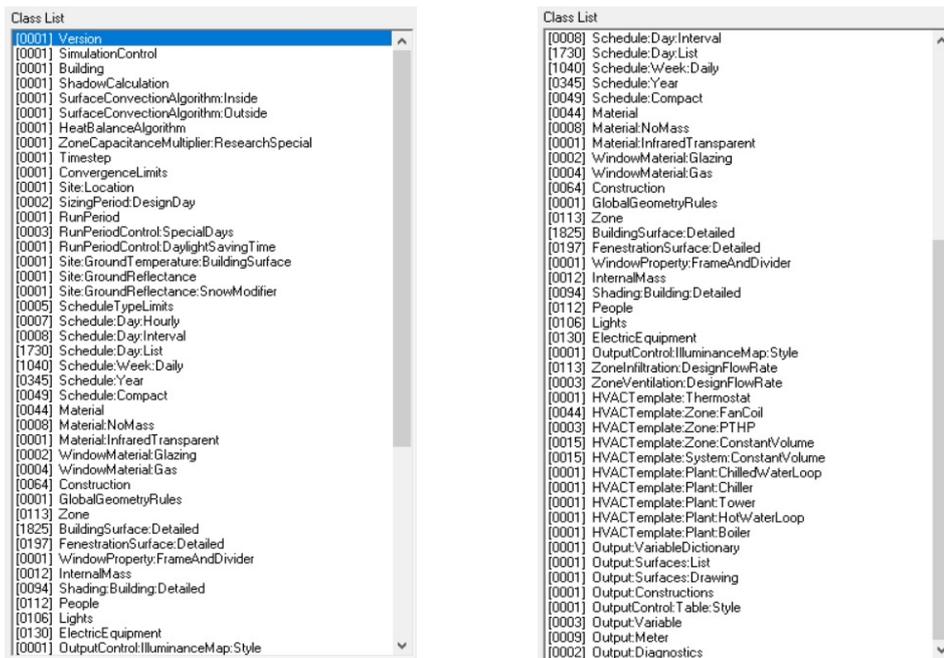


Figura 73 - Objetos criados no modelo E+ da Torre Norte

Este modelo é referente ao ano de 2015, portanto não se encontra totalmente atualizado. Os resultados referentes à análise do consumo encontram-se na figura 74. Observa-se neste caso uma discrepância maior para o valor do consumo de eletricidade, representado pela linha a azul.

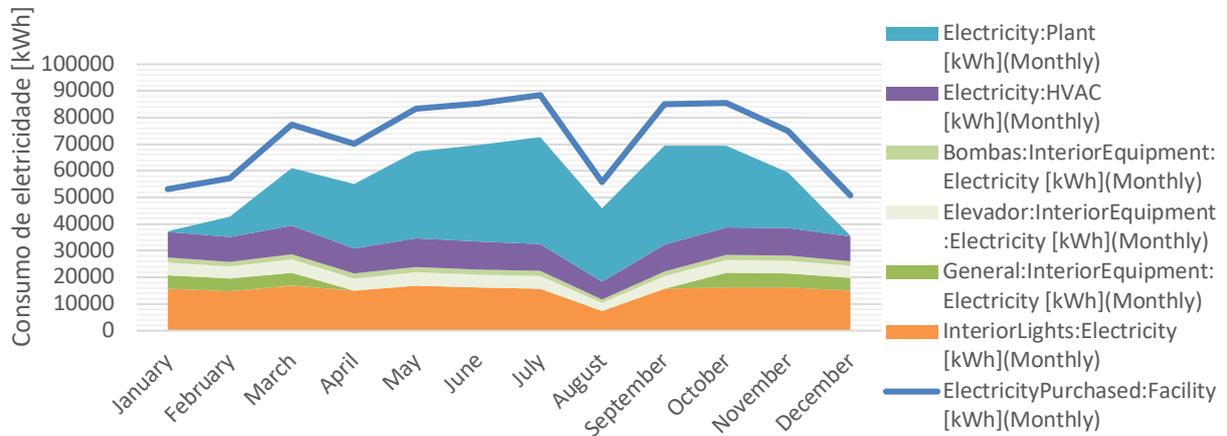


Figura 74 - Resultados da simulação E+ para a Torre Norte

Para além deste modelo ser de 2015 e deste não se encontrar atualizado, observa-se que poderá haver um erro associado à modelação dos equipamentos interiores e não se apresentam todos os dados referentes a estes, como tal este apresenta-se provavelmente subestimado. Na figura 75, encontram-se os tipos de utilização estudados e a respetiva percentagem no consumo total. Na tabela 19, encontram-se os dados referentes a cada uma.

Tabela 19 - Consumo de eletricidade resultante do modelo E+ da Torre Norte e comparação de dados

	[kWh]
<i>Interior Lights</i>	181956,94
<i>Interior Equipment</i>	107556,1
<i>Heating</i>	1281,51
<i>Cooling</i>	220318,63
<i>Fans</i>	116903,48
<i>Pumps</i>	54851,62
<i>Heat Rejection</i>	7244,84
<i>Exterior Lights</i>	0
Total variáveis	690113,12
Consumo total (E+)	867076,84
Purchased:	
Facility	
Total Real 2017	898081,10
Erro	3,45%
Total Real 2018	1002120,52
Erro	13,48%

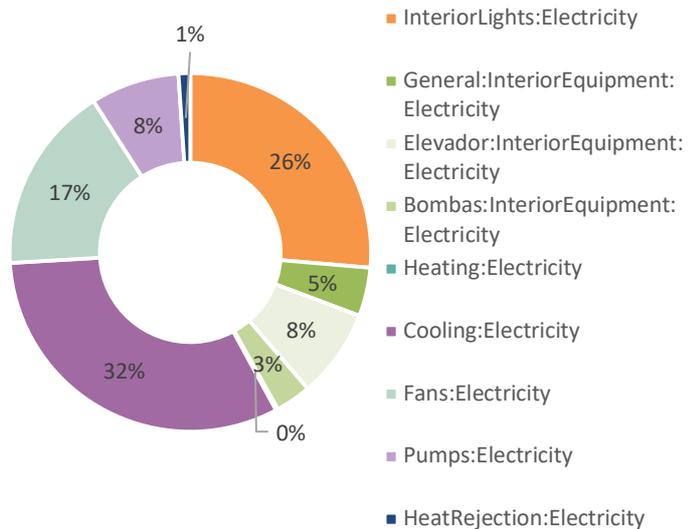


Figura 75 - Tipos de utilização de energia elétrica na Torre Norte

Torna-se então possível de observar na figura 75, que os dados referentes aos equipamentos muito provavelmente não se encontram todos definidos no modelo, pela baixa percentagem e pelo resultado estar fragmentado em várias variáveis. A diferença entre o total das variáveis e o consumo total presente na tabela 19, poderá ser explicada por este motivo.

Neste caso, o arrefecimento apresenta a maior percentagem do consumo total. Este resultado encontra-se bastante consistente com as conclusões retiradas dos dados reais, em que os meses com necessidades de arrefecimento apresentam maiores consumos.

Relativamente à iluminação, esta também apresenta uma elevada percentagem do consumo total. O mesmo não se pode dizer dos equipamentos, o que não se encontra de acordo com a realidade.

5.3.4 Torre Sul

Os objetos existentes no modelo E+ da Torre Sul encontram-se na figura 76. Este modelo é referente ao ano de 2018.

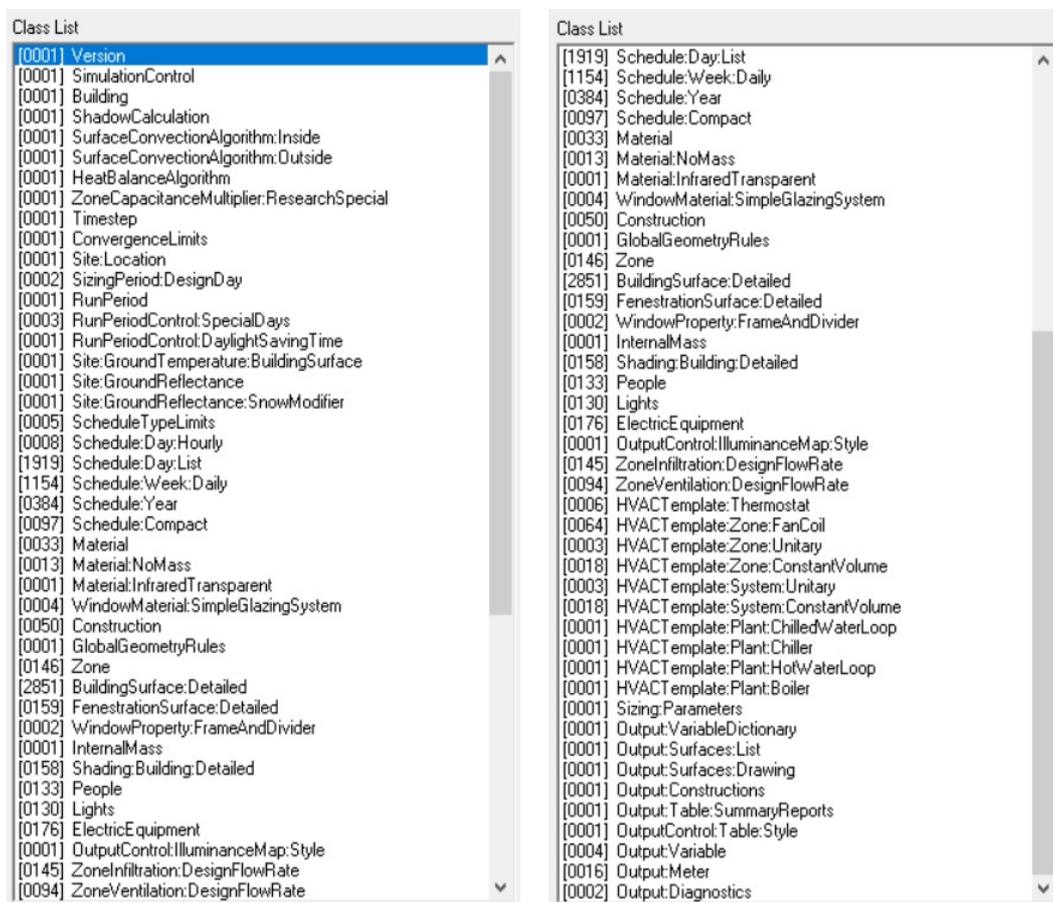


Figura 76 - Objetos criados no modelo E+ da Torre Sul

Os resultados referentes ao consumo de energia elétrica encontram-se na figura 77. À semelhança do modelo da Torre Norte, também no presente caso observa-se uma certa discrepância para o valor do consumo. É possível observar também que os meses com necessidades de arrefecimento apresentam valores de consumo maiores, como seria esperado pela análise dos dados reais.

