

Utilização do CEA na Gestão de Energia dos Edifícios do Exército

Caso de Estudo: Aquartelamento da Academia Militar da Amadora

António Pedro Nunes da Silva Gonçalves

Dissertação para obtenção do Grau Mestre em

Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Carlos Augusto Santos Silva

TCor MAT Énio Rodrigo Pereira Chambel

Júri

Presidente: Prof. António Luís Nobre Moreira

Orientador: Prof. Carlos Augusto Santos Silva

Vogais: Prof. Ana Sofia Oliveira Henriques Moita

Dr. Ricardo Manuel Anacleto Gomes

Dezembro 2022

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

Ao longo deste percurso que culminou com a realização desta Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, passei por vários bons momentos e outros menos bons que fazem parte do ciclo de aprendizagem e da vida. No decorrer destes anos, várias pessoas se cruzaram neste percurso, cujo apoio e contribuição foi de uma importância vital.

- Ao meu orientador, Professor Carlos Augusto Santos Silva, que desde o primeiro dia mostrou toda a sua disponibilidade em ajudar, disponibilizando de imediato o seu contacto pessoal, e cujo acompanhamento e simpatia deram origem a um trabalho melhor;
- Ao meu coorientador, Tenente-Coronel de Material Énio Rodrigo Pereira Chambel, que me ajudou em toda a minha etapa na Academia Militar como meu diretor de curso e que me ajudou durante esta dissertação a recolher todos os dados necessários de forma a atingir os objetivos propostos;
- A todo o corpo docente da Academia Militar e do Instituto Superior Técnico que me fizeram crescer como engenheiro e como pessoa;
- Aos meus camaradas de curso geral, mais propriamente aos das engenharias que me acompanharam nas vivências da Academia Militar e sem eles, o viver academia não tinha tido o mesmo significado;
- Ao meu colega de curso, Miguel Fernandes, que através de uma competição saudável me fez tornar numa pessoa melhor, tendo passado comigo todas as dificuldades que este curso nos proporcionou;
- A todos os meus amigos, um grande obrigado pelo apoio e por todos os momentos em que foi preciso desanuviar, e por instantes, esquecer o trabalho para voltar de forma mais eficiente;
- Ao meu primo Rui Gonçalves, escritor autodidata de crónicas de cinema, que procedeu à revisão da escrita desta dissertação;
- À minha namorada, pela paciência e compreensão, pelo tempo que não passamos juntos e pelas muitas ocasiões que não privei com ela durante todo este tempo. Todo este apoio mostra a sua grandeza enquanto mulher;
- Por último, e sem menos importância, à minha família, particularmente aos meus pais e irmãos, que participaram de forma ativa em todas as etapas do meu crescimento e por todo o apoio incondicional durante o meu percurso, acreditando em mim e em tudo aquilo que sou hoje.

A todos eles o meu obrigado.

Resumo

Os últimos anos mostraram que eventos extraordinários como a pandemia e o conflito entre a Rússia e a Ucrânia, alteraram por completo o panorama energético. Consequentemente, estes eventos provocaram a desordem e um grande choque noutras áreas como a saúde e economia com impacto no quotidiano das pessoas e das instituições. Contudo, a utilização de energias renováveis e a implementação de eficiência energética, tornam os sistemas mais resilientes a este tipo de alterações extremas, contribuindo assim para uma transição energética mais sustentável.

Este trabalho consiste na aplicabilidade de um software de simulação energética em edifícios (CEA) que visa avaliar a implementação de eficiência energética em edifícios, assim como analisar o potencial de utilização de fontes renováveis nas unidades do Exército Português, usando como caso de estudo o Aquartelamento da Academia Militar da Amadora. Desta forma, este programa servirá como uma ferramenta de apoio na gestão de consumos e para aumentar a eficiência energética dos edifícios.

O estudo começou pelo levantamento das características da envolvente, perfis horários, sistemas AVAC, AQS e de fornecimento de todos os edifícios existentes no campus, como também a explicação da função de cada edifício. Numa fase posterior inseriram-se estes dados no software e foram feitas simulações energéticas para dois casos distintos. Para um dos casos utilizaram-se os arquétipos de construção e de sistemas já elaborados pelo programa com base em edifícios suíços. No outro, criaram-se arquétipos que definem a maior parte dos edifícios que o Exército Português possui.

Após este processo, concluiu-se que os resultados foram bons, apresentando erros abaixo dos 25% que indicam um bom ajuste do modelo segundo a diretriz do ASHRAE. Assim, procedeu-se à proposta de medidas de eficiência energética e simulou-se o potencial da produção de energia renovável, mostrando a redução da fatura energética e a viabilidade destas medidas.

Palavras-Chave: Unidades Militares, Consumo Energético, Simulação Energética, *City Energy Analyst*, Eficiência Energética

Abstract

The last few years have shown that extraordinary events such as the pandemic and the conflict between Russia and Ukraine have completely changed the energy landscape. Therefore, these events have caused disorder and a major shock in other areas such as health and economy with an impact on the daily lives of people and institutions. However, the use of renewable energy and the implementation of energy efficiency, make systems more resilient to these kinds of extreme changes, thereby contributing to a more sustainable energy transition.

This work consists in the applicability of a software for energy simulation in buildings (CEA) which aims to evaluate the implementation of energy efficiency in buildings, as well as to analyse the potential for using renewable sources in the Portuguese Army bases, using the Military Academy in Amadora as a case study. In this way, this program will serve as a support tool in the management of energy consumption and to increase the energy efficiency of buildings.

The study began with the characterization of the envelope, hourly profiles, HVAC, hot water and supply systems of all existing buildings on the campus, as well as an explanation of the function of each building. At a later stage, was made the input of these data into the software and energy simulations were performed for two different cases. For one of the cases, the archetypes of construction and systems that were already developed by the program based on Swiss buildings were used. In the other, archetypes were created based in the buildings that the Portuguese Army has.

After this process, it was concluded that the results were good, presenting errors below 25% indicating a good fit of the model according to the ASHRAE guideline. Thus, energy efficiency measures were proposed and the potential of renewable energy production was simulated, showing the reduction of energy bills and the viability of these measures.

Keywords: Military Bases, Energy Consumption, Energy Simulation, City Energy Analyst, Energy Efficiency

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
Índice	iv
Lista de Figuras.....	vi
Lista de Tabelas.....	vii
Lista de Acrónimos e Siglas.....	viii
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Motivação.....	6
1.3. Objetivos	6
1.4. Contribuições	6
1.5. Estrutura da dissertação	7
2. Estado da Arte	8
2.1. Enquadramento Legal.....	8
2.2. Auditoria Energética.....	12
2.3. Certificação Energética.....	14
2.4. Eficiência Energética em Edifícios.....	15
2.4.1. Zero Energy Building (ZEB).....	16
2.4.2. <i>Nearly Zero Energy Building</i> (nZEB)	16
2.4.3. Plus Energy Building.....	17
2.5. Softwares de Eficiência Energética – City Energy Analyst.....	18
2.5.1. Metodologia UBEM.....	18
2.5.2. CEA.....	21
2.5.3. Estrutura e Funcionamento	23
2.5.4. Vantagens, Aplicações e Desafios	27
3. Metodologia.....	28
3.1. Caracterização dos edifícios existentes na AM	28
3.2. Criação de arquétipos para as tipologias existentes	29
3.3. Ferramenta UBEM – CEA.....	29
3.4. Análise dos resultados do programa	29
3.5. Análise da implementação das medidas de eficiência energética	30
4. Caso de Estudo.....	31
4.1. Caracterização do AAMA.....	32
4.1.1. Tipologias de consumo existentes no AAMA	34
4.1.2. Caracterização da Zona	34
4.1.3. Consumos do AAMA	36
4.2. Caracterização das diversas tipologias de edifícios existentes no AAMA	40
4.2.1. Definição padrão.....	40

4.2.2. Caracterização da envolvente	41
4.2.3. Ganhos internos e conforto interno	45
4.2.4. Perfis horários.....	47
4.2.5. Sistemas AVAC e AQS.....	49
4.2.6. Sistemas de fornecimento	52
5. Modelação Energética com o CEA.....	53
5.1. Dados	53
5.1.1. Input de dados primários	54
5.1.2. Input de dados secundários.....	56
5.2. Resultados	57
5.2.1. Verificação e Validação do Modelo Computacional	57
5.2.2. Resultados	59
6. Melhoria energética.....	62
6.1. Simulações do potencial de energias renováveis.....	62
6.1.1. Potencial Solar.....	62
6.1.2. Potencial de outras fontes renováveis.....	65
6.2. Outras medidas de eficiencia energética.....	69
6.3. Discussão das medidas propostas	70
7. Conclusões e Trabalhos Futuros	71
7.1. Conclusões	71
7.2. Trabalhos Futuros	72
Referências	73
Anexos	I
Anexo A – Parâmetros climáticos do AAMA.....	I
Anexo B – Correspondência entre os setores dos edifícios com as geometrias criadas no CEA	IV
Anexo C – Imagens.....	IV

Lista de Figuras

Figura 1: Consumo global de energia primária.....	1
Figura 2: Renováveis na energia primária global	2
Figura 3: Contributo da Energia Renovável no Consumo Final em 2020 em Portugal.....	3
Figura 4: Sistema global de energia hoje e em 2050 no cenário de zero emissões.....	5
Figura 5: Evolução da legislação para eficiência energética em edifícios	11
Figura 6: Diagrama de edifícios eficientes.....	15
Figura 7: Conceito de nZEB.....	16
Figura 8: Balanço zero de Passive House e de um edifício convencional.	17
Figura 9: Visão global de um UBEM.....	19
Figura 10: Ferramentas UBEM.....	20
Figura 11: a) conjunto de ferramentas para a análise de sistemas energéticos urbanos; b) efeitos estudados do desenvolvimento urbano no desempenho dos sistemas energéticos; c) modelos de simulação dinâmica padrão e corpo interdisciplinar de conhecimento.	21
Figura 12: CEA Framework, (1) demand module, (2) resource potential module, (3) systems technology module, (4) system optimization module, (5) decision module, (6) spatiotemporal analysis module...	23
Figura 13: Cadeia de fornecimento de energia simplificada.....	24
Figura 14: Procedimentos efetuados para o caso de estudo	28
Figura 15: Metodologia de modelação energética do caso de estudo	30
Figura 16: Campus do Aquartelamento da Academia Militar da Amadora	31
Figura 17: Infraestruturas do AAMA.	32
Figura 18: Consumos anuais de eletricidade do AAMA dos anos 2019, 2020 e 2021	36
Figura 19: Consumos mensais de eletricidade do AAMA dos anos 2019, 2020 e 2021	36
Figura 20: Consumos anuais de gás do AAMA dos anos 2019, 2020 e 2021	37
Figura 21: Consumos mensais de gás do AAMA dos anos 2019, 2020 e 2021	37
Figura 22: Gastos anuais de eletricidade do AAMA dos anos 2019, 2020 e 2021	38
Figura 23: Gastos mensais de eletricidade do AAMA dos anos 2019, 2020 e 2021	38
Figura 24: Gastos mensais de gás natural do AAMA dos anos 2019, 2020 e 2021	39
Figura 25: Classes de construção	44
Figura 26: Sistema AQS e AVAC das Casernas	49
Figura 27: Sistema AQS e AVAC das Casernas	50
Figura 28: Representação do AAMA em 3D e 2D no CEA	54
Figura 29: Zona de Input Editor no Dashboard do CEA.....	55
Figura 30: Consumos mensais do AAMA de acordo com os arquétipos do CEA.....	57
Figura 31: Consumos mensais do AAMA de acordo com os arquétipos criados.....	57
Figura 32: Comparação dos consumos reais com os dos modelos energéticos	59
Figura 33: Consumos anuais dos diversos setores dos edifícios.....	60
Figura 34: Impacto de cada edifício no valor total do consumo do AAMA	60
Figura 35: Consumo semanal das Casernas através do registador de energia Fluke 1742	61
Figura 36: Consumos semanais dos diversos setores do edifício da caserna dos alunos no CEA....	61
Figura 37: Potencial Solar do AAMA	63
Figura 38: Potencial fotovoltaico por área útil.....	63
Figura 39: Potencial fotovoltaico térmico.....	64
Figura 40: Potencial de coletores solares por área útil.....	64

Lista de Tabelas

Tabela 1: Intervalos de valor de <i>RIEE</i> para edifícios de comércio e serviços	14
Tabela 2: Parâmetros climáticos do AAMA.....	35
Tabela 3: Tarifas tetra-horária do AAMA dos anos 2019, 2020 e 2021.....	39
Tabela 4: Definição padrão dos edifícios do AAMA.....	40
Tabela 5: Tipo de construção da envolvente dos edifícios do AAMA	41
Tabela 6: Tipos de infiltração dos edifícios do AAMA.....	41
Tabela 7: Caracterização da envolvente.....	42
Tabela 8: Tipos de envolvente opaca existente no AAMA.....	43
Tabela 9: Tipos de envolvente envidraçada e sombreamento	43
Tabela 10: Tabela de conectividades da envolvente	44
Tabela 11: Dados dos ganhos internos consoante a tipologia de espaço.....	45
Tabela 12: Limites de conforto interno consoante a tipologia de espaço	46
Tabela 13: Sistemas AVAC presentes no AAMA.....	51
Tabela 14: Sistemas AVAC presentes no AAMA.....	52
Tabela 15: Dados primários necessários para a criação de um projeto CEA	53
Tabela 16: Comparação dos consumos reais com os dos modelos energéticos e CVRMSE	58
Tabela 17: Distribuição da matéria orgânica.....	66
Tabela 18: Planeamento	67
Tabela 19: Investimento Inicial do projeto.....	68

Lista de Acrónimos e Siglas

AAMA- Quartelamento da Academia Militar da Amadora

AM- Academia Militar

AMG- Arrecadação de Material de Guerra

AC- Ar Condicionado

AQS- Água Quente Sanitária

AVAC- Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

BEM - Building Energy Models

BP- British Petroleum

CCS- Companhia de Comando e Serviços

CE - Comunidade Europeia

CEA- *City Energy Analyst*

CINAMIL- Centro de Investigação, Desenvolvimento e Inovação da Academia Militar

CV(RMSE) - *Coefficient of Variance of the Root Mean Square Error*

ELPRE - Estratégia de Longo Prazo para a Renovação dos Edifícios

EPBD - *Energy Performance of Buildings Directive*

GD- Graus-dias

GEE - Gases com Efeito de Estufa

GN- Gás Natural

GNR- Guarda Nacional Republicana

IST - Instituto Superior Técnico

NA- Não Aplicável

NUTS- Nomenclatura das Unidades Territoriais

nZEB - *Nearly Zero Energy Building*

PEB - *Plus Energy Buildings*

PNEC - Plano Nacional Energia e Clima

PNAEE - Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética

PNAER - Plano de Ação Nacional para as Energias Renováveis

PT- Posto de Transformação

RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

RECS - Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços

RED - *Renewable Energy Directive*

REH - Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

RSECE - Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

RMSE - *Root Mean Square Error*

RNC - Roteiro para a Neutralidade Carbónica

SIGOp- Sistema de Informação Geográfica para Apoio às Operações

SCE - Sistema Nacional de Certificação Energética

UBEM – Urban Building Energy Models

UE - União Europeia

UNFCCC - *United Nations Framework Convention on Climate*

UTA - Unidades de Tratamento de Ar

VRV - Volume de Refrigerante Variável

ZEB - *Zero Energy Buildings*

1. Introdução

1.1. Enquadramento

A sociedade depende de energia para realizar as suas atividades diárias. Além disso, esta é necessária para sustentar e melhorar a qualidade de vida de cada ser humano. A taxa de consumo de energia final per capita é um indicador de qualidade de vida e bem-estar [1].

A tendência é então que o consumo energético mundial aumente como mostra a figura 1. Contudo, atender ao crescente consumo de energia de forma segura e ambientalmente responsável é um desafio fundamental. Ao longo dos anos, o mundo testemunhou alguns episódios sérios no que diz respeito ao sistema energético global: a crise do Canal de Suez em 1956, o embargo do petróleo de 1973, logo seguido pela revolução iraniana em 1979 e, mais recentemente, o desastre de Fukushima, em 2011 [2]. Também os dois últimos anos, serão lembrados pela pandemia COVID-19 e a Guerra na Ucrânia, que abalaram o mundo a todos os níveis.

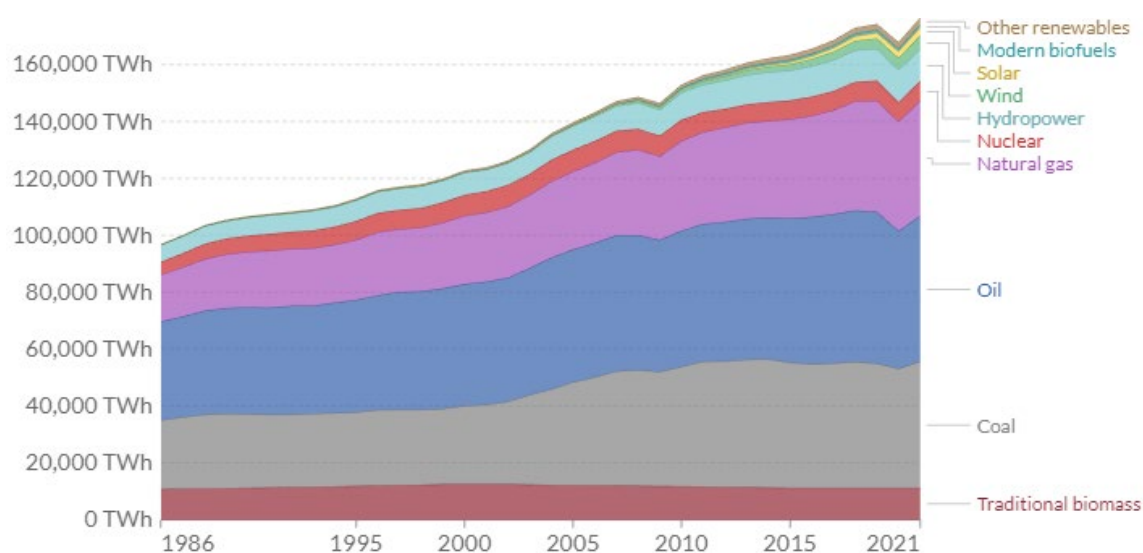


Figura 1: Consumo global de energia primária. Fonte: *Our World in Data based on Vaclav Smil (2017) and BP Statistical Review of World Energy*

O setor de energia global foi duramente atingido pelo surto de COVID-19 no início de 2020. As restrições impostas pelos governos mundiais deixaram milhões de pessoas confinadas às suas casas durante o ano, o que teve um impacto substancial nas viagens e no trabalho. Como resultado, a procura de energia caiu quatro por cento em 2020, comparativamente a 2019. Embora a pandemia continue a ter um forte impacto no setor da energia atualmente, as projeções mostram que, à medida que as restrições foram atenuadas em todo o mundo e o processo de vacinação foi ganhando força, a procura de energia passou os níveis pré-pandemia [2].

Desta forma, o *chief economist* da *British Petroleum* (BP), Spencer Dale, afirma que, para o sistema energético global, a combinação da pandemia, juntamente com os esforços para mitigar o seu impacto, levou a desenvolvimentos e resultados inigualáveis em tempos de paz modernos [3].

Porém, a Guerra na Ucrânia veio alterar este contexto de paz, e conseqüentemente, o sistema energético mundial. A Rússia é um ator importante nos mercados globais de energia e é um dos três maiores produtores de petróleo e gás natural do mundo, disputando os primeiros lugares com a Arábia Saudita e os Estados Unidos. A Rússia depende muito das receitas de petróleo e gás natural, que em 2021 representaram 45% do seu orçamento federal [4].

É evidente que tanto a pandemia como o conflito entre a Rússia e a Ucrânia, alteraram por completo o panorama energético. Apesar da desordem de 2020, as energias renováveis, lideradas pela energia eólica e solar, continuaram a crescer. A relativa imunidade das energias renováveis aos eventos dos últimos anos é promissora, prevendo-se um crescimento em 2050 de 14% face a 2016 (figura 2). Neste momento de incerteza do mercado global, o que sabemos é que o mundo precisa de energia em quantidades crescentes para apoiar o progresso económico e social, de forma a construir uma melhor qualidade de vida. No entanto, fornecer essa energia a todo o mundo vem com a responsabilidade e o compromisso de desenvolver e usar os nossos recursos com responsabilidade [3] [4].

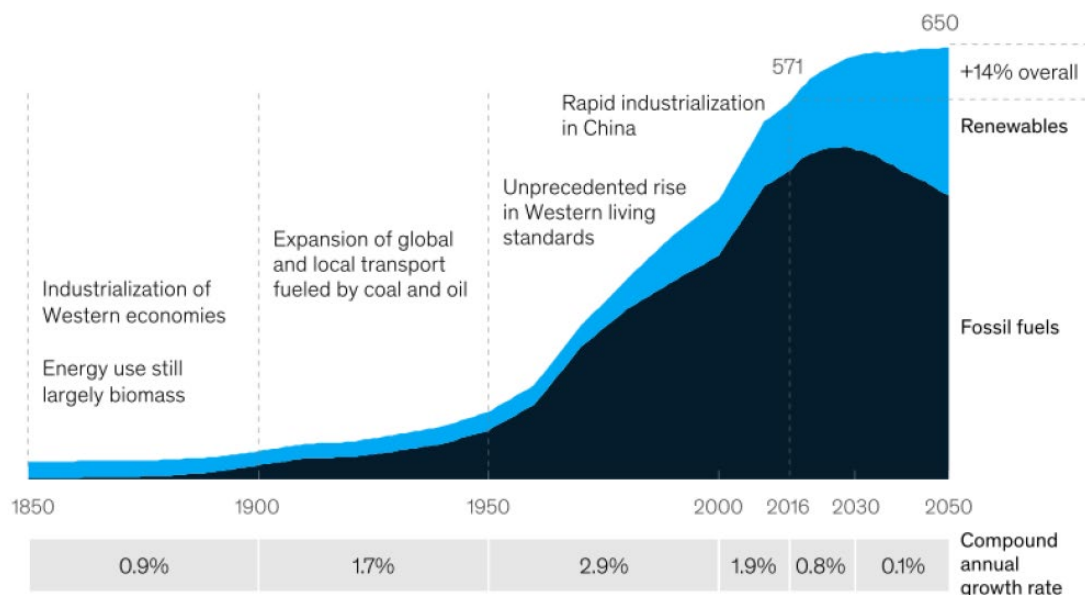


Figura 2: Renováveis na energia primária global. Fonte: *McKinsey Energy Insights' Global Perspective (2019)*

A queda nas emissões de carbono devido ao uso de energia foi igualmente impressionante, com as emissões a cair mais de 6% em 2020. Esta taxa de declínio nas emissões de carbono é semelhante à média que o mundo necessita a cada ano, durante os próximos 30 anos, de forma a estar no caminho certo para cumprir os objetivos do Acordo de Paris. Esta visa limitar o aquecimento global em 2 graus Celsius (de preferência a 1,5), em comparação com os níveis pré-industriais. A dificuldade em cumprir os objetivos traçados por este acordo veio reforçar a importância da transição de combustíveis fósseis, que atualmente representam a maior parte das emissões, para fontes de energia renováveis que são fundamentais para enfrentar a crise climática. A produção de energia renovável gera emissões bastante inferiores e três vezes mais empregabilidade do que a queima de combustíveis fósseis [2].

Com o objetivo de acelerar a transição combustíveis fósseis – renováveis e de forma a tornar-se mais independente de países como a Rússia no contexto energético, a Comunidade Europeia (CE) desenvolveu a “*Clean energy for all Europeans package*”, em 2016. Como parte deste pacote, a Comissão adotou uma proposta legislativa de reformulação da “*Renewable Energy Directive I*” (RED I), que entrou, posteriormente em vigor em 2018, denominada RED II.

A RED II estabelece um quadro comum para a promoção de energia de fontes renováveis na União Europeia (UE), e uma meta de 32% de energia de fontes renováveis no consumo final bruto de energia da UE em 2030. Estabelece também critérios de sustentabilidade e de redução das emissões de gases com efeito de estufa para biocombustíveis, bio líquidos e combustíveis de biomassa e institui regras sobre o apoio financeiro, de forma a melhorar a utilização de energias renováveis.

Em janeiro de 2020, o Parlamento Europeu adotou o Pacto Ecológico Europeu, enfatizando a necessidade de ações mais ambiciosas para enfrentar as mudanças climáticas e cumprir os objetivos ambientais. O Parlamento Europeu destacou o papel essencial da energia na transição para uma economia líquida de zero emissões de gases de efeito estufa e, particularmente, a importância da descarbonização do sistema energético. Por essas razões, o Parlamento Europeu pediu a revisão da RED de acordo com as novas ambições climáticas, estabelecendo novas obrigações para os Estados-Membros individuais, de modo a não ficar abaixo das metas da UE de 2020 [5].

Segundo o vice-presidente da Comissão Europeia, Frans Timmermans, “Portugal é uma das forças motrizes do Pacto Ecológico Europeu, tem uma população ávida e conhecedora de tecnologia e dispõe de todas as condições para estar na ‘*pole position*’ da transição energética, pois tem sol, vento e mar, que são os recursos naturais mais importantes para o desenvolvimento das energias verdes” [6]. Esta afirmação pode ser baseada na figura 3 onde apresenta a contribuição das fontes de energia renovável no consumo final de energia.

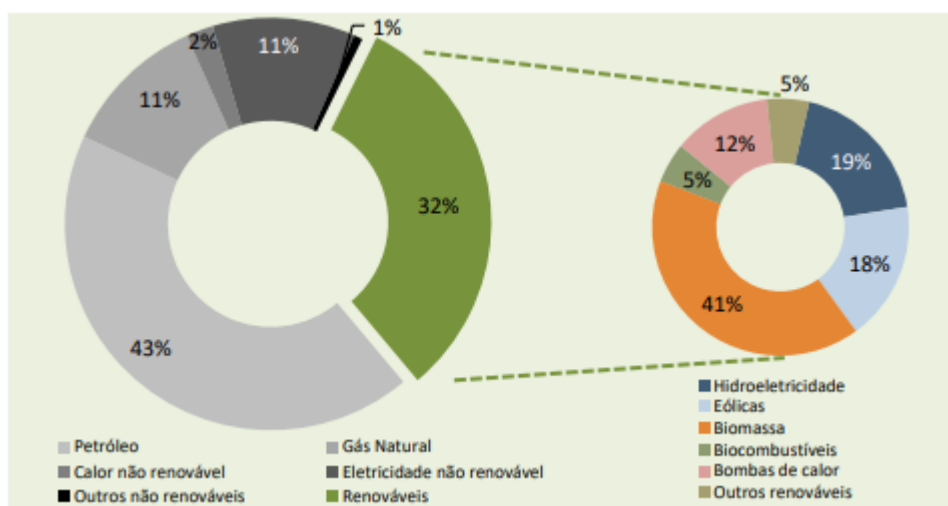


Figura 3: Contributo da Energia Renovável no Consumo Final em 2020 em Portugal. Fonte: Relatório DGEG – renováveis: estatísticas rápidas – nº211 – junho de 2022

A eficiência energética é um assunto que está atualmente na base de vários debates e decisões políticas mundiais, europeias, e em Portugal não é exceção. Nos últimos anos têm sido

desenvolvidos diversos projetos como o Roteiro para a Neutralidade Carbónica (RNC 2050), o Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC 2030), e a Estratégia de Longo Prazo para a Renovação do Edificado (ELPRE), que demonstram que a eficiência energética é um objetivo prioritário para a obtenção da neutralidade carbónica.

O facto de os cidadãos portugueses estarem bastante envolvidos nesta temática, faz com que se tornem mais motivados para a prática de ações conscientes no que diz respeito ao consumo energético responsável. Estudos recentes mostram que 97% dos portugueses se preocupam em utilizar programas 'eco' em alguns equipamentos ou em desligar totalmente os seus aparelhos eletrónicos, em vez de os deixar em standby.

Com o objetivo de atingir a neutralidade carbónica em 2050, foi aprovado em 2020, pelo Conselho de Ministros, o PNEC 2030. Este plano institui diversas metas no que toca a energia e clima para a década 2021-2030, tais como a redução do consumo de energia primária em 35%, a redução das emissões de gases com efeito de estufa entre 45% e 55% face a 2005 e o crescimento das energias renováveis no consumo final bruto de energia para 47%, onde o setor dos transportes deve atingir 20% em matérias renováveis.

O plano acima mencionado, estima que, com a aposta nas energias renováveis, Portugal se torne energeticamente independente, com uma redução da sua dependência em 65% até 2030, e para valores inferiores a 20%, em 2050 [6].

O setor dos edifícios, que representa aproximadamente 40% da energia final na Europa e cerca de 30% em Portugal, teve um investimento de 190 biliões de dólares americanos no ano 2021 em medidas de eficiência energética em edifícios, que corresponde a mais 20% em relação a 2019. Embora a atividade global de construção se tenha contraído durante grande parte de 2020, os investimentos em eficiência energética em edifícios na Europa aumentaram fortemente o suficiente para impulsionar os investimentos globais nessa área em 11%, para quase 180 biliões de dólares. A maior parte deste aumento deveu-se à intensificação das políticas de eficiência implementadas antes de 2020 [7].

Os Estados-Membros da UE têm vindo a promover um conjunto de medidas com vista a impulsionar a melhoria do desempenho energético e das condições de conforto dos edifícios. Nesse sentido, e com base no Acordo de Paris, a Comissão Europeia (CE) publicou em 2018, a diretiva 2018/844, também denominada como EPBD, *Energy Performance of Buildings Directive*. Esta diretiva visa reduzir pelo menos 40% das emissões de gases com efeito de estufa (GEE) em 2030, em relação a 1990, aumentar o consumo proveniente de energias renováveis e melhorar a segurança, a competitividade e sustentabilidade energética da UE em determinados prazos. Os períodos definidos foram 2030, 2040 e 2050 para curto-prazo, meio-prazo e longo-prazo, respetivamente.

A estratégia de Portugal para curto prazo consiste numa combinação de diversas opções políticas e tecnológicas, sabendo que a transição energética passará, definitivamente, pelo setor da eletricidade [8].

A operacionalização do Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC 2030), do Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050, e em 2019, a Estratégia de Longo Prazo para a Renovação do Edificado, mostram que é uma prioridade atingir objetivos como a redução da fatura e da dependência energética do país, o aumento da eficiência energética, a promoção do uso de energias de fontes renováveis, a descarbonização da economia nacional e a garantia uma transição justa, democrática e coesa.

Os sistemas de energia que precisam de emergir durante a transição de energia limpa são muito diferentes dos que existem hoje (figura 4). No sistema de energia do futuro, o consumo resume-se à eletricidade, que é cada vez mais usada por residências e indústrias [10]. De forma a atingir esta transição e os objetivos do parágrafo anterior, torna-se necessário uma grande intervenção na matéria de eficiência energética, com a possibilidade de uma redução de 50% no consumo de energia em Portugal [9]. Isto, apenas se forem postas em prática medidas para melhorar a eficiência energética dos edifícios, daí o propósito desta dissertação.

