



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Rui Pedro Barreto Ribeiro

**AUTOSSUFICIÊNCIA ENERGÉTICA E GESTÃO  
DA PROCURA NUMA INSTITUIÇÃO DE  
ENSINO SUPERIOR**

VOLUME 1

**Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, no ramo de Energia, orientada pela Professora Doutora Ana Soares e apresentada ao Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.**

Maio de 2024



Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
da Faculdade de Ciências e Tecnologias  
da Universidade de Coimbra

# **Autossuficiência energética e gestão da procura numa instituição de ensino superior**

Rui Pedro Barreto Ribeiro

Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, no ramo de Energia, orientada pela Professora Doutora Ana Soares e apresentada ao Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Maio 2024



UNIVERSIDADE DE  
**COIMBRA**



**“Now this is not the end. It is not even the beginning of the end. But it is, perhaps,  
the end of the beginning.”**

Winston Churchill (1874–1965)

---

# Agradecimentos

---

A realização desta dissertação e todo o meu percurso académico representou uma jornada intelectual gratificante e desafiadora, que não teria sido possível sem o apoio e contribuição de todos os que me acompanharam durante o meu percurso.

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha orientadora, Professora Doutora Ana Soares, pela sua disponibilidade e orientação ao