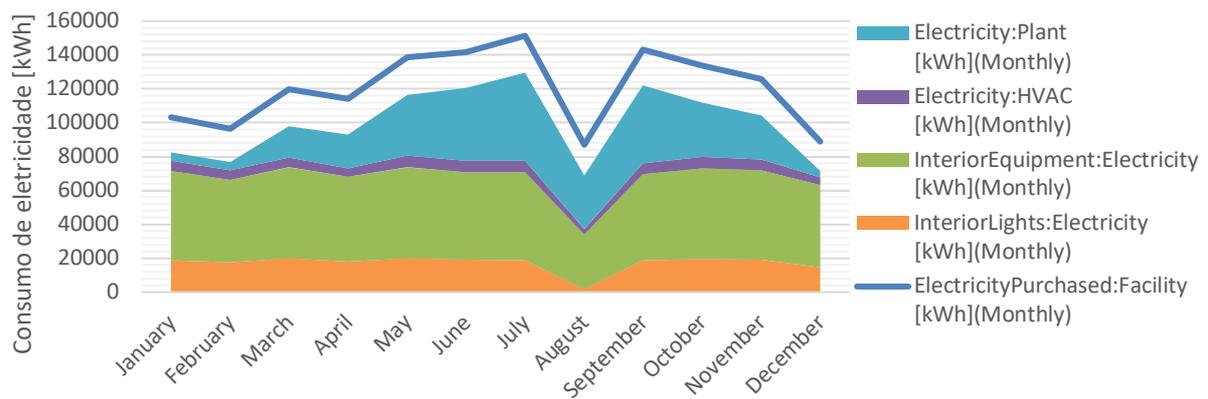


Figura 77 - Resultados da simulação E+ para a Torre Sul

Na figura 78, encontram-se os tipos de utilização estudados e as respetivas percentagens no consumo total. Na tabela 20, apresentam-se os valores referentes a cada uma. Nesta tabela são apresentados os resultados mais robustos do presente modelo. Sendo que o somatório dos resultados se encontra igual ao valor do consumo total de eletricidade.

Tabela 20 - Consumo de eletricidade resultante do modelo E+ da Torre Sul e comparação de dados

	[kWh]
<i>Interior Lights</i>	205621,78
<i>Interior Equipment</i>	601046,64
<i>Heating</i>	0
<i>Cooling</i>	278567,69
<i>Fans</i>	310285,78
<i>Pumps</i>	47417,73
<i>Exterior Lights</i>	0
Consumo total (E+)	1442939,62
Purchased:	
Facility	
Total Real 2017	1571763,28
Erro	8,2%
Total Real 2018	1539458,08
Erro	6,27%

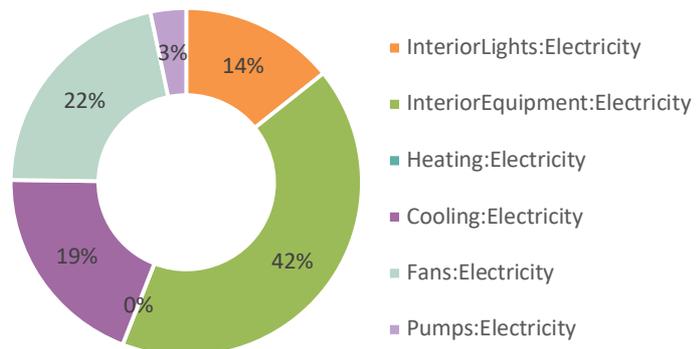


Figura 78 - Tipos de utilização de energia elétrica na Torre Sul

Neste pavilhão os equipamentos apresentam a maior percentagem face aos outros consumos. À semelhança da Torre Norte, também esta apresenta valores de arrefecimento elevados, tal como seria de esperar pelas conclusões retiradas dos dados reais.

Por fim, encontra-se na tabela 21, um resumo dos resultados para o consumo de eletricidade de cada edifício, com base na equação (1) anteriormente apresentada, para posteriormente se proceder à validação dos modelos.

Tabela 21 - Resultados dos modelos E+ para os quatro edifícios

Resultados E+ [kWh]	Pavilhão Central	Pavilhão de Civil	Torre Norte	Torre Sul
<i>Building</i>	1242669,17	1210290,11	470819,78	1054384,48
<i>HVAC</i>	154190,57	135191,43	116589,26	70688,23
<i>Plant</i>	169831,73	479051,55	279667,8	317866,91
<i>Exterior</i>	13489,28	8402,73	0	0
Total (Purchased)	1580180,75	1832935,82	867076,84	1442939,62

5.3.5 Visualização de resultados na Plataforma

Na figura 79, encontra-se o tipo de utilização com maior percentagem de consumo de cada edifício. De notar que na plataforma a percentagem é relativa ao número de edifícios selecionados, e não ao consumo total.



Figura 79 - Tipo de utilização com maior consumo em cada edifício no primeiro cenário

Outra possibilidade de visualização encontra-se na figura 80, em que é possível observar-se apenas um edifício e o tipo de utilização com maior consumo respetivamente. Neste exemplo, verifica-se que na Torre Sul, o tipo de utilização com maior consumo são os equipamentos.



Figura 80 - Tipo de utilização com maior consumo de um edifício no primeiro cenário

5.4 Validação

Através dos valores reais do consumo de eletricidade e os obtidos através do modelo, tornou-se possível representar e comparar estes dois valores. Este processo realizou-se para todos os edifícios.

A partir de algum estudo sobre a validação nos UBEMs, sabe-se que poderá haver algumas incertezas associadas a taxas de infiltração ou comportamento dos ocupantes, tal como referido no capítulo 2. Portanto, em relação ao consumo de energia nos edifícios, poderão existir erros na ordem dos 7% aos 21%, sendo estes valores de erro aceitáveis na tomada de decisão. Para análises referentes à carga de pico, erros até 40% podem ser considerados (Reinhart and Cerezo Davila, 2016).

Outros autores validaram modelos em que a percentagem do erro para os serviços de energia nos edifícios está situada entre 4% a 66%. Através de modelos implementados foram identificados erros entre 1% e 19% para a escala urbana, a partir destes modelos foram observados erros entre 6% a 39% para o consumo de eletricidade nos edifícios. Este modelo apresenta uma ferramenta baseada no EnergyPlus (Fonseca and Schlueter, 2015b).

A partir de estudos de validação e critérios da ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) dois parâmetros foram calculados e estudados na presente dissertação.

O MBE (*Mean bias error*) representa uma média dos erros absolutos de uma amostra. Quando apresenta valores positivos revela que o modelo subestima os dados e valores negativos revela uma previsão sobrestimada. O cálculo do valor MBE realiza-se através da equação (4), em que m_i é o valor medido, s_i é o valor simulado e n o número de dados (Ruiz and Bandera, 2017).

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)}{n} \quad (4)$$

Sabendo que este parâmetro pode ter alguns erros associados torna-se importante calcular o valor NMBE (*Normalized mean bias error*), que apresenta a diferença entre os valores reais e os modelados. O cálculo do parâmetro NMBE realiza-se através da equação (5), em que \bar{m} é a média dos valores medidos e o valor de p é sugerido ser igual a zero (Ruiz and Bandera, 2017).

$$NMBE = \frac{1}{\bar{m}} \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)}{n - p} \times 100 (\%) \quad (5)$$

Por fim, existe um critério CV(RMSE) (*Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error*) que avalia a capacidade do modelo. Segundo a ASHRAE, estes são parâmetros precisos para validar modelos (Ruiz and Bandera, 2017). O coeficiente CV(RMSE) mede a variação dos erros e encontra-se na equação (6).

$$CV(RMSE) = \frac{1}{\bar{m}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)^2}{n - p}} \times 100 (\%) \quad (6)$$

Os critérios que a ASHRAE apresenta como valores aceitáveis para modelos com resoluções horárias é 20% e mensais são de 5% para o NMBE e 15% para o CV(RMSE) (Royapoor and Roskilly, 2015).

Simplificando o processo de validação deste trabalho e observando estudos de diversos autores que validaram os seus modelos através do erro relativo (Fonseca and Schlueter, 2015b), a validação terá em consideração o erro relativo apresentado na equação (7).

$$Erro\ relativo = \frac{|modelo - real|}{real} \times 100\ (%) \quad (7)$$

Para o caso do Pavilhão Central, a comparação entre os resultados reais e os modelados encontra-se na figura 81.

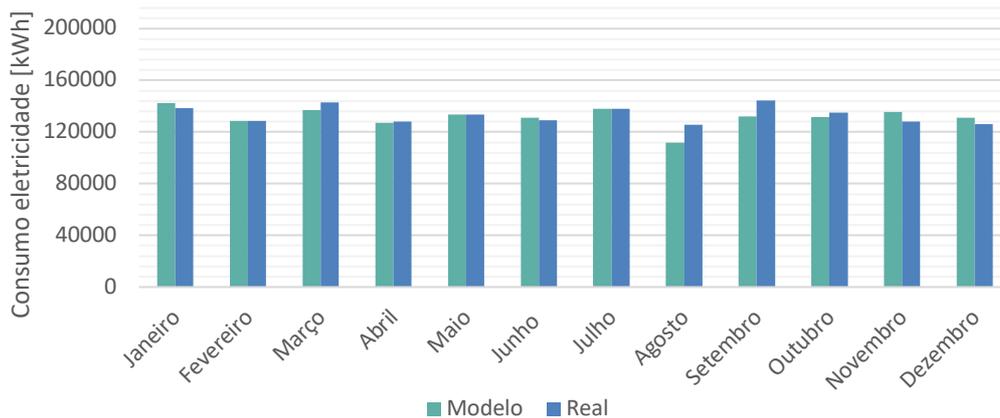


Figura 81 - Comparação entre o modelo e o valor real do consumo no Pavilhão Central

Na tabela 22, é possível observar o reduzido erro, calculado a partir da equação (7).

Tabela 22 - Erro relativo entre o valor real de consumo anual e do modelo no Pavilhão Central

2018	Consumo de eletricidade [kWh]	MBE	Erro relativo
Real	1597667,95	1457,27	1,1 %
Modelo	1580180,75	(> 0)	

Para o Pavilhão de Civil, a comparação entre os consumos mensais encontra-se na figura 82.

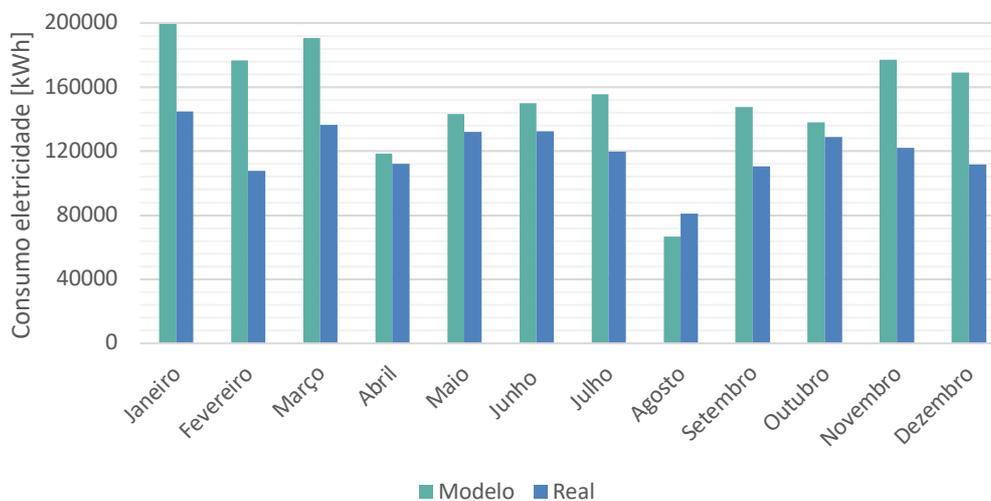


Figura 82 - Comparação entre o modelo e o valor real do consumo no Pavilhão de Civil

Relativamente ao erro associado a este modelo encontra-se na tabela 23. Como este modelo não se encontra atualizado até ao ano de 2018, poderá ser uma das razões para o erro ser maior neste caso. Ainda assim encontra-se validado segundo os estudos realizados e os valores apresentados anteriormente.