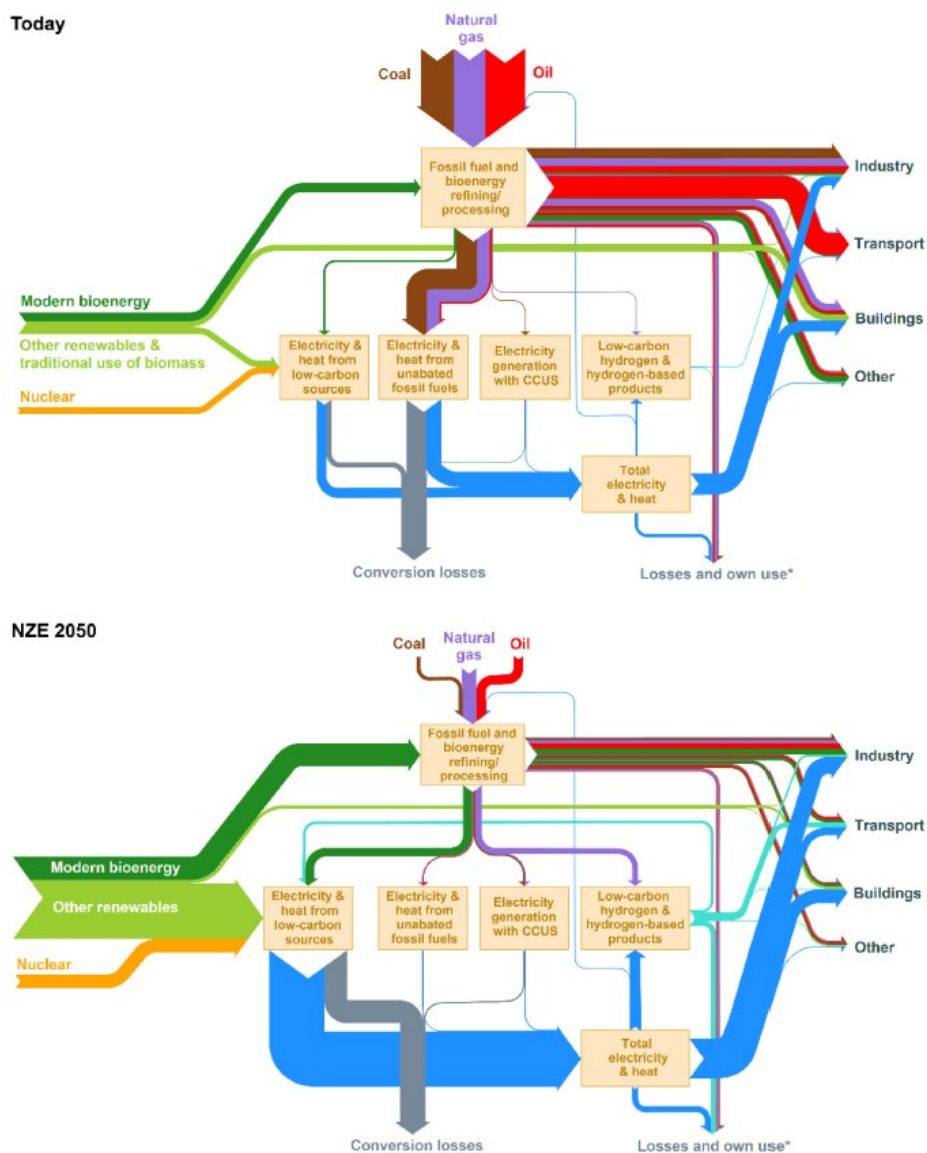


Figura 4: Sistema global de energia hoje e em 2050 no cenário de zero emissões. Fonte: World Energy Outlook (2021)

1.2. Motivação

Tal como acontece em Portugal, a Academia Militar (AM) apresenta grande parte dos seus gastos em faturas energéticas devido aos seus edifícios. Isto deve-se ao facto de existirem edifícios construídos há quase 50 anos, portanto, de baixa eficiência energética.

Nesse sentido, esta Dissertação foi realizada com o intuito de retribuir tudo aquilo que foi feito pela AM ao longo dos anos da minha formação e aplicar o que me foi ensinado durante esta passagem pelo Instituto Superior Técnico (IST). Com isto, pretendeu-se implementar um *software* para a gestão do sistema de energia do Exército, bem como apresentar medidas para uma renovação energética dos edifícios da AM, para que esta sirva de unidade piloto para se tornar 1ª unidade militar com certificação energética.

Por fim, é desejo desta dissertação continuar o trabalho realizado anteriormente por outros camaradas, de forma que este se estenda para as diversas unidades do Exército Português.

1.3. Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo principal implementar o *software City Energy Analyst* (CEA) na plataforma de gestão de Energia para Edifícios do Exército, de modo que se possa perceber onde se gasta mais energia, de forma a implementar medidas de otimização energética e, com isso, reduzir a fatura energética.

Para alcançar este objetivo principal, subdividiu-se este problema em tarefas cada uma com o seu objetivo, entre os quais, criar arquétipos das várias tipologias de consumo de energia da AM, observar os consumos energéticos reais da AM para serem posteriormente comparados com os resultados numéricos do CEA e, assim, validar os mesmos. Também são estudadas, através das diversas ferramentas do programa, medidas e métodos para atingir uma boa eficiência energética dos edifícios e implementá-las, caso se verifique uma opção adequada do ponto de vista do engenheiro responsável da unidade.

Por fim, e não menos importante, esta dissertação tem também como objetivo promover e alcançar a missão e os valores da AM relacionados com o serviço à comunidade, em particular nos domínios da segurança e defesa.

1.4. Contribuições

A presente dissertação expõe os seguintes contributos:

- Análise do balanço energético do campus da Amadora;
- Apresentação de todo o tipo de envolvente, sistemas AVAC, AQS e de fornecimento presentes no AAMA;
- Estudo e criação de diferentes tipos de arquétipos quanto à tipologia de consumo de cada edifício do campus;
- Implementação dos arquétipos criados no software comercial CEA;

- Análise dos resultados dos modelos do campus comparativamente aos dados reais, validando-os;
- Análise do impacto de todos os edifícios no consumo anual do campus;
- Apresentação medidas e métodos para a melhoria da eficiência energética;
- Análise do potencial das ferramentas do *software* para o aumento da eficiência energética e redução de custos dos edifícios e do campus;
- Avaliação da viabilidade económica das medidas propostas.

1.5. Estrutura da dissertação

A estrutura desta dissertação compreende 7 Capítulos com o seguinte conteúdo:

- Capítulo 1: Enquadra a dissertação no panorama mundial, europeu e português no que à energia diz respeito. Define também os objetivos, a motivação, os contributos e a estrutura deste trabalho;
- Capítulo 2: Consiste no enquadramento teórico, com base na literatura existente assente na área da eficiência energética, focando na legislação em vigor. Também são explicados os conceitos e ferramentas utilizados para o apoio do estudo realizado na presente dissertação;
- Capítulo 3: Apresenta a metodologia utilizada na realização deste trabalho e os procedimentos efetuados para alcançar os seus objetivos;
- Capítulo 4: Caracteriza o local do caso de estudo, apresentando os seus edifícios e respetivas funções. É feito o levantamento da envolvente, perfis horários, sistemas AVAC, AQS e de fornecimento de todos os edifícios existentes no campus. Criação de arquétipos para o CEA, que definem a maior parte dos edifícios que o Exército português possui;
- Capítulo 5: Descrição dos procedimentos realizados para implementar os dados levantados no CEA que elabora a modelação energética dos edifícios do campus. Verificação e validação dos arquétipos criados e dos resultados apresentados pelo programa;
- Capítulo 6: Apresenta medidas para otimização energética dos edifícios do campus, sendo feita a análise da viabilidade económica das mesmas. Mostra a potencialidade e os benefícios de utilizar *softwares* de simulação energética;
- Capítulo 7: Este capítulo expõe as limitações e as conclusões finais desta dissertação. São ainda apresentadas algumas sugestões de trabalhos futuros que acrescentam valor a este estudo.

2. Estado da Arte

Este capítulo consiste no enquadramento teórico, com base na literatura existente assente na área da eficiência energética. Apresenta assim toda a legislação europeia e nacional de forma cronológica, assim como os conceitos e ferramentas utilizadas para o apoio do estudo realizado na presente dissertação.

2.1. Enquadramento Legal

O Protocolo de Quioto foi adotado em 11 de dezembro de 1997 e trata-se do primeiro tratado internacional que pretende limitar as emissões de gases com efeito de estufa (GEE). O Protocolo de Kyoto operacionaliza a *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC) ao comprometer os países industrializados e as economias em transição a limitar e reduzir as emissões de GEE, de acordo com metas individuais acordadas. Devido a um complexo processo de ratificação, este tratado apenas entrou em vigor em 16 de fevereiro de 2005. Atualmente, existem 192 estados no Protocolo de Kyoto [11].

Neste sentido, a Comissão Europeia publicou a 23 de abril de 2009, a *Renewable Energy Directive* (RED) 2009/28/EC, que revogou a Diretiva 2001/77/CE. A RED é uma diretiva da União Europeia (UE) que determina os níveis de uso de energia renovável dentro da UE de 2009 a 2021. A diretiva exige que 20% da energia consumida na UE fosse renovável como parte de seu esforço para reduzir as emissões de dióxido de carbono [12].

O setor da construção é crucial para alcançar os objetivos energéticos e ambientais da UE. Da mesma forma, edifícios melhores e mais eficientes em termos energéticos melhoram a qualidade de vida dos cidadãos e aliviam a pobreza energética, trazendo benefícios adicionais, como saúde e melhores níveis de conforto térmico interior, empregos verdes, para a economia e a sociedade. Para aumentar o desempenho energético dos edifícios, a UE estabeleceu um quadro legislativo que revoga a diretiva 2002/91/CE e inclui a *Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD) 2010/31/UE e a Diretiva de Eficiência Energética 2012/27/UE. Ambas as diretrizes promovem políticas que ajudam a alcançar um setor imobiliário altamente eficiente em termos energéticos e descarbonizado até 2050, criam um ambiente estável para decisões de investimento e permitem que consumidores e empresas façam escolhas mais informadas para economizar energia e dinheiro [13].

Os Estados-Membros foram obrigados a notificar a Comissão Europeia com um Plano de Ação Nacional para as Energias Renováveis (PNAER) e um Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE) que define o seu roteiro em cada uma destas matérias. Os Estados-Membros também devem apresentar relatórios de progresso explicando a sua implementação das diretivas e o seu progresso em direção às metas, conforme exigido nos artigos das diretivas [12] [13].

A Resolução de Conselho de Ministros n.º 20/2013, em abril, aprovou o Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE) e o Plano Nacional de Ação para Energias Renováveis (PNAER). “Nestes dois instrumentos de política energética são definidas as políticas e medidas para o setor da eficiência energética e energias renováveis, que visam atingir os objetivos e metas definidas

para Portugal no horizonte de 2020, de acordo com o definido na Diretiva 2012/27/UE, relativa à eficiência energética, e na Diretiva 2009/28/CE, relativa à promoção das energias de fonte renovável” [14].

Os Decretos-Leis 78/2006, 79/2006 e 80/2006 desenvolvidos ao abrigo da diretiva 2002/91/CE, aprovaram o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE), Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE) e o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE). Com isto, o Estado promoveu um grande dinamismo no que toca à eficiência energética dos edifícios. Com a publicação da Diretiva 2010/31/UE, revogando a 2002/91/CE, surgiu a oportunidade de melhorar o SCE e os relativos regulamentos, com vista a alinhar os objetivos nacionais com as imposições europeias. Deste modo, o Decreto-Lei 118/2013 revogou os três Decretos-Leis anteriormente descritos. A revisão da legislação nacional resultou na junção num só diploma do que estava anteriormente regulado em três diplomas distintos relativos ao SCE e na aplicação do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) [15].

Em novembro de 2016, entrou em vigor o Acordo de Paris que se propôs a melhorar e substituir o Protocolo de Quioto. O Acordo de Paris foi assinado por 195 países e está dentro da UNFCCC, que trata da mitigação das emissões de gases de efeito estufa. O Protocolo de Quioto, por outro lado, é um tratado que compromete os Estados Partes a reduzir as emissões de gases de efeito estufa, com base no consenso científico [16].

No mesmo mês, a Comissão Europeia apresentou o Pacote “Energia Limpa para todos os Europeus”. Este Pacote contém alterações às Diretivas 2010/31/EU (Diretiva EPBD) e 2012/27/EU, relativas ao setor dos edifícios e à eficiência energética. Os edifícios são responsáveis por 36 % dos GEE e por 40% dos consumos energéticos da UE. Desta forma, demonstram um enorme potencial no combate às alterações climáticas através da melhoria da sua eficiência, enquanto se assegura a redução das emissões e dos consumos, vindo ainda a aumentar a segurança e o conforto das pessoas [17]. Ambas as diretivas foram alteradas em 2018 e 2019, como parte deste pacote. A Diretiva que as altera é a EPBD 2018/844/EU que introduziu novos elementos e mostrou um forte sinal sobre o compromisso da UE de modernizar o setor dos edifícios com melhorias tecnológicas e de aumentar as renovações dos edifícios. Também em 2018, entrou em vigor a atual Diretiva de Energias Renováveis 2018/2001/EU (RED II) como parte do pacote Energia limpa para todos os europeus, que visa manter a UE como líder global em energias renováveis e, mais amplamente, ajudar a cumprir a sua meta de emissões com os compromissos do Acordo de Paris. A diretiva estabelece uma nova meta vinculativa de energia renovável para a UE em 2030 de pelo menos 32%, com uma cláusula para uma possível revisão em alta até 2023. Esta meta é uma continuação da meta de 20% para 2020 [13].

O Decreto-Lei 101-2020, que revogou o Decreto-Lei 118/2013, “estabelece um enquadramento normativo para a transição energética na década de 2021 -2030 e para a criação da União da Energia e da Ação Climática na União Europeia e assegura o cumprimento do Acordo de

Paris sobre as alterações climáticas e o aquecimento global do planeta e, em simultâneo, salvaguarda o crescimento económico e a criação de emprego, através da prioridade à eficiência energética, o reforço da aposta nas energias provenientes de fontes renováveis e o progressivo abandono de energia produzida a partir de combustíveis fósseis, com vista ao desenvolvimento de um sistema energético sustentável, concorrencial, competitivo, eficiente, seguro e descarbonizado até 2050” [17].

Em consequência da informação descrita acima, foram desenvolvidos instrumentos nacionais como o Roteiro para a Neutralidade Carbónica até 2050 (RNC 2050), o Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC 2030) e a Estratégia de Longo Prazo para a Renovação dos Edifícios (ELPRE) que definem metas ambiciosas para que o setor imobiliário tenha necessidades quase nulas de energia.

Através do RNC2050, é possível visualizar quais as transformações a nível económico e social necessárias para atingir o objetivo da neutralidade carbónica até 2050. Para que isso aconteça, é imprescindível que haja uma alteração eficaz dos custos, com foco na competitividade da economia a nível nacional; é necessário promover a empregabilidade, através da criação de novos postos de trabalho e, por último, potenciar a qualidade de vida e da saúde humana, melhorando, essencialmente, a qualidade do ar interior dos edifícios. Este Roteiro foi desenvolvido a par das normas estabelecidas noutras estratégias de economia circular, nomeadamente, seguindo o Plano Ação para a Economia Circular e a par dos princípios de planeamento e ordenamento de território, visados no Programa Nacional de Políticas de Ordenamento do Território [18].

O PNEC 2030 é o instrumento que está no foco da política energética e climática para o período 2021-2030. Este plano contém normas fundamentais para a concretização dos objetivos impostos para Portugal até 2030, ao nível de energia e clima. O PNEC 2030 veio substituir o Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética e o Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis definidos até 2020. Foi desenvolvido com o objetivo de atingir metas a longo prazo em Portugal, nomeadamente, alcançar a neutralidade carbónica, trabalhando em consonância com o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050. O PNEC 2030 é constituído por medidas que integram as 5 dimensões da União da Energia, sendo estas, a Descarbonização (energias renováveis e emissão de GEE); a Eficiência Energética e a Segurança Energética; o Mercado Interno de Energia e, por último, a Inovação, Investigação e Competitividade [14].

A Estratégia de Longo Prazo para a Renovação dos Edifícios (ELPRE), foi aprovada pelo Governo Português, através da Resolução do Conselho de Ministros 8-A/2021, de 3 de fevereiro. Esta estratégia procura ir de encontro às metas europeias e nacionais, que pretendem alcançar a neutralidade carbónica e a eficiência energética dos edifícios, transformando-os em *Nearly Zero Energy Building* (nZEB). Ao desenvolver esta Estratégia, o Governo aponta que, para a concretização dos objetivos definidos até 2050, no que toca à eficiência energética, são necessários, aproximadamente, 143.492 milhões de euros, sendo que, a maioria será dirigida para a renovação dos edifícios residenciais (110.078 milhões de euros) e o restante valor será aplicado na transformação de edifícios não residenciais. No total, até 2030, as áreas renovadas deverão corresponder a cerca de 364 milhões de metros quadrados e, até 2050, deverão aumentar para 748 milhões de metros

quadrados. A ELPRE pretende ainda poupar 11% da energia primária até 2030 e 34% até 2050 e reduzir em 26% o número de horas de desconforto na habitação, até 2030, e em 56% até 2050. Em suma, esta Estratégia tem como principais objetivos, a intervenção nas áreas envolventes dos edifícios; a promoção da energia provinda de fontes renováveis; a adoção de soluções técnicas adequadas ao objetivo da renovação energética dos edifícios abrangidos, em articulação com a avaliação dos mecanismos de resposta às falhas no mercado; o desenvolvimento de programas de financiamento para a renovação e para a mobilização do investimento, público e privado, bem como o reforço das políticas de incentivo e monitorização do mercado [19].

Após a introdução de regras de desempenho energético nos códigos nacionais de construção, os edifícios consomem atualmente apenas metade em comparação com os edifícios típicos da década de 1980. Em outubro de 2020, a Comissão apresentou a sua estratégia de onda de renovação, no âmbito do Pacto Ecológico Europeu (*European Green Deal*). Esta estratégia contém um plano de ação com medidas concretas de regulamentação, financiamento e facilitação para impulsionar a renovação de edifícios. O seu objetivo é pelo menos duplicar a taxa anual de renovação energética dos edifícios até 2030 e promover uma renovação profunda. A revisão da Diretiva Desempenho Energético dos Edifícios é uma das suas principais iniciativas [13].

Com o intuito de esclarecer o que foi implementado desde o Protocolo de Quioto até aos dias de hoje, a figura 5 mostra os acordos, diretivas, estratégias e leis aplicadas a nível internacional, europeu e nacional de modo a alcançar a neutralidade carbónica em 2050 e uma melhor eficiência energética em edifícios.

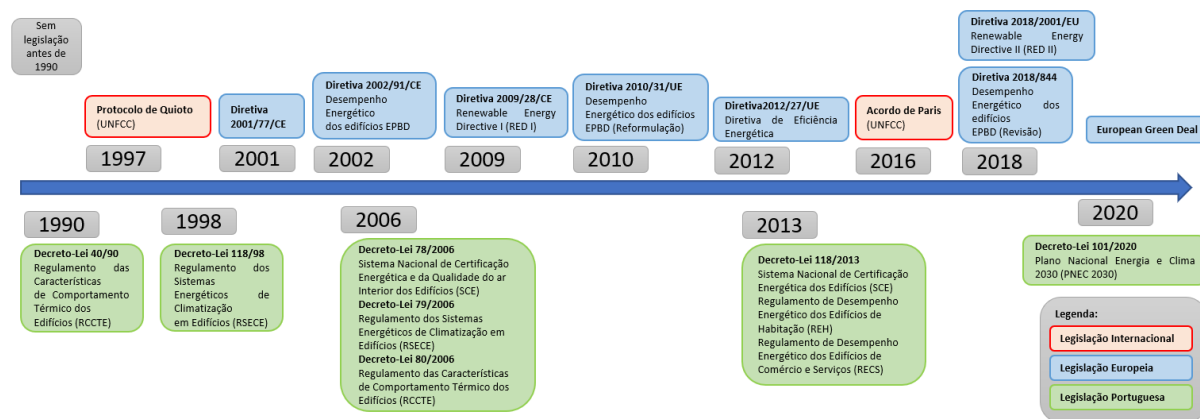


Figura 5: Evolução da legislação para eficiência energética em edifícios

2.2. Auditoria Energética

Uma auditoria energética pode ser definida como um processo para avaliar onde um edifício usa energia e identificar oportunidades para reduzir o seu consumo. Existe uma relação direta com o custo da auditoria, quantos dados serão recolhidos e analisados, e o número de oportunidades identificadas. Assim, é feita uma primeira distinção entre o custo da auditoria que determina o tipo de auditoria a ser realizada. A segunda distinção é feita entre o tipo de instalação. Por exemplo, uma auditoria de construção pode enfatizar os requisitos de envolvente do edifício, iluminação, aquecimento e ventilação. Por outro lado, uma auditoria de uma planta industrial enfatiza os requisitos do processo [20].

Antes de iniciar a auditoria energética, é útil ter uma ideia do âmbito do projeto e o nível de esforço necessário para atender às expectativas. Existem três tipos níveis de auditoria energética, qualquer um dos quais pode atender a diferentes necessidades. Os níveis básicos de auditoria, em ordem crescente de complexidade, são:

- Nível I - A Auditoria *Walk-through*

A auditoria passo a passo, como o próprio nome indica, é uma passagem pelas instalações para inspecionar visualmente cada um dos sistemas que usam energia. Normalmente, inclui uma avaliação dos dados de consumo de energia para analisar as quantidades e padrões de uso de energia, bem como fornecer comparações com as médias da indústria ou referências para instalações semelhantes. É a auditoria menos dispendiosa, mas pode gerar uma estimativa preliminar do potencial de economia e fornecer uma lista de oportunidades de economia de baixo custo por meio de melhorias nas práticas operacionais e de manutenção. A auditoria de nível um é também uma oportunidade de recolher informações para uma auditoria mais detalhada.

- Nível II - Auditoria Padrão

A auditoria padrão continua a quantificar os usos e perdas de energia através de uma revisão e análise mais detalhada de equipamentos, sistemas e características operacionais. Essa análise também pode incluir algumas medições e testes no local para quantificar o uso de energia e a eficiência de vários sistemas. São usados cálculos de energia padrão para analisar eficiências e calcular economias de energia e custos com base em melhorias e alterações em cada sistema. A auditoria padrão também incluirá uma análise económica das medidas recomendadas.

- Nível III - Simulação por Computador

A auditoria de nível três inclui mais detalhes do uso de energia por função e uma avaliação mais abrangente dos padrões de uso de energia. Isso é feito através do uso de um software de simulação computacional. O auditor desenvolverá uma simulação computacional de sistemas de construção que levarão em conta o clima e outras variáveis e preverão o uso de energia durante todo o ano. O objetivo do auditor é construir uma base de comparação consistente com o consumo real de energia da instalação. Depois de construir essa linha de base, o auditor fará alterações para melhorar a eficiência de vários sistemas e medir os efeitos em comparação com a linha de base. Devido ao tempo envolvido na recolha de informações detalhadas de equipamentos, dados operacionais e configuração de um

modelo computacional preciso, este corresponde ao nível mais caro de auditoria energética, mas pode ser garantido, se a instalação ou os sistemas forem de natureza mais complexa [20].

Para a execução de uma auditoria energética, a metodologia mais utilizada inclui 4 fases de intervenção:

1. Primeira fase — a preparação da auditoria;
2. Segunda fase — a intervenção no local da instalação a auditar;
3. Terceira fase — o tratamento da informação recolhida nas duas primeiras fases;
4. Quarta fase — a elaboração do relatório da auditoria energética.

Quanto aos seus objetivos do ponto de vista energético de uma instalação, a Auditoria Energética determina as formas de energia utilizadas; examina o modo como a energia é utilizada e os respetivos custos; identifica as possibilidades de melhoria dos rendimentos energéticos e analisa técnica e economicamente as soluções encontradas [21].

Para atingir os objetivos estipulados, a auditoria poderá apoiar-se em simuladores dinâmicos que adquirem valores de consumo muito próximos da realidade. Para avaliar a capacidade preditiva do modelo e utilizá-lo para prever o uso de energia de um edifício e comparar essas previsões com o uso real de energia, a medida estatística que nos permite quantificar essa comparação é o Coeficiente de Variação da Raiz do Erro Quadrado Médio ou *Coefficient of Variance of the Root Mean Square Error* CV(RMSE). O *Root Mean Square Error* ou erro quadrático médio da raiz é dado por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N}}$$

Em que:

Y_i – Valores de consumo reais;

\hat{Y}_i – Valores de consumo previstos;

N – Número de observações.

A diferença entre os quadrados dos valores previstos e reais representa a variação da variável dependente, não explicada pelo modelo computacional. Somando todos os resíduos quadrados, dividindo pelo número de observações e aplicando a raiz quadrada do resultado, temos a RMSE. Esta ferramenta estatística indica o ajuste absoluto do modelo e mostra quão próximos os valores previstos estão dos dados reais. Assim, fornece uma representação objetiva da precisão preditiva do modelo. O CV(RMSE) leva esta medida um passo adiante, normalizando-a pelo valor médio da variável dependente.

$$CV(RMSE) = \frac{1}{\bar{Y}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N}}$$

Em que:

\bar{Y} – Valor médio da variável dependente.

De acordo com a Diretriz do ASHRAE 14-2014 “*Measurement of Energy, Demand, and Water Savings*”, um CV(RMSE) igual ou abaixo de 25% indica um bom ajuste do modelo com recursos preditivos aceitáveis e confiáveis para intervalos entre 12 e 60 meses [22].

2.3. Certificação Energética

A certificação energética surge conforme explicado no subcapítulo 2.1. O Decreto-Lei 101-D/2020, regula o Sistema de Certificação Energética de Edifícios (SCE) e estabelece os requisitos para a melhoria do desempenho energético de edifícios.

Numa avaliação energética são detalhadas as condições do estudo da energia de um edifício, procurando identificar os vetores energéticos e caracterizar os consumos. Pode compreender a recolha das características da envolvente e dos sistemas, caracterizar os perfis de utilização e quantificar, monitorizar e a simular dinamicamente os consumos energéticos [23].

Para isto, existem 2 modelos de certificação energética em vigor. Um modelo para edifícios de habitação e outro para edifícios de comércio e serviços.

No caso dos edifícios de comércio e serviços, a classe energética é estabelecida em função do rácio de classe energética, R_{IEE} . Este rácio resulta do quociente entre a diferença dos indicadores de eficiência energética do tipo S previsto e do contributo de fontes de energia renovável, pelo indicador de eficiência energética de referência do tipo S, conforme equação abaixo. Através do valor de R_{IEE} determinado, a classe energética é definida em conformidade com os intervalos apresentados na Tabela 1 [24].

$$R_{IEE} = \frac{IEE_{pr,S} - IEE_{pr,ren}}{IEE_{ref,S}}$$

Em que:

R_{IEE} – Rácio de classe energética em edifícios de comércio e serviços;

$IEE_{pr,S}$ – Indicador de eficiência energética previsto do tipo S [kWhEP/(m2.ano)];

$IEE_{pr,ren}$ – Indicador de eficiência energética previsto renovável [kWhEP/(m2.ano)];

$IEE_{ref,S}$ – Indicador de eficiência energética de referência do tipo S [kWhEP/(m2.ano)].

Classe Energética	R_{IEE}
A+	$R_{IEE} < 0.25$
A	$0.25 < R_{IEE} < 0.50$
B	$0.50 < R_{IEE} < 0.75$
B-	$0.75 < R_{IEE} < 1.00$
C	$1.00 < R_{IEE} < 1.50$
D	$1.50 < R_{IEE} < 2.00$
E	$2.00 < R_{IEE} < 2.50$
F	$R_{IEE} > 2.50$

Tabela 1: Intervalos de valor de R_{IEE} para edifícios de comércio e serviços

2.4. Eficiência Energética em Edifícios

Um edifício energeticamente eficiente cria condições de vida confortáveis no seu interior, usando o menor consumo de energia possível, maximizando a eficiência na utilização dos recursos. As medidas para tornar um edifício energeticamente eficiente abrangem todo o ciclo de vida do edifício: o próprio processo de construção, passando pelo ciclo de manutenção da operação e fases de demolição do edifício. Um edifício energeticamente eficiente mantém o edifício totalmente funcional e termicamente confortável para os seus ocupantes. Com o custo da energia a aumentar e a crise energética a ser cada vez mais uma realidade, a necessidade de fornecer projetos de construção energeticamente eficientes torna-se mais importante [25].

A figura 6 apresenta alguns conceitos, apresentando várias soluções e tecnologia para eficiência energética em edifícios e também as definições de *Zero Energy Buildings* (ZEB) para *Plus Energy Buildings* (PEB) [26].

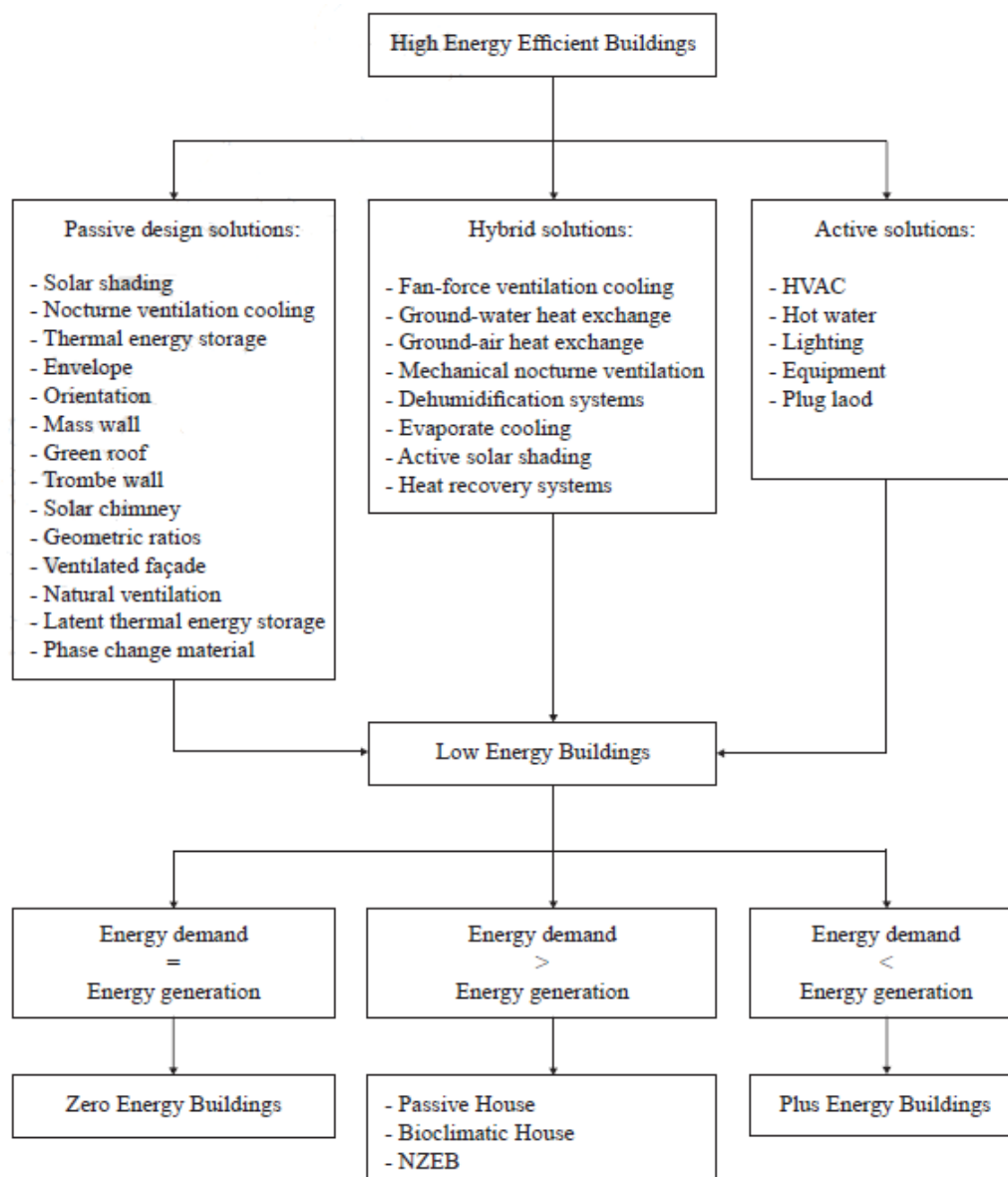


Figura 6: Diagrama de edifícios eficientes. Fonte:[26]

2.4.1. Zero Energy Building (ZEB)

O conceito de *Zero Energy Building* (ZEB) ganhou grande atenção internacional nos últimos anos e agora é visto como o futuro alvo para o projeto de edifícios. No entanto, antes de ser totalmente implementado nos códigos nacionais de construção e nas normas internacionais, o conceito ZEB requer uma definição clara e consistente, e uma metodologia de cálculo de energia acordada [27].