Tabela 23 - Erro relativo entre o valor real de consumo anual e do modelo no Pavilhão de Civil

2018	Consumo de eletricidade [kWh]	MBE	Erro relativo
Real	1605370,71	-18963,76	14,17 %
Modelo	1832935,82	(< 0)	

Para o caso da Torre Norte, sabendo que o modelo é referente ao ano de 2015, utilizou-se os dados mais próximos desse ano, portanto o ano de 2017. A comparação entre os consumos mensais encontra-se na figura 83.

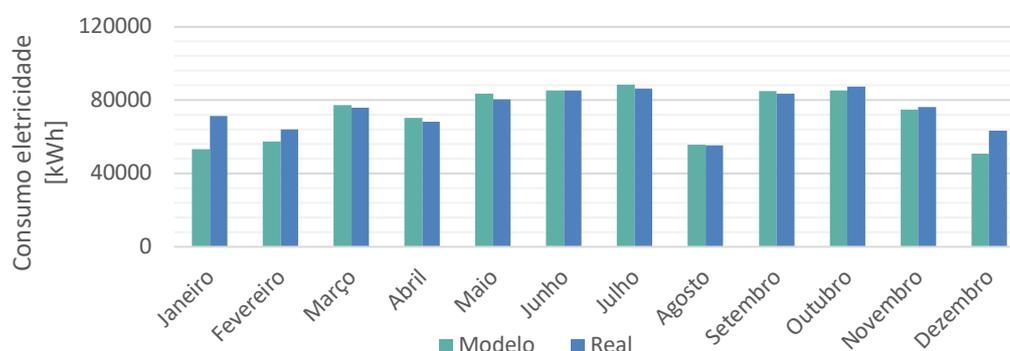


Figura 83 - Comparação entre o modelo e o valor real do consumo na Torre Norte

O erro relativo associado a este modelo encontra-se na tabela 24.

Tabela 24 - Erro relativo entre o valor de consumo anual e do modelo na Torre Norte

2017	Consumo de eletricidade [kWh]	MBE	Erro relativo
Real	898081,10	2583,69	3,45 %
Modelo	867076,84	(> 0)	

Por fim, para o caso da Torre Sul, esta comparação encontra-se na figura 84. E foi realizada com os dados referentes ao ano de 2018.

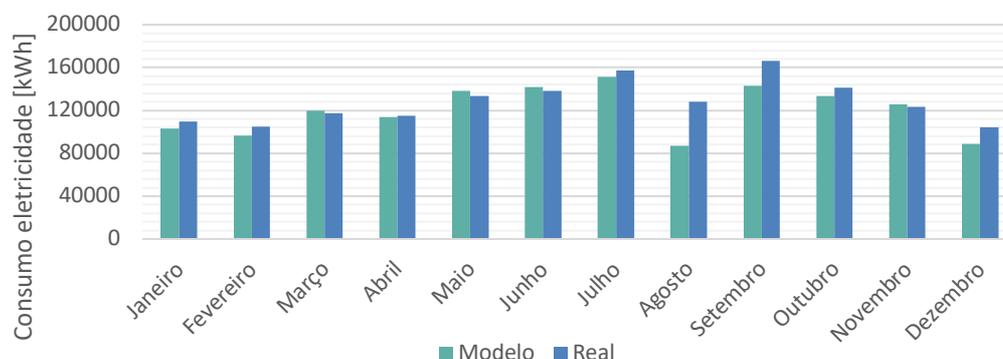


Figura 84 - Comparação entre o modelo e o valor real do consumo na Torre Sul

O erro relativo referente a este modelo encontra-se na tabela 25.

Tabela 25 - Erro relativo entre o valor real de consumo anual e do modelo na Torre Sul

2018	Consumo de eletricidade [kWh]	MBE	Erro relativo
Real	1539458,08	8043,21	6,27 %
Modelo	1442939,62	(> 0)	

A partir da bibliografia apresentada, e sabendo que modelos foram validados com erros de 6% a 39% para o consumo de eletricidade nos edifícios, todos os erros estão dentro dos valores demonstrados.

Daqui se conclui que os atuais modelos, ainda que não atualizados, podem ser utilizados para estimar o impacto de medidas de eficiência energética para análise de resolução temporal mensal.

6 Eficiência energética e Medidas de Poupança

Sabendo o elevado consumo de eletricidade do Campus, e havendo uma preocupação na redução do mesmo, várias medidas e alterações foram planeadas e em breve serão implementadas. Com a diminuição do consumo, para além das vantagens para o Campus a todos os níveis, menor será o impacto deste na grande cidade de Lisboa.

6.1 Proposta de alterações

Em conformidade com o presente caso de estudo, o foco do estudo das alterações a implementar será nos quatro edifícios. Através do estudo apresentado no capítulo anterior, é possível retirar algumas conclusões, nomeadamente, a necessidade de diminuir o consumo proveniente da iluminação, principalmente no Pavilhão de Civil. Na Torre Sul, o consumo é consideravelmente influenciado pelas necessidades de arrefecimento.

As alterações planeadas encontram-se detalhadas na tabela 26. Pelo menos uma destas propostas já se encontra em vigor, nomeadamente a substituição de lâmpadas T8 por tubos de LED no Pavilhão de Civil. A presente informação foi disponibilizada pelo Projeto Campus Sustentável (Técnico - Campus Sustentável, 2018).

Tabela 26 - Medidas de poupança para os edifícios do IST

Pavilhão	Alterações
Pavilhão Central	<ul style="list-style-type: none">✓ Substituição da Iluminação T8 para LED;✓ Isolamento para preparação e reabilitação da cobertura;✓ Implementação de sistemas fotovoltaicos na cobertura (180 kW);
Pavilhão Civil	<ul style="list-style-type: none">✓ Substituição da Iluminação T8 para LED;✓ Reabilitação do Sistema de AVAC (permutadores, etc.);✓ Reabilitação dos envidraçados e envolvente translúcida;✓ Substituição das claraboias dos corredores;✓ Isolamento para preparação e reabilitação da cobertura;✓ Implementação de sistemas fotovoltaicos na cobertura (120 kW);
Torre Norte	<ul style="list-style-type: none">✓ Isolamento para preparação e reabilitação da cobertura;✓ Implementação de sistemas fotovoltaicos na cobertura (46 kW), este sistema será implementado no Pavilhão I que se encontra na estrutura deste edifício;
Torre Sul	<ul style="list-style-type: none">✓ Substituição do Chiller por um mais eficiente (612kW);✓ Isolamento para preparação e reabilitação da cobertura;✓ Implementação de sistemas fotovoltaicos na cobertura (46 kW), este sistema será implementado no Pavilhão de minas que se encontra na estrutura deste edifício.

6.2 Medidas de eficiência energética

Tendo em consideração que o objetivo e conclusão principal é a necessidade de diminuir o consumo de energia elétrica, vai-se analisar o impacto de duas medidas:

- ✓ A substituição da iluminação no Pavilhão Central e de Civil;

- ✓ A instalação de painéis fotovoltaicos para produzir energia elétrica a partir da luz solar na cobertura dos quatro edifícios.

6.2.1 Iluminação

A partir dos modelos EnergyPlus dos dois edifícios, Pavilhão Central e de Civil, torna-se possível alterar a potência referente às alterações de iluminação de cada zona térmica, como se observa na figura 85 representado pela caixa azul. Depois de simular novamente os novos modelos, a partir dos resultados é possível perceber o impacto desta medida.

Os valores referentes à iluminação utilizada nos dois edifícios foram cedidos pelo Projeto Campus Sustentável.

The screenshot shows the EnergyPlus software interface. On the left, the 'Class List' is visible, with 'Lights' selected. On the right, the 'Comments from IDF' pane shows the 'Explanation of Object and Current Field' for the selected object. Below this, a table displays the 'Lighting Level' for eight zones (Obj1 to Obj8). The 'Lighting Level' row is highlighted with a blue box, showing values of 378, 403, 772, 653, 1000, 290, and 580 for zones Obj1 through Obj7 respectively. The 'Obj8' column is empty.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7
Name		1General lighting	2General lighting	3General lighting	5General lighting	6General lighting	7General lighting	8General lighting
Zone or ZoneList Name		01:1	01:2	01:3	01:5	01:6	01:7	01:8
Schedule Name		IluminaçãoYEARTZ						
Lighting Level	W	378	403	772	653	1000	290	580
Watts per Zone Floor Area	W/m2							
Watts per Person	W/person							
Return Air Fraction		0	0	0	0	0	0	0
Fraction Radiant		0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
Fraction Visible		0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18

Figura 85 - Potência total da iluminação de cada zona térmica no EnergyPlus

No plano de eficiência energética constitui que todas as lâmpadas T8 estão a ser totalmente substituídas por tubos de LED e as lâmpadas dicroicas por spots LED (Técnico - Campus Sustentável, 2018). A alteração estudada nesta dissertação foi a substituição dos equipamentos fluorescentes tubulares T8 de 58W para iluminação LED de 24W. Apesar de que atualmente, mais alterações estão a ser pensadas para equipamentos T8 de outras potências (36W, 18W e 8W). Foi escolhida esta alteração por se tratar de uma medida que já se encontra a ser implementada em ambos os edifícios.

Na tabela 27, encontra-se como exemplo os dados de iluminação de uma zona térmica, com salas de estudo, do Pavilhão de Civil. A partir destes dados alterou-se os valores de 58W para 24W, e consequentemente obteve-se os valores de potência total absorvida através da equação (8). Este é valor foi substituído nos modelos EnergyPlus.

$$\text{Potência total absorvida} = \text{potência média absorvida} \times \text{número de lâmpadas} \quad (8)$$

É de notar que a potência média absorvida para o caso da iluminação fluorescente T8, pode ser maior que a potência nominal, devido ao consumo dos balastos e da elevada utilização das mesmas. A principal função de um balastro é a limitação da corrente para os valores impostos. Este equipamento está inserido entre a rede e a lâmpada de descarga (EDP Distribuição, 2019). Relativamente à iluminação LED apresenta inúmeras vantagens face à iluminação convencional (como o caso da iluminação fluorescente), tais como uma elevada

eficácia, eficiência e um tempo de vida útil entre 25000 e 100000 horas. Em comparação com a iluminação fluorescente que pode apresentar uma eficácia até 90 lm/W, a iluminação LED pode apresentar valores superiores aos 100 lm/W, podendo rondar entre 90 a 180 lm/W (EDP Distribuição, 2019).

Tabela 27 - Dados reais de iluminação de uma zona térmica do Pavilhão de Civil

Piso.id (Zona térmica 41)	Tecnologia	Luminárias (Quantidade)	Lâmpadas (Quantidade)	Potência nominal [W/lamp]	Potência instalada [W]	Potência média absorvida [W/lamp]	Potência total absorvida [W]
0.16	Fluorescente tubular T8	16	16	58	928	70,18	1123
0.17	Fluorescente tubular T8	16	16	58	928	70,18	1123
0.18	Fluorescente tubular T8	16	16	58	928	70,18	1123
0.19	Fluorescente tubular T8	16	16	58	928	70,18	1123

No presente estudo, foi assumido que a potência média absorvida é igual à potência nominal de 24W.

Na tabela 28, encontram-se o número total de lâmpadas de cada edifício e o número de lâmpadas alteradas que foram estudadas, este último valor corresponde ao número total de lâmpadas fluorescentes tubulares T8 de 58W presentes em ambos os edifícios que estão a ser substituídas.

Tabela 28 - Número de lâmpadas substituídas no presente estudo

Edifício	Número de lâmpadas	Número de lâmpadas substituídas
Pavilhão Central	3832	330
Pavilhão de Civil	6055	3769

6.2.1.1 Pavilhão Central

Os resultados obtidos para o Pavilhão Central após a alteração encontram-se na figura 86 e 87.

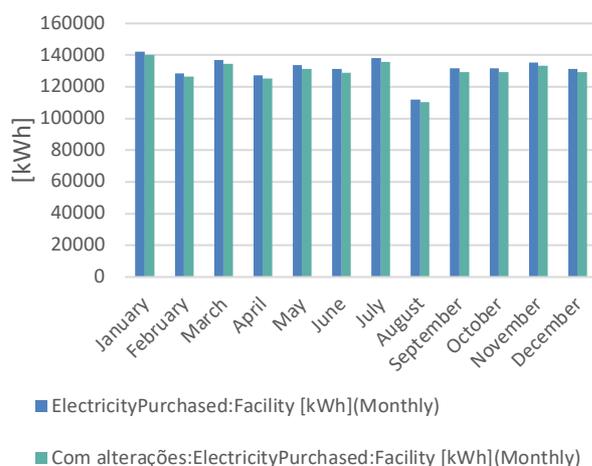


Figura 86 - Comparação do consumo mensal total após a alteração da iluminação (E+) no Pavilhão Central

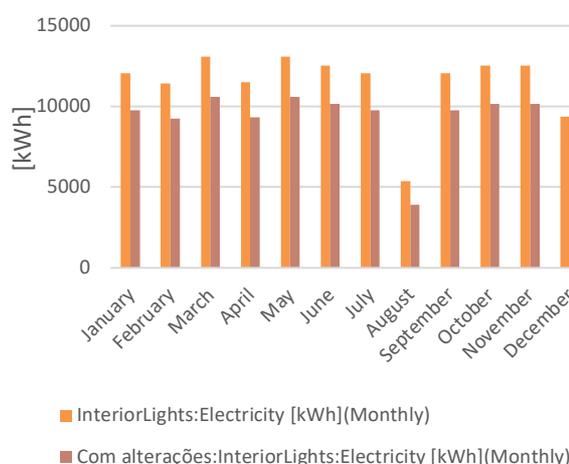


Figura 87 - Comparação do consumo mensal referente à iluminação (E+) no Pavilhão Central

Apesar do número reduzido de lâmpadas fluorescentes T8 de 58W neste edifício, face ao Pavilhão de Civil, valores de redução significativos são observados.

A partir da tabela 29, é possível observar uma redução de 19,4% no consumo referente à iluminação. Relembrando resultados anteriores, este tipo de utilização representa aproximadamente 9% do consumo total, logo esta alteração permite uma redução de aproximadamente 2% no consumo total do edifício, como se pode observar na figura 88.

Tabela 29 - Redução no consumo de eletricidade após alterações de iluminação no Pavilhão Central

[kWh]	Consumo anual	Consumo anual após alterações
Iluminação (E+)	137601,97	110893,88
Redução		19,4%
Consumo total (E+)	1580180,75	1553917,18
Redução		1,67%



Figura 88 - Percentagem referente à iluminação no Pavilhão Central após as alterações

6.2.1.2 Pavilhão de Civil

Relativamente ao Pavilhão de Civil, os resultados encontram-se nas figuras 89 e 90.

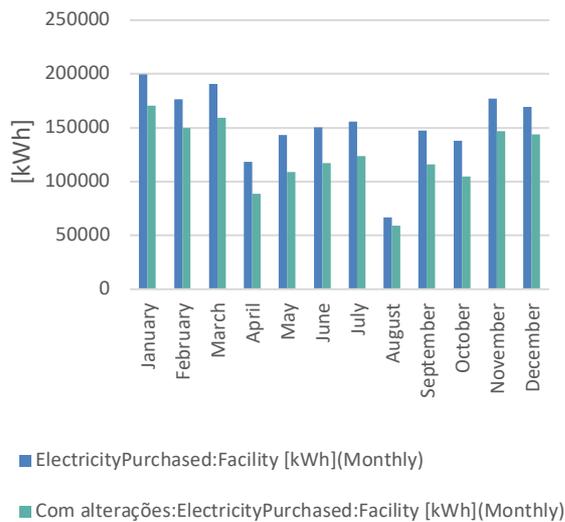


Figura 89 - Comparação do consumo mensal total após a alteração da iluminação (E+) no Pavilhão de Civil

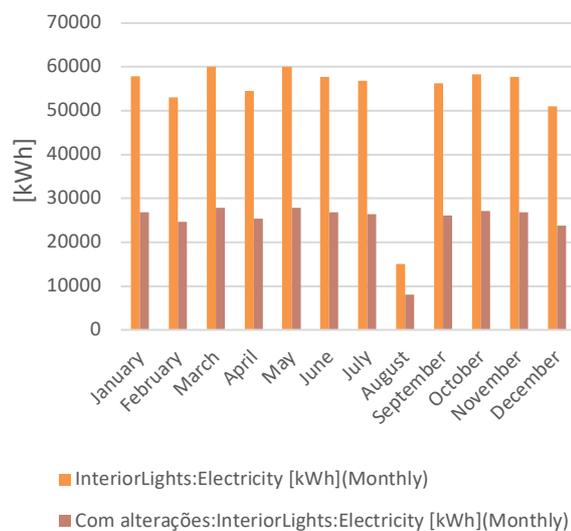


Figura 90 - Comparação do consumo mensal referente à iluminação (E+) no Pavilhão de Civil

Desta forma observa-se que a percentagem referente à iluminação diminui consideravelmente com estas alterações. Observando estes resultados na tabela 30, nos valores anuais espera-se uma redução de 18,8% do consumo total do edifício. E relativamente à iluminação, uma redução de 53,4% no valor.

Na figura 91, observa-se que a iluminação se apresenta como aproximadamente 20%, portanto uma redução relativa aos resultados anteriores, em que se apresenta como 35% do consumo total do edifício.

Tabela 30 - Redução no consumo de eletricidade após alterações de iluminação no Pavilhão de Civil

[kWh]	Consumo anual	Consumo anual após alterações
Iluminação (E+)	638655,56	297634,80
Redução		53,40%
Consumo total (E+)	1832935,82	1488546,52
Redução		18,80%



Figura 91 - Percentagem referente à iluminação no Pavilhão de Civil após as alterações

Fica assim demonstrado que a substituição da iluminação para LED se apresenta como uma medida de elevada viabilidade. A partir dos dados reais cedidos pelo Projeto Campus Sustentável, foi possível calcular o erro entre o consumo real da iluminação e o consumo obtido a partir dos modelos e, desta forma, validar estes resultados. Os resultados encontram-se na tabela 31.

Tabela 31 - Comparação entre os dados reais e dos modelos referente à iluminação

Edifício	Iluminação [kWh]	Iluminação [kWh]	Erro
	Consumo real de energia	Consumo E+	
Pavilhão Central	144369,53	137601,97	4,69%
Pavilhão de Civil	616757,88	638655,56	3,5%

A partir dos resultados anteriores, na tabela 32, encontram-se os valores de redução no consumo dos dois edifícios.

Tabela 32 - Redução no consumo total dos edifícios após a substituição da iluminação

Edifício	Redução no consumo total [kWh]	Redução total nos dois edifícios
Pavilhão Central	26263,57	10,9%
Pavilhão de Civil	344389,3	

Pelo somatório do consumo total dos dois edifícios, prevê-se uma redução de 10,9% nestes edifícios.

A partir do valor de redução no consumo dos dois edifícios e do valor do consumo total anual do Campus em 2017, determinou-se o valor do consumo final do Campus após a medida. Os resultados obtidos encontram-se na tabela 33.

Tabela 33 - Impacto da substituição de iluminação no consumo total do Campus

2017	[kWh]	Redução
Consumo Campus	11079063	3,35%
Consumo Campus após alteração iluminação	10708410	

Concluindo, esta medida representaria uma redução de 3,35% no consumo total anual do Campus. Do ponto de vista económico esta medida também poderá trazer benefícios. Segundo a Eurostat, Autoridade estatística da Comissão Europeia, em 2018 estima-se que o preço médio de eletricidade em Portugal foi de 0,2759 €/kWh, fazendo uma estimativa com este preço, representaria uma poupança de aproximadamente 102

mil euros na fatura energética anual do Campus. É de notar, que apenas foi estudado a alteração em dois pavilhões e apenas de um tipo de iluminação com uma determinada potência. Torna-se assim claro, se a substituição se realizar em tudo o que se pretende no plano de eficiência e em todos os edifícios planeados, esta medida terá resultados viáveis.

6.2.2 Painéis fotovoltaicos

Através da potência de cada sistema fotovoltaico (FV) a instalar, tornou-se possível compreender o impacto que teria na redução do consumo e o seu valor.

Inicialmente, utilizou-se os dados de eletricidade mais recentes, referentes ao ano de 2018, e dados típicos de dimensionamento de painéis fotovoltaicos de 250W e com uma área útil do telhado de 70%. O processo foi realizado para os quatro edifícios em estudo.

6.2.2.1 Pavilhão Central

Relativamente à diferença no consumo, para o Pavilhão Central, encontra-se na figura 92, é notável a diminuição no consumo anual, principalmente nos meses de verão onde poderá existir maior produção. Apesar da possibilidade de existir também uma redução da eficiência quando a temperatura ambiente aumenta.

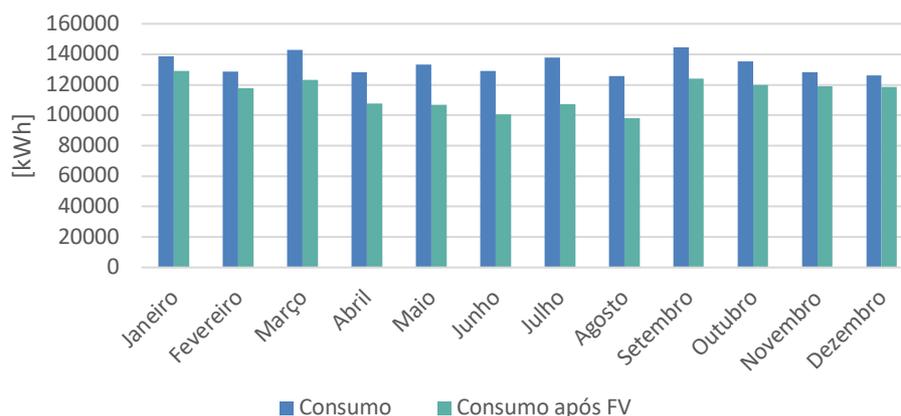


Figura 92 - Comparação do consumo mensal após a implementação dos painéis fotovoltaicos no Pavilhão Central

Utilizando a mesma amostra, de 26 a 30 de setembro, observou-se a diferença no perfil diário anteriormente estudado. O perfil encontra-se na figura 93.