2.4.2. Nearly Zero Energy Building (nZEB)

Visto que não há uma definição consistente sobre o que é um edifício energeticamente eficiente, e existem várias abordagens para possíveis metodologias de cálculo de ZEB, uma limitação no uso ZEB é: “a designação de ZEB deve ser usada apenas para edifícios que demonstraram através de medições anuais reais que a energia fornecida é menor do que ou igual à energia renovável exportada no local” [28].

Desta forma, utiliza-se a definição de *Nearly Zero Energy Buildings* (nZEBs) que representam uma das maiores oportunidades para aumentar a poupança de energia na Europa. Um nZEB é definido como um edifício com um desempenho energético muito elevado. A quantidade quase zero ou muito baixa de energia necessária deve ser coberta em grande medida por energia proveniente de fontes renováveis. A EPBD afirma que os Estados-Membros devem detalhar as definições nZEB, refletindo condições nacionais, regionais ou locais, incluindo um indicador numérico de energia primária expresso em kWh/m² por ano. O conceito de um nZEB está esquematizado na figura 7 [28].

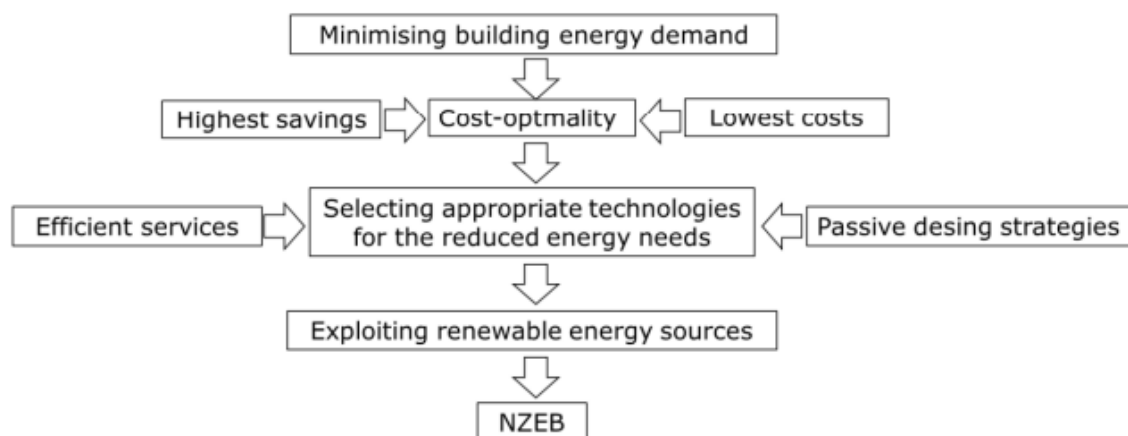


Figura 7: Conceito de nZEB. Fonte:[28]

O conceito *Passive House* surgiu como uma solução muito promissora para reduzir a procura energética dos edifícios através da promoção de tecnologia de construção, e atingir os objetivos em relação ao meio ambiente. O objetivo do conceito de *Passive House* é fornecer um ambiente interno aceitável em termos de qualidade do ar e conforto térmico com necessidades e custos mínimos de energia. O conceito de design ou tecnologia aplicada baseia-se em cinco princípios principais: excelente isolamento térmico; janelas eficientes; *perfect air tightness*; minimização de pontes térmicas e sistema de ventilação com recuperação de calor [26].

Este tipo de edifícios tem necessidades quase nulas de energia, ou seja, são edifícios otimizados desde a fase de projeto até à fase final de construção. Desta forma, quase não necessitam de energia durante a sua utilização e a pouca energia de que precisam provém de fontes renováveis [29].



Figura 8: Balanço zero de Passive House e de um edifício convencional. Fonte: [29]

2.4.3. Plus Energy Building

Considerando a quantidade de edifícios existentes e a descarbonização que se exige nos novos edifícios para alcançarem um melhor desempenho, é preciso ir mais além do conceito de nZEB.

Atualmente, com o trabalho de pesquisa para melhorar o desempenho dos edifícios, de tecnologia e de equipamentos eficientes para o setor de construção, o nZEB pode ser melhorado para alcançar o chamado Edifício de Energia Positiva ou Plus Energy Buildings (PEB). Como requisito geral, um PEB produz mais energia do que consome e fornece energia baseada em fontes renováveis à rede, contribuindo para reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no sistema de energia. Assim, os PEBs podem apoiar, por exemplo, edifícios, onde a transição para o estado de energia zero não teria uma boa relação custo-benefício. Nesta perspetiva, os PEBs representam um passo fundamental para a descarbonização do setor da construção [30].

2.5. Softwares de Eficiência Energética – City Energy Analyst

2.5.1. Metodologia UBEM

O número de habitantes das cidades em todo o mundo crescerá até 2030. Para apoiar este crescimento, foram tomadas medidas políticas a nível internacional e nacional, mas a sua implementação ocorre, principalmente, a nível municipal. De modo a conseguir gerir e reduzir as emissões de GEE para edifícios novos ou já existentes, as cidades precisam de entender quais os conjuntos de edifícios que, atualmente causam essas emissões [31].

No nível de construção individual, os Building Energy Models (BEM) já são bastante utilizados em muitas partes do mundo para o desenvolvimento de projetos e com códigos aprimorados. Este tipo de modelos requer saber a geometria, dados de construção e perfis de utilização para um modelo inicial. O nível de informação disponível é proporcional ao estado do design do projeto, onde requer que o modelador faça suposições educadas sobre certos dados para a simulação caso estejam em falta. As informações disponíveis são inseridas num software BEM através de um processo principalmente manual, demorado e caro.

Embora o processo BEM descrito acima possa, em princípio, ser aplicado sucessivamente a qualquer número de edifícios, este processo exige muito tempo e recursos financeiros. Para se tornar acessível, o BEM precisa de se expandir para o âmbito urbano [31]. Esta expansão é denominada como Urban Building Energy Model (UBEM) e não se trata de uma modelação de energia de um edifício individual para vários de forma linear, mas trata-se de conseguir fazer a interconexão e interdependências dinâmicas e complexas entre os edifícios urbanos e o ambiente urbano. O ambiente urbano influencia fortemente o desempenho dos edifícios circundantes, bem como os edifícios influenciam fortemente o ambiente urbano. Comparado com a BEM, a UBEM deve capturar as interações entre edifícios (por exemplo, sombreamento, reflexão solar) e entre edifícios e o microclima urbano (por exemplo, libertação de calor do edifício para o ambiente). Assim, considerar os edifícios urbanos como parte de sistemas urbanos permite um desempenho maior do que apenas a soma de edifícios individuais [32].

A UBEM refere-se à modelação computacional e simulação do desempenho de um grupo de edifícios no contexto urbano, para levar em conta não apenas a dinâmica de edifícios individuais, mas, mais importante, os efeitos entre edifícios e o microclima urbano. O objetivo é fornecer elementos quantitativos como, por exemplo o uso e necessidades anuais de energia e o potencial de geração de energia renovável, bem como a formulação de políticas energéticas.

Dependendo dos casos, a UBEM pode ter diferentes escalas espaciais e temporais. A UBEM pode abranger escalas espaciais de dezenas de prédios num quarteirão a centenas ou milhares de prédios numa cidade inteira. A UBEM abrange também várias escalas temporais. Em relação ao clima, a maior parte da UBEM não leva necessariamente em conta os efeitos do microclima urbano. Normalmente, há um único arquivo meteorológico que representa as condições meteorológicas locais ou de toda a cidade. Apenas alguns modelos são acoplados a simulações microclimáticas e a maioria deles não representa a troca de radiação de ondas longas entre edifícios de maneira suficiente [32].

O UBEM pode usar diferentes abordagens de modelação. A análise dos fluxos de energia pode ser realizada por meio de modelos de energia de edifícios “top-down” que começam com a necessidade de energia do edifício para uma região e subdividem-se cada vez mais até subseções menores. Modelos “top-down” podem fornecer estimativas do que aconteceria se mais edifícios de um determinado tipo fossem construídos ou convertidos nouro tipo. No entanto, estes modelos estão limitados na capacidade preditiva ao investigar o desempenho de um conjunto de edifícios num contexto urbano. Nesta escala urbana, espera-se que os modelos energéticos de edifícios urbanos “bottom-up” atinjam os objetivos de planejar cenários integrados de oferta e procura de energia. Os modelos “bottom-up” são baseados em descrições físicas e cálculos de engenharia dentro e ao redor de edifícios, que são usados para analisar os custos operacionais de energia e desempenho dinâmico para o grupo de edifícios em altas resoluções espaciais e temporais [31].

A figura 9 ilustra os principais componentes de um ecossistema UBEM, incluindo conjuntos de dados, fluxos de trabalho de simulação, resultados e indicadores para apoiar a tomada de decisões [32].

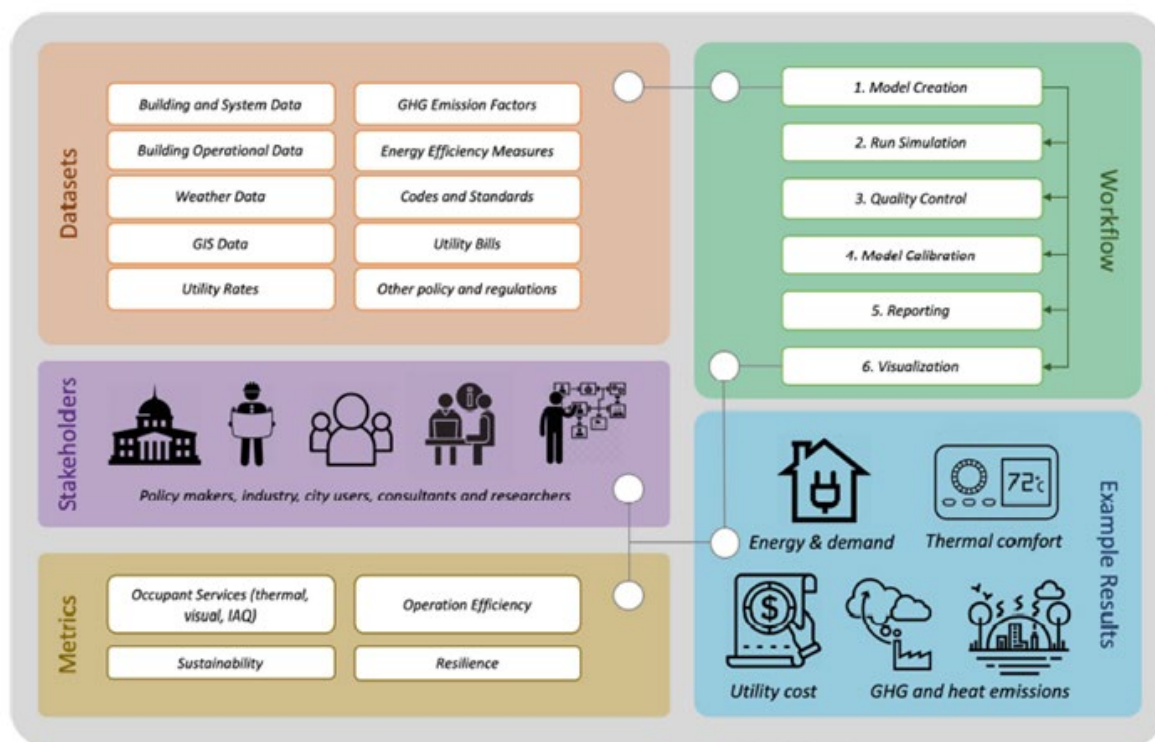


Figura 9: Visão global de um UBEM. Fonte:[32]

A tarefa de criar um modelo de energia fiável de um conjunto de edifícios, novo ou existente, pode ser dividida nas seguintes subtarefas: organização e entrada de dados, geração e execução do modelo térmico e validação do resultado [31].

O procedimento de modelação para um UBEM começa com a identificação das propriedades geométricas dos edifícios, ou seja, forma e geometria através de modelos 3D da cidade. Além disso, as propriedades não geométricas dos edifícios, por exemplo, materiais, sistemas e ocupação, são

definidas por arquétipos de construção que representam as características mais importantes do setor edificado. De seguida, juntamente com as condições climáticas predefinidas, todos os dados necessários são importados para um motor de simulação UBEM no qual o modelo térmico é iniciado e simulado. Os resultados da simulação da necessidade de energia nas cidades, bem como os parâmetros de entrada, podem ser armazenados numa base de dados e visualizados a qualquer momento [33].

As ferramentas UBEM existentes atualmente já têm uma boa fidelidade. Algumas ferramentas UBEM são baseadas na web como o CityBES, enquanto a maioria são aplicações independentes (por exemplo, CitySim e UMI). Algumas ferramentas UBEM usam mecanismos de simulação baseados em física (CityBES e UrbanOpt usam EnergyPlus), enquanto outras usam modelos de ordem reduzida (SimStadt, CitySim, City Energy Analyst e TASER). A maioria das ferramentas UBEM integram conjuntos de dados baseados em GIS. A figura 10 resume um conjunto de ferramentas UBEM.[32]

Approach	Tool		Developer	Calculation method	Target Users	Reference
Physics-based dynamic simulation method	CityBES	Web-based data and computing platform to evaluate energy performance of city buildings	LBNL	EnergyPlus	Urban planners, policy makers	(Hong, Chen, Lee, <i>et al.</i> , 2016)
	UMI	Urban modeling interface for energy performance analysis of neighborhoods	MIT	EnergyPlus	District energy managers	(Reinhart <i>et al.</i> , 2013)
	UrbanOPT	Modeling tool to integrate energy loads and renewable energy at the district level to develop	NREL	EnergyPlus and OpenStudio	District energy managers	(NREL, 2018)
Reduced-order calculation method	SimStadt	Urban energy tool for energy analysis for city districts	Hochschule für Technik Stuttgart	ISO / CEN standards based reduced-order model	Urban planners, policy makers	(Nouvel, Brassel, <i>et al.</i> , 2015)
	TEASER	Tool for multiple building energy performance evaluation	RWTH Aachen University	Modelica-based reduced order model	District energy managers	(Remmen <i>et al.</i> , 2017)
	City Energy Analyst	Computational framework for the analysis and optimization of energy systems in neighborhoods and city districts	ETH Zurich	Tool specific calculation modules	Urban planners, policy makers	(Fonseca <i>et al.</i> , 2016)

Figura 10: Ferramentas UBEM. Fonte:[32]

2.5.2. CEA

O *City Energy Analyst* (CEA) é uma ferramenta de simulação urbana para avaliar várias estratégias de eficiência energética em diferentes escalas urbanas, ou seja, prédios, bairros ou cidades. Esta ferramenta versátil permite que os engenheiros simulem a necessidade de energia de vários edifícios e encontrem os sistemas de conversão de energia mais adequados. [34] Estas otimizações podem variar de *retrofits* de edifícios até à exploração de recursos renováveis. As configurações não só devem cumprir as metas de desempenho nos níveis financeiro, energético, emissões e técnico, mas também devem ser visualizadas para facilitar a sua discussão e aprovação.



Figura 11: a) conjunto de ferramentas para a análise de sistemas energéticos urbanos; b) efeitos estudados do desenvolvimento urbano no desempenho dos sistemas energéticos; c) modelos de simulação dinâmica padrão e corpo interdisciplinar de conhecimento. Fonte: Adaptado de [36]

Para isso, a estrutura do programa integra métodos dependentes do tempo para simulação de desempenho energético de edifícios, simulação de tecnologias de conversão e armazenamento, avaliação de potenciais fontes renováveis, otimização de sistemas de energia de dois níveis e análise multicritério. O modelo foi programado em Python v2.7 e construído como uma extensão do Sistema de Informação Geográfica ArcGIS v10.3 [35].

O CEA integra uma extensão GIS para visualização dos dados espaço-temporais e para a distribuição dos sistemas otimizados. Além disso, também inclui uma forma de ver as séries temporais em edifícios e gráficos comparativos para o desempenho de vários cenários. Para conseguir isso, o CEA usa modelos termodinâmicos físicos e abordagens estocásticas (com eventos aleatórios) para calcular a necessidade de energia num edifício ou cidade [34].

Atualmente, o estudo de configurações ótimas de sistemas energéticos é um problema. Este problema requer uma descrição detalhada dos padrões espaço-temporais e de modelos avançados para simulação. De modo a dar uma resposta a estes problemas, os colaboradores fizeram uma pesquisa sobre as abordagens para a construção de prognóstico de necessidades (“*top-down*”, “*bottom-up*” e híbrido, onde a abordagem *top-down* é a seguida pelo CEA), análise de potenciais

recursos renováveis (biomassa, energia solar, energia eólica, etc.), melhoria de sistemas de energia de edifícios e visualização de qualidades de energia.

Em linha com os interesses governamentais para integrar um planeamento de energia e estratégias de desenho urbano em conformidade, uma abordagem integrada torna-se necessária. Este tipo de abordagem deve atingir previsões fiáveis e exibir de forma eficiente os padrões de consumo de energia, disponibilidade de recursos e configurações de sistemas de energia ideais para tomadores de decisão para otimizar os sistemas de energia do edifício em escalas de bairro e distrito. Em contraste com as abordagens existentes, o *framework* desenvolve numa única interface uma série de modelos detalhados para a construção de previsão de procura de energia, avaliação de disponibilidade de recursos, simulação de conversão, tecnologias de armazenamento e distribuição, otimização de dois níveis, avaliação multicritério e visualização 4D.

A estrutura permite avaliar holisticamente as opções de construção e *retrofit* de uma infraestrutura e encontrar sistemas de conversão de energia ideais. Além disso, permite analisar os benefícios energéticos, de carbono e financeiros de vários cenários urbanos. Os resultados podem ser representados numa interface intuitiva para modeladores de planeamento urbano e de energia [35].

O CEA tem como objetivo utilizar variáveis exógenas e endógenas da configuração de um determinado edifício ou de vários edifícios e prever a necessidade de energia individual ou global em diferentes cenários. Esta ferramenta também considera todo o sistema de distribuição de energia elétrica mostrando os efeitos de futuras implementações no meio ambiente da região [34].

Os dados que podem ser obtidos do CEA baseiam-se na combinação de todas as considerações acima mencionadas e incluem efeitos negativos de pequenas perturbações, como infiltração de ar ou efeito do microclima. Como resultado, os dados gerados pelo CEA visam melhorar um modelo de previsão graças à sua precisão [34]. Assim, é de notar que o CEA é adequado para auxiliar as pessoas competentes de planeamento urbano na tomada de decisão com o objetivo de aumentar o desempenho energético de bairros e cidades [35].

2.5.3. Estrutura e Funcionamento

A estrutura geral do *City Energy Analyst* (CEA) utiliza sete bases de dados e seis módulos de cálculo como se pode visualizar na figura 12. Foi desenvolvido na linguagem de programação de código Python v2.7 e construído como uma extensão do Sistema de Informações Geográficas ArcGIS v10.3. Algoritmos nativos desta plataforma são usados para armazenar, analisar e visualizar informações em escalas espaciais e temporais.

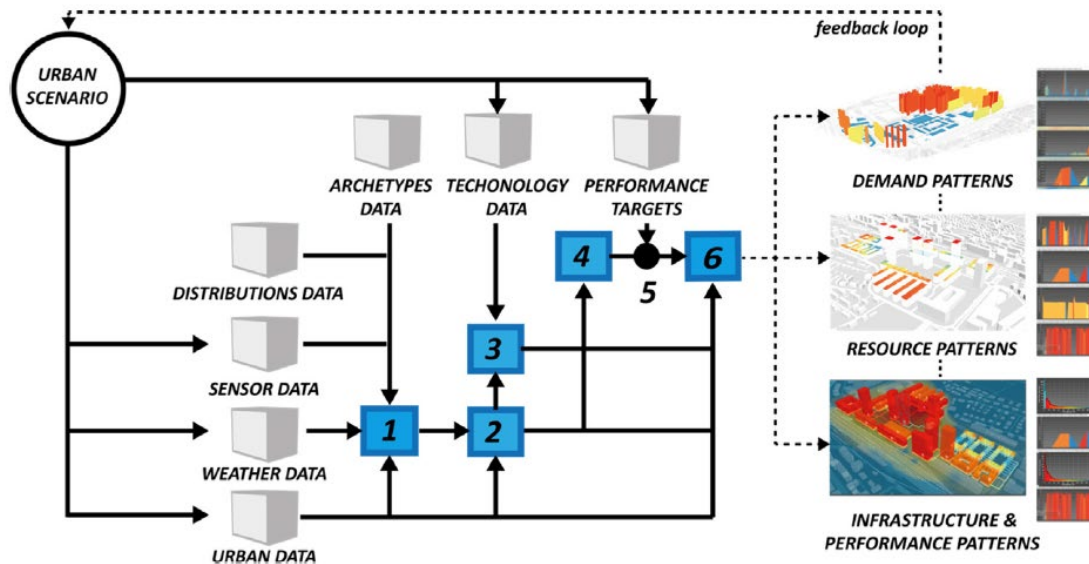


Figura 12: CEA Framework, (1) demand module, (2) resource potential module, (3) systems technology module, (4) system optimization module, (5) decision module, (6) spatiotemporal analysis module. Fonte:[35]

A base de dados meteorológica armazena dados de séries temporais de temperatura ambiente, humidade relativa e transmissividade solar obtidos com o software Meteonorm 7.0.

A base de dados urbana contém informações georreferenciadas de edificações, infraestruturas, recursos locais e topografia. Os dados são recolhidos de base de dados oficiais e *Open Street Maps*. Inclui propriedades como área ocupada, altura, proporções de janela para parede, tipos de sistemas de sombreamento, tipos de ocupação, sistemas de conversão e ano de construção e última renovação. Também inclui informações sobre localização de redes de energia, redes de esgoto, estradas e características do solo e dos corpos de água. Um modelo digital de elevação descreve a topografia da área.

A base de dados de arquétipos descreve as propriedades padrão do setor edificado local em relação à envolvente do edifício e aos sistemas de climatização. A base de dados é baseada em dados estatísticos recolhidos para edifícios construídos antes de 2005. Os valores para outros períodos são obtidos a partir de interpolação linear e regulamentos locais de construção.

A base de dados de distribuições contém dados de séries temporais padrão para todos os tipos de edifícios descritos na base de dados de arquétipos. Essas séries temporais contêm horários de ocupação, taxas mínimas de ventilação e *setpoints* de temperatura e humidade para edifícios. Além disso, também contém requisitos de caudais volumétrica de serviços de água doce e quente. Esses dados são usados em conjunto com os dados de arquétipos no módulo de necessidade.

A base de dados de sensores, como é denominado pelos criadores do programa, é um conjunto de dados complementar contendo dados sobre serviços de energia não padronizados em usos de edifícios, como indústria e outras componentes de infraestrutura (taxas de fluxo de massa, temperaturas de operação etc.)

A base de dados de tecnologias contém dados técnicos e económicos de tecnologias de conversão, distribuição e armazenamento em escala distrital. Estes dados são usados em todo o módulo de tecnologia de sistemas.

A base de dados *performance targets* armazena percentagens de critérios de decisão e valores-chave de desempenho para seleção de opções de infraestrutura e são usados no módulo de decisão.

Os criadores do CEA desenvolveram uma série de módulos de cálculo para simulação do potencial de disponibilidade de recursos, otimização e visualização de sistemas de energia desde o edifício até a escala bairro/distrito. Estes módulos estão representados por números na figura 12. O módulo 1 representa as necessidades dos edifícios. O módulo 2 apresenta uma série de modelos de simulação para avaliação dos recursos energéticos locais. O módulo 3 descreve modelos tecnoeconómicos de tecnologias para conversão, armazenamento e distribuição de energia térmica. O módulo 4 apresenta um método de otimização de dois níveis para dimensionamento e operação de sistemas de energia. Por fim, os módulos 5 e 6 apresentam uma série de métodos para a análise e visualização do desempenho do sistema de energia, respetivamente [35].

Para isso, levou-se em consideração a cadeia de abastecimento simplificada na figura 13. Nesta figura estão retratados todos os fluxos de energia nos subsistemas de geração, conversão, distribuição, emissão e transferência de energia.

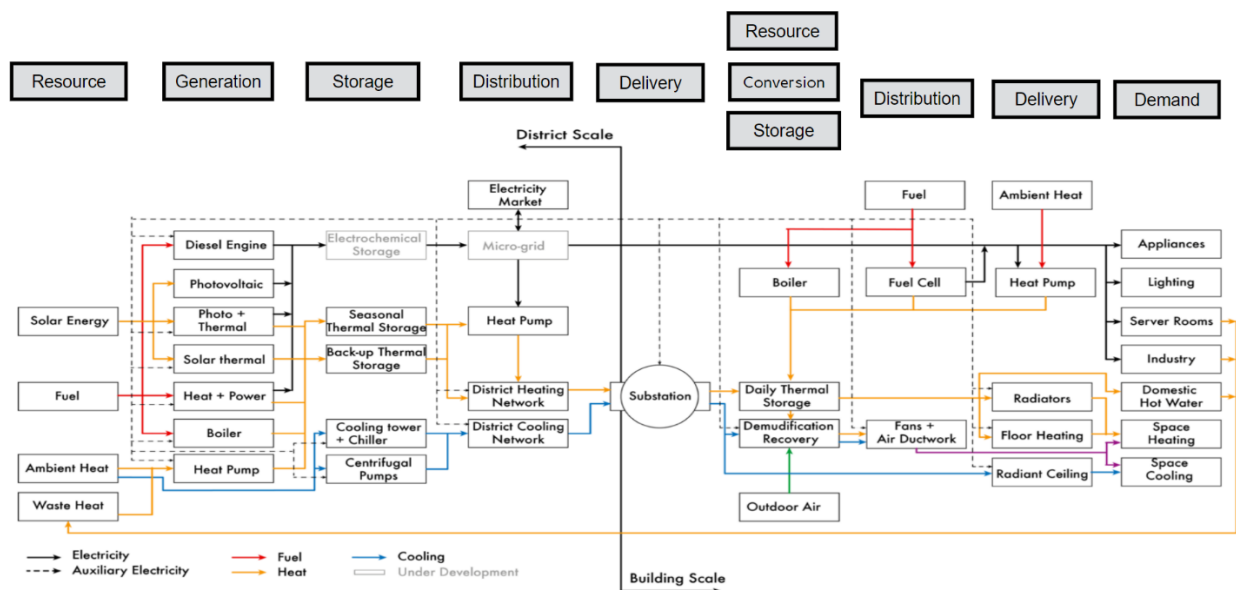


Figura 13: Cadeia de fornecimento de energia simplificada. Fonte:[36]

1. Demand Module

No módulo 1 calcula-se a necessidade de energia em edifícios. Neste modelo, a necessidade de energia final dos edifícios é decomposta em múltiplos usos finais e estimada numa base horária em níveis qualitativos e quantitativos. Assim, permite abordar usos finais, como aquecimento e arrefecimento, água quente sanitária, eletrodomésticos e iluminação do espaço, bem como usos finais mais específicos, como arrefecimento de sala de servidores. Alguns desses usos finais fazem parte da entrada para o modelo de fontes de calor residual potencial apresentado no módulo 2.

2. Resource Potential Module

O módulo de potencial de recursos agrega modelos físicos para avaliação de fontes endógenas de energia como potencial solar no telhado, o calor ambiente (calor geotérmico, águas de lagos) e fontes de calor residual (servidores, processos industriais e esgotos).

3. Systems Technology Module

O módulo de sistemas de tecnologia agrega modelos tecnoeconómicos de diversas unidades de produção, armazenamento e distribuição de energia como bombas de calor, caldeiras de condensação, tecnologias combinadas de calor e energia (turbina de ciclo a gás combinado, células de combustível), tecnologias solares (painéis fotovoltaicos, coletores solares, painéis fotovoltaicos-térmicos), chillers e torre de arrefecimento, armazenamento térmico, subestações e permutadores de calor e bombas de circulação.

4. System Optimization Module

O módulo de otimização do sistema de abastecimento compreende as redes térmicas e otimização do seu tamanho e operação. Tanto o layout quanto o diâmetro das redes térmicas são otimizados para minimizar os custos de investimento e operação. Neste programa é integrado um algoritmo de árvore na plataforma GIS ArcGIS para calcular e representar um layout próximo ao ideal para redes de aquecimento e arrefecimento. A estratégia de otimização de dois níveis foi usada para configurar um sistema energético comunitário para custos totais anuais, emissões (CO₂) e necessidades primárias de energia mínimos. Este problema está sujeito a restrições de disponibilidade de recursos (módulo 2), operação de sistemas de tecnologia (módulo 3) e configuração da rede.

5. Decision Module

No módulo de decisão é, inicialmente, feita uma avaliação de confiabilidade, seguida de uma análise de decisão multicritério e de ciclo de vida, e por fim, é elaborada uma avaliação comparativa.

5.1. Avaliação de confiabilidade

Para avaliar a confiabilidade, realiza-se uma análise de sensibilidade para caracterizar a confiabilidade das configurações ótimas de Pareto¹ e determinar parâmetros influentes do modelo.

¹ As condições necessárias para a obtenção da otimalidade de Pareto relacionam-se à eficiência no consumo, eficiência na produção e eficiência tanto no consumo quanto na produção.

Para isso, avalia-se as variações no preço do gás natural, biogás e eletricidade na largura de banda de $\pm 10\%$ com aumentos de 2%. Para cada aumento, a frente de Pareto é reavaliada e as configurações Pareto-dominantes são selecionadas. O nível de confiabilidade é medido como o número relativo de vezes que uma configuração é Pareto-dominante em relação a outras configurações. Os parâmetros com o maior número associado de configurações descartadas são os mais sensíveis.

5.2. Análise de decisão multicritério

A fim de selecionar configurações que maximizem o valor social, económico e ambiental da área, os criadores do CEA integraram a abordagem de análise de decisão multicritério. Para isso, considera-se três níveis de critérios (social, económico e ambiental) com peso, e seis subcritérios (social: introdução de renováveis, exportação de eletricidade; económico: custos totais anuais de energia, custos operacionais anuais, ambiental: emissões e energia primária não renovável).