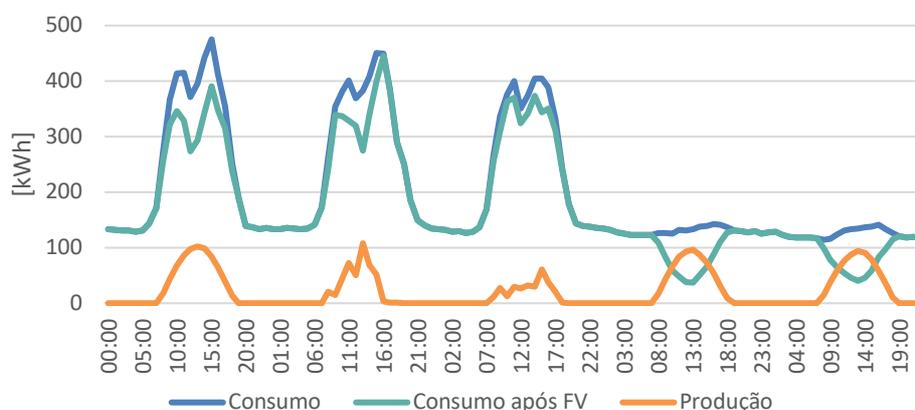


Figura 93 - Perfil de consumo diário da amostra de 26 a 30 de setembro, antes e após FV, no Pavilhão Central

É de relembrar que a presente amostra representa três dias úteis, um sábado e um domingo. Nestes últimos, com a produção de energia proveniente dos painéis, o consumo foi próximo de zero durante o dia.

6.2.2.2 Pavilhão de Civil

Relativamente ao Pavilhão de Civil, a comparação entre os valores do consumo para cada um dos casos encontra-se na figura 94. Tal como o que acontece no caso anterior, também neste edifício existe uma redução substancial ao longo do ano.

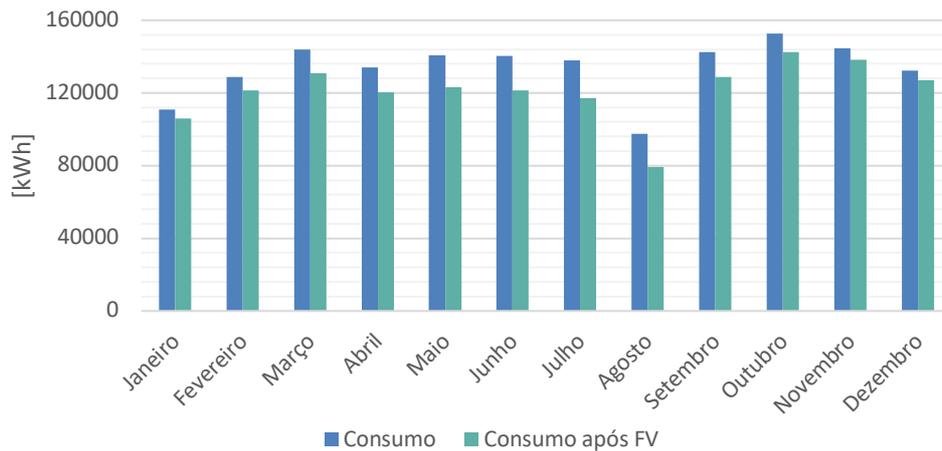


Figura 94 - Comparação do consumo mensal após a implementação de painéis fotovoltaicos no Pavilhão de Civil

Em relação à comparação com a amostra do perfil de consumo diário encontra-se na figura 95. As mesmas conclusões são observadas para o presente caso.

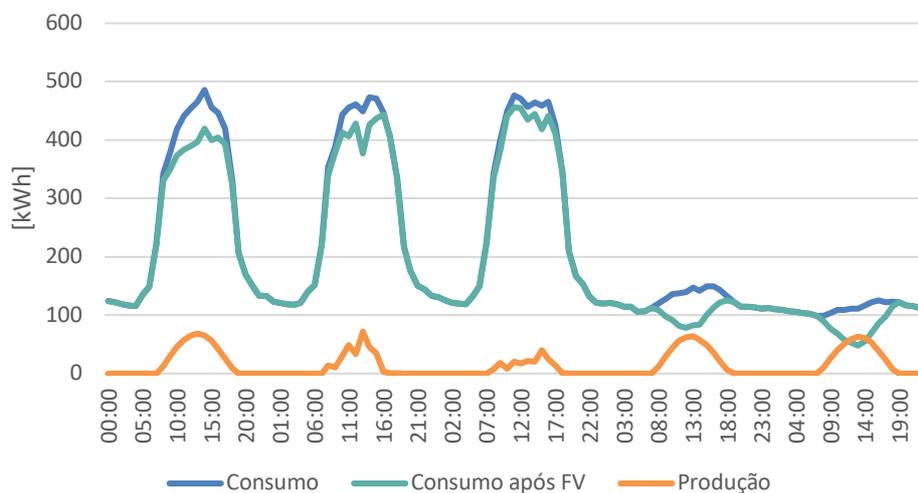


Figura 95 - Perfil de consumo diário da amostra de 26 a 30 de setembro, antes e após FV, no Pavilhão de Civil

6.2.2.3 Torre Norte

Para a Torre Norte, a comparação entre os consumos encontra-se na figura 96. Neste caso, a diferença é menor porque o número de painéis instalados também é menor.

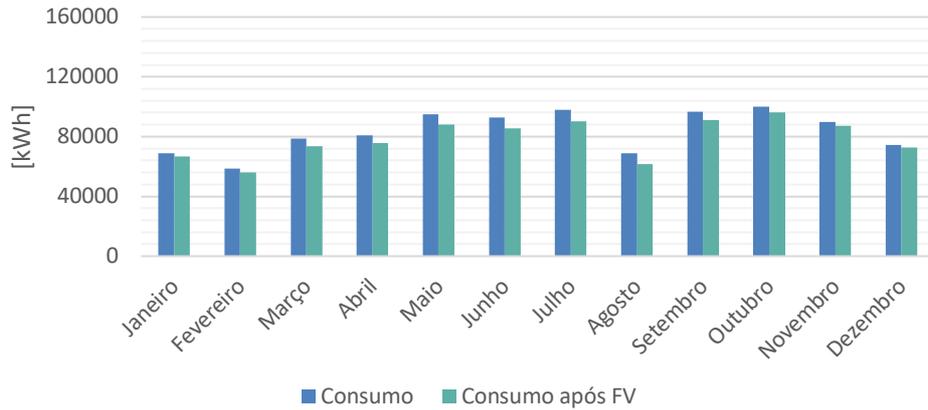


Figura 96 - Comparação do consumo mensal após a implementação de painéis fotovoltaicos na Torre Norte

A comparação com o perfil diário da amostra encontra-se na figura 97. A diferença entre os perfis não é tão visível como nos dois casos anteriores, apesar de existir uma diminuição dos valores.

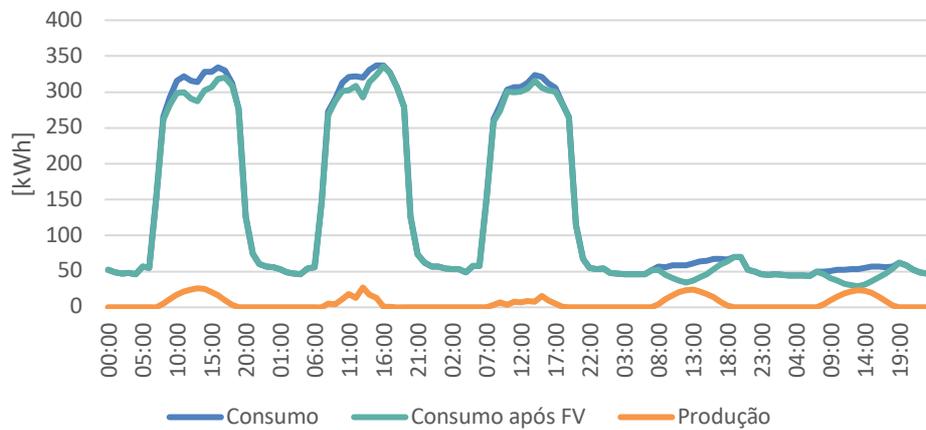


Figura 97 - Perfil de consumo diário da amostra de 26 a 30 de setembro, antes e após FV, na Torre Norte

6.2.2.4 Torre Sul

Por fim, para a Torre Sul, a comparação encontra-se na figura 98. Para este caso revela-se uma diminuição substancial no consumo de eletricidade.

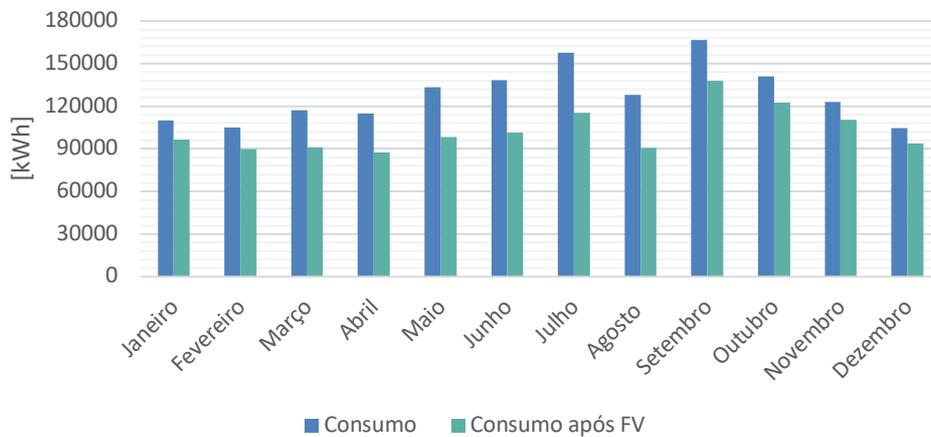


Figura 98 - Comparação do consumo mensal após a implementação de painéis fotovoltaicos na Torre Sul

Relativamente ao perfil diário para este caso, encontra-se na figura 99. Algumas irregularidades são observadas neste perfil, tal como já tinha sido verificado anteriormente. As irregularidades são mais visíveis no fim de semana. Duas razões possíveis para esta situação, poderá ser devido a picos de temperatura ou por algum constrangimento nos dados.

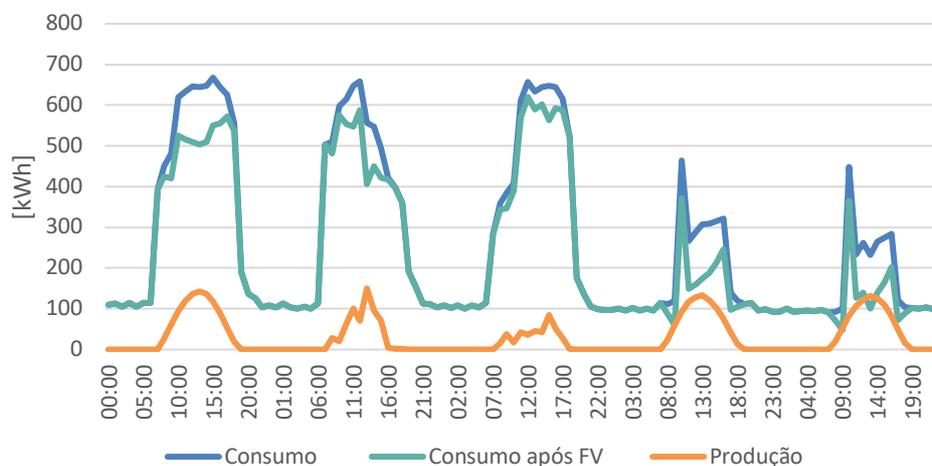


Figura 99 - Perfil diário da amostra de 26 a 30 de setembro, antes e após FV, na Torre Sul

Torna-se assim visível a vantagem de implementar painéis fotovoltaicos nos edifícios.

Na figura 100, encontra-se a comparação dos dados para os quatro edifícios. Desta forma, observa-se a produção de energia fotovoltaica, sendo esta a diferença entre os dois valores de consumo.

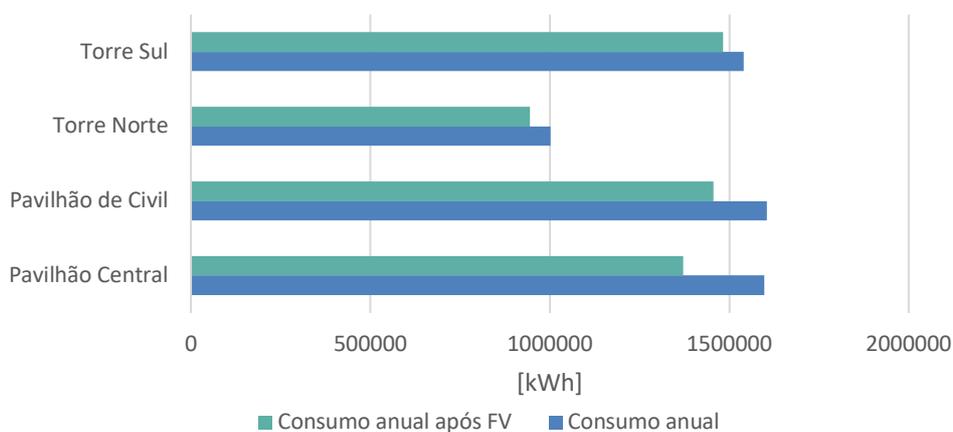


Figura 100 - Comparação dos resultados antes e após implementação de FV nos quatro edifícios

Na tabela 34, encontra-se os resultados referentes à produção de energia solar fotovoltaica.

Tabela 34 - Produção de energia fotovoltaica nos quatro edifícios no ano de 2018

[kWh]	Consumo anual	Consumo após FV	Produção de energia
Pavilhão Central	1597667,955	1371369,852	226298,103
Pavilhão de Civil	1605370,712	1455797,436	149573,276
Torre Norte	1002120,520	944678,819	57441,701
Torre Sul	1539458,077	1482041,953	57416,124

Após o estudo do valor do consumo de eletricidade e produção de energia, realizou-se o estudo em relação à razão de autoconsumo e a autossuficiência associada ao sistema.

O conceito autoconsumo é definido como a fração de energia elétrica gerada pelos painéis fotovoltaicos que é para consumo próprio (Reis *et al.*, 2019). O conceito de autossuficiência representa o grau com que a produção de energia através de sistemas fotovoltaicos suprime as necessidades energéticas (Reis *et al.*, 2019), portanto a independência alcançada da rede de energia pública.

A razão de autoconsumo (SC) encontra-se na equação (6) e de autossuficiência (SS) na equação (7).

$$SC = \frac{\int M(t) dt}{\int P(t) dt} \quad (6)$$

$$SS = \frac{\int M(t) dt}{\int L(t) dt} \quad (7)$$

Nestas equações, L(t) representa a carga instantânea, P(t) a produção de energia fotovoltaica, S(t) a potência associada à bateria (S(t) < 0 quando está a carregar e S(t) > 0 quando está a descarregar) e, por fim, M(t) = min (L(t), P(t) + S(t)) (Reis *et al.*, 2019). Neste trabalho, devido à provável elevada razão de autoconsumo não se apresentam as potências associadas às baterias como simplificação.

Quando existe excesso de produção, pode ser armazenada à rede e posteriormente ser consumida. Portanto uma razão de autoconsumo, SC = 100%, significa que não existe excesso e que toda a energia fotovoltaica é consumida (Reis *et al.*, 2019).

No campus em estudo, a rede de eletricidade encontra-se interligada entre os edifícios, como tal, é de esperar que não exista um excesso de energia em desperdício caso existisse energia gerada em excesso. Pela interligação da rede, tanto na Torre Norte, como na Torre Sul, apesar dos sistemas não estarem diretamente nestas, mas sim nos edifícios existentes nas suas bases, foi assumido como se estivessem nas torres.

Na tabela 35, apresentam-se o número de painéis, a potência associada, a razão de autoconsumo (SC) e a de autossuficiência (SS).

Tabela 35 - Sistemas fotovoltaicos dos quatro edifícios

	Número de Painéis	Potência [kW]	Autoconsumo	Autossuficiência
Pavilhão Central	720	180	100%	14%
Pavilhão de Civil	480	120	99%	9%
Torre Norte	184	46	99%	6%
Torre Sul	184	46	99%	4%

Como seria de esperar, o autoconsumo é igual ou muito próximo de 100%. O pavilhão que se apresentaria com maior capacidade de autossuficiência seria o Pavilhão Central, com uma razão de 14%. Apesar das razões de autossuficiência não serem elevadas, a percentagem prevista teria um impacto bastante positivo na redução do consumo dos edifícios, e conseqüentemente no consumo do Campus. A redução alcançada para os dados de 2018 encontra-se na tabela 36, sendo este um resultado bastante apelativo.

Tabela 36 - Impacto da implementação de FV no consumo total dos quatro edifícios em 2018

2018	[kWh]	Redução
Consumo dos quatro edifícios	5744617,26	
Consumo dos quatro edifícios após FV	5253888,06	8,52%

Sabendo que estes quatro edifícios representaram 50% do consumo total anual do Campus em 2017 e sabendo também os valores da razão de autossuficiência para cada edifício em 2017, que representaria a produção de energia, torna-se possível uma previsão face ao impacto que teria no Campus a implementação de painéis nestes edifícios.

Realizando novamente o estudo para os dados de 2017 obteve-se os seguintes resultados apresentadas na tabela 37.

Tabela 37 - Produção de energia fotovoltaica nos quatro edifícios no ano de 2017

[kWh]	Consumo anual	Consumo após FV	Produção de energia
Pavilhão Central	1657772,195	1431407,174	226365,02
Pavilhão de Civil	1439591,069	1289289,289	150301,78
Torre Norte	898081,104	840222,331	57858,77
Torre Sul	1571763,282	1513893,653	57869,63
Total 4 edifícios	5567207,65	5074812,45	492395,20

Na tabela 38, é apresentada a redução associada ao consumo dos quatro edifícios.

Tabela 38 - Impacto da implementação de FV no consumo total dos quatro edifícios em 2017

2017	[kWh]	Redução
Consumo dos quatro edifícios	5567207,65	
Consumo dos quatro edifícios após FV	5074812,45	8,84%

A partir do valor da produção de energia solar fotovoltaica referente aos quatro edifícios determinou-se o valor do consumo final do Campus. Os resultados obtidos encontram-se na tabela 39.

Tabela 39 - Impacto da implementação de FV no consumo total do Campus

2017	[kWh]	Redução
Consumo Campus	11079063	
Consumo Campus após FV dos 4 edifícios	10586668	4,44%

Concluindo, a implementação de painéis nos quatro edifícios resultaria numa redução de 4,44% no consumo total anual do Campus. Sabendo que os quatro edifícios representam 50% do consumo anual do Campus, prevê-se que a implementação nos dez edifícios previstos poderá representar até 9% desta redução no consumo total. Analisando impacto económico da medida, como para o caso da substituição da iluminação, esta medida pode representar uma poupança de aproximadamente 136 mil euros por ano na fatura energética do Campus.

6.3 Visualização de resultados na Plataforma

Tal como no capítulo anterior, os resultados referentes à análise relativa aos painéis fotovoltaicos encontram-se representados na plataforma de gestão de energia.

Na figura 101, encontra-se uma comparação entre os dois primeiros cenários, antes e após a implementação de painéis fotovoltaicos. Como se pode observar, após a implementação de PV, a Torre Sul passará a ser o pavilhão com maior consumo, pois o Pavilhão Central e de Civil apresentam maior produção de energia fotovoltaica.

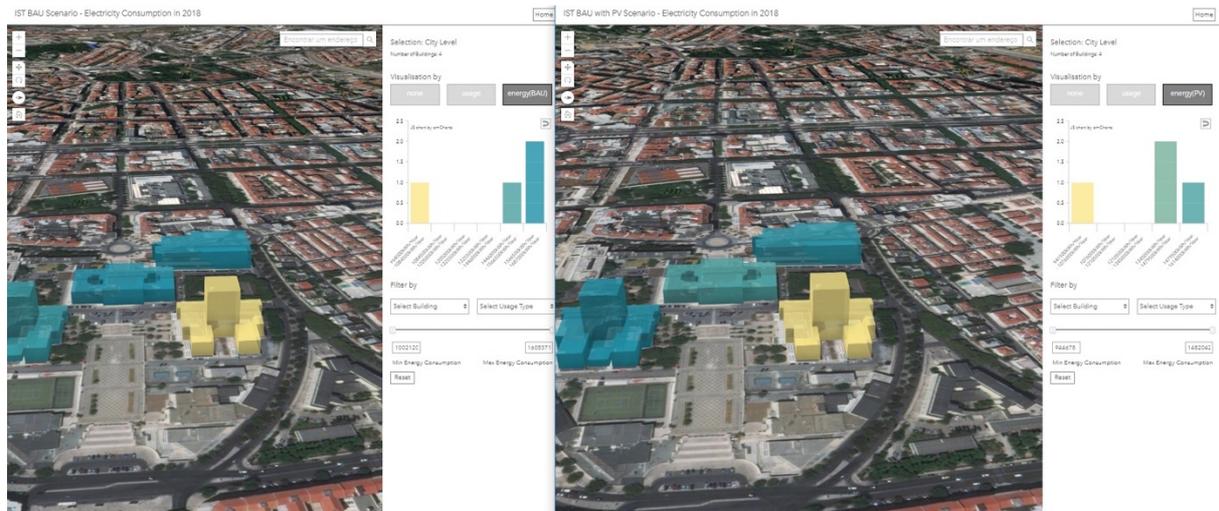


Figura 101 - Comparação entre os dois primeiros cenários

Na figura 102, encontra-se o terceiro cenário que representa a poupança energética originada. Como se pode observar, as maiores poupanças ocorrerão no Pavilhão Central.



Figura 102 - Terceiro cenário com a poupança de energia

7 Conclusões

O presente trabalho apresenta como principal foco a modelação de energia em ambiente urbano, sendo que o caso de estudo é no Campus da Alameda do IST, nomeadamente quatro edifícios constituintes. A visualização GIS do Campus e a animação na plataforma de gestão de energia do IST, referente ao consumo de eletricidade, constitui uma chave fulcral para a compreensão na necessidade da melhoria do desempenho energético dos edifícios e na tomada de decisão face às mesmas. Através da plataforma tornou-se possível esta visualização e uma maior compreensão dos principais resultados obtidos neste trabalho.

Relativamente à proposta para a concretização dos objetivos através da criação de um modelo a partir da ferramenta CEA, alguns desafios foram encontrados. Inicialmente devido a erros na instalação, posteriormente por erros no código da ferramenta, neste momento já corrigidos. Depois do programa estar operacional, todas as análises encontravam-se possíveis de realizar, mas apenas para testar com o modelo de referência, qualquer alteração para o modelo deste caso de estudo originava diversos erros.

Uma alternativa recentemente desenvolvida, o CEA *Dashboard*, foi avaliada, mas devido à existência e fácil acesso aos dados reais neste caso de estudo optou-se por um método que envolvia análises dos dados reais e de modelos EnergyPlus calibrados e a posterior visualização na plataforma de gestão de energia, como anteriormente mencionado.