5.3. Análise do ciclo de vida

Quanto à análise do ciclo de vida dos edifícios, são avaliados todos os vetores de energia relacionados à construção/demolição, operação e mobilidade induzida. Esses vetores relacionados à operação de edifícios são calculados com o procedimento apresentado nos módulos 1–4. O método consiste numa relação da base de dados de energia cinzenta e emissões com o tipo de ocupação, ano de construção, ano de retrofit e área construída dos edifícios. Esses dados são extraídos da base de dados urbanos, como vem descrito na página 23.

5.4. Avaliação comparativa

Na última etapa do módulo de decisão do desempenho dos edifícios, são comparados os resultados da configuração ótima de Pareto com as médias locais de consumo de energia final, valores-alvo da pegada de carbono e do consumo de energia primária.

6. *Spatiotemporal Analysis Module*

No último módulo, é desenvolvida uma interface 4D para representar fluxos de energia dependentes do tempo entre edifícios. Esta interface serve como um catalisador de discussões entre os tomadores de decisão. A interface visual serve, adicionalmente, como um ciclo de feedback (figura 1) para projetistas de sistemas de energia urbanos que, mapeando soluções finais de infraestrutura, padrões de procura e disponibilidade de recursos podem começar a fazer as modificações necessárias para traduzir essas configurações em soluções mais adaptáveis ao mercado.

2.5.4. Vantagens, Aplicações e Desafios

O CEA apresenta como vantagens:

- 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.

Contudo, apresenta alguns desafios:

- Aumento da capacidade de análise para incluir a rede, recursos e otimização de transportes urbanos e simulação de transportes elétricos;
- Instalação e utilização.

Quanto à sua aplicação, comparando grandes unidades militares com bairros e quarteirões, ambos podem auxiliar-se deste software, pois torna-se exaustivo analisar os edifícios individualmente no caso das unidades militares. Estas apresentam diferentes áreas com necessidades distintas, desde edifícios residenciais, refeitórios, auditórios, salas de aula, picadeiros, recintos desportivos, etc. Podem então realizar-se vários estudos e implementação de modelos de energia com o objetivo de prever o impacto no campus da Amadora e da sua modernização.

3. Metodologia

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada e em cada secção será descrito em detalhe os aspetos referentes a cada uma. Os procedimentos efetuados relativos ao método de estudo aplicado na presente dissertação são apresentados na figura 14.

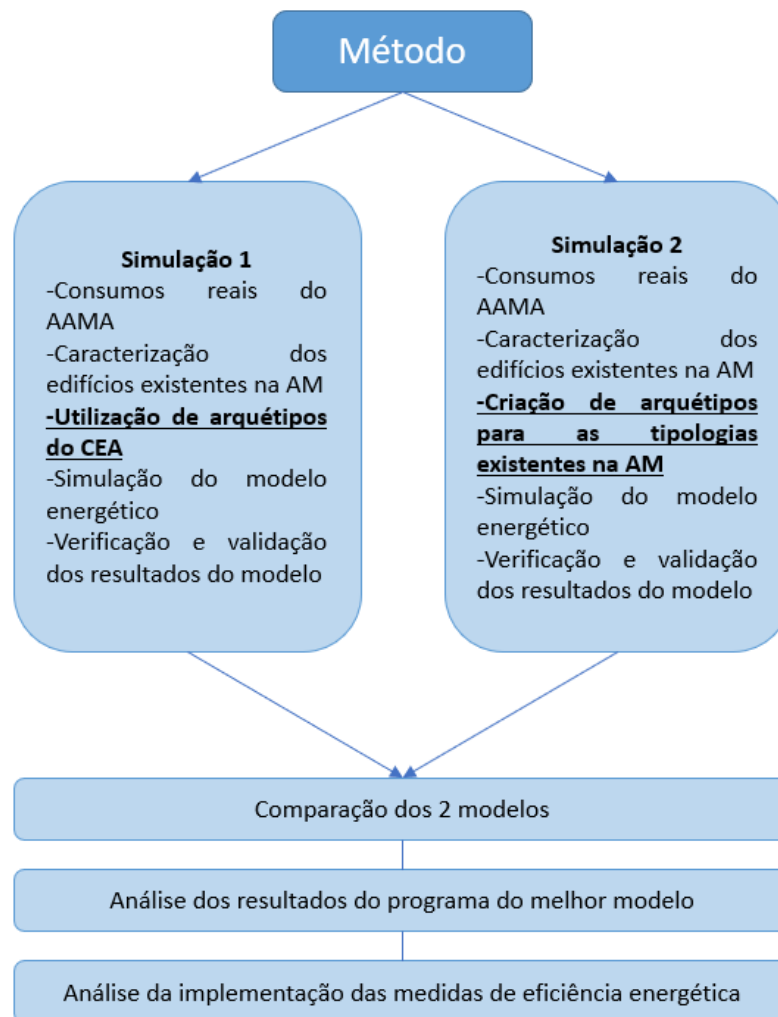


Figura 14: Procedimentos efetuados para o caso de estudo

3.1. Caracterização dos edifícios existentes na AM

O primeiro passo, e um dos aspetos principais na criação de um UBEM, é a recolha de dados da geometria e sistemas de cada edifício.

Os dados relativos à geometria do edifício podem ser adquiridos através de bases de dados de sistemas de informação geográfica já existentes ou criadas de raiz. Este tipo de dados contempla a altura e forma do edifício, número de andares acima e abaixo do solo.

Os sistemas do edifício incluem a construção, envolvente, equipamentos, iluminação, sistemas de AVAC, sistemas AQS e sistemas de fornecimento do edifício. Os dados dos sistemas do edifício são inseridos num arquétipo já estabelecido para um certo tipo de edifícios ou este é criado e os dados são inseridos manualmente [37].

3.2. Criação de arquétipos para as tipologias existentes

Numa segunda fase são criados os arquétipos para cada categoria de edifícios presente na AM.

Edifícios de uso semelhante, ano de construção e tamanho podem ser organizados em arquétipos e pode ser criada uma base de dados de arquétipos, partindo de uma combinação de dados [37].

Enquanto para a geometria os dados podiam ser medidos para um grupo limitado de edifícios, para os sistemas, quando se pretende analisar um grupo de edifícios com os consumos diferentes, as medições tornam-se impraticáveis devido ao grande número de propriedades a caracterizar. Assim, agruparam-se os edifícios de categorias parecidas por consumos semelhantes, considerando ferramentas estatísticas para criar um arquétipo de edifício que represente esses mesmos edifícios.

3.3. Ferramenta UBEM – CEA

Em relação às ferramentas UBEM mostradas no subcapítulo 2.1, utilizou-se o software *City Energy Analyst* (CEA) para a simulação termodinâmica que obedece aos critérios estabelecidos de acordo com o ASHRAE 90.1, ISSO 13790 e ISO 13780 [35].

Esta ferramenta apresenta boas faculdades como a capacidade de desenvolver modelos numa só interface que permite uma melhor compreensão para a tomada de decisão e funciona como uma *toolbox* no programa ArcGIS. Este programa é intuitivo e é possível a visualização do Campus e dos edifícios alvos do estudo.

3.4. Análise dos resultados do programa

Nesta etapa são apresentados e analisados os resultados da simulação.

Na plataforma são apresentados dois cenários: um utilizando apenas os arquétipos já existentes no CEA com base em edifícios suíços e outro aplicando os arquétipos criados com base nos edifícios do AAMA.

Pelos dados dos consumos mensais do AAMA, procedeu-se à verificação e validação dos resultados do programa pelo método apresentado no subcapítulo 2.2. Através destes dados, determinou-se o impacto de cada edifício no valor total do consumo do AAMA.

Após analisar os edifícios mais impactantes no consumo do AAMA, identificou-se a necessidade de melhorar a eficiência energética destes edifícios, tendo-se implementado para esses medidas que respondessem a esse indicador.

3.5. Análise da implementação das medidas de eficiência energética

Com a necessidade de melhorar a eficiência energética dos edifícios identificados como os de maior consumo, foram apresentadas medidas ativas e passivas, tendo em consideração o PNEC 2030. Estas medidas para melhoria energética dos edifícios do campus foram analisadas de acordo com viabilidade tecnológica e económica.

Este estudo pretende também mostrar a redução de tempo e o esforço necessário na avaliação das políticas de redução de consumo energético e emissões de carbono.

A figura 15 sintetiza toda a metodologia do presente trabalho.

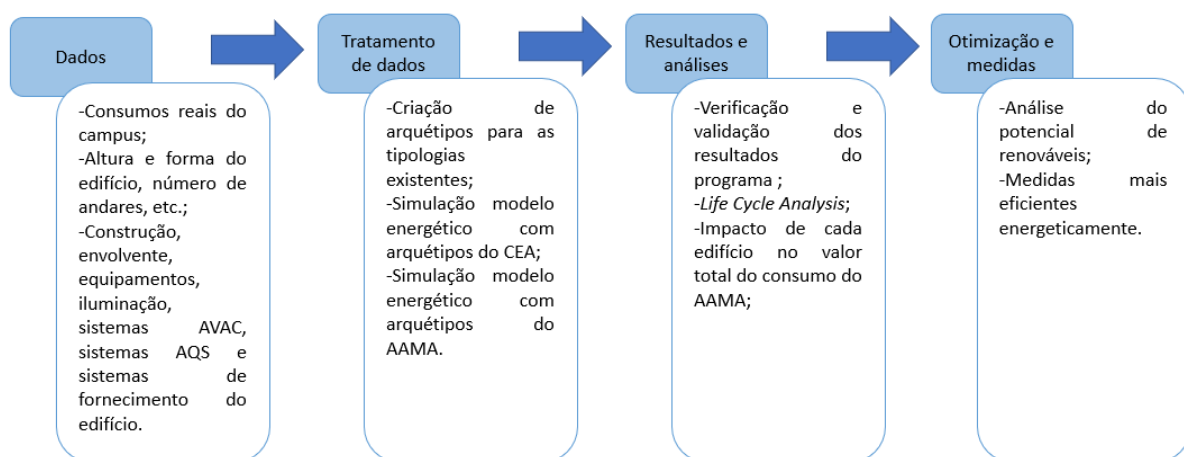


Figura 15: Metodologia de modelação energética do caso de estudo

4. Caso de Estudo

Para o cumprimento do objetivo da presente dissertação, o Aquartelamento da Academia Militar da Amadora (AAMA) foi escolhido para caso de estudo, dado a ter uma grande diversidade de tipologias de consumo nos vários edifícios presentes nas diferentes unidades militares do Exército Português, onde o perfil de ocupação é semelhante. Desta forma, o estudo irá ser conduzido nesta unidade militar que servirá de base para aumentar a eficiência energética de todos os edifícios do Exército Português, de tal forma que se baixe o valor da fatura energética, uma vez que estes são o principal motivo de uma parcela significativa desta fatura.

A Academia Militar (AM) tem um papel relevante para o Exército Português. A missão da AM é formar e preparar futuros Oficiais para os quadros permanentes do Exército e da Guarda Nacional Republicana (GNR), dotando-os das competências necessárias ao desenvolvimento das suas funções e promover o seu desenvolvimento individual que permita o exercício do comando e da liderança [38].

A sede da AM fica localizada em Arroios (Lisboa), e é aqui que residem os alunos da AM que estão a tirar os mestrados em Engenharia Mecânica, Eletrotécnica e Civil no IST e também os cursos de Medicina. Os alunos a frequentar a licenciatura das diversas engenharias e dos restantes cursos vivem em regime de internato no AAMA e, atualmente, representam cerca 85% dos alunos da instituição. Os dois polos anteriormente mencionados (Sede e AAMA) compõem a AM no seu todo.

Este capítulo está dividido em duas partes para uma mais fácil compreensão. Numa primeira parte será feita uma caracterização mais detalhada do AAMA, bem como os seus consumos e tarifas associados. Numa segunda parte, será feita a caracterização das diversas tipologias de consumos nos diferentes edifícios existentes no AAMA, para posteriormente serem processados no *City Energy Analyst* (CEA).



Figura 16: Campus do Aquartelamento da Academia Militar da Amadora. Fonte: Imagens satélite (google earth)

4.1. Caracterização do AAMA

No AAMA é feita toda a formação de grande parte dos cadetes, tanto a componente académica como física, militar e comportamental. Por esta razão, cerca de 85% dos alunos estão neste polo. Além disto, os alunos vivem em regime de internato, o que significa um maior tempo de uso das infraestruturas e um maior gasto de energia. Do mesmo modo, vários servidores desta unidade pernoitam no aquartelamento devido à distância a casa ou outro motivo.

Para cumprimento da missão da AM, o AAMA está equipado com uma serie de infraestruturas que ocupam cerca de 32 000 m^2 de um terreno total de, aproximadamente, 390 220 m^2 . A área das infraestruturas que perfazem este valor é constituída pelo edifício de comando, edifício da direção de ensino, edifícios de aulas, caserna dos alunos, caserna dos sargentos, caserna de praças, casa da guarda, refeitório e cozinha, recintos desportivos, picadeiros e cavalariças, bar e espaço de convívio, arrecadações de material de guerra e auditórios.

Com objetivo de visualizar melhor a distribuição dos edifícios da unidade, onde se situam e a sua função, apresenta se em baixo a figura 17. A figura abaixo mostra a vista aérea 2D do AAMA.



Figura 17: Infraestruturas do AAMA. Fonte: Imagens satélite (google earth)

a) Edifício A: Existem diversas funções neste edifício como o exercício das funções dos docentes para garantir a aprendizagem de conhecimentos dos alunos; fornecer informação fiável e acesso rápido a

informação; e armazenar arquivos e dados. Este edifício dispõe de salas de aulas, laboratórios, gabinetes de docentes, biblioteca e servidores;

b) Edifício B: A função principal deste edifício é garantir a aprendizagem de conhecimentos, habilidades e valores necessários à formação dos alunos. Este edifício dispõe da maioria das salas de aulas e alguns gabinetes;

c) Edifício da Direção de Ensino: Neste edifício coordena-se e planeia-se a formação académica, técnica e científica dos alunos da AM. Para isso, dispõe de salas de reunião e gabinetes de apoio;

d) Auditórios: Possui dois auditórios e um local de intervalos com bar e espaço de convívio. Este recinto visa apresentar a um público diversos temas da área do saber, bem como diferentes tipos de celebrações;

e) Edifício de Comando: Destina-se a dirigir, coordenar e controlar a unidade, subunidades e estabelecimentos. Neste edifício encontram-se os gabinetes do comando, assim com os gabinetes responsáveis pela formação militar, comportamental e das várias secções de recursos humanos e financeiros. Adicionalmente, este edifício possui ainda salas de aula e um estúdio TV;

f) Refeitório e cozinha: Visa assegurar o confeccionamento e o fornecimento de refeições a todos os utilizadores da AAMA;

g) Companhia de Comando e Serviços (CCS): Órgão responsável de assegurar o normal funcionamento das atividades logísticas e administrativas da AM;

h) Edifício de Alunos: Tem a componente social como principal função, sendo um local onde os alunos podem conviver. Este edifício dispõe de um bar, salas de convívio e um cabeleireiro;

i) Caserna de alunos da 1ª e 2ª Companhia: Alberga os alunos da 1ª e 2ª Companhia (1º e 2º ano). Contém ainda os gabinetes dos comandantes das companhias, dos assuntos administrativos (secretarias) e ainda a arrecadação de material de guerra (AMG);

j) Caserna de alunos da 3ª e 4ª Companhia: Alberga os alunos da 3ª e 4ª Companhia (3º e 4º ano). Contém ainda os gabinetes dos comandantes das companhias, dos assuntos administrativos (secretarias) e ainda a AMG;

k) Caserna dos Sargentos: Dormitório para os Sargentos do AAMA e ainda alguns gabinetes;

l) Picadeiro Coberto e Cavalariças: O picadeiro destina-se ao ensino e prática de equitação, enquanto as cavalariças alojam os cavalos e dispõe do necessário para o seu tratamento;

m) Recintos desportivos 1: Neste edifício coordena-se e planeia-se o treino físico dos alunos da AM. Para isso, dispõe de gabinetes dos responsáveis pela formação física, pavilhões de jogos, ginástica e uma sala de judo;

n) Recintos desportivos 2: Este edifício apoia o anterior, possuindo mais pavilhões gimnodesportivos;

o) Pavilhão Koboyashi: Utilizado com o mesmo objetivo do recinto anterior. Este pavilhão é específico para a prática de futsal e ainda para a formação de boxe;

p) Igreja: Uso para o culto, especialmente cristão, dos servidores da AM e restantes convidados;

q) Casa da Guarda: Estrutura junto da entrada da AM (Porta de Armas) que controla os acessos à mesma. Este serviço é feito todos os dias durante 24 horas;

r) Antigas lavandarias;

s) Edifício CINAMIL.

4.1.1. Tipologias de consumo existentes no AAMA

A diversidade de edifícios existente é grande para conseguir desempenhar todas as funções inerentes ao cumprimento da missão da AM. A fim de classificar estes edifícios em tipologias de consumo diferentes, podemos dividir quanto a **ensino, biblioteca, refeitório, bar, auditório, dormitórios, recintos desportivos, ginásio, picadeiro, arrecadação, átrio e lavandarias**. Esta divisão é feita, visto que existem diferenças nas funções e propósitos de cada edifício, tal como o seu consumo, uma vez que, a sua envolvente, ganhos internos, sistemas AVAC, AQS e de fornecimento, etc. também irão ser diferentes.

Os espaços anteriormente referidos são fundamentais para o cumprimento da principal missão da AM que é formar oficiais do Exército e da GNR. No entanto, os consumos destes espaços podem ser minimizados sem retirar qualquer potencial aos mesmos.

4.1.2. Caracterização da Zona

O zonamento climático do país baseia-se na Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos (NUTS). A nomenclatura subdivide-se em 3 níveis (NUTS I, NUTS II, NUTS III), definidos de acordo com critérios populacionais, administrativos e geográficos. [39]

Quanto ao AAMA, este fica localizado no município da Amadora inserido no Continente no que toca ao nível NUTS I, e área Metropolitana de Lisboa no que refere ao nível NUTS II e III.

Segundo a Portaria 6479-H-2021, os valores dos parâmetros climáticos X relativos a um certo local, são obtidos a partir de valores de referência X_{ref} para cada NUTS III e ajustados de acordo com a altitude desse local, z . As correções de altitude são lineares, com declive a e proporcionais à diferença entre a altitude do local e uma altitude de referência z_{ref} para a NUTS III, como mostra a seguinte expressão:

$$X = X_{ref} + a(z - z_{ref}) \quad [\text{meses ou } ^\circ\text{C}] \quad (1)$$

A expressão (1) foi utilizada para definir as zonas climáticas do AAMA. Para a aplicação de requisitos de qualidade térmica da envolvente, são definidas três zonas climáticas de inverno (I1, I2 e I3) e três zonas climáticas de verão (V1, V2 e V3).

O z local foi medido com auxílio ao Sistema de Informação Geográfica para Apoio às Operações (SIGOp) do Exército Português. O z local medido foi 136m como mostra o Anexo A.

Para a estação de aquecimento (inverno), os parâmetros climáticos são o número de graus-dias (GD), na base de 18 °C, a duração da estação de aquecimento (M), a temperatura exterior média do mês mais frio ($\theta_{ext, i}$) e a energia solar média mensal durante a estação, recebida numa superfície vertical orientada a Sul (G_{Sul}).

No sentido de definir a zona climática de inverno, foi calculado o número de graus-dias, correspondente à estação de aquecimento, conforme o Anexo A. Obteve-se o valor de 1116.9 °C, que se caracteriza como inverno ameno, isto é l_1 . O valor da duração desta estação e da temperatura exterior média do mês mais frio também foi calculada, obtendo-se um valor aproximado de 5.4 meses e 10.7°C.

Para a estação de arrefecimento (verão), os parâmetros climáticos são a temperatura exterior média ($\theta_{ext, v}$), a duração da estação (L_V) e a energia solar acumulada durante a estação, recebida na horizontal (inclinação 0°) e em superfícies verticais (inclinação 90°) para os quatro pontos cardeais e os quatro pontos colaterais (I_{Sol}).

A fim de definir a zona climática de verão, foi calculada a temperatura média exterior correspondente à estação de arrefecimento ($\theta_{ext, i}$), conforme o Anexo A. Obteve-se o valor de 21.4 °C, que se caracteriza como verão moderado, isto é V_2 . O valor da duração desta estação é considerado constante e tem o valor de 2928 horas, correspondentes a 4 meses.

Em forma de resumo e de acordo com a Portaria 6479-H-2021, os parâmetros climáticos da zona da Amadora, são apresentados na tabela 2. Estes dados foram todos calculados detalhadamente no Anexo A.

Estação de Aquecimento	M (meses)	$\theta_{ext, i}$ (°C)	GD (°C)				G_{Sul} (kWh/m2 por mês)				
	5.4	10.7	1116.9				150				
Estação de Arrefecimento	L_V (meses)	$\theta_{ext, v}$ (°C)	I_{Sol} (kWh/m2 acumulados de junho a setembro)								
			0°	90°N	90°NE	90°E	90°SE	90°S	90°SW	90°W	90°NW
	4	21.4	840	225	365	500	495	410	495	500	365

Tabela 2: Parâmetros climáticos do AAMA

4.1.3. Consumos do AAMA

Os consumos energéticos do AAMA provém de duas fontes: energia elétrica e gás natural.

Quanto aos consumos de energia elétrica, estes foram adquiridos através das faturas mensais.

A figura 18 representa os consumos anuais de energia ativa dos anos 2019, 2020 e 2021.

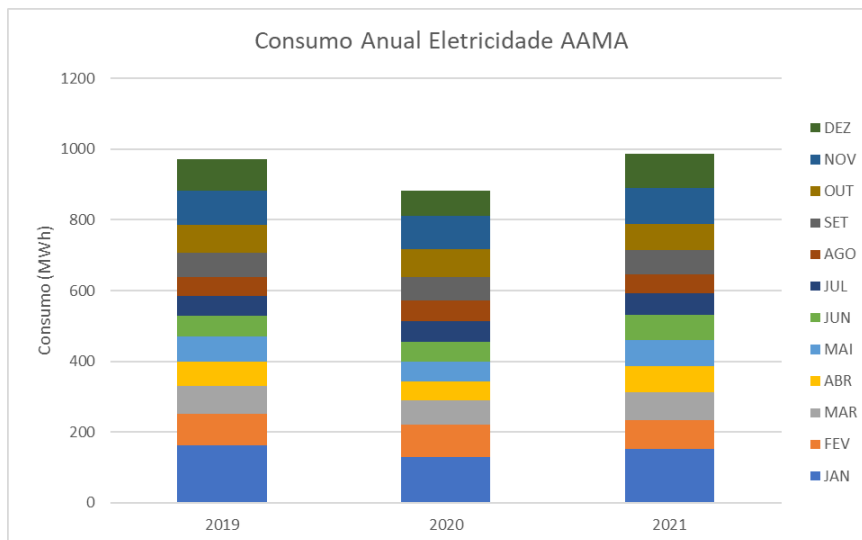


Figura 18: Consumos anuais de eletricidade do AAMA dos anos 2019, 2020 e 2021

Perante a figura apresentada, é de notar uma redução dos consumos elétricos no ano 2020 em relação a 2019 e uma recuperação dos níveis de 2019 no ano de 2021. Este facto pode ser justificado pela pandemia COVID-19 que se sucedeu nesse ano. O campus mostra assim uma tendência mais ou menos constante, não analisando o ano de 2020, consumindo então 970 MWh e 986 MWh nos anos 2019 e 2021, respetivamente. Após realizada a análise do consumo anual, é importante fazer a análise do consumo mensal que pode ser visualizado na figura 19.

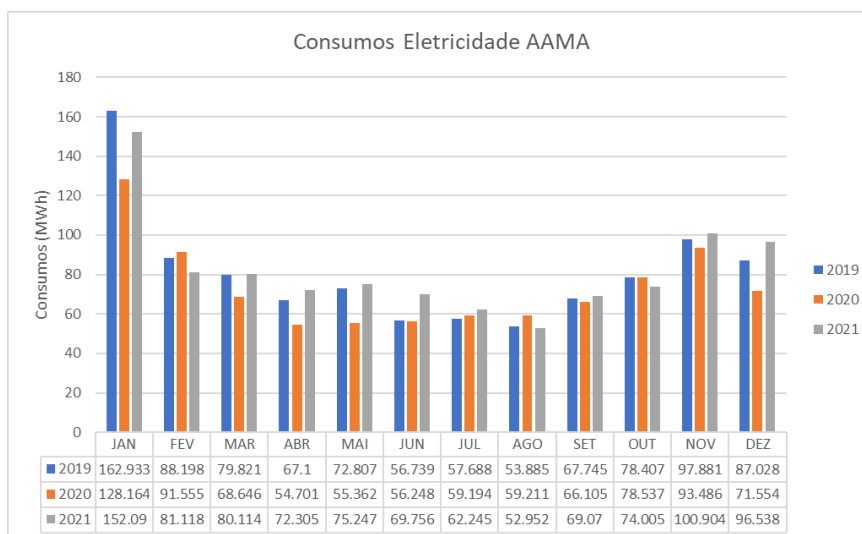


Figura 19: Consumos mensais de eletricidade do AAMA dos anos 2019, 2020 e 2021

O consumo de eletricidade mensal no campus atinge o seu pico em janeiro e é maior nos meses de inverno. Apresenta uma tendência decrescente até aos meses de verão, atingindo o seu

mínimo em agosto que corresponde ao mês de férias dos alunos da AM e exercícios militares. Esta tendência inverte-se ao atingir o seu mínimo, crescendo até janeiro. Estes resultados são expectáveis uma vez que o AAMA se situa numa zona climática de inverno ameno e verão moderado.

Os consumos de gás natural foram adquiridos através das faturas mensais dos anos 2019, 2020 e 2021 estão representados nas figura 20 e 21. O ano que demonstrou maior consumo de gás natural foi o de 2021, tendo sido consumidos 689 MWh de gás. Estes apresentam tendências mensais semelhantes à eletricidade.

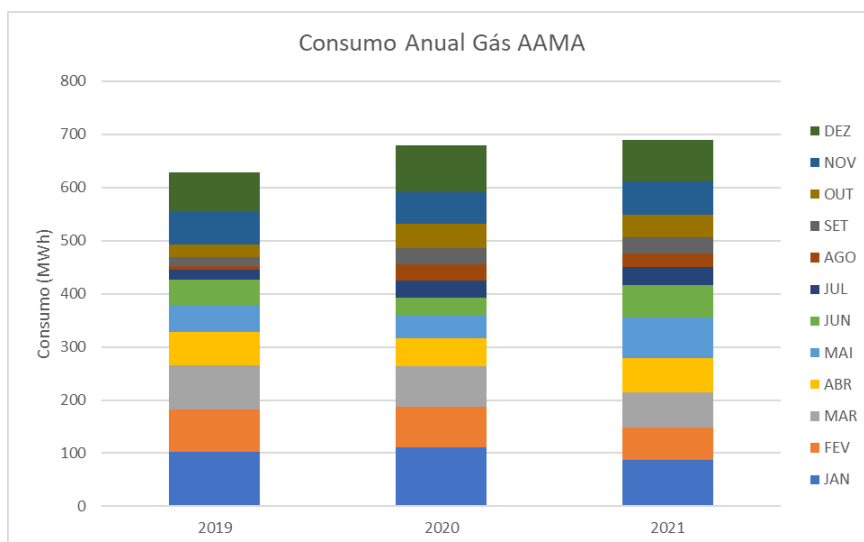


Figura 20: Consumos anuais de gás do AAMA dos anos 2019, 2020 e 2021

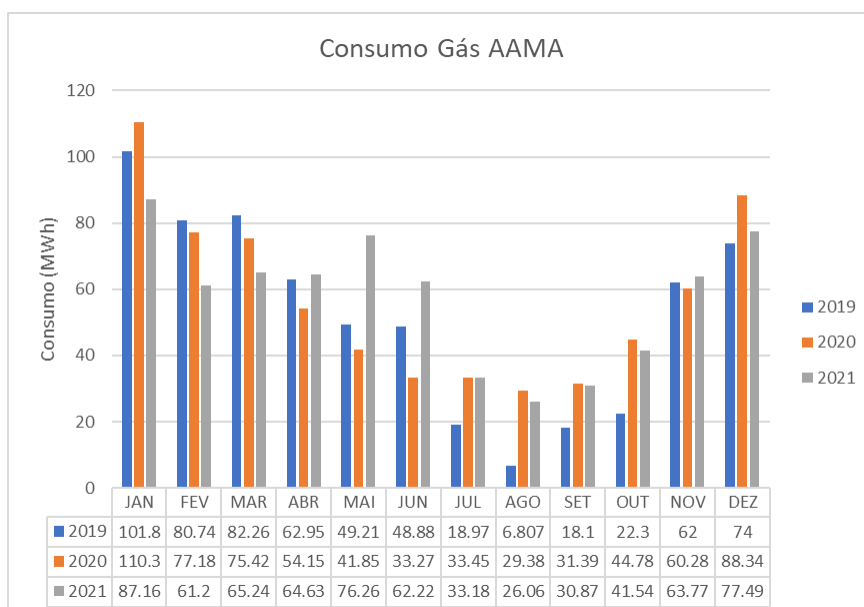


Figura 21: Consumos mensais de gás do AAMA dos anos 2019, 2020 e 2021

4.1.4. Gastos e Tarifas

Relativamente aos gastos de eletricidade, o AAMA obteve uma fatura anual de 67794€, 53202€ e 47468€ respetivos aos anos de 2019, 2020 e 2021 como demonstra a figura 22. Esta queda abrupta deve-se à mudança de fornecedor para a Endesa como será explicado de seguida.

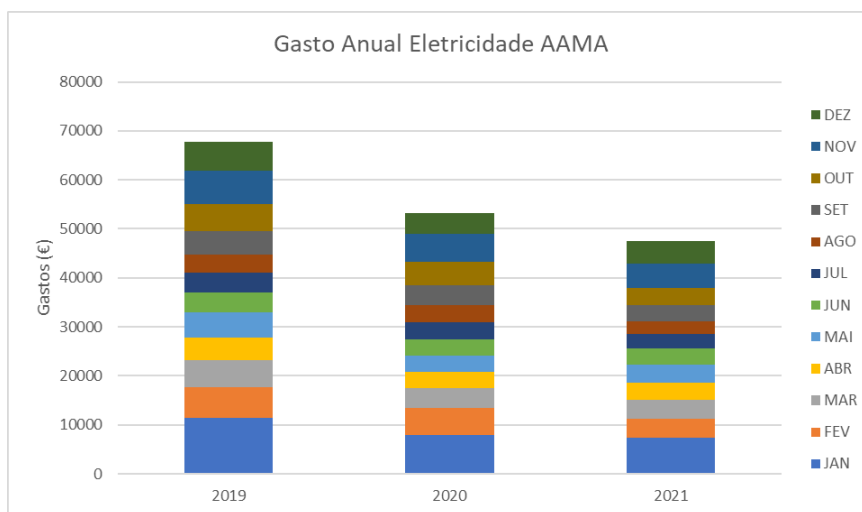


Figura 22: Gastos anuais de eletricidade do AAMA dos anos 2019, 2020 e 2021

O panorama mensal está apresentado na figura 23.

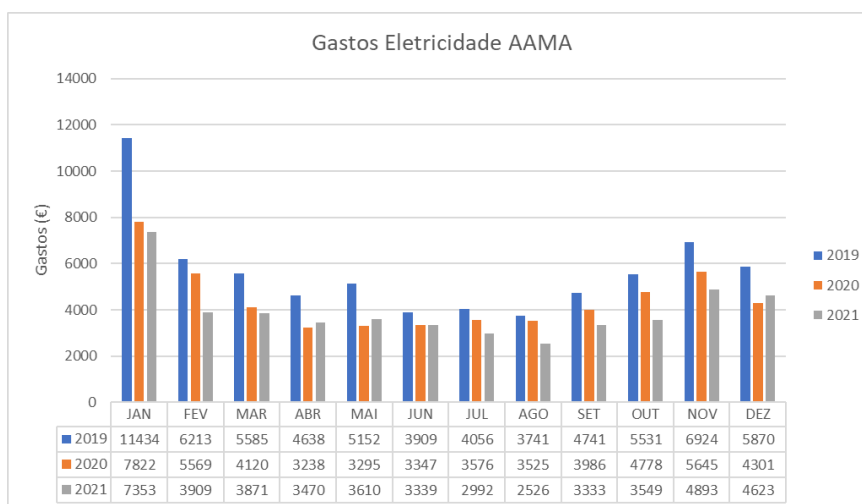


Figura 23: Gastos mensais de eletricidade do AAMA dos anos 2019, 2020 e 2021

De acordo como verificado nas figuras 22 e 23, a fatura de eletricidade anual verifica um decréscimo gradual de 2019 até 2021, mesmo verificando-se um menor consumo em 2020 do que nos outros dois anos. Isto prende-se com o facto de as tarifas terem reduzido durante estes anos e é bastante importante saber quanto é pago por kWh.

A AM no que toca à distribuição e utilização de energia elétrica apresenta média tensão, por isso a tarifa tetra-horária é a única opção horária. Na tarifa tetra-horária, os custos variam conforme o horário em que a energia elétrica é consumida e existem quatro períodos distintos. Estes valores estão presentes na tabela 3, bem como a companhia que fornece a energia.

Ano	Empresa	Tarifa (€/kWh)			
		Ponta	Cheia	Vazio	Super Vazio
2019	Iberdrola	0.0800	0.0751	0.0595	0.0566
2020	Iberdrola	0.0685	0.0642	0.0537	0.0485
2021	Endesa	0.0552	0.0504	0.0436	0.0404

Tabela 3: Tarifas tetra-horária do AAMA dos anos 2019, 2020 e 2021

Quanto aos gastos correspondentes a gás natural, o AAMA obteve uma fatura anual de 21446€, 17902€ e 19726€ respetivos aos anos de 2019, 2020 e 2021. A figura 24 mostra os valores dos gastos mensais de gás naturais do AAMA.

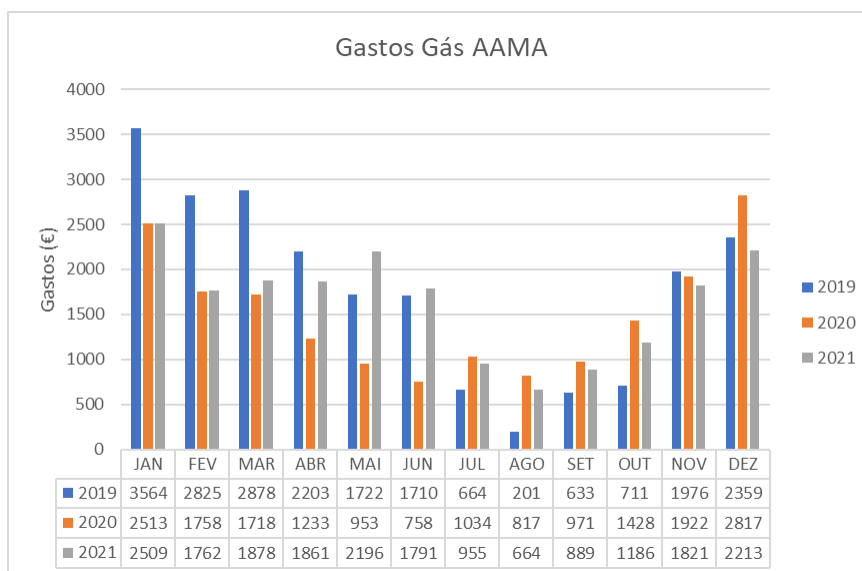


Figura 24: Gastos mensais de gás natural do AAMA dos anos 2019, 2020 e 2021

A AM totaliza 89240€, 71104€ e 67194€ em consumo energético correspondente aos anos de 2019, 2020 e 2021. Nestes anos verifica-se uma redução de cerca de 20 mil euros na fatura energética. Contudo, estas faturas ainda apresentam altas importâncias, algo que este trabalho tem o objetivo de reduzir.

4.2. Caracterização das diversas tipologias de edifícios existentes no AAMA

Neste subcapítulo será feita a caracterização das diversas tipologias de consumos nos diferentes edifícios existentes no AAMA, para posteriormente estes dados serem processados no *City Energy Analyst* (CEA). A aquisição de dados e o pré-tratamento dos mesmos está dividido em definição padrão dos edifícios, caracterização da envolvente, ganhos internos e conforto interno, perfis de ocupação, sistemas AVAC e AQS e ainda sistemas de fornecimento.

4.2.1. Definição padrão

A definição padrão de cada edifício consiste no ano da construção, no número de andares, acima e abaixo do solo, e também na altura do edifício, acima e abaixo do solo. Estes dados foram retirados das plantas dos edifícios e estão representados na tabela 4.

Edifício	Ano	Nº andares acima do solo	Altura acima do solo [m]	Nº andares abaixo do solo	Altura abaixo do solo [m]
Edifício A	2002	3	13.1	0	0
Edifício B	2003	3	13.9	0	0
Edifício da Direção de Ensino	2006	2	7.8	1	2.8
Auditórios	2006	1	16.6	1	3.5
Edifício de Comando	1986	2	9.8	0	0
Refeitório e cozinha	2003	1	5.0	0	0
CCS	2004	2	6.0	0	0
Edifício de Alunos	2003	2	12.0	1	3
Caserna de alunos (1ª, 2ª, 3ª e 4ª Companhias)	2003	3	10.3	0	0
Caserna dos Sargentos	1998	1	3.6	0	0
Picadeiro Coberto e Cavalariças	2020	1	7.0	0	0
Recintos desportivos 1	2020	1	7.0	0	0
Recintos desportivos 2	1998	1	5.0	0	0
Pavilhão Koboyashi	1995	1	7.1	0	0
Igreja	2020	1	4.5	0	0
Casa da Guarda	1970	1	3.0	0	0
Antigas lavandarias	1970	1	3.6	0	0
Edifício CINAMIL	2020	1	8.0	0	0

Tabela 4: Definição padrão dos edifícios do AAMA

Numa análise geral, nota-se que os edifícios mais altos são as casernas de aluno, os edifícios de aulas (A e B) e o edifício de alunos. Ou seja, são os edifícios de utilização dos alunos, os que correspondem à maioria do efetivo da AM.

Os edifícios estão divididos em várias secções, como por exemplo o edifício de Comando que é composto pelo bloco norte, centro e sul. É de referir que estas secções/blocos tem alturas diferentes, e nesse sentido, o valor de altura do edifício que foi apresentado na tabela é o valor da maior altura destas secções. No entanto, os dados a inserir no CEA, serão a altura de cada secção, de modo a obter um resultado mais preciso.

4.2.2. Caracterização da envolvente

A envolvente de um edifício é constituída pelo conjunto dos elementos que separam os espaços interiores úteis do exterior, dos espaços interiores não úteis, do solo, de edifícios adjacentes e de outras frações vizinhas [24].

Os elementos que caracterizam a envolvente são o tipo de construção, infiltração, tipo de janelas, corte construtivo de paredes, tetos e chão, tipo de sombreamento e ainda outros rácios importantes.

Em primeiro lugar, o tipo de construção da envolvente de um edifício prende-se com a capacidade calorífica interna por unidade de área climatizada. A construção pode ser classificada como *very light*, *light*, *medium*, *heavy* ou *very heavy*, de acordo com a norma ISO 13790. Este parâmetro é calculado pelo *Simple hourly method* e os valores estão na tabela 5.

Descrição	Cm_Af [J/Km ²]	Edifícios
<i>Very light</i>	80 000	q)
<i>Light</i>	110 000	k), l), n), p) e r)
<i>Medium</i>	165 000	c), f), g), h), m) e o)
<i>Heavy</i>	260 000	a), b), d), e), i), j) e s)
<i>Very heavy</i>	370 000	Nenhum

Tabela 5: Tipo de construção da envolvente dos edifícios do AAMA

Para atingir a pressão de equilíbrio, a quantidade de ar que sai e que entra no espaço deve ser a mesma. A quantidade de ar trocada com a envolvente é medida em ACH50, que é a abreviação de *Air Changes per Hour* com uma diferença de pressão de 50 Pa. Isto significa que para 1 ACH@50, acontece uma troca completa de ar a cada 60 minutos. Para caracterizar este parâmetro foram criadas as classes *highly tight*, *tight*, *medium*, *medium leaky*, *leak* e *very leaky* como mostra a tabela 6.

Descrição	ACH@50[1/h]	Edifícios
<i>Very tight</i>	1	Nenhum
<i>Tight</i>	2	c), q), r)
<i>Medium</i>	3	a), b), d), g), i), j), k), p)
<i>Medium Leaky</i>	4	e), h), l), m), n), o)
<i>Leak</i>	5	f)
<i>Very leaky</i>	6	s)

Tabela 6: Tipos de infiltração dos edifícios do AAMA

A envolvente opaca de um edifício são todos os elementos que mantêm um ambiente interior aquecido ou arrefecido e facilitam o seu controlo climático. A caracterização térmica de elementos opacos, como paredes, tetos e chão deve ser elaborada consoante o coeficiente de transmissão térmica, o coeficiente de absorção solar, a emissividade da superfície externa, a reflectância no espectro vermelho e as emissões por m² de parede, telhado ou chão de acordo com todo o ciclo de vida do edifício. Esta caracterização foi feita de acordo com a norma ISO 13790 e a Portaria 6476-H/2021 e está presente na tabela 7.

JANELAS					
Descrição	U	G	e	F_F	GHG
Vidros simples	4.8	0.85	0.89	0.2	47
Vidros duplos	3.1	0.75	0.89	0.2	62
TELHADOS					
Descrição	U	a	e	r	GHG
Telhas de barro - construção antiga	0.3	0.55	0.91	0.45	112
Tinta branca sobre gesso e betão - telhado novo	0.15	0.3	0.84	0.7	113
Telhado sanduíche vermelho com 6 cm de espessura	0.3424	0.54	0.91	0.46	112
Telhado sanduíche branco com 3 cm de espessura	0.5	0.34	0.91	0.66	112
PAREDES					
Descrição	U	a	e	r	GHG
Tinta branca sobre gesso e tijolos de barro - prédio antigo	0.8	0.3	0.84	0.7	112
Bloco de betão exposto - prédio antigo	0.75	0.6	0.95	0.4	112
Tinta branca sobre gesso e tijolo de barro - prédio novo	0.3	0.3	0.84	0.7	112
Painel sanduiche branco	0.16	0.3	0.84	0.7	112
Tinta vermelha sobre gesso e tijolos de barro - prédio antigo	0.8	0.75	0.88	0.25	112
Divisória interna em tijolo	3.2	0.6	0.95	0.4	34
Divisória interna em placa de gesso	3.2	0.6	0.95	0.4	73
PAVIMENTO					
Descrição	U			GHG	
Piso de betão antigo	2.9			113	
Piso de betão renovado	0.28			157	
Piso de betão novo	0.25			180	
Piso de betão, antigo - cave (inclui escavação)	2.9			248	
Piso de betão, renovado - cave (inclui escavação)	0.28			292	
Piso de betão, novo - cave (inclui escavação)	0.25			315	
SOMBREAMENTO					
Descrição	rf_sh				
Estores de rolo	0.08				
Venezianas	0.15				

Tabela 7: Caracterização da envolvente

NOTA: $U(W/m^2)$, $F_F(m^2_{caixilharia}/m^2_{janela})$, $GHG(kg_{CO2}/m^2)$

Na tabela 8 é possível visualizar os tipos de envolvente opaca existente no AAMA.

Tipos de parede			
Parede Interna	Código	Parede Externa	Código
Divisória interna em tijolo	PI1	Tinta branca sobre gesso e tijolos de barro - prédio antigo	PE1
		Bloco de betão exposto - prédio antigo	PE2
Divisória interna em placa de gesso	PI2	Tinta branca sobre gesso e tijolo de barro - prédio novo	PE3
		Painel sanduiche branco	PE4
		Tinta vermelha sobre gesso e tijolos de barro - prédio antigo	PE5
Tipos de pavimento			
Piso interno	Código	Piso subsolo	Código
Piso de betão antigo	PAV1	Piso de betão, antigo - cave (inclui escavação)	SUB1
Piso de betão renovado	PAV2	Piso de betão, renovado - cave (inclui escavação)	SUB2
Piso de betão novo	PAV3	Piso de betão, novo - cave (inclui escavação)	SUB3
Tipos de telhado			Código
Telhas de barro - construção antiga			T1
Tinta branca sobre gesso e betão - telhado novo			T2
Telhado sanduíche vermelho com 6 cm de espessura			T3
Telhado sanduíche branco com 3 cm de espessura			T4

Tabela 8: Tipos de envolvente opaca existente no AAMA

As janelas são consideradas envolvente envidraçada. Estas correspondem às componentes que apresentem uma área envidraçada igual ou superior a 25% da sua área total. A sua caracterização deve ser efetuada mediante o coeficiente de transmissão térmica, a fração envidraçada, coeficiente de ganho de calor solar, emissividade da superfície externa e ainda as emissões de dióxido de carbono por m^2 de janelas de acordo com todo o ciclo de vida do edifício. Adicionalmente, o sombreamento pode ser realizado por uma ampla gama de componentes de construção como características da paisagem (árvores, por exemplo), elementos exteriores (alhetas, por exemplo), dispositivos de controlo de brilho interno (como venezianas ou persianas), etc. A caracterização foi feita apenas para os dispositivos de controlo de brilho interno porque as restantes já são contabilizadas pelo programa comercial de forma automática. Cada componente tem o seu coeficiente de sombreamento respetivo que é a sua medida de desempenho térmico e está definido consoante a norma ISO 13790 e a Portaria 6476-H/2021. A envolvente envidraçada e tipo de sombreamento existente no AAMA está apresentada na tabela 9.

Tipo de janela	Código	Tipo de sombreamento	Código
Vidros simples	J1	Nenhum	S1
Vidros duplos	J2	Estores de rolo	S2
		Venezianas	S3

Tabela 9: Tipos de envolvente envidraçada e sombreamento

De forma a descrever as propriedades da envolvente opaca e envidraçada de um determinado tipo de edifício, sendo que para cada classe de edifício são atribuídos diferentes valores, foram criados arquétipos com bases estatísticas no ano de construção de cada edifício. Para isso foram criadas várias classes como mostra a figura 25.

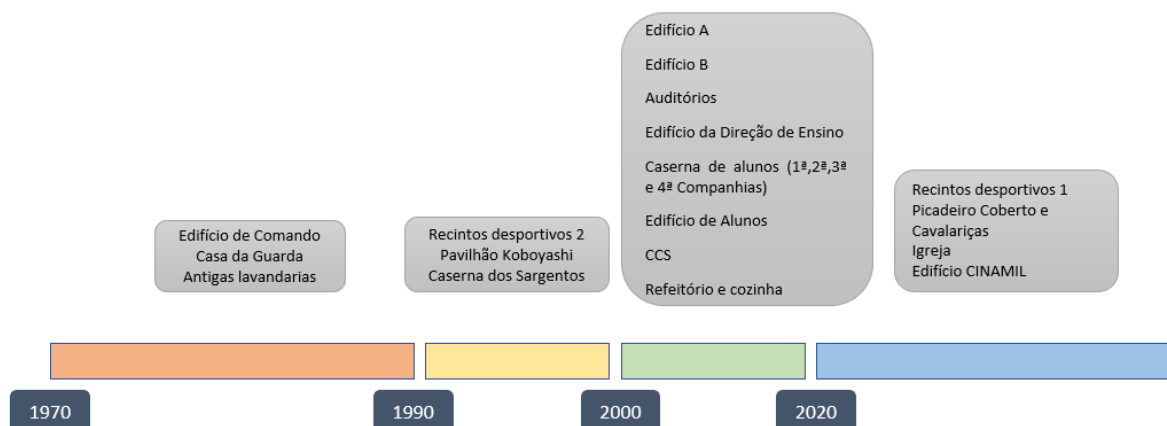


Figura 25: Classes de construção

As classes criadas na figura 24 são detalhadas na tabela de conectividades seguinte.

Classe	Tipo de telhado	Tipos de pavimento		Tipos de parede		Tipo de janela	Tipo de sombreamento
		Piso interno	Piso subsolo	Parede Interna	Parede Externa		
1970-1990	T1	PAV1	SUB1	PI1	PE5	J1	S3
1990-2000	T1	PAV2	SUB2	PI1	PE1	J2	S2
2000-2020	T2	PAV2	SUB2	PI1	PE3	J2	S2
2020-2040	T3	PAV3	SUB3	PI1	PE3	J2	S2

Tabela 10: Tabela de conectividades da envolvente

Na tabela 10 nota-se que nem todos os elementos estão nela representados. Contudo, estes são definidos *à posteriori*, pois apenas os que estão na tabela representam a grande maioria destes edifícios.

Por fim, foram calculadas mais especificamente, as frações da área bruta do chão, do piso com necessidades elétricas, com sistema AVAC, e os rácios entre a área de janelas e área de parede virado para norte, sul, este e oeste e ainda o número de andares com uma fachada totalmente envidraçada de todos os edifícios do AAMA.

4.2.3. Ganhos internos e conforto interno

O ambiente interno é bastante importante para a nossa saúde, uma vez que constitui cerca de 65% da exposição total ao longo das nossas vidas. A saúde do ambiente interno compreende os aspetos da saúde e da doença humana que são determinados por fatores no ambiente interno. Também se refere à teoria e à prática de avaliar e fatores do controlo no ambiente interno que podem potencialmente afetar a saúde [40]. O ambiente interno foi caracterizado quanto aos seus ganhos internos e quanto ao conforto térmico.

Os ganhos de calor interno são gerados pela atividade dos ocupantes como calor metabólico, pela utilização de dispositivos elétricos ou pela emissão térmica de iluminação artificial. As contribuições dos ocupantes, iluminação e dos vários aparelhos para saber os picos de cargas sensíveis e latentes foram estimados consoante o tipo de arquétipo e estão representados na tabela 11.

Variável	Arquétipos											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Pico de ocupação de número de pessoas por m^2	3	5	5	4	2	8	30	45	7	25	3	3
Pico de calor sensível libertado por pessoa	70	70	95	140	60	70	210	130	115	175	70	70
Pico de humidade libertada por ocupação	80	80	80	90	80	80	280	200	90	280	60	60
Pico de potência elétrica devido a computadores e outros equipamentos	14	9	5	2	10	9	0	0	30	2	3	3
Pico de potência elétrica devido a iluminação	15	7	7	5	4	4	5	2	5	10	1	1
Pico de potência elétrica devido a processos industriais	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pico de potência elétrica devido a servidores	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pico de potência de arrefecimento devido a refrigeração de salas	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pico de potência elétrica devido a carregamento de veículos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pico de consumo de água quente	2	0	15	2	0	35	0	0	0	0	0	0
Pico de consumo de água (fria + quente)	25	0	45	20	15	140	0	20	200	0	0	0
Pico de potência de aquecimento	20	0	0	0	0	55	0	0	0	0	0	0
Pico de potência de arrefecimento	20	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0

Tabela 11: Dados dos ganhos internos consoante a tipologia de espaço

Os 12 arquétipos, quanto à tipologia de espaço, existentes no AAMA estão indicados conforme a seguinte numeração: 1-Ensino; 2-Biblioteca; 3-Refeitório; 4-Bar; 5-Auditório; 6-Dormitórios; 7-

Recintos Desportivos; 8-Picadeiro e cavalariças; 9-Lavandarias; 10-Ginásio; 11-Arrecadações e 12-Atrios.

O conforto térmico é a condição mental que expressa satisfação com o ambiente térmico. A condição mental e a satisfação são questões subjetivas. Assim, o julgamento de conforto é um processo cognitivo influenciado por vários fatores como físicos, fisiológicos, psicológicos e outros processos [40].

A zona de conforto representa aquele ponto no qual a pessoa necessita de consumir a menor quantidade de energia para se adaptar ao ambiente circunstante e desta forma foram definidos limites de ajuste para a temperatura, humidade e ventilação. Cada tipologia de espaço tem os seus limites de conforto interno definidos na tabela 12, pois estes são adaptados consoante o uso do espaço.

Variável	Arquétipos											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ponto de ajuste da temperatura para sistemas de aquecimento [°C]	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	28
Limite da oscilação da temperatura para sistemas de aquecimento [°C]	21	21	21	21	21	21	18	18	21	18	20	18
Ponto de ajuste da temperatura para sistemas de arrefecimento [°C]	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28
Limite da oscilação da temperatura para sistemas de arrefecimento [°C]	12	12	12	12	12	18	12	12	12	12	12	12
Limite inferior da humidade relativa admitida [%]	30	40	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Limite superior da humidade relativa admitida [%]	60	60	70	60	60	60	70	70	70	70	60	70
Ventilação interior adequada por pessoa [L/s/pes]	8	6	7	10	6	6	27	4	7	25	6	4

Tabela 12: Limites de conforto interno consoante a tipologia de espaço

4.2.4. Perfis horários

No AAMA existem diversos edifícios, em que, a cada qual é atribuído um perfil horário de ocupação, aquecimento, arrefecimento, consumo de água, iluminação e utilização de equipamentos. Assim, com o objetivo de descrever estes perfis nos diversos edifícios, foram redigidos os seguintes parágrafos.

Em primeiro lugar, será descrito o Edifício A, onde são lecionadas as aulas e onde estão presentes os laboratórios. As aulas decorrem entre as 8h e as 17h, de segunda a sexta-feira, exceto às quartas-feiras em que terminam às 12h. No AAMA, grande parte dos docentes tem o auxílio de um computador (320W) e de um projetor (260W) para lecionarem as suas aulas. Para além das salas de aula e dos laboratórios, neste edifício estão ainda instalados os servidores do AAMA e a biblioteca. No que diz respeito às iluminações do edifício, este encontra-se equipado com lâmpadas fluorescentes compactas de 13W e fluorescentes tubulares de 58W. Quanto ao sistema de aquecimento e arrefecimento, o edifício A é constituído por um sistema de 2 caldeiras de condensação, 2 Unidades de Tratamento de Ar (UTA) e um Chiller.

O Edifício B é onde decorrem a grande maioria das aulas académicas, que ocorrem no mesmo horário do edifício A. É neste edifício que também se encontra um bar, frequentemente utilizado pelos alunos e docentes durante os intervalos. Relativamente à iluminação, o seu perfil é igual ao edifício A. O sistema de aquecimento e arrefecimento é um VRV.

De seguida, é apresentado o Edifício da Direção de Ensino, onde se situam os órgãos administrativos da componente académica. Os perfis de ocupação são designados consoante os horários regulares de serviço da AM (das 9h às 12h e das 13h às 17h). Quanto ao sistema AVAC, este é composto por um sistema Rooftop.

Junto ao edifício acima referido, encontra-se o edifício que engloba os dois auditórios. Estes são geralmente utilizados quando ocorrem palestras, conferências ou para comunicar informações importantes por parte dos comandantes a todos os seus subordinados. O sistema AVAC do edifício é o mesmo do edifício da Direção de Ensino.

O Edifício de Comando corresponde ao local onde estão as entidades de comando da AM, assim como os gabinetes dos instrutores da componente militar e o do Oficial Dia. Uma vez que este é um edifício construído para dar apoio logístico e administrativo, este funciona no horário normal de trabalho durante os dias úteis, excetuando o gabinete do Oficial Dia que é ocupado 24h durante todos os dias do ano. Este edifício apresenta 12 sistemas de Ar-Condicionado Split (AVAC Split).

O edifício seguinte corresponde ao refeitório, que funciona consoante os horários das 3 refeições do dia. A 1ª refeição do dia é tomada entre as 7h15 e as 8h, nos dias úteis, e entre as 8h e as 8h30 nos restantes dias do ano. A 2ª refeição ocorre das 12h30 às 13h30 e entre as 19h e as 20h realiza-se a 3ª refeição. A alimentação não é confeccionada no próprio refeitório, pelo que não existem quaisquer custos referentes à sua produção. A iluminação deste edifício funciona de igual forma aos

edifícios de aulas. O sistema AVAC é composto por 7 sistemas de Ar-Condicionado Split (AVAC Split) e ainda uma zona de congelados.

O edifício que diz respeito à Companhia de Comando e Serviços (CCS) fornece apoio à operação da AAMA e está dividido em duas áreas. A primeira engloba os gabinetes, ocupados de segunda a sexta-feira, das 9h às 17h; a segunda área corresponde à zona de alojamento da classe de praças. Esta última, não contempla um sistema de ar-condicionado, no entanto, possui um sistema de AQS, composto por 2 caldeiras de condensação. Quanto ao perfil de ocupação da área dos alojamentos, este é ocupado, durante os dias úteis, entre as 20h e as 8h da manhã do dia seguinte.

O Edifício de Alunos é o espaço para convívio dos alunos e é, geralmente, ocupado após a 2ª e a 3ª refeições do dia, isto é, entre as 13h30 e as 14h e entre as 19h30 e as 21h. A iluminação deste espaço é composta por 2 lâmpadas fluorescentes compactas eficientes (MASTER PL-T de 2 pinos) de 26W por cada 4 m².

A Caserna de alunos da 1ª e 2ª Companhia e a caserna dos alunos da 3ª e 4ª Companhia são destinados a alojar os alunos e tem perfis de ocupação semelhantes diferindo apenas em pequenos momentos (por exemplo, diferentes horários de aulas de treino físico que implica a troca de fardamento neste edifício). Os edifícios estão munidos de um sistema de radiadores que quase não é utilizado pelos alunos como será explicado mais à frente. A iluminação destes edifícios é feita por 10 lâmpadas T8 LED 1200mm por quarto e 4 lâmpadas E27 por sala de estudo, sabendo que existem 72 quartos em cada edifício cada um com a sua sala de estudo.

O seguinte edifício engloba o alojamento dos sargentos, bem como 2 gabinetes de administração. O perfil de ocupação da área dos alojamentos é o mesmo que o perfil da zona de alojamento dos praças.

Por fim, a última área engloba diversos pavilhões destinados à prática desportiva, nomeadamente, um picadeiro coberto e as cavalariças, um complexo de pavilhões gimnodesportivos e um ginásio. Os pavilhões gimnodesportivos e o ginásio são ocupados, maioritariamente, nos dias úteis para as aulas de treino físico que compreendem um horário entre as 8h e as 12h ou no final das aulas, entre as 17h e as 20h. Aos fins de semana estas instalações são ocupadas por um número pouco significativo de indivíduos. O picadeiro é utilizado para aulas de equitação, para atividades extracurriculares ou para treinos individuais. Já as cavalariças são utilizadas todo o ano, uma vez que servem para alojar os cavalos e é necessário o seu tratamento contínuo. Ainda neste complexo estão presentes os pavilhões para a prática de artes marciais e combate corpo a corpo, assim como um pavilhão utilizado essencialmente para atividades gímnicas e de treino funcional. Portanto, estes são utilizados após o período de aulas (entre as 17h e as 20h).

4.2.5. Sistemas AVAC e AQS

O conforto depende de comportamentos que são iniciados, conscientemente ou inconscientemente, e guiado por sensações térmicas e de humidade, para reduzir o desconforto. Alguns exemplos são alterar as roupas, a atividade, a mudança de postura ou localização, e do funcionamento dos equipamentos AVAC [40]. Nesse sentido, o principal objetivo dos sistemas AVAC é proporcionar condições para o conforto térmico humano, isto é, dar a condição de espírito que expressa satisfação.

As Águas Quentes Sanitárias (AQS) são as águas destinadas ao consumo humano aquecidas para uso. Estas têm vários tipos de utilização, embora a maior parte da água seja consumida para banhos.

O sistema de aquecimento instalado nos alojamentos dos alunos consiste num sistema de radiadores que são alimentados através das caldeiras que aquecem as AQS, que com o auxílio de bombas conduzem o calor até aos radiadores. A quantidade de calor emitida é controlada através de torneiras que controlam o volume de caudal. Contudo, o sistema em questão não é utilizado e, em vez deste, os alunos servem-se de termo ventiladores como sistema individual de aquecimento. Este acaba por ser o único sistema AVAC a atuar nestes edifícios, uma vez que não existe qualquer sistema de arrefecimento nem de ar condicionado, sendo a ventilação natural. As AQS são aquecidas por 2 caldeiras de condensação e existem 2 depósitos com cerca de 2000 litros de capacidade. O sistema AQS é composto por 2 circuitos, um fechado e um aberto. O fechado corresponde ao aquecimento das águas nas caldeiras e a circulação no permutador, enquanto o circuito aberto é o sistema que possui os depósitos de água e as saídas para os alojamentos.

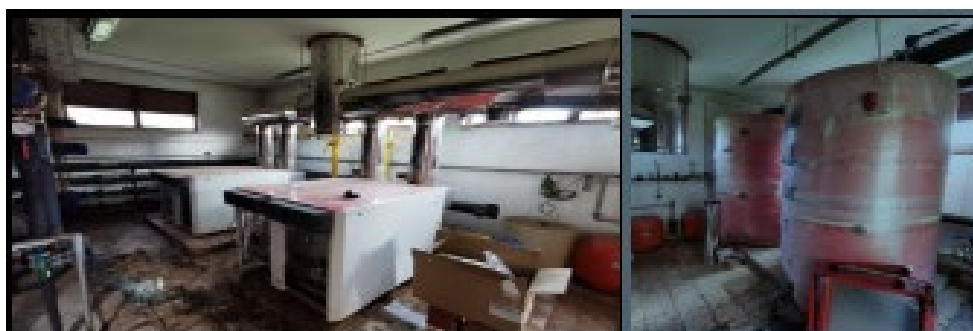


Figura 26: Sistema AQS e AVAC das Casernas

Nos edifícios de aulas, a climatização é feita por duas unidades *multi-split*, do tipo VRV. O sistema VRV é um ar condicionado para edifícios comerciais que utilizam o controlo de fluxo de refrigerante variável desenvolvido pela Daikin para proporcionar aos clientes a capacidade de manter o controlo de zona individual em cada divisão e piso de um edifício. Isto é conseguido, uma vez que consiste num sistema com apenas uma unidade externa ligada a múltiplas unidades internas operando individualmente por zona térmica. Apresenta a grande vantagem de poder combinar múltiplas unidades internas apenas num ciclo de refrigeração através da tecnologia eletrónica e de sistemas de controlo. A tecnologia VRV alterna o volume de refrigerante num sistema para atender aos requisitos precisos de um edifício. Apenas uma quantidade mínima de energia é necessária para um sistema manter as

temperaturas definidas e garantir que ele se desligue automaticamente quando nenhum ocupante for detetado numa sala. Esse mecanismo exclusivo alcança mais sustentabilidade a longo prazo, pois os utilizadores finais economizam nos custos de energia e reduzem as emissões de carbono do sistema. O termo VRV significa Volume de Refrigerante Variável, e segundo vários autores, este é o sistema mais moderno e versátil do mercado e permite uma eficiência sazonal de até 28% quando comparado com outras soluções [41] [42]. As duas unidades externas estão situadas no terceiro piso do edifício B. Este sistema constitui por si a parte AVAC do edifício. Não existe qualquer sistema AQS nos edifícios de ensino do AAMA.