Relativamente à análise do consumo de energia elétrica, a partir dos resultados obtidos, retira-se que os quatro edifícios são responsáveis por 50% do consumo total anual do Campus e revela-se então importante a redução deste consumo. Todos os edifícios apresentam elevados consumos, apesar da Torre Norte apresentar valores menores, relativamente aos restantes.

Estudou-se também os tipos de utilização de energia em cada edifício através dos modelos EnergyPlus. Desta forma chegou-se à conclusão de que os equipamentos e iluminação têm um peso considerável no consumo total dos edifícios, sendo que uma das principais estratégias de melhoria no Campus passa pela substituição da iluminação. Existem também elevados consumos relativamente ao AVAC e a todos sistemas que permitem um conforto interior. Revelou-se também padrões relativamente à ocupação, aos dias úteis e fins de semana.

Segundo a análise da substituição da iluminação de dois edifícios, apenas com a substituição de um tipo de equipamento, uma redução de aproximadamente 11% é originada no consumo do Pavilhão Central e de Civil. De notar que no Pavilhão de Civil origina-se uma redução elevada, de 53,4%, no consumo referente à iluminação. Estima-se que esta alteração nos dois edifícios origina uma redução 3,35% no consumo total anual do Campus.

Segundo a análise da implementação de painéis fotovoltaicos, como melhoria da eficiência energética do Campus, a redução no consumo dos quatro edifícios pode rondar aproximadamente os 9%, e no consumo total do Campus pode rondar os 4,44%. Sabendo também que no plano de eficiência energética a implementação de painéis será em dez edifícios, esta última percentagem pode aumentar consideravelmente, sendo assim uma mais valia para o Campus.

Portanto, apesar dos desafios associados à ferramenta CEA, nesta dissertação o modelo de energia para o caso de estudo tornou-se possível e encontram-se vários cenários implementados na plataforma de gestão de energia com os resultados obtidos. Sendo que esta proposta permitiu uma fiabilidade maior nos resultados.

7.1 Trabalho futuro

A importância da redução do consumo dos edifícios e a melhoria da eficiência energética constituem as principais estratégias para a atingir as metas associadas às grandes cidades. Como tal, revela-se a importância de continuar o estudo de modelação de energia em ambiente urbano, e a aplicação deste, nos campi universitários.

Como proposta de trabalho futuro seguem-se os seguintes tópicos:

- ✓ Testar a ferramenta CEA noutra interface e numa das propostas mais recentes, ter em atenção quando já existir documentação de apoio suficiente sobre as novas propostas. Esta proposta pode ter a vantagem de se conseguir reduzir o tempo de modelação de energia para o Campus;
- ✓ Testar outra ferramenta UBEM, das estudadas no presente trabalho, para o Campus do IST;
- ✓ Comparação dos resultados obtidos nesta dissertação com os resultados obtidos pela simulação das ferramentas de implementação;
- ✓ Definição de arquétipos e calibração de modelos com arquétipos para um campus, para que possa ser utilizado neste e noutros casos de estudo, desta forma a modelação a partir destas ferramentas UBEM ficaria cada vez mais próxima dos resultados reais e poderia ser realizado o estudo ao nível dos andares e zonas de cada edifício.

REFERÊNCIAS

- L. Aelenei, A. Ferreira, C. S. Monteiro, R. Gomes, H. Gonçalves, S. Camelo and C. Silva. Smart City: A Systematic Approach towards a Sustainable Urban Transformation. *Energy Procedia*, 91:970–979, 2016.
- I. Ballarini, S. P. Corgnati and V. Corrado. Use of reference buildings to assess the energy saving potentials of the residential building stock: The experience of TABULA project. *Energy Policy*, 68:273–284, 2014.
- Y. Chen and T. Hong. Impacts of building geometry modeling methods on the simulation results of urban building energy models. *Applied Energy*, 215:717–735, 2018.
- Y. Chen, T. Hong and M. A. Piette. City-Scale Building Retrofit Analysis: A Case Study using CityBES. *Building Simulation*, 2017.
- City energy analyst, “Installation guide for Windows — City Energy Analyst 2.14 documentation”, 2019. [Online]. Available: <https://city-energy-analyst.readthedocs.io/en/latest/installation-on-windows.html>. [Accessed 16 May 2019].
- City-energy-analyst.readthedocs.io, “Tutorials — City Energy Analyst 2.14 documentation”, 2019. [Online]. Available: <https://city-energy-analyst.readthedocs.io/en/latest/tutorials.html>. [Accessed 5 May 2019].
- Desktop ArcGIS, “What is a shapefile? — Help | ArcGIS for Desktop”, 2019. [Online]. Available: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/shapefiles/what-is-a-shapefile.htm>. [Accessed 2 Apr. 2019].
- C. Ding, W. Feng, X. Li, and N. Zhou. Urban-scale building energy consumption database: a case study for Wuhan, China. *Energy Procedia*, 158:6551–6556, 2019.
- EDP Distribuição, 2019. [Online]. Available at: <https://www.edpdistribuicao.pt/sites/edd/files/2019-04/Manual%20Iluminacao%20Publica.pdf> [Accessed 18 May 2019].
- EnergyPlus, “EnergyPlus”, 2019. [Online]. Available: <https://energyplus.net/>. [Accessed 20 Feb. 2019].
- J. A. Fonseca, T. A. Nguyen, A. Schlueter and F. Marechal. City Energy Analyst (CEA): Integrated framework for analysis and optimization of building energy systems in neighborhoods and city districts. *Energy and Buildings*, 113:202–226, 2016.
- J. A. Fonseca and A. Schlueter. Integrated model for characterization of spatiotemporal building energy consumption patterns in neighborhoods and city districts. *Applied Energy*, 142:247–265, 2015a.
- J. A. Fonseca and A. Schlueter. Integrated model for characterization of spatiotemporal building energy consumption patterns in neighborhoods and city districts. *Applied Energy*, 142, 247–265, 2015b.
- T. Hong, Y. Chen, S. H. Lee and M. A. Piette. CityBES: A Web-based Platform to Support City-Scale Building Energy

Efficiency. *Urban Computing*, 2016.

T. Hong, Y. Chen, M. A. Piette and X. Luo. Modeling City Building Stock for Large-Scale Energy Efficiency Improvements using CityBES Overview of CityBES, *Conference: ACEEE Summer Study*, (Nyserda), 2016.

T. Hong, J. Langevin and K. Sun. Building simulation: Ten challenges. *Building Simulation*, 11(5):871–898, 2018.

INE, “Página de download de informação geográfica”, 2019. [Online]. Available: <http://mapas.ine.pt/download/index2011.phtml>. [Accessed 8 Mar. 2019].

INETI, “Weather Data | EnergyPlus”, 2019. [Online]. Available: <https://energyplus.net/weather>. [Accessed 4 Apr. 2019].

Lisboa E-Nova, “Matriz Energética de Lisboa 2014”, 2016. [Online]. Available: http://www.lisboaenova.org/images/stories/MatrizEnergetica2014/matriz_energetica_lisboa_2014_af_edreivista_digital.pdf. [Accessed 1 May 2019].

B. LLC, “Group – Reports: Input Output Reference — EnergyPlus 8.0”, 2019. [Online]. Available: <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-0/input-output-reference/page-088.html>. [Accessed 2 May 2019].

S. T. Moghadam, S. Coccolo, G. Mutani and P. Lombardi. A new clustering and visualization method to evaluate urban energy planning scenarios. *Cities*, 1–31, 2018.

C. S. Monteiro, A. Pina, C. Cerezo, C. Reinhart and P. Ferrão. The Use of Multi-detail Building Archetypes in Urban Energy Modelling. *Energy Procedia*, 111:817–825, 2017.

S. Napal and C. F. Reinhart. A comparison of two modeling approaches for establishing and implementing energy use reduction targets for a university campus. *Energy and Buildings*, 173:103–116, 2018.

Projeto Campus Sustentável, “Campus Sustentável – Instituto Superior Técnico”, 2019. [Online]. Available: <http://sustentavel.unidades.tecnico.ulisboa.pt/>. [Accessed 1 May 2019].

C. F. Reinhart and C. Cerezo Davila. Urban building energy modeling - A review of a nascent field. *Building and Environment*, 97:196–202, 2016.

C. F. Reinhart, T. Dogan, J. A. Jakubiec, T. Rakha and A. Sang. Umi - an Urban Simulation Environment for Building Energy Use, Daylighting and Walkability. *Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association*, 476–483, 2013.

V. Reis, R. H. Almeida, J. A. Silva and M. C. Brito. Demand aggregation for photovoltaic self-consumption. *Energy Reports*, 5:54–61, 2019.

M. Royapoor and T. Roskilly. Building model calibration using energy and environmental data. *Energy and Buildings*, 94:109–120, 2015.

G. R. Ruiz and C. F. Bandera. Validation of calibrated energy models: Common errors. *Energies*, 10(10), 2017.

L. G. Swan and V. I. Ugursal. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8):1819–1835, 2009.

Técnico - Campus Sustentável, “Plano de Eficiência Técnico 2020”, 2018. [Online]. Available: <http://www.uc.pt/++preview++/efs/docs/EVCS2018/apresentacaoULisboa>. [Accessed 18 May 2019].

E. Thorin. Basics of Energy. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, Elsevier Inc, 1-2, 2014.

S. Yu, Y. Cui, X. Xu and G. Feng. Impact of Civil Envelope on Energy Consumption based on EnergyPlus. *Procedia Engineering*, 121:1528–1534, 2015.

ANEXOS

Anexo A – Instalação do *City Energy Analyst* (CEA)

Neste anexo encontra-se o tutorial de instalação da *toolbox* CEA numa interface, no programa PyCharm. Este tutorial encontra-se adaptado do tutorial presente no site oficial do CEA (City energy analyst, 2019). De notar que é um tutorial de instalação para o software Windows. Inicialmente, na presente dissertação foi instalada a versão 2.9 do CEA.

Em primeira fase, são necessários alguns pré-requisitos para que seja possível a instalação do CEA. Os pré-requisitos são os seguintes:

1. Download e instalação do Git (64-bit), instalada a versão 2.20.1;
2. Download e instalação GitHub Desktop (64-bit);
3. Download e instalação do DaySIM, instalada a versão 4.0;
4. Download e instalação do Anaconda e Miniconda (64-bit) para Python 2.7.

Na documentação oficial de instalação do CEA apenas indica a instalação do Miniconda para Python 2.7, mas na presente dissertação foi efetuada a instalação do Python 3.7.1 (Anaconda 3, 2018, 64-bit), posteriormente à instalação do Python 2.7.15. Uma nota relevante é na instalação e no seguimento dos passos retirar a opção *“Register Anaconda as my default Python 2.7”*.

Depois destes pré-requisitos estarem instalados, procede-se ao download do *City Energy Analyst* e posteriormente à sua instalação na interface, poderá ser qualquer interface das propostas pela equipa do CEA. Para o download do CEA os passos são os seguintes:

1. Abrir o Github Desktop;
2. Carregar em Ctrl+Shift+O (vai para o *“clone repository”*), no separador URL tab, como se observa na figura 103.
3. Copiar o link: <https://github.com/architecture-building-systems/CityEnergyAnalyst> e carregar no comando *“Clone”* (900MB).