Figura 27: Sistema AQS e AVAC das Casernas

De acordo com os sistemas AVAC anteriormente descritos e de forma a analisar os sistemas de aquecimento, arrefecimento, ventilação, controlo e AQS foi elaborada a tabela 13, para caracterizar os parâmetros necessários para a sua implementação no CEA.

Aquecimento & Arrefecimento					
Variável	Radiador	Termo ventilador	AC Central	Mini split	
Classe do sistema de aquecimento	Radiador	Central AC	AC Central	AC Descentralizado	
Percentagem convectiva do sistema de aquecimento em relação à potência total	1	1	1	1	
Fluxo Máximo permitido por m^2 de área bruta do piso por cada sistema de aquecimento (W/m^2)	500	50	500	150	
Temperatura de correção de emissões perdidas devido ao sistema de aquecimento ($^{\circ}C$)	0.15	-0.1	-1.1	0.7	
Temperatura nominal da água fornecida nas unidades de ar-condicionado ($^{\circ}C$)	NA	NA	40	NA	
Aumento da temperatura nominal da água nas unidades de ar-condicionado ($^{\circ}C$)	NA	NA	20	NA	
Temperatura de entrada do ar de retorno nas unidades de recirculação do ar ($^{\circ}C$)	NA	NA	36	NA	
Temperatura nominal da água fornecida nas unidades de recirculação do ar ($^{\circ}C$)	NA	NA	40	7.5	
Aumento da temperatura nominal da água nas unidades de recirculação do ar ($^{\circ}C$)	NA	NA	20	7	
Temperatura de saída do ar proveniente das unidades de recirculação do ar ($^{\circ}C$)	NA	21	36	16	
Temperatura nominal da água fornecida na unidade de aquecimento ($^{\circ}C$)	90	NA	NA	NA	
Diminuição da temperatura nominal da água nas unidades de aquecimento ($^{\circ}C$)	20	NA	NA	NA	
Controlo					
Variável				Controlador PI	
Temperatura de correção do sistema de aquecimento devido a perdas ($^{\circ}C$)				1.2	
Temperatura de correção do sistema de arrefecimento devido a perdas ($^{\circ}C$)				-1.2	
Ventilação					
Descrição	Ventilação mecânica	Ventilação da janela	Recuperação de calor	Descarga noturna	Economizador
Ventilação da janela - com descarga noturna	Falso	Verdadeiro	Falso	Verdadeiro	Falso
Ventilação mecânica	Verdadeiro	Falso	Verdadeiro	Verdadeiro	Falso
Ventilação da janela - sem descarga noturna	Falso	Verdadeiro	Falso	Falso	Falso
AQS					
Variável	Água de alta temperatura (60/10)		Água de temperatura média (45/10)		
Temperatura de saída da água ($^{\circ}C$)	60		45		
Fluxo máximo permitido por m^2 de área bruta do piso por cada sistema AQS (W/m^2)	500		500		

Tabela 13: Sistemas AVAC presentes no AAMA

4.2.6. Sistemas de fornecimento

O fornecimento de energia é a entrega de combustíveis ou combustíveis transformados no ponto de consumo. A energia que o AAMA consome para poder funcionar com os seus sistemas energéticos provém de 2 tipos: Energia elétrica e Gás Natural.

A energia elétrica, fornecida ao AAMA pela Endesa chega aos seus edifícios através dos postos de transformação do campus, é utilizada na iluminação, equipamentos, aquecimento e nos equipamentos das AQS.

Existem 3 postos de transformação (PT1, PT2 e PT3) que são fornecidos por um PT principal. O PT1 alimenta o edifício A, o edifício B, o edifício da CCS e as luzes exteriores. O PT2 fornece energia elétrica ao edifício dos auditórios. E, por último, o PT3 é o posto que alimenta as restantes instalações do campus.

Ao longo dos últimos anos, a AM optou por mudar de empresa que prestava o serviço de fornecimento de energia elétrica ao campus. Este serviço era feito pela EDP até ao ano de 2018, passando para Iberdrola em 2019 e 2020, e de 2021 até ao momento, o serviço é realizado pela Endesa. Estas alterações visaram reduzir a fatura energética.

Ainda em relação à energia elétrica, a potência contratada do AAMA equivale a 329kW e a distribuição de energia é feita por ligação direta ao Quadro Geral de Baixa Tensão de 240V de cada edifício.

Quanto ao Gás Natural, este é abastecido pela GALP, e é utilizado no aquecimento das AQS, e possui uma tarifa baixa pressão (tarifa BP) mensal em que o gás natural consumido se encontra dentro dos intervalos de 10 000 a 100 000 m^3 /ano.

A tabela 14 mostra os elementos relevantes dos sistemas de fornecimento no que diz respeito ao aquecimento, arrefecimento, eletricidade e AQS para serem posteriormente colocados no CEA.

Descrição	Matéria-Prima	Escala	Eficiência (%)	Custos de capital por kW (USD\$2015/kW)	Tempo de vida útil (anos)	Fator de custo de operação e manutenção (%)	Taxa de juros (%)
Aquecimento e Arrefecimento							
Caldeira a GN	GN	Edifício	0.8	645	20	1	5
Eletricidade							
PT	Rede	Cidade	0.99	1	20	1	5
AQS							
Caldeira a GN	GN	Edifício	0.8	645	20	1	5

Tabela 14: Sistemas AVAC presentes no AAMA

5. Modelação Energética com o CEA

O seguinte capítulo visa descrever os procedimentos realizados para implementar no CEA os dados levantados, apresentar os resultados da modelação energética dos edifícios do campus e fazer a verificação e validação dos arquétipos criados e dos resultados apresentados pelo programa.

5.1. Dados

Um projeto feito no CEA apresenta 7 bases de dados primárias, 4 secundárias e 7 padrão. As bases de dados primárias são a entrada mínima exigida no CEA e podem ser visualizadas na tabela 15, bem como os respetivos formatos.

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>

Tabela 15: Dados primários necessários para a criação de um projeto CEA

As bases de dados secundárias são compostas pela arquitetura, ganhos internos, conforto interno e sistemas técnicos. Estas podem ser geradas, alternativamente, a partir das bases de dados de idade, ocupação e propriedades de arquétipos. Esta última faz parte da base de dados padrão, onde o CEA consegue ir buscar estes dados automaticamente. Atualmente, o CEA inclui esta base de dados para os estudos de caso suíços e de Singapura. Por este motivo, é necessário personalizar estes dados para o presente estudo de caso. Assim sendo, alterou-se os dados do ficheiro suíço, pois entre os dois apresentados é o que mais se assemelha a Portugal. Os dados padrão são compostos por 7 conjuntos: ciclo de vida dos sistemas e edifícios, propriedades e horários de arquétipos, propriedades da envolvente emissões e dados incertos.

Todos estes dados serão descritos de seguida.

5.1.1. Input de dados primários

As 7 bases de dados primárias já apresentadas anteriormente seguem uma linha guia para elaborar os primeiros passos do modelo. Os primeiros dados a serem apresentados são os *shapefile* e a *raster image*, ou seja, a geometria dos edifícios do campus, da envolvente e o terreno. Estes dados são úteis para calcular a geometria e a posição dos edifícios e também a radiação refletida dos edifícios circundantes para a zona de análise. Os dados do terreno consistem numa *raster image* com células de 5m X 5m de resolução armazenando a elevação do terreno em metros.

Após ter sido delimitada a zona do caso de estudo, ou seja, todo o perímetro do AAMA, as representações 2D e 3D podem ser visualizadas na figura 28.



Figura 28: Representação do AAMA em 3D e 2D no CEA

Na figura 28 é possível verificar que os edifícios estão divididos em várias divisões ou setores para que a descrição da sua geometria seja facilitada. Desta forma, obteve-se um total de 76 setores/geometrias. No anexo B é feita a correlação entre os setores dos edifícios e as geometrias que os representam.

Após definida e detalhada a zona do estudo de caso, procedeu-se à restante discretização dos parâmetros de cada edifício do AAMA.

No Dashboard do CEA, alterou-se a definição padrão dos edifícios de acordo com o que foi apresentado no ponto 4.2.1 desta dissertação, tendo em conta que cada geometria representa um setor de um edifício com uma determinada altura. A base de dados que armazena a idade de construção e anos de reforma de diferentes componentes arquitetónicos em edifícios, é útil para estimar a energia incorporada e as emissões devido à construção e *retrofit* de edifícios.

De seguida é executado o *Archetypes Mapper* que atribui propriedades de construção e tipos de sistemas da base de dados padrão de arquétipos. Este base de dados armazena propriedades de construção suíças e é útil para recuperar propriedades de edifícios com base no ano de construção, idade, sistemas de aquecimento, refrigeração e alimentação elétrica dos edifícios. Serve também para ter uma noção relativa dos consumos e emissões numa primeira abordagem antes de implementar os novos arquétipos.

O City Energy Analyst fornece dados horários de um ano meteorológico típico para as localidades de Zurique, Zug e Singapura. Contudo, os dados meteorológicos de 3034 localidades estão disponíveis no formato meteorológico EnergyPlus num arquivo .epw que armazena dados horários sobre as condições climáticas da zona de interesse. Esses dados são úteis para estimar a radiação solar no local, e as condições de temperatura e humidade do ar, como tal, é um elemento-chave da CEA. Desta forma, utilizou-se o ficheiro relativo a Lisboa. É de referir que este formato está presente em 6 localidades e Portugal continental mais uma para cada zona insular.

Após definido o clima, executaram-se os programas para obter a necessidade de energia (*Demand Forecasting*). Primeiramente o *Building Solar Radiation* para calcular a radiação solar para um cenário e, de seguida, o *Building Schedules* para estimar o perfil de ocupação dos edifícios. A base de dados de ocupação armazena informação de horários de ocupação, utilização de água quente, iluminação e outros eletrodomésticos, como dito anteriormente, é útil para calcular a procura de energia nos edifícios.

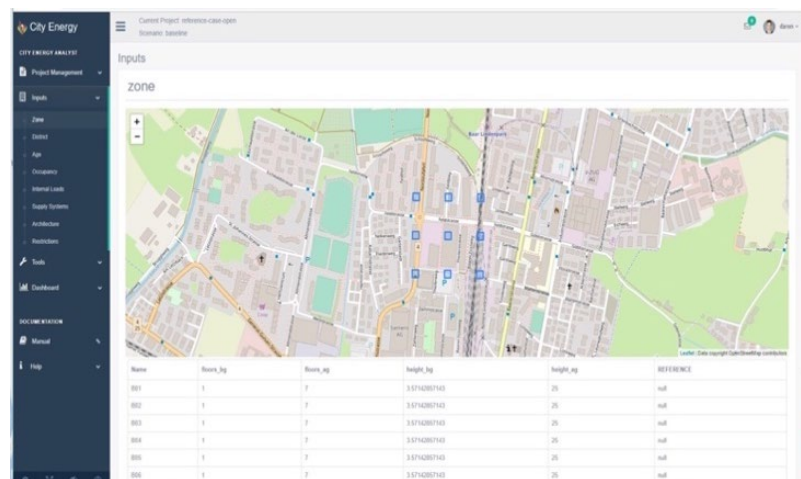


Figura 29: Zona de *Input Editor* no *Dashboard* do CEA

5.1.2. Input de dados secundários

Como dito anteriormente, os dados secundários podem ser gerados a partir das bases de dados primárias e padrão. Logo, não são obrigatórias para a criação do modelo. Contudo, podem alterar significativamente os resultados e torná-los mais fiáveis, isto é, com menor erro.

O caso de estudo trata-se de uma unidade militar que por sua vez possui edifícios antigos e modernos, com uma diferença no período de construção de cerca de 50 anos. Isto é, existem edifícios do ano de 1970 até 2020.

Foram então criadas as 4 bases de dados secundárias: arquitetura da zona, ganhos internos da zona, conforto interior e sistemas AVAC, AQS e de fornecimento.

Neste sentido, torna-se necessário elaborar arquétipos com as propriedades da envolvente para os edifícios de épocas diferentes tal como para tipologias de uso diferentes. Um Arquétipo é uma base de dados que relaciona a tipologia de edifícios com dados históricos sobre sua construção, sistemas de energia, operação etc.

A arquitetura da zona consiste num arquivo que armazena as propriedades arquitetónicas das edificações no AAMA. Esta base de dados é útil para calcular as propriedades térmicas da envolvente do edifício e da densidade ocupacional e está criada e descrita no ponto 4.2.2 e 4.2.4.

A base de dados relativa aos sistemas armazena informações de sistemas AVAC, AQS e de fornecimento dos edifícios do AAMA. Esta base de dados é útil para saber que tipo de sistema o edifício está a utilizar e está descrita no ponto 4.2.5 e 4.2.6. Dependendo do sistema, a necessidade de energia do edifício pode ser suprida de diferentes maneiras.

Tal como elaborado na caracterização da envolvente, também a nível de ganhos e conforto interno, é necessário elaborar arquétipos.

A base de dados de ganhos internos serve para calcular o calor libertado no interior do edifício devido à utilização de eletrodomésticos, ocupação de pessoas, etc. Em contrapartida, os dados de conforto interno estabelecem limites de conforto térmico necessários para o tipo de edifícios do AAMA e é importante para definir os limites superior e inferior para o aquecimento ou arrefecimento de um edifício. Ambas as bases de dados estão criadas e descritas no ponto 4.2.3 da presente dissertação.

A função destas bases de dados é ajudar o utilizador a restabelecer os dados de entrada para uma melhor análise quando os dados são escassos ou neste caso não adequados.

5.2. Resultados

Neste subcapítulo apresentam-se os resultados dos 2 cenários apresentados. Cada modelo foi verificado e validado numa primeira fase e numa segunda etapa discutido e analisado quanto aos seus consumos.

5.2.1. Verificação e Validação do Modelo Computacional

Após as simulações dos modelos energéticos dos dois cenários apresentados, foi de imediato feita a verificação e validação dos dados apresentados pelo programa através do método apresentado no subcapítulo 2.2.

Desta forma, comparou-se os dados relativos aos consumos mensais previstos pelo programa para cada um dos cenários (com arquétipos já existentes do CEA e com os arquétipos criados no capítulo 4 desta dissertação para o caso de estudo em causa), presentes nas figuras 30 e 31, com os valores reais dos consumos apresentados na secção 4.1.3.

Os consumos mensais do AAMA, de acordo com os arquétipos do CEA, mostram a seguinte distribuição.

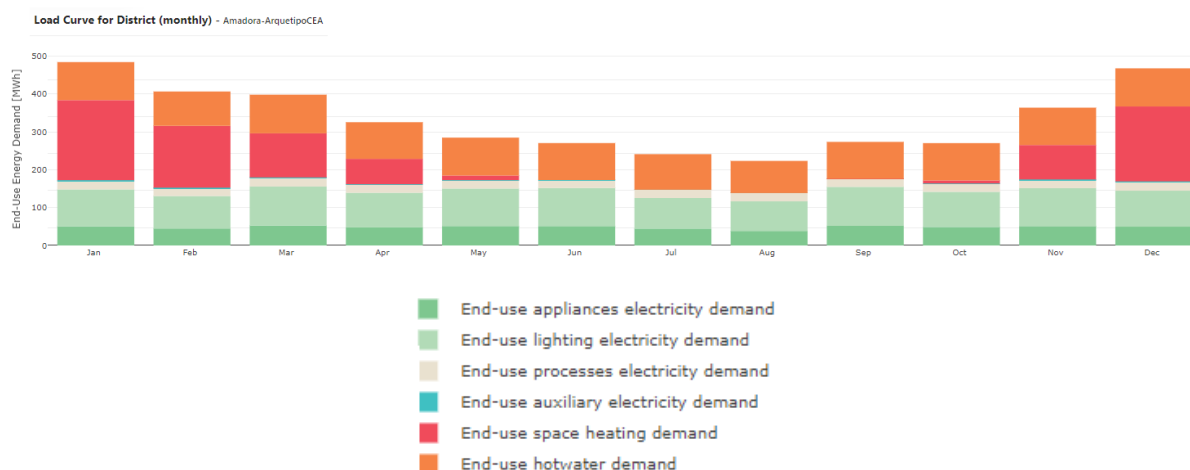


Figura 30: Consumos mensais do AAMA de acordo com os arquétipos do CEA

Os consumos mensais do AAMA, de acordo com os arquétipos criados no capítulo 4, mostram a seguinte distribuição.

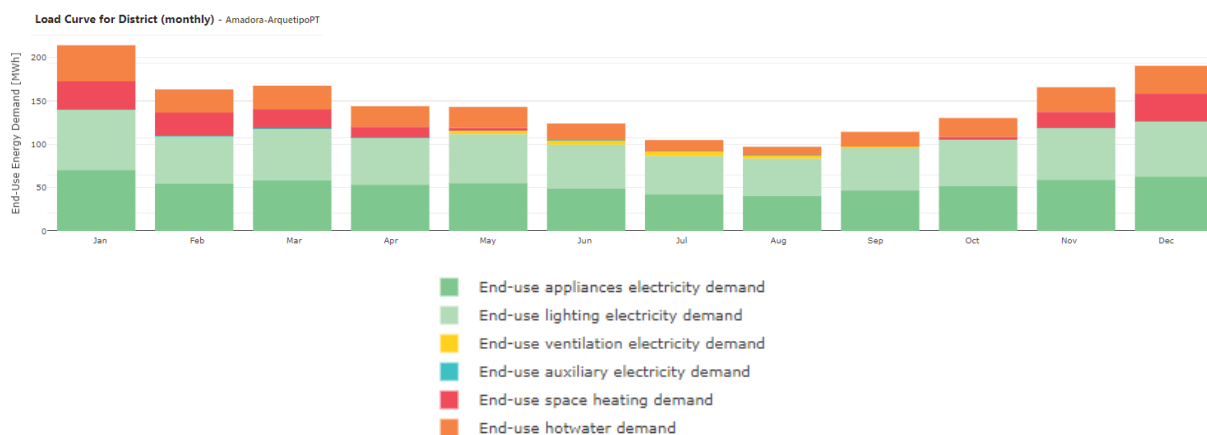


Figura 31: Consumos mensais do AAMA de acordo com os arquétipos criados

Assim, calculando o valor total de energia consumido pelo campus (eletricidade+gás natural), mensalmente, é possível comparar este valor com os dos modelos energéticos. Com o auxílio da ferramenta Excel, foi elaborada a tabela 16 de forma a calcular o valor de CVRMSE.

		Eletricidade (KWh)	Gás (kWh)	Total (MWh)	Modelo CEA (MWh)	RMSE	Média Modelo	CVRMSE	ModeloPT (MWh)	RMSE	Média Modelo	CVRMSE
2019	JAN	162933	101845	264.778	484.451	205.359	334.261	61.44%	214.275	26.321	146.618	17.95%
	FEV	88198	80736	168.934	406.749				163.321			
	MAR	79821	82256	162.077	398.368				167.599			
	ABR	67100	62950	130.05	325.607				143.978			
	MAI	72807	49208	122.015	284.878				143.131			
	JUN	56739	48875	105.614	270.507				123.989			
	JUL	57688	18970	76.658	241.190				104.909			
	AGO	53885	6807	60.692	223.373				97.135			
	SET	67745	18102	85.847	273.651				114.354			
	OUT	78407	22301	100.708	270.375				130.315			
	NOV	97881	62000	159.881	364.069				165.839			
	DEZ	87028	73999	161.027	467.915				190.569			
2020	JAN	128164	110349	238.513	484.451	209.913	334.261	62.80%	214.275	24.740	146.618	16.87%
	FEV	91555	77180	168.735	406.749				163.321			
	MAR	68646	75419	144.065	398.368				167.599			
	ABR	54701	54149	108.85	325.607				143.978			
	MAI	55362	41852	97.214	284.878				143.131			
	JUN	56248	33270	89.518	270.507				123.989			
	JUL	59194	33448	92.642	241.190				104.909			
	AGO	59211	29376	88.587	223.373				97.135			
	SET	66105	31385	97.49	273.651				114.354			
	OUT	78537	44777	123.314	270.375				130.315			
	NOV	93486	60280	153.766	364.069				165.839			
	DEZ	71554	88340	159.894	467.915				190.569			
2021	JAN	152090	87160	239.25	484.451	201.866	334.261	60.39%	214.275	15.445	146.618	10.53%
	FEV	81118	61204	142.322	406.749				163.321			
	MAR	80114	65241	145.355	398.368				167.599			
	ABR	72305	64631	136.936	325.607				143.978			
	MAI	75247	76264	151.511	284.878				143.131			
	JUN	69756	62223	131.979	270.507				123.989			
	JUL	62245	33183	95.428	241.190				104.909			
	AGO	52952	26064	79.016	223.373				97.135			
	SET	69070	30867	99.937	273.651				114.354			
	OUT	74005	41535	115.54	270.375				130.315			
	NOV	100904	63771	164.675	364.069				165.839			
	DEZ	96538	77489	174.027	467.915				190.569			

Tabela 16: Comparação dos consumos reais com os dos modelos energéticos e CVRMSE

Através da tabela 16, verifica-se que os valores do modelo energético com arquétipos do CEA, estão muito aquém do estipulado pela diretiva do ASHRAE que indica que um bom ajuste do modelo deve ter um CV(RMSE) igual ou abaixo de 25% para se considerar que os recursos preditivos são aceitáveis e confiáveis. Esta disparidade pode-se justificar com o facto destes modelos serem elaborados para edifícios suíços, onde se denota que utilizam os sistemas de aquecimento de forma mais frequente comparativamente com Portugal devido às diferenças do clima, notando-se uma visível diferença no que toca aos consumos de aquecimento. Também se justifica pela grande diferença das propriedades da envolvente, como por exemplo o coeficiente de transferência de calor. Assim, conclui-se que este modelo não está atualizado. Por outro lado, os consumos relativos ao modelo utilizado com os arquétipos elaborados, demonstram que os recursos preditivos são aceitáveis e confiáveis, apresentando um CV(RMSE) abaixo de 25%. Este modelo apresenta um CV(RMSE) de 17.95%, 16.87% e de 10.53%, comparando com os anos de 2019, 2020 e 2021, respetivamente. Conclui-se que os arquétipos estão bem elaborados para o local do caso de estudo e que estes podem ser

utilizados para prever os consumos de estabelecimentos semelhantes ao do campus como por exemplo outras unidades militares. Embora apresentem um erro reduzido que pode ser justificado com pequenas diferenças anuais, como por exemplo, o número de habitantes a diferir de ano para ano e quanto tempo os equipamentos estão ligados, etc., estes arquétipos podem ainda ser melhorados com pequenos detalhes.

Para uma melhor visualização das diferenças entre os dois modelos energéticos e os consumos reais, a figura 32 mostra estes dados em forma de gráfico de barras.

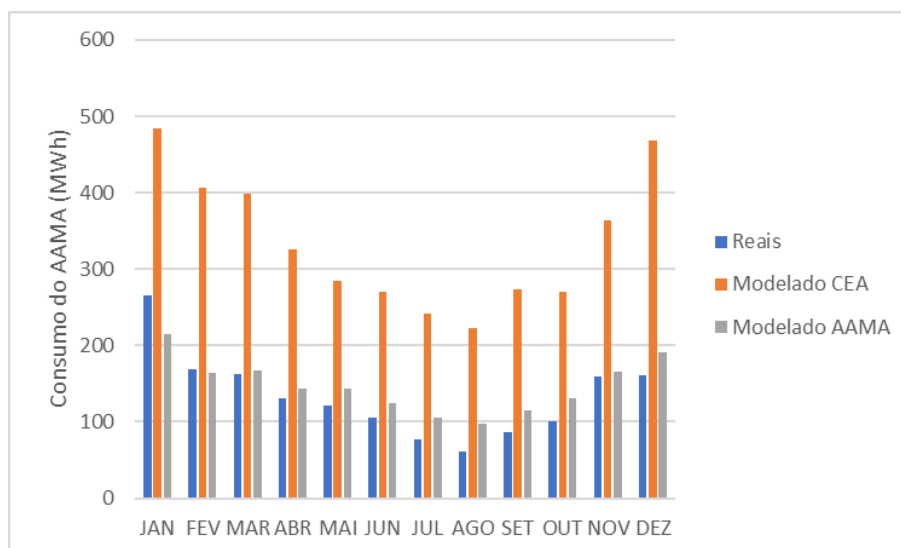


Figura 32: Comparação dos consumos reais com os dos modelos energéticos

5.2.2. Resultados

Os resultados do modelo energético correspondentes aos arquétipos criados nesta dissertação são analisados nesta secção.

O CEA contempla uma base de dados padrão que armazena informações para a Análise do Ciclo de Vida das edificações (*Life Cycle Analysis*) em função da sua construção. Esta base de dados padrão é útil para calcular as emissões incorporadas, a energia cinza dos edifícios (*grey energy of buildings*) e os custos totais de Energia. Contudo esta base de dados não foi alterada, e desta forma não está baseada em edifícios portugueses, e assim não foi feita esta análise.

Quanto ao consumo dos edifícios, este depende de vários aspetos como a envolvente, sistemas, iluminação, comportamento dos seus utilizadores, dados climáticos, etc... Desta forma, e com o objetivo de prever o impacto de cada edifício no AAMA e colaborar para a sua modernização, fez-se uma abordagem simultânea dos edifícios do AAMA no CEA. A figura 33 representa então os consumos anuais dos diversos setores dos edifícios.

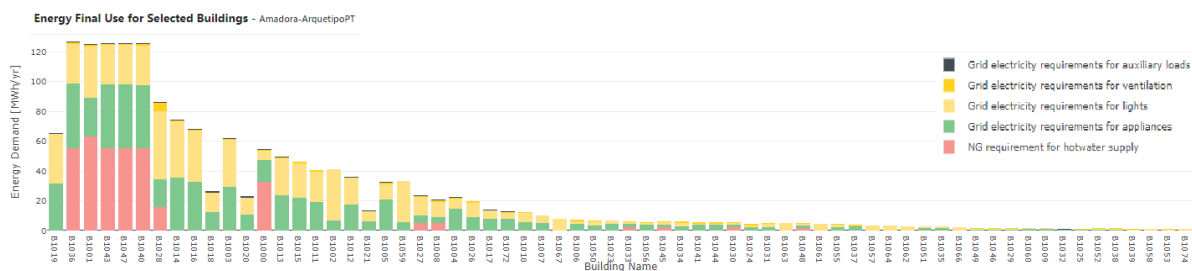


Figura 33: Consumos anuais dos diversos setores dos edificios

Nestes dados é possível averiguar quais são os setores com maior consumo do AAMA, no entanto, pretende-se também uma análise por edifício no global. Logo, juntou-se os setores por edifício para determinar o impacto de cada edifício no valor total do consumo do AAMA. Estes dados estão expostos na figura 34.



Figura 34: Impacto de cada edifício no valor total do consumo do AAMA

Através da figura 34, observa-se que as casernas dos alunos são os edificios que mais consomem energia (17.6% cada), seguidos dos edificios de aulas (A:12.3% e B:10.4%), refeitório (7.9%), edificio de comando (7.8%), edificio do bar de alunos (6.7%) e outros.

É evidente o elevado impacto das casernas dos alunos e dos edificios de aulas, representando 57.8% do consumo total do campus. Estes valores são expectáveis, uma vez que são estes os edificios com um maior perfil ocupacional, portanto de um maior consumo energético. Assim, devem ser tomadas medidas de eficiência energética de forma prioritária nestes edificios, porque representam a maior fatia do consumo do campus.

De forma a comparar os resultados por edifício, recorreu-se aos dados retirados pelo registador de energia *Fluke 1742*, pois esta análise não é possível através das faturas energéticas que apenas mostram o consumo global do campus. Estes dados foram retirados de uma tese de mestrado em que se avalia o impacto das casernas dos alunos no campus e mediram-se os valores para a semana de 22 (5ªfeira) a 28 (4ªfeira) de outubro de 2020. Na figura 35 visualizam-se 2 tipos de gráficos: um relativo a uma medição de consumos, considerando um intervalo de registo de 60 minutos (em

cima), e outro com um intervalo de 15 minutos (em baixo). Um registo de consumos de 60 em 60 minutos significa que neste tempo se consumiu, por exemplo, 30 kWh. Assim, considerou-se o intervalo de 60 em 60 minutos para a contabilização dos consumos energéticos das casernas, somando-se todos estes valores. Durante esta semana totalizou um valor de 2347 kWh (2.347 MWh) de consumo.

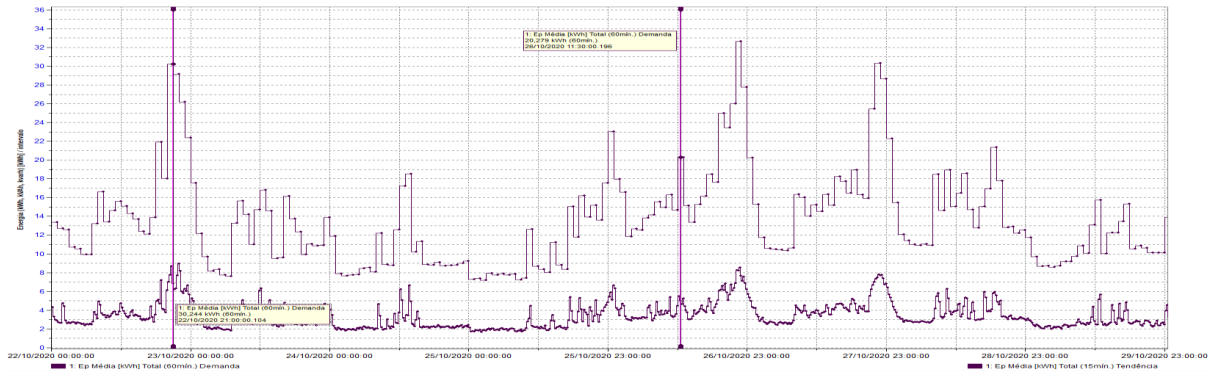


Figura 35: Consumo semanal das Casernas através do registador de energia *Fluke 1742*. Fonte: J. Bernardo, (2021). *Plataforma de gestão de Energia para Edifícios do Exército*

O modelo energético criado no CEA apresenta um consumo elétrico, na semana de 22 a 28 de outubro, de 3.16 MWh. Apenas são avaliados os consumos elétricos, pois são apenas estes que os registadores conseguem medir.

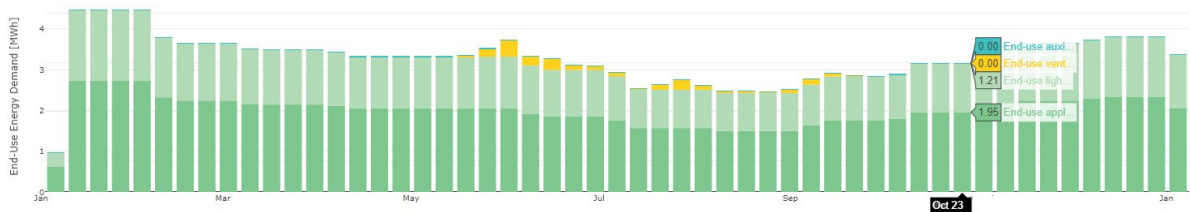


Figura 36: Consumos semanais dos diversos setores do edifício da caserna dos alunos no CEA.

Aplicando a expressão para calcular o CVRMSE, obtém-se um valor de 25%. Este valor está dentro dos níveis para um bom ajuste do modelo, contudo, está no limiar do aceitável para a diretriz do ASHRAE. Este valor é justificado pelo facto de as medições reais dos equipamentos terem sido efetuadas durante o período de COVID-19, o que é uma limitação para o estudo. Por este motivo, os valores das medições são inferiores aos do modelo energético, no entanto, são consideradas válidas.

6. Melhoria energética

Alcançar edifícios otimizados tem sido uma das principais prioridades no setor de construção e cada vez mais levou as pessoas a implementar medidas para reduzir a fatura energética, sem nunca comprometer o bom ambiente interno.

Para aumentar a eficiência e reduzir as necessidades energéticas de um edifício é necessário um investimento. A decisão de tomar este investimento é feita após elaborar um balanço que permite à instituição visualizar a que prazo obtém o retorno do investimento. A análise do retorno é feita com base no valor que se pouparia a cada mês/ano até este abater o valor do investimento.

Com vista a transformar o AAMA num campus com necessidades quase nulas de energia, apresentam-se dois meios para o alcançar, em que um visa produzir energia elétrica e térmica de forma renovável e outro que apresenta diversas medidas para reduzir o consumo desta energia.

6.1. Simulações do potencial de energias renováveis

Tal como apresentado na secção 4.1.3 desta dissertação, o AAMA necessita de cerca 980 MWh de eletricidade e de 680 MWh de gás por ano. Estas necessidades energéticas estão, atualmente, todas garantidas pela rede. Neste subcapítulo é apresentada uma forma de complementar este fornecimento através de fontes de energia renovável.

De forma a fazer este estudo, utilizaram-se as ferramentas do CEA para analisar capacidade do campus para a adoção de sistemas mais eficientes energeticamente. A ferramenta tem em consideração o local do caso de estudo e a área disponível para os sistemas. Apresenta o resultado das simulações para a produção de energia, através de fontes como a energia solar e geotérmica, analisando equipamentos de conversão de energia (como painéis fotovoltaicos), extração de calor de corpos de água e esgotos.

Após realizada a simulação da produção de energia, tanto elétrica como térmica, que o campus é capaz de produzir, analisaram-se os diferentes casos financeiramente.

6.1.1. Potencial Solar

O potencial solar, a par do eólico e do hídrico, é o que mais se destaca em Portugal. Em 2021, a capacidade instalada era de 1,77 GW, embora o PNEC 2030 tinha definido como meta 2 GW para 2020. As metas para 2025 e 2030 são 6,6 GW e 9 GW, respetivamente. O presidente da APREN diz que “Quando as medidas estiverem implementadas e a capacidade fotovoltaica atingir os 9 GW definidos pelo PNEC 2030, a energia solar ficará a par com a capacidade eólica instalada prevista (9,3 GW)” [43].

O potencial de todos os edifícios do AAMA foi simulado no CEA e está apresentado na figura 37.

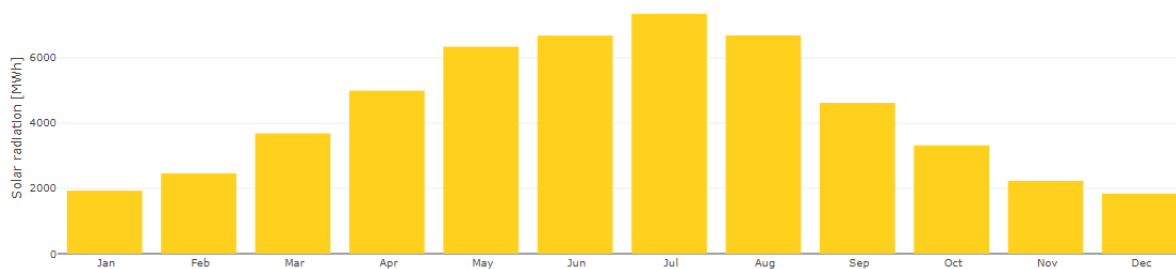


Figura 37: Potencial Solar do AAMA

Através da figura 37, vê-se o enorme potencial solar dos edifícios do campus. Desta forma fez-se a análise de implementar painéis fotovoltaicos, painéis fotovoltaicos-térmicos e coletores solares nos telhados dos edifícios do AAMA.

- Painéis fotovoltaicos

Para fazer a simulação do potencial de painéis fotovoltaicos utilizou-se novamente o CEA já que este aproveita o modelo já realizado. Este calcula a produção mensal de kWh por m² de área útil de telhado do campus ou dos edifícios escolhidos. Para isto, foi utilizada a base de dados de tecnologias que contém dados técnicos e económicos de tecnologias de conversão. É importante referir que a eficiência do painel é 16% e a inclinação ótima é usada pelo programa. A figura 38 mostra o potencial fotovoltaico por área útil dos telhados do AAMA.

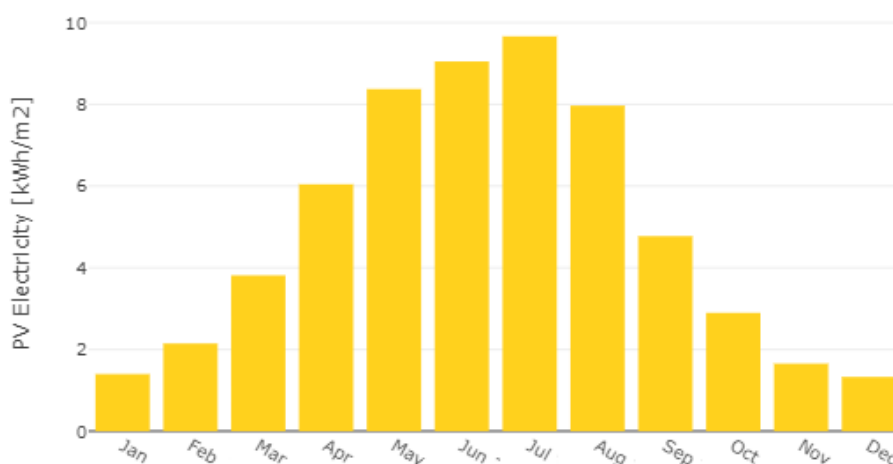


Figura 38: Potencial fotovoltaico por área útil

Com base no gráfico da figura 38, a produção anual de energia de painéis fotovoltaicos nos telhados dos edifícios do AAMA situa-se nos 59.11 kWh/m².

Para saber qual a área necessária para cobrir o valor dos consumos de eletricidade ($\approx 980\text{MWh}$), ou seja, para tornar o campus autossuficiente a nível de eletricidade, calculou-se o quociente entre os consumos elétricos pela produção anual de energia de painéis fotovoltaicos por área útil dos telhados do AAMA, totalizando uma área de, aproximadamente, 16 500 m². Considerando um painel de 2 m², seriam necessários 8 250 painéis e estes sendo adquiridos com um custo unitário de 100€ totalizava um investimento total de 825 000€ que seriam pagos num período de 13 anos e meio.

- Painéis térmicos fotovoltaicos

Os painéis térmicos fotovoltaicos, normalmente abreviados como PVT e também conhecidos como coletores solares híbridos, coletores solares térmicos fotovoltaicos, coletores PV/T ou sistemas de cogeração solar, são tecnologias de geração de energia que convertem a radiação solar em energia térmica e elétrica utilizável. O resultado da simulação desta tecnologia no AAMA está demonstrado na figura 39.

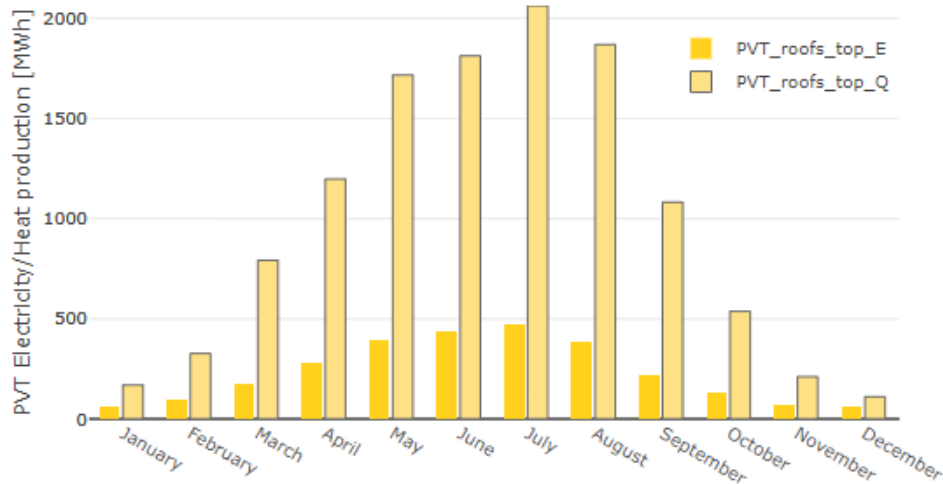


Figura 39: Potencial fotovoltaico térmico

- Coletores solares

Segundo o presidente da ZERO, Francisco Ferreira, “a energia solar não serve apenas para a produção de eletricidade, é também muito importante no aquecimento de águas sanitárias e em usos ainda limitados como a produção de calor na indústria”, acrescentando que “o relativo atraso de Portugal, comparativamente com outros países europeus, prende-se principalmente com o recurso ao uso de painéis no setor residencial” [44]. Um coletor solar é um dispositivo que capta e concentra a radiação solar. Estes dispositivos permitem o aquecimento de água para uso pessoal. O resultado da simulação desta tecnologia no AAMA está demonstrado na figura 40.

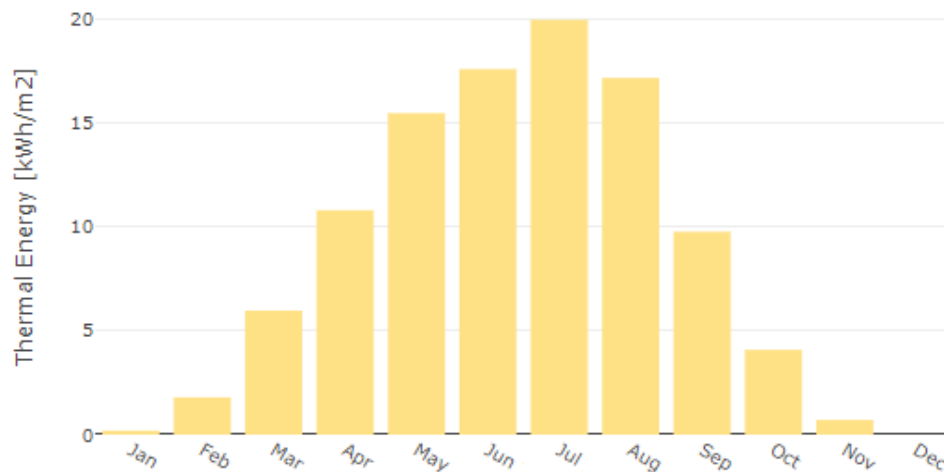


Figura 40: Potencial de coletores solares por área útil

6.1.2. Potencial de outras fontes renováveis

Para além da energia renovável proveniente do sol, existem outras tecnologias que visam otimizar o sistema energético como é o caso da extração de calor de corpos de água e esgotos. Contudo, por causa de erros de código não foi possível fazer a simulação do potencial geotérmico do calor de esgoto, de um corpo de água, entre outros.

No entanto elaborou-se um pequeno estudo sobre o potencial da aplicação de um biodigestor no campus da Amadora, pois também para este caso está a ser desenvolvido um código no CEA que estará futuramente disponível. O objetivo deste estudo é avaliar a oportunidade de utilizar vários resíduos provenientes do AAMA para a formação de biogás.

Esta unidade militar incorpora um refeitório que fornece alimentação diária e cavalariças que estão destinadas aos cavalos para os alunos realizarem atividades equestres. Perante estas condições, é natural que exista desperdício alimentar assim como dejetos de equinos, que são caracterizados como matéria orgânica sem qualquer valor para a instituição, mas que é bastante útil para a produção de biogás.

O biogás é um combustível gasoso que é produzido no interior de um biodigestor, resultante da matéria orgânica. O biodigestor é uma tecnologia que consiste em equipamentos completamente selados e impermeáveis, impossibilitando a existência de ar atmosférico no seu interior, uma vez que as bactérias que realizam a digestão anaeróbia necessitam de um ambiente hipóxico (baixo teor de oxigénio). Esta tecnologia tem como vantagens requerer menos espaço para o tratamento de resíduos, é uma fonte de energia renovável, reaproveita a matéria orgânica e reduz a quantidade de metano emitida para a atmosfera. O biodigestor é constituído por um reservatório que armazena a biomassa por um determinado tempo, e por uma câmara (gasómetro) que armazena o biogás produzido. O biodigestor pode ser classificado como contínuo ou descontínuo. No contínuo, o abastecimento de biomassa é diário, com descarga proporcional à entrada de biomassa. Já no descontínuo, utiliza-se a capacidade máxima de armazenamento de biomassa, retendo-a até à completa bio digestão. Os principais modelos de biodigestores do tipo contínuo são o indiano, o chinês e o canadiano, e do tipo descontínuo, existe o modelo batelada. Um biodigestor contínuo apresenta uma melhor eficiência (em condições idênticas) na produção de biogás que um descontínuo. O biogás é composto por 55-70% de metano (CH₄) e 30-45% dióxido de carbono (CO₂), com pequenas quantidades de ácido sulfídrico (H₂S) e amónia (NH₃), traços de hidrogénio (H₂), azoto (N₂), monóxido de carbono (CO), carboidratos e oxigénio (O₂). É um gás combustível com uma queima renovável, sendo usado como combustível e fonte de energia alternativa.

De forma a otimizar a produção de biogás, a mistura correta para um bom funcionamento do biodigestor é 75% de água e 25% de resíduos orgânicos e deve ser agitada periodicamente para garantir a homogeneidade da mistura. Fatores como temperatura, pH, quantidade de amónia, concentração de certos nutrientes, tempo de digestão, entre outros, têm grande influência no processo da digestão anaeróbica nas diversas etapas [45].

Adjacente à AM encontra-se a unidade Lanceiros Nº2, capaz de fornecer a mesma quantidade de matéria orgânica devido ao desperdício alimentar da sua messe. Os dados obtidos relativamente à quantidade de matéria orgânica que pode ser aproveitada diariamente varia de 180 a 240 kg tendo em conta os dois refeitórios. (AM e Lanceiros).

De forma a realizar uma alimentação diária contínua dos biodigestores, uma vez que nos dias de atividade reduzida o desperdício alimentar não é significativo, a solução parte do conceito de armazenar os restos de comida de forma que não haja um excesso armazenado, mas que exista sempre a mesma quantidade de matéria para alimentar os biodigestores diariamente.

Em média, existirá 210 kg diários de matéria orgânica, mas não poderá ser esta a base diária de alimentação dos biodigestores. De forma que nos sábados, domingos e feriados exista matéria a fornecer, será necessário armazenar cerca de 28% do desperdício diário, e assim sucessivamente nos dias consequentes. Para assegurar uma bio digestão contínua, foi elaborado um plano de alimentação do biodigestor de forma a garantir o que nos dias de atividade reduzida ocorra o fornecimento mínimo de biomassa. Na tabela 17 apresenta-se um exemplo para demonstrar a temática.

	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado	Domingo
Matéria orgânica média (kg)	210	210	210	210	210	0	0
Alimentação do biodigestor (kg)	150	60+90 =150	120+30= 150	180-30 =150	240-90 =150	300-150 =150	150
Acumulado (kg)	60	120	180	30+210 =240	90+210 =300	150	0

Tabela 17: Distribuição da matéria orgânica

Dado que esta distribuição não será perfeita e constante, é então necessário ir ajustando consoante a sua necessidade. Para uma alimentação diária de 150 kg de matéria orgânica, são misturados 75 kg de fezes de equinos. O AAMA possui cavaliças com mais de 20 cavalos. Esta quantidade será facilmente obtida para realizar a mistura, uma vez que cada equino, produz estrume, entre 10 a 25 kg/dia em média. A mistura a colocar no biodigestor será de 75% de água e 25% de matéria orgânica. Neste caso teríamos uma alimentação diária de 225 kg de matéria orgânica proveniente do desperdício alimentar, logo 675 kg de água correspondente a cerca de 675 litros água (75%). Esta água poderá ser reciclada de forma a não ocorrer um desperdício excessivo de água. O total de matéria será de 900kg.

Existe uma temperatura em que a máxima produção de biogás é atingida, esse valor situa-se nos 38°C. Após várias pesquisas, conclui-se que a temperatura no biodigestor, se nenhuma medida for posta em prática, situar-se-á no intervalo entre os 18°C e os 20°C durante o período de Inverno e no intervalo entre os 20°C e os 25°C no período de verão. Com estas temperaturas, o valor de produção de biogás desceria para intervalos insuportáveis para as bactérias produtoras de biogás. Isso resultaria na inviabilidade do projeto estudado neste trabalho. A solução passa por aproveitar a energia térmica

produzida durante a queima do biogás no gerador, fazendo a ligação de um permutador de calor ao gerador.

De acordo com os diferentes tipos de biodigestor e da matéria-prima (substratos) utilizada para a alimentação do biodigestor, entre outros fatores, o tempo de retenção varia de 4 a 60 dias. Para o substrato composto de resíduos de matéria orgânica, o tempo de detenção situa-se na faixa de 20 a 30 dias, sendo que com 30 dias a carga orgânica já sofreu grande redução e, por isso, a produção de biogás já atingiu seu máximo e a partir desse ponto passa a decair.

O volume proposto do biodigestor do tipo contínuo canadiano será de 35000 litros (35m³) para ser capaz de acumular a alimentação diária no biodigestor. A capacidade do biodigestor nunca será totalmente preenchida uma vez que a maior parte da água é retirada. Ao colocar 3 biodigestores, é possível alimentar o primeiro biodigestor por 20 dias, de forma a ocupar uma grande parte de toda a sua capacidade. Depois destes 30 dias, este biodigestor continuará a sua digestão por mais 20 dias de forma a aproveitar a última quantidade de matéria orgânica que lá foi colocada e neste período será utilizado o segundo biodigestor para a matéria orgânica que é desperdiçada nesse período. Este ciclo repete-se a cada 90 dias.

Planeamento	
Dias: 1-20	1º Biodigestor é alimentado diariamente
Dias: 21-40	1º Biodigestor continua a digestão anaeróbia. 2º Biodigestor é alimentado diariamente
Dias: 41-60	2º Biodigestor continua a digestão anaeróbia. 3º Biodigestor é alimentado diariamente
Dias: 61-90	3º Biodigestor continua a digestão anaeróbia. 1º Biodigestor é alimentado diariamente

Tabela 18: Planeamento

A matéria orgânica que é colocada por dia equivale a 225 kg que corresponde a 150 kg de desperdício alimentar e 75 kg de fezes de equino. Esta quantidade daria cerca de 101.3 m³ de biogás por dia segundo o seguinte cálculo, considerando um rendimento de 90%.

$$V_b = M_s * V_{b/M_s} * \eta$$

Onde: V_b = volume diário de biogás, M_s =massa diária de matéria seca, V_{b/M_s} = fator teórico de conversão volume de biogás por matéria seca e η = rendimento da conversão.

$$V_b = 225 \frac{kg}{dia} * 0.5 \frac{m^3}{kg} * 0.9 = 101.3 \frac{m^3}{dia}$$

Esta quantidade de biogás disponível não será viável para a geração de energia elétrica. Portanto, será mais rentável utilizar este biogás de forma a substituir o gás natural da rede.

Após os 40 dias para cada biodigestor, este será devidamente esvaziado e limpo, a água poderá ser reciclada e a matéria existente poderá ser vendida ou utilizada como adubo para produções agrícolas.

Para conseguir implementar um biodigestor, é necessário construir uma estrutura para permitir o seu funcionamento. Por sua vez, é preciso adquirir alguns equipamentos e todos os seus custos estão apresentados na tabela 19 que representam uma estimativa do investimento inicial que é necessário para a implementar o desafio proposto neste trabalho.

Descrição	Quantidade	Valor (€)
Biodigestor 35 m³	3	2.000,00
Terraplanagem/Escavações	N/D	400,00
Casa de máquinas	1	1.900,00
Conjunto de limpeza de biogás	1	4.000,00
Conjunto secador de biogás	N/D	6.000,00
Reservatórios de biogás limpo	1	2.800,00
Tubulações de conexão	N/D	1.500,00
Compressor	3	5.000,00
Rede de alta tensão	N/D	1.200,00
Gasoduto	1km	1.600,00
Escavações gasoduto	1km	800,00
Acessórios de controlo	N/D	4.600,00
Quadro de comando	1	1.900,00
Triturador de lixo orgânico	1	3.000,00
TOTAL		36.700,00

Tabela 19: Investimento Inicial do projeto

Tendo em média 101.3 m³ de biogás por dia, chega-se a um valor anual de cerca 36956.25 m³. Sabendo que cada metro cúbico de biogás contém o equivalente a 6 kWh de energia calorífica, obtém-se um total de 221.737MWh. Estimando uma tarifa média de 0.03€/kWh, concluiu-se que ao aplicarmos um biodigestor com as características mencionadas, a necessidade de gás natural seria menor e haveria uma poupança de 6652.12€ por ano e o investimento que poderia ser feito, seria coberto, em, sensivelmente, 5 anos e 6 meses.

Seria possível alargar o desafio a outras unidades do exército, como a Brigada mecanizada, que sendo constituídas por um efetivo militar superior à Academia Militar, possam criar um sistema de recolha com vista a aumentar a quantidade de energia gerada.

Ao mesmo tempo que se reduz o desperdício e diminuimos o consumo excessivo, também conseguimos que a Aquartelamento da Academia Militar da Amadora reduza as suas despesas e atinja um melhor nível de autossuficiência.

6.2. Outras medidas de eficiencia energética

Nesta secção são apresentadas diversas medidas para reduzir o consumo de energia, sem nunca baixar o potencial dos serviços e atividades desenvolvidas nos edifícios. Assim, expõem-se um conjunto de medidas para reduzir os consumos no que toca a iluminação, equipamentos, entre outros como por exemplo:

- Substituição de lâmpadas por outras mais eficientes

No que diz respeito à iluminação, as lâmpadas que ainda não foram substituídas por outras mais eficientes como as LED, devem ser trocadas.

- Implementação de sensores

A instalação de sensores nas instalações sanitárias de alguns edifícios já é uma realidade e apresenta vários pontos positivos, pois há um maior aproveitamento da iluminação pela luz natural por parte dos utilizadores. Desta forma, é aconselhável expandir esta medida para outras áreas de todo o campus como corredores, átrios e outras áreas de circulação.

- Alteração no comportamento individual

A redução do consumo não se deve apenas a ter aparelhos mais eficientes, mas também à consciência individual, passando por uma conduta mais atenta. Sugere-se então algumas alterações no comportamento de cada um, sem nunca retirar qualquer tipo de conforto individual.

- Desligar a iluminação interior de carácter decorativo de edifícios a partir das 22h00 no período de inverno e a partir das 23h00 no período de verão;
- Desligar a iluminação exterior de carácter decorativo dos edifícios a partir das 24h00, salvaguardando questões de segurança;
- Em épocas festivas, ajustar os períodos de utilização da iluminação para o horário entre as 18h00 e as 24h00;
- Desligar a iluminação interior sempre que o espaço não esteja em uso e após o horário de trabalho;
- Maior utilização de luz natural;
- Adequação da intensidade da iluminação às necessidades dos utilizadores dos espaços.
- Manter portas e janelas fechadas sempre que existir um sistema de climatização ligado e sempre que tenham espaços com entrada direta para a rua;

6.3. Discussão das medidas propostas

Como visto, o polo da Amadora tem um grande potencial solar como também de produção de biogás. No entanto, cabe aos responsáveis decidir se o futuro da AM passa pela eletrificação ou se continua com o uso de alguns equipamentos a gás.

Caso o futuro passe pela eletrificação, o melhor será o uso do sistema de painéis e coletores solares. Neste caso, temos de contar com o conjunto dos gastos elétricos de gás já existentes. Para cobrir todos os gastos, será necessário um investimento total de 1 400 000€ que seriam pagos num período de 17 anos e meio. Este investimento tornaria o AAMA numa unidade com edifícios com necessidades quase zero de energia (nZEB). Apesar do valor ser de grande importância, a AM iria obter benefícios na economia a médio prazo, independência energética e a uma melhoria da qualidade ambiental.

Por outro lado, se a AM optar por continuar a usar equipamentos a gás, é prudente utilizar uma solução combinada de painéis e biodigestores que farão a alimentação de todos os sistemas presentes. Para cobrir todos os gastos elétricos, será necessário um investimento total de 825 000€ que seriam pagos num período de 13 anos e meio. Neste caso, o AAMA não seria uma unidade com edifícios com necessidades quase zero de energia (nZEB), uma vez que a quantidade de biogás produzida não seria suficiente para os consumos atuais do campus. Contudo, os custos da fatura energética iriam ser bastante reduzidos.

7. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este capítulo expõe as limitações e as conclusões finais desta dissertação. São ainda apresentadas algumas sugestões de trabalhos futuros que acrescentam valor e dão continuidade a este estudo.

7.1. Conclusões

Os problemas energéticos e ambientais estão intimamente relacionados, uma vez que produzir, transportar ou consumir energia tem um impacto ambiental significativo. Logo, isto acarreta custos.

De forma a procurar metodologias mais eficientes para reduzir tanto os custos energéticos como as questões ambientais, aprofundou-se o estudo através do recurso a softwares que melhoram a eficiência energética dos edifícios para que seja mais fácil e rápido fazer este tipo de avaliações.

A metodologia utiliza o *City Energy Analyst* que contribuiu para a modelação energética dos edifícios do AAMA, onde se introduz os dados levantados das características de cada edifício numa primeira abordagem, seguindo-se da criação de arquétipos para as diferentes tipologias de construção e consumo presentes nesta unidade militar. Após tudo isto, os dados são simulados não só com a biblioteca de arquétipos presentes no CEA, como também com os arquétipos criados para o caso de estudo em questão. A partir dos resultados da simulação energética dos consumos, averigua-se a fiabilidade e validade dos mesmos de acordo com as normas ASHRAE. No processo de validação dos dados obteve-se dois resultados distintos. O modelo dos arquétipos do CEA deu valores muito acima do estabelecido pela diretriz do ASHRAE (25%), obtendo-se valores na casa dos 60%. Esta grande disparidade pode dever-se à base de dados dos arquétipos do CEA que é baseada em dados estatísticos recolhidos para edifícios suíços, que são diferentes dos portugueses, construídos antes de 2005 e os valores para outros períodos são obtidos a partir de interpolação linear e regulamentos locais de construção. Enquanto, o modelo de arquétipos criado propositadamente para os edifícios do Exército Português em particular para a Academia Militar, alcançou resultados bastante positivos. Os valores atingiram a meta proposta, estando, para os três anos analisados, abaixo dos 25%. O erro relativamente baixo, pode explicar-se por vários pormenores como a quantidade de edifícios que foi feita a recolha de dados. Podem dever-se também ao facto do CEA considerar a planta dos edifícios através da vista aérea que algumas vezes não corresponde à correta, nem à área dos pisos do subsolo. O CEA também contém erros numéricos. No entanto, estas justificações surgem de pequenos erros não significativos e serão corrigidos pelo programa que continua em permanente atualização.

Feita a validação da simulação, realizou-se o estudo de otimização energética. Nesta fase analisou-se todas as ferramentas de otimização e produção de energia renovável que o CEA tem à disposição. Esta dissertação apresenta todas elas, com exceção do potencial geotérmico da captação de calor de esgotos e corpos de água que não foi possível realizar por erros de código. Foi então analisado a potencialidade solar e de produzir biogás. Ambas mostraram bons resultados, pois as unidades militares têm um elevado potencial, possuindo terrenos de grandes dimensões e elevados efetivos.

Com este estudo, é possível concluir que o investimento em tecnologias de fonte renovável e em medidas para uma melhor eficiência energética dos edifícios tem uma grande viabilidade económica. As unidades militares têm um grande consumo diário e o investimento é legítimo, uma vez que, após se tornar numa unidade com edifícios com necessidades energéticas quase zero, a redução da fatura energética é drástica.

O potencial da aplicabilidade do CEA é enorme, no entanto há que ter cuidado ao aplicá-lo a edifícios que não tem características semelhantes para os quais os arquétipos foram criados. Neste caso, deve-se alterar os parâmetros necessários para que os resultados sejam adequados.

Por fim, conclui-se que este trabalho oferece metodologias e ferramentas para uma análise energética mais rápida e apropriada, demonstrando o potencial das unidades militares em implementar medidas de otimização energética que terão benefícios a nível social, financeiro e ambiental. Desta forma contribui também para modernização das forças armadas, demonstrando ser um exemplo a seguir.

7.2. Trabalhos Futuros

A melhoria energética de unidades militares tem um papel bastante importante na redução do consumo e da fatura energética. De forma a fazer uma análise melhor e mais rápida, foi demonstrado nesta dissertação que a modelação energética urbana de edifícios tem um enorme potencial. Nesse sentido, são propostos alguns tópicos para trabalhos futuros:

- Inserir Sistema de Informação Geográfica para Apoio às Operações no CEA, para um melhor detalhe do terreno;
- Melhorar os arquétipos criados que definem a maior parte dos edifícios que o Exército Português possui e criar aqueles que estão em falta como por exemplo enfermaria e oficinas;
- Aplicar a metodologia utilizada nesta dissertação nas restantes unidades militares com os arquétipos criados;
- Fazer a validação dos arquétipos quanto ao valor das emissões, uma vez que estes valores estão explícitos nas faturas.

Referências

- [1] C. Pasten and J. C. Santamarina, 'Energy and quality of life', *Energy Policy*, vol. 49, pp. 468–476, outubro 2012, doi: 10.1016/j.enpol.2012.06.051.
- [2] Statista, (2022). *Primary energy demand change worldwide from 2019 to 2021*. Consultado em abril de 2022, disponível em <https://www.statista.com/statistics/1242753/change-in-global-energy-demand/>.
- [3] British Petroleum Company, "*BP Statistical Review of World Energy*". London: British Petroleum Co, 2021.
- [4] International Energy Agency: IEA (2022). *Russia's War on Ukraine*. Consultado em junho de 2022, disponível em <https://www.iea.org/topics/russia-s-war-on-ukraine>.
- [5] Z. Anna, '*Renewable Energy Directive*', p. 10
- [6] Direção Geral de Energia e Geologia, ADENE. (2021). *Energia em Números*.
- [7] K. Sadamori and B. Motherway, '*Energy Efficiency 2021*', *Energy Effic.*, p. 103, 2021.
- [8] European Parliament and Council of the European Union, "*Directive (EU) 2018/844 of the European parliament and of the council of 30 May 2018*," vol. 2018, pp. 75–91, 2018.
- [9] Parlamento Europeu, "*Estratégia de longo prazo para a renovação dos edifícios (ELPRE)*." 2020.
- [10] 'World Energy Outlook 2021', p. 386.
- [11] United Nations Climate Change. *What is the Kyoto Protocol?*. Consultado em maio de 2022, disponível em https://unfccc.int/kyoto_protocol.
- [12] European Commission. *Renewable energy directive*. Consultado em junho de 2022, disponível em <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2009/28/oj>.
- [13] European Commission. *Energy performance of buildings directive*. Consultado em junho de 2022, disponível em https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en.
- [14] Direção Geral de Energia e Geologia. *Estratégias e Política Energética*. Consultado em junho de 2022, disponível em <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/planeamento-energetico-e-seguranca-de-abastecimento/planeamento-e-politica-energetica/estrategias-e-politica-energetica/>.
- [15] Diário da República, "*Decreto-Lei n.o 118/2013, de 20 de agosto (desempenho energético dos edifícios)*", vol. 159, pp. 4988–5005, 2013.
- [16] United Nations Climate Change. *The Paris Agreement*. Consultado em maio de 2022, disponível em <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>.
- [17] Diário da República, "*Decreto-Lei n.o 101/2020, de 7 de dezembro (Requisitos aplicáveis a edifícios para a melhoria do seu desempenho energético e regula o Sistema de Certificação Energética*

de Edifícios, transpondo a Diretiva (UE) 2018/844 e parcialmente a Diretiva (UE) 2019/944”, Série I de 2020.