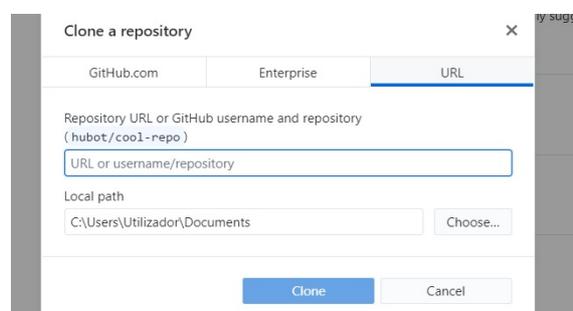


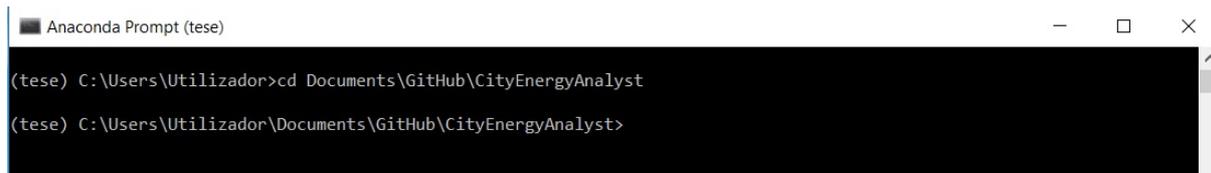
Figura 103 - Download do projeto CEA

Depois do download do CEA, segue-se os seguintes passos:

1. Pesquisar no menu iniciar e abrir o Anaconda Prompt (terminal console);
2. Escrever no terminal: `cd Documents\Github\CityEnergyAnalyst` e carregar ENTER;
3. Escrever: `conda env create` e carregar ENTER novamente;
4. Este processo demora algum tempo (cerca de 40 minutos);
5. Escrever: `activate cea` e carregar ENTER;
6. Escrever: `pip install -e .[dev]` e carregar ENTER.

Relativamente aos ambientes e à criação destes: no painel de controlo - sistema - definições avançadas do sistema, abre automaticamente as propriedades do sistema, carregar em “variáveis de ambiente”, depois “*path*”, e é neste local que é possível editar as variáveis de sistema, criar um novo e copiar a diretoria do Python ou do que se pretende. Nesta dissertação estes são alguns dos exemplos:

- `C:\Users\Utilizador\Anaconda3;`
- `C:\Users\Utilizador\Anaconda3\envs\tese` (observa-se na figura 104);
- `C:\Users\Utilizador\Anaconda3\envs\cea;`
- `C:\Users\Utilizador\Anaconda3\Scripts;`



```
Anaconda Prompt (tese)
(tese) C:\Users\Utilizador>cd Documents\Github\CityEnergyAnalyst
(tese) C:\Users\Utilizador\Documents\Github\CityEnergyAnalyst>
```

Figura 104 - Ambiente de instalação do CEA

Posteriormente, procede-se à instalação do PyCharm, umas das interfaces utilizadas para a instalação do CEA, nesta interface o CEA aparece como um projeto.

1. Download e instalação do *JetBrains PyCharm Community* (Versão instalada: Edition 2018.3.2);
2. Abrir o PyCharm e abrir o projeto “CityEnergyAnalyst”, ter em atenção à diretoria onde se encontra guardado no computador;
3. Abrir *File - Settings - Project:CityEnergyAnalyst - Project Interpreter - Project Interpreter*, como se pode observar na figura 105;
4. Carregar na ronda dentada no lado direito e adicionar (“Add”) o ambiente existente com o ficheiro python;
5. No separador “*Conda Environment*” adicionar o ambiente existente, através da sua localização no computador;
6. No presente caso: Python 2.7 “`C:\Users\Utilizador\Anaconda3\envs\cea\python.exe`”.
7. Carregar em “Ok” e “Apply”;

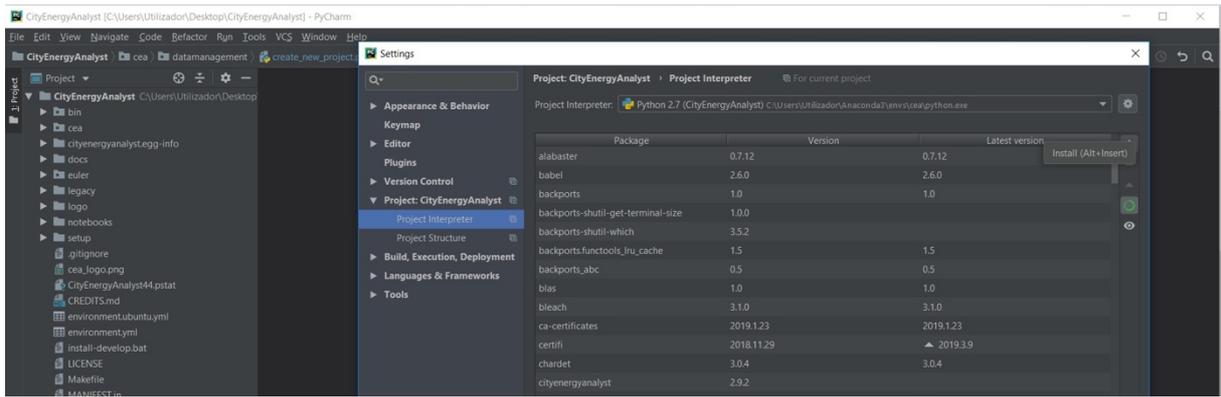


Figura 105 - Instalação do CEA no PyCharm

Algumas soluções de erros possíveis:

- Instalação de GDAL;
- Instalação de bibliotecas inexistentes: ir a *Project Interpreter - Package*, carregar no “+” e aparece a imagem representada na figura 106, depois de pesquisar a biblioteca carregar em “Install Package”

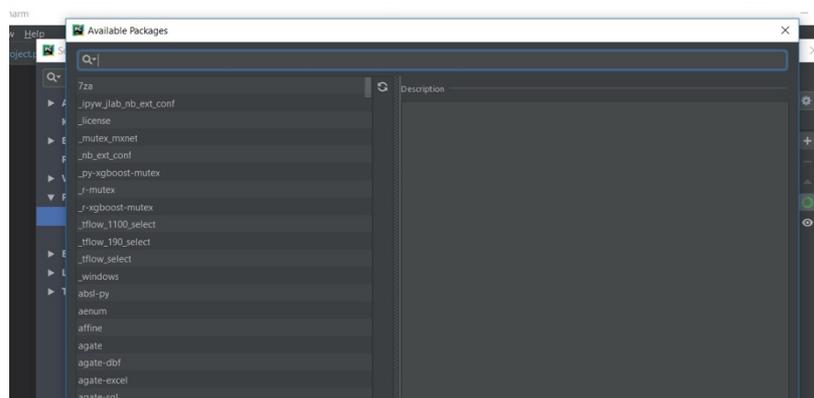


Figura 106 - Instalação e lista de bibliotecas existentes

Quando a biblioteca não se encontra existente para instalação no programa, procede-se à instalação como se apresenta na figura 107. Outra biblioteca que foi necessária instalar no presente caso foi “*pip install numpy*”, isto porque ao correr módulos do programa aparecia erros referentes a inexistências dessas bibliotecas. O erro que está na figura 107 só apareceu depois da alteração de dados para um novo projeto.

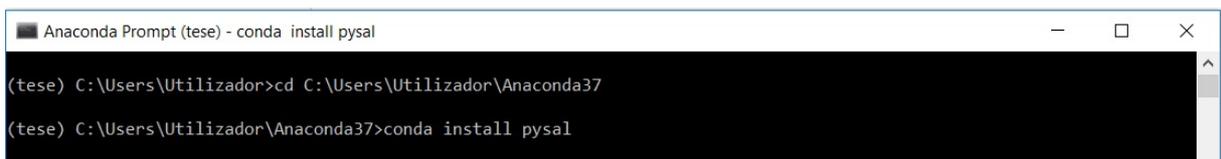


Figura 107 - Instalação de novas bibliotecas Python

Por fim, de realçar que a versão 2.13 já se encontra disponível para instalação no site oficial, com as novas interfaces incorporadas.

Anexo B – Consumo de eletricidade

Tabela 40 - Consumo mensal do Pavilhão Central

	[kWh]	[kWh]
Meses	2017	2018
Janeiro	151079,711	138514,906
Fevereiro	132381,555	128473,642
Março	146739,013	142703,140
Abril	130977,637	128042,430
Maiο	148292,234	133411,351
Junho	143553,742	128925,225
Julho	155831,138	137874,850
Agosto	121027,214	125681,365
Setembro	137668,800	144482,224
Outubro	136486,228	135232,226
Novembro	127169,416	128198,301
Dezembro	126565,506	126128,295

Tabela 41 - Consumo mensal do Pavilhão de Civil

	[kWh]	[kWh]
Meses	2017	2018
Janeiro	144786,527	110867,525
Fevereiro	107909,901	128657,504
Março	136317,223	143754,194
Abril	112276,716	133979,516
Maiο	132063,161	140867,874
Junho	132320,483	140220,384
Julho	119855,143	137750,932
Agosto	81168,3159	97401,025
Setembro	110403,726	142455,777
Outubro	128898,514	152742,502
Novembro	121897,390	144461,771
Dezembro	111693,972	132211,707

Tabela 42 - Consumo mensal da Torre Norte

	[kWh]	[kWh]
Meses	2017	2018
Janeiro	71432,892	69017,196
Fevereiro	64186,761	58493,745
Março	75775,739	78495,032
Abril	68259,960	81010,326
Maio	80599,765	94886,022
Junho	85223,622	92870,115
Julho	86475,479	98094,073
Agosto	55523,199	68741,699
Setembro	83697,868	96406,459
Outubro	87363,479	100014,631
Novembro	76125,574	89616,174
Dezembro	63416,769	74475,048

Tabela 43 - Consumo mensal da Torre Sul

	[kWh]	[kWh]
Meses	2017	2018
Janeiro	115077,366	109774,875
Fevereiro	102004,683	104963,012
Março	128891,225	117342,275
Abril	119759,118	114987,873
Maio	148157,872	133451,569
Junho	154483,518	138310,702
Julho	161347,291	157489,835
Agosto	104451,118	127929,553
Setembro	147791,192	166446,900
Outubro	157707,731	141088,402
Novembro	130247,379	123111,100
Dezembro	101844,788	104561,981

Tabela 44 - Consumo mensal do Campus da Alameda em 2017

	[kWh]
Meses	2017
Janeiro	1037419
Fevereiro	835867
Março	945758
Abril	852502
Maio	990737
Junho	1003514
Julho	1008630
Agosto	676973
Setembro	885980
Outubro	1006480
Novembro	931404
Dezembro	903799

Anexo C – Consumo de eletricidade referente aos modelos EnergyPlus

Tabela 45 - Resultados da simulação dos modelos EnergyPlus para o consumo de eletricidade

Meses	Consumo de eletricidade [kWh]			
	Pavilhão Central	Pavilhão de Civil	Torre Norte	Torre Sul
Janeiro	142360,82	199444,73	53184,90	103263,09
Fevereiro	128513,63	176742,82	57294,49	96327,24
Março	136923,90	190577,28	77362,06	119777,96
Abril	127342,25	118481,99	70159,23	113950,20
Maiο	133628,46	143120,59	83451,25	138449,84
Junho	131305,05	150156,46	85332,95	141654,50
Julho	138229,12	155648,19	88446,37	151286,48
Agosto	111918,15	66599,43	55764,89	86957,16
Setembro	131836,69	147725,54	84908,94	143148,86
Outubro	131678,22	138021,23	85461,91	133593,36
Novembro	135344,58	177166,49	74920,06	125751,32
Dezembro	131099,88	169251,06	50789,79	88779,60