[18] Republica Portuguesa. (2019). *Roteiro para a neutralidade carbónica 2050*.

[19] Direção Geral de Energia e Geologia. *Estratégia de Longo Prazo para a Renovação dos Edifícios de Portugal (ELPRE PT)*. Consultado em junho de 2022, disponível em <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-transversais/relacoes-internacionais/politica-energetica/estrategia-de-longo-prazo-para-a-renovacao-dos-edificios-de-portugal-elpre-pt/>

[20] A. Thumann, W. J. Younger, and T. Niehus, *Handbook of energy audits*, 8th ed. Lilburn GA: Boca Raton, FL: Fairmont Press; Distributed by CRC Press/Taylor & Francis, 2010.

[21] Portal Energia – Pedro Reis. (2012). *A importância e as fases de uma auditoria energética*. Consultado em junho de 2022, disponível em <https://www.portal-energia.com/a-importancia-e-fases-de-uma-auditoria-energetica/>

[22] M. Sharma, “How to assess a regression’s predictive power for energy use” *Energy Management, M&V*, 2020. Consultado em junho de 2022, disponível em <https://www.kw-engineering.com/how-to-assess-a-regressions-predictive-power-energy-use/>.

[23] Direção Geral de Energia e Geologia. *Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE)*. Consultado em junho de 2022, disponível em <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/eficiencia-energetica/auditorias-energeticas/sistema-de-certificacao-energetica-dos-edificios-sce/>

[24] Diário da República, “Portaria 6476, de 1 de julho de 2021 (Ambiente e ação climática)”, vol. 126, pp. 330-(66), 2021.

[25] J. Gupta, M. Chakraborty. (2021). *Energy efficiency in buildings*. doi:10.1016/B978-0-12-822989-7.00016-0

[26] A. Figueiredo, J. Figueira, R. Vicente, and R. Maio, “Thermal comfort and energy performance: Sensitivity analysis to apply the Passive House concept to the Portuguese climate”, *Build. Environ.*, vol. 103, no. 2016, pp. 276–288, 2016.

[27] A. J. Marszal et al., ‘Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies’, *Energy Build.*, vol. 43, no. 4, pp. 971–979, Apr. 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.12.022.

[28] D. D’Agostino and L. Mazzarella, ‘What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions’, *J. Build. Eng.*, vol. 21, pp. 200–212, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.job.2018.10.019.

[29] Portugal Passivhaus.(2019). *O que são edifícios nZEB? Serão hoje uma realidade?*. Consultado em julho de 2022, disponível em <http://passivhaus.pt/blog-4-10-O-que-s%C3%A3o-edif%C3%ADcios-nZEB?--Ser%C3%A3o-hoje-uma-realidade?>.

- [30] A. A. W. Hawila, R. Perneti, C. Pozza, and A. Belleri, '*Plus energy building: Operational definition and assessment*', *Energy Build.*, vol. 265, p. 112069, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.112069.
- [31] C. F. Reinhart and C. Cerezo Davila, '*Urban building energy modeling – A review of a nascent field*', *Build. Environ.*, vol. 97, pp. 196–202, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.12.001.
- [32] T. Hong, Y. Chen, X. Luo, N. Luo, and S. H. Lee, '*Ten questions on urban building energy modeling*', *Build. Environ.*, vol. 168, p. 106508, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106508.
- [33] F. Johari, G. Peronato, P. Sadeghian, X. Zhao, and J. Widén, '*Urban building energy modeling: State of the art and future prospects*', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 128, p. 109902, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109902.
- [34] J. Acosta, (2020). *Neural network model for building electric energy consumption forecasting in densely populated tropical areas*. pp.10-11
- [35] 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 Build.*, vol. 113, pp. 202–226, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.11.055.
- [36] City Energy Analyst. (2017). Urban Energy Performance. Consultado em junho de 2022, disponível em <https://www.cityenergyanalyst.com/>
- [37] Chen, Yixing; Hong, Tianzhen (2018). *Impacts of building geometry modeling methods on the simulation results of urban building energy models*. 717–735. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.02.073
- [38] Academia Militar. *Missão e Valores*. Consultado em maio de 2022, disponível em <https://academiamilitar.pt/sobre-a-am/missao-e-valores.html>
- [39] Diário da República, "Portaria 6476, de 1 de julho de 2021 (Clima)", vol. 126, pp. 97-101, 2021.
- [40] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2017). *ASHRAE Handbook*. I-P Edition
- [41] Daikin, "*Daikin VRV, inventada por nós*," 2019. Consultado em julho de 2022, disponível em https://www.daikin.pt/pt_pt/product-group/vrv.html.
- [42] Wikipédia, "VRV," 2019. Consultado em julho de 2022, disponível em <https://pt.wikipedia.org/wiki/VRV>.
- [43] Associação Portuguesa de Energias Renováveis. *Energias Renováveis*. Consultado em agosto de 2022, disponível em <https://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/destaques>
- [44] Zero, Associação Sistema Terrestre Sustentável. (2021) Consultado em agosto de 2022, disponível em <https://zero.org/alteracoes-climaticas-energia-e-mobilidade/>
- [45] E. Moço, (2012). *Projeto de uma unidade produtora de biogás*. Escola Superior de Tecnologia de Tomar

Anexos

Anexo A – Parâmetros climáticos do AAMA

O cálculo de certos parâmetros climáticos é necessário para a caracterização do zonamento climático da região da Amadora. Este município fica inserido no Continente no que toca ao nível NUTS I, e área Metropolitana de Lisboa no que refere ao nível NUTS II e III, como ilustra a tabela seguinte.

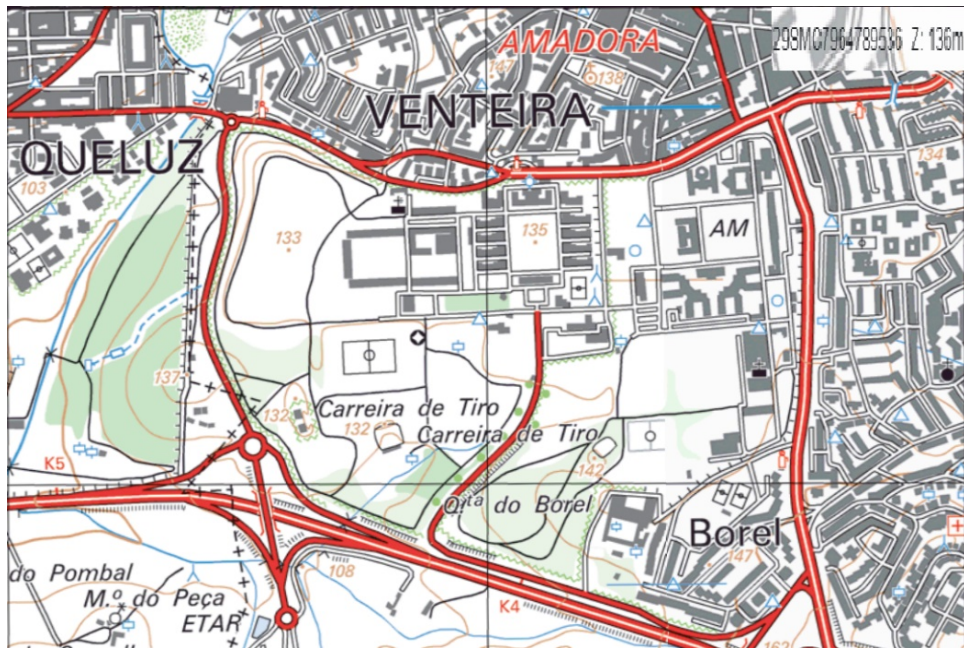
NUTS III	Municípios
Serra da Estrela	Fornos de Algodres, Gouveia, Seia
Dão - Lafões	Aguar da Beira, Carnegal do Sal, Castro Daire, Mangualde, Nelas, Oliveira de Frades, Penalva do Castelo, Santa Comba Dão, São Pedro do Sul, Sátão, Tondela, Vila Nova de Paiva, Viseu, Vouzela
Pinhal Interior Norte	Alvaiázere, Ansião, Arganil, Castanheira de Pera, Figueiró dos Vinhos, Góis, Lousã, Miranda do Corvo, Oliveira do Hospital, Pampilhosa da Serra, Pedrógão Grande, Penela, Tábua, Vila Nova de Poiares
Pinhal Interior Sul	Oleiros, Proença-a-Nova, Sertão, Vila de Rei
Pinhal Litoral	Batalha, Leiria, Marinha Grande, Pombal, Porto de Mós
Oeste	Alcobaça, Alenquer, Arruda dos Vinhos, Bombarral, Cadaval, Caldas da Rainha, Lourinhã, Nazaré, Óbidos, Peniche, Sobral de Monte Agraço, Torres Vedras
Médio Tejo	Abrantes, Alcanena, Constância, Entroncamento, Ferreira do Zêzere, Mação, Ourém, Sardoal, Tomar, Torres Novas, Vila Nova de Barquinha
Lezíria do Tejo	Almeirim, Alpiarça, Azambuja, Benavente, Cartaxo, Chamusca, Coruche, Golegã, Rio Maior, Salvaterra de Magos, Santarém
Grande Lisboa	Amadora, Cascais, Lisboa, Loures, Mafra, Odivelas, Oeiras, Sintra, Vila Franca de Xira
Península de Setúbal	Alcochete, Almada, Barreiro, Moita, Montijo, Palmela, Seixal, Sesimbra, Setúbal
Alto Alentejo	Alter do Chão, Arronches, Avis, Campo Maior, Castelo de Vide, Crato, Elvas, Fronteira, Gavião, Marvão, Monforte, Mora, Nisa, Ponte de Sôr, Portalegre
Alentejo Central	Alandroal, Arraiolos, Borba, Estremoz, Évora, Montemor-o-Novo, Mourão, Portel, Redondo, Reguengos de Monsaraz, Sousel, Vendas Novas, Viana do Alentejo, Vila Viçosa
Alentejo Litoral	Alcácer do Sal, Grândola, Odemira, Santiago do Cacém, Sines
Baixo Alentejo	Aljustrel, Almodôvar, Alvito, Barrancos, Beja, Castro Verde, Cuba, Ferreira do Alentejo, Mértola, Moura, Ourique, Serpa, Vidigueira
Algarve	Albufeira, Alcoutim, Aljezur, Castro Marim, Faro, Lagoa, Lagos, Loulé, Monchique, Olhão, Portimão, S. Brás de Alportel, Silves, Tavira, Vila do Bispo, Vila Real de Santo António
Região Autónoma dos Açores	Vila do Porto, Lagoa, Nordeste, Ponta Delgada, Povoação, Ribeira Grande, Vila Franca do Campo, Angra do Heroísmo, Praia da Vitória, Santa Cruz da Graciosa, Calheta, Velas, Lajes do Pico, Madalena, São Roque do Pico, Horta, Lajes das Flores, Santa Cruz das Flores, Vila do Corvo
Região Autónoma da Madeira	Calheta, Câmara de Lobos, Funchal, Machico, Ponta do Sol, Porto Moniz, Ribeira Brava, Santa Cruz, Santana, São Vicente, Porto Santo

NUTS III. Fonte: [24]

Pela equação 1 e pelos dados da tabela seguinte relativa aos valores de referência para a estação de aquecimento, chega-se aos resultados para a determinação da zona climática de inverno.

	z REF m	$\theta_{ax, v}$		I_{tot}								
		REF °C	a °C/km	kWh/m ² acumulados de junho a setembro								
				0°	90° N	90° NE	90° E	90° SE	90° S	90° SW	90° W	90° NW
Minho-Lima	268	20,5	-4	785	220	345	475	485	425	485	475	345
Alto Trás-os-Montes	680	21,5	-7	790	220	345	480	485	425	485	480	345
Cávado	171	20,7	-3	795	220	345	485	490	425	490	485	345
Ave	426	20,8	-3	795	220	350	490	490	425	490	490	350
Grande Porto	94	20,9	0	800	220	350	490	490	425	490	490	350
Tâmega	320	21,4	-3	800	220	350	490	490	425	490	490	350
Douro	579	22,7	-6	805	220	350	490	490	420	490	490	350
Entre Douro e Vouga	298	20,6	-3	805	220	350	490	490	425	490	490	350
Baixo Vouga	50	20,6	-2	810	220	355	490	490	420	490	490	355
Baixo Mondego	67	20,9	0	825	225	360	495	495	420	495	495	360
Beira Interior Norte	717	21,7	-5	820	220	355	495	500	425	500	495	355
Beira Interior Sul	328	25,3	-7	830	220	360	500	495	420	495	500	360
Cova da Beira	507	22,5	-6	825	225	360	495	495	425	495	495	360
Serra da Estrela	553	21,0	-4	820	225	355	495	495	420	495	495	355
Dão - Lafões	497	21,2	-3	815	220	355	495	490	415	490	495	355
Pinhal Interior Norte	361	21,2	-2	825	220	357	500	495	420	495	500	357
Pinhal Interior Sul	361	22,4	-3	830	225	360	500	500	420	500	500	360
Pinhal Litoral	126	20,1	-2	830	225	360	500	495	415	495	500	360
Oeste	99	21,0	0	830	225	360	500	495	415	495	500	360
Médio Tejo	168	22,1	-7	835	220	360	500	495	415	495	500	360
Lezíria do Tejo	73	23,1	-6	835	225	365	500	495	410	495	500	365

Valores de referência e declives para ajustes em altitude para a estação de aquecimento. Fonte: [24]



Z local. Fonte: Carta topográfica

Equação (1)

$$X = X_{ref} + a(z - z_{ref})$$

$$GD = 1071 + 1700(0.136 - 0.109)$$

$$GD = 1116.9^{\circ}C < 1300^{\circ}C$$

No que diz respeito à estação de aquecimento, as zonas climáticas de inverno são definidas de acordo com a tabela seguinte.

Critério	GD ≤ 1300	1300 < GD ≤ 1800	GD > 1800
Zona	I1	I2	I3

E tem-se:

$$X = X_{ref} + a(z - z_{ref})$$

$$M = 5.3 + 3(0.136 - 0.109)$$

$$M = 5.381 \text{ meses}$$

$$X = X_{ref} + a(z - z_{ref})$$

$$\theta_{ext,i} = 10.8 - 4(0.136 - 0.109)$$

$$\theta_{ext,i} = 10.692^{\circ}C$$

Pela equação 1 e pelos dados da tabela seguinte relativa aos valores de referência para a estação de arrefecimento, chega-se aos resultados para a determinação da zona climática de verão.

	z REF m	$\theta_{ext,v}$		I_{tot}								
		REF °C	a °C/km	kWh/m ² acumulados de junho a setembro								
				0°	90° N	90° NE	90° E	90° SE	90° S	90° SW	90° W	90° NW
Grande Lisboa	109	21,7	-10	840	225	365	500	495	410	495	500	365
Península de Setúbal	47	22,8	-5	845	225	365	505	495	410	495	505	365
Alto Alentejo	246	24,5	0	845	225	365	505	500	415	500	505	365
Alentejo Central	221	24,3	0	850	225	370	510	500	415	500	510	370
Alentejo Litoral	88	22,2	0	850	225	365	510	495	405	495	510	365
Baixo Alentejo	178	24,7	0	855	225	370	510	495	405	495	510	370
Algarve	145	23,1	0	865	225	375	515	500	405	500	515	375
R.A. Açores	10	21,3	-6	640	195	285	375	375	235	375	375	285
R.A. Madeira	380	20,2	-6	580	195	260	325	320	280	320	325	260

Valores de referência e declives para ajustes em altitude para a estação de arrefecimento. Fonte: [24]

$$X = X_{ref} + a(z - z_{ref})$$

$$\theta_{ext,i} = 21.7 - 10(0.136 - 0.109)$$

$$\theta_{ext,i} = 21.43^{\circ}C$$

No que diz respeito à estação de arrefecimento, as zonas climáticas de verão são definidas de acordo com a tabela seguinte.

Critério	$\theta_{ext,v} \leq 20^{\circ}C$	$20^{\circ}C < \theta_{ext,v} \leq 22^{\circ}C$	$\theta_{ext,v} > 22^{\circ}C$
Zona	V1	V2	V3

A duração da estação de arrefecimento, verão é igual a 4 meses = 2928 horas.

Anexo B – Correspondência entre os setores dos edifícios com as geometrias criadas no CEA

Edifício	Setor do Edifício	Número da Geometria (BXXXX)
Edifício A	este / centro / oeste / atrium / biblioteca	B1014/ B1015/ B1016/ B1074/ B1017
Edifício B	norte / este / sul / sudoeste / oeste(bar) / oeste(atrío) / noroeste	B1013/ B1012/ B1011/ B1010/ B1008/ B1009/ B1007
Edifício Direção de Ensino	Gabinetes	B1003
Edifício dos Auditórios	Auditório Grande / atrio / Auditório pequeno	B1005/ B1004/ B1006
Edifício de Comando	Norte / Centro / Sul	B1018/ B1019/ B1020
Refeitório	Refeitório / Arrecadação / Loja	B1001/ B1024/ B1025
CCS	Alojamentos / Gabinetes	B1000/ B1026
Edifício dos Alunos	Atrio / Bares + Salas	B1027/ B1028
1ª e 2ª Companhia	Quartos / Gabinetes / Arrecadações / Salas de estudo / Casa das botas / Atrio / Secretarias	B1043+B1047/ B1045+1048/ B1046+B1049/ B1050+B1055/ B1044+B1056/ B1051/ B1052+B1053
3ª e 4ª Companhia	Quartos / Gabinetes / Arrecadações / Salas de estudo / Casa das botas / Atrio / Secretarias	B1036+B1040/ B1030+B1033/ B1029+B1032/ B1031+B1034/ B1037+B1041/ B1035/ B1038+B1039
Caserna de Sargentos	Alojamentos	B1023
Picadeiro e cavalariças	Picadeiro coberto/ Cavalariças	B1057/ B1058
Recintos desportivos 1	Ginásio/Telheiro/Pavilhões gimnodesportivos/ Gabinetes	B1059 / B1060/ B1061/ B1062/ B1063/ B1064/ B1065
Recintos desportivos 2	Pavilhão gimnodesportivos	B1002
Pavilhão Koboyashi	Pavilhão central / Pavilhão de boxe	B1067/ B1066
Igreja	Igreja	B1068
Casa da Guarda	Casa da Guarda	B1022
antigas lavandarias	Antigas lavandarias	B1069/ B1070
Edifício CINAMIL	Laboratório balístico do CINAMIL	B1071
Outros alojamentos desprezáveis para o estudo	Casa das máquinas AQS / Edifício da carreira de tiro de 25 m	B1042+B1054/ B1073

Anexo C – Imagens

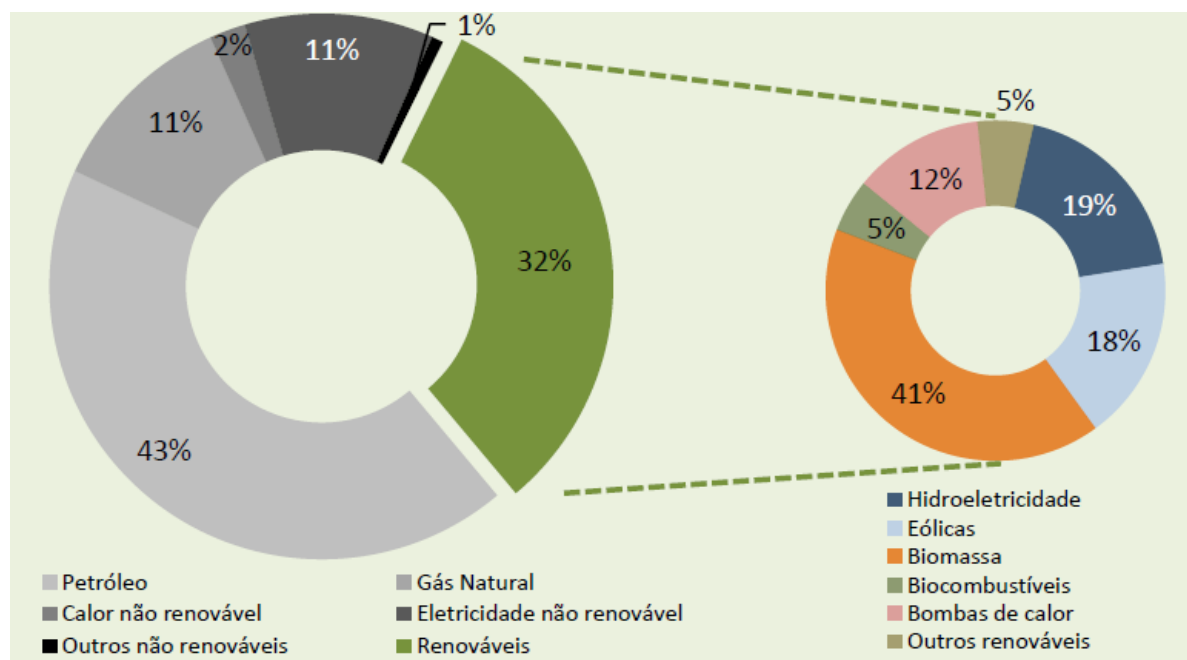
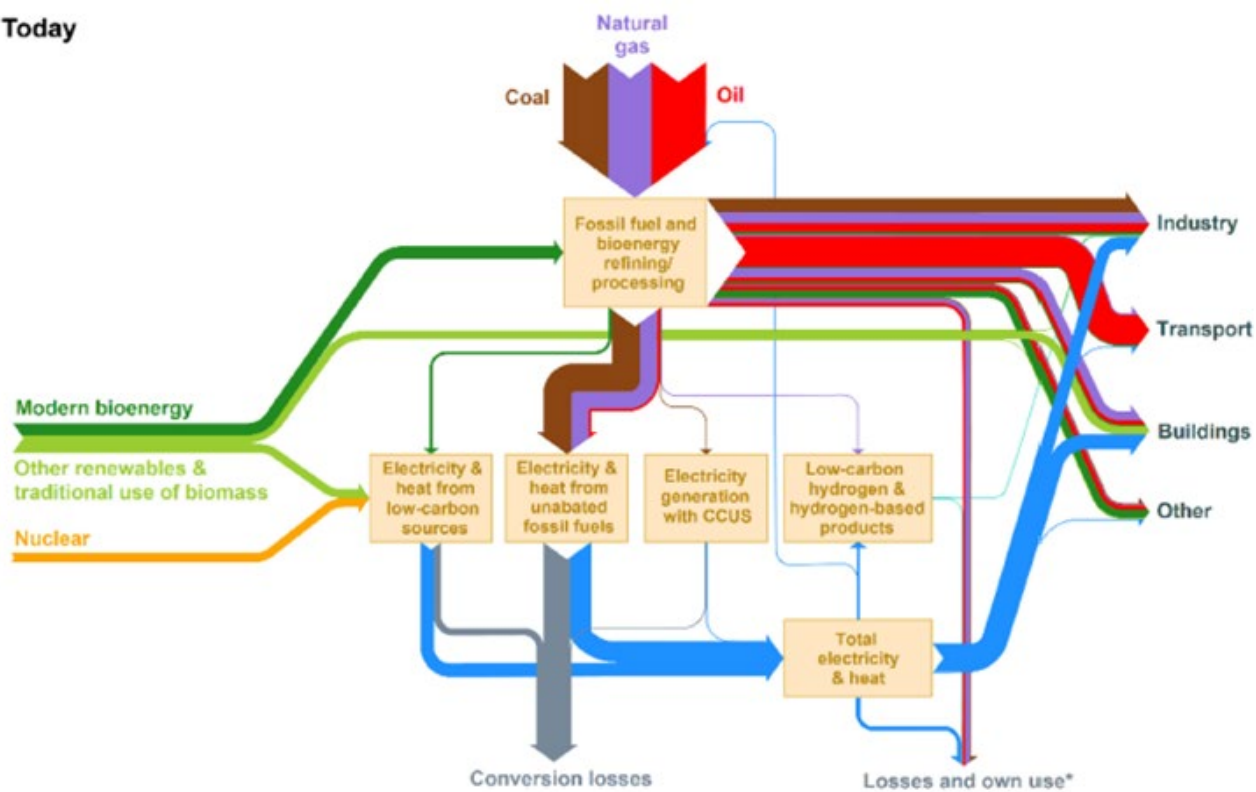


Figura 3

Today



NZE 2050

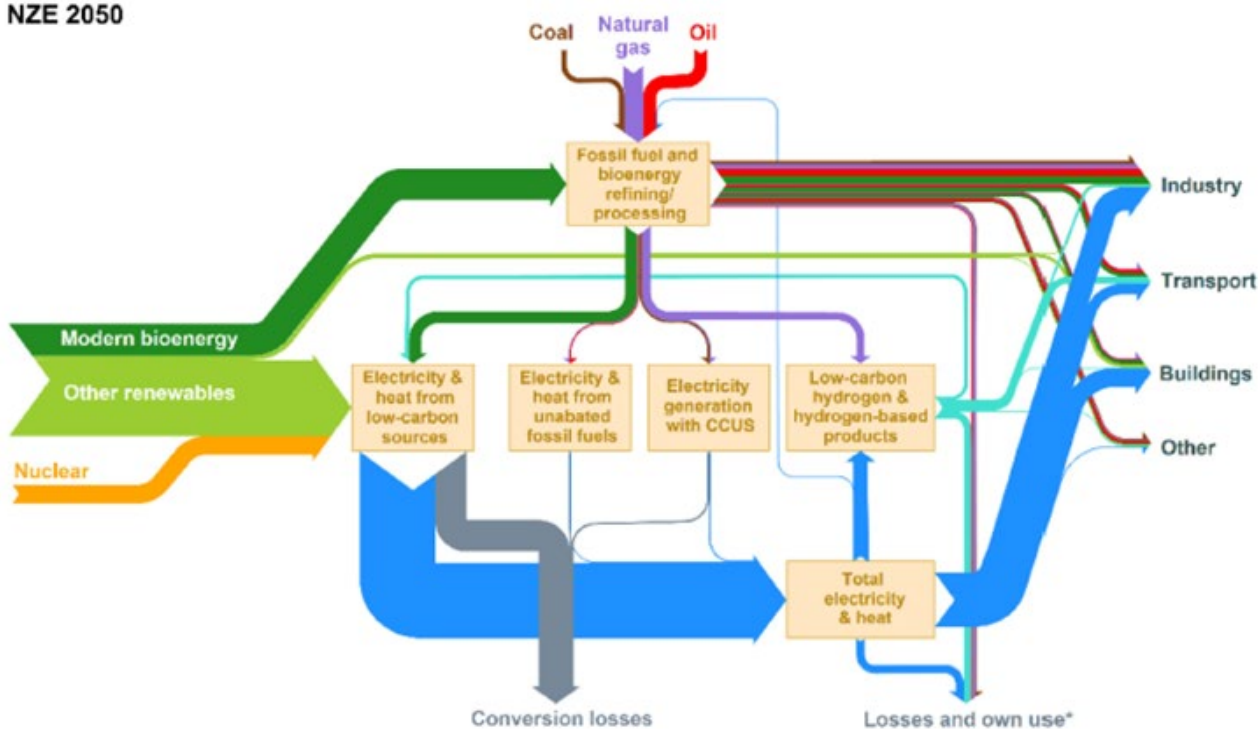


Figura 4

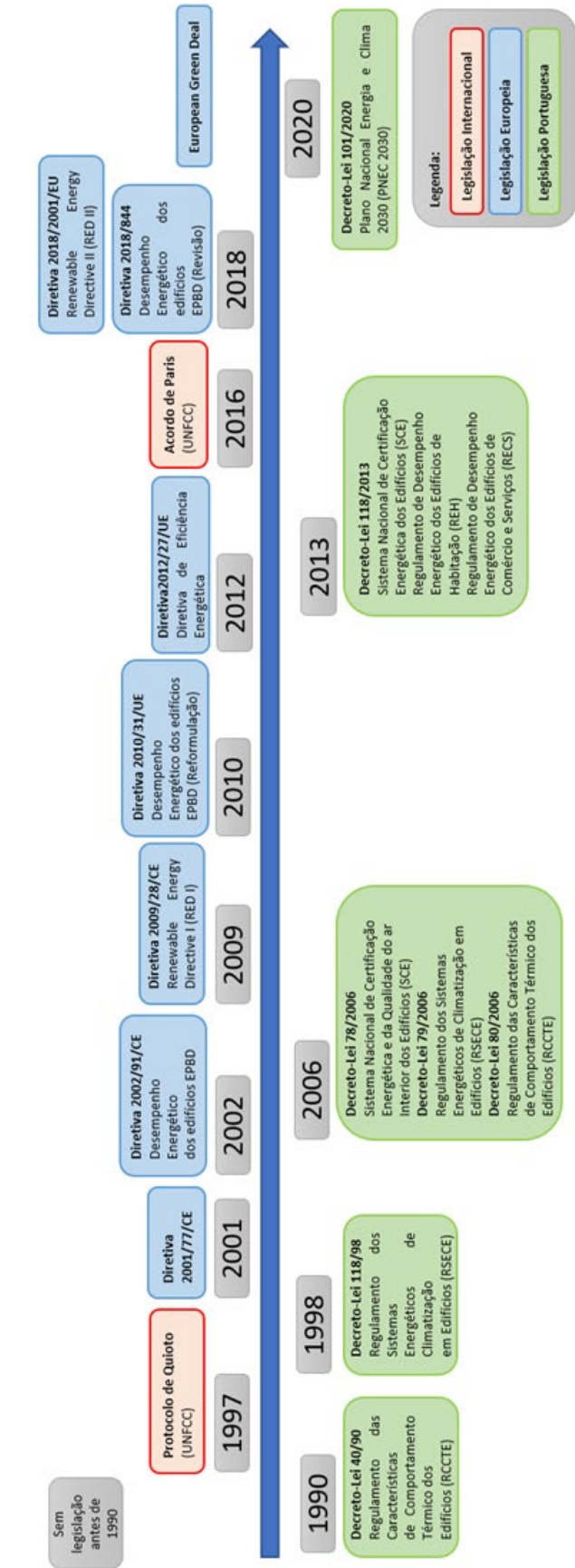


Figura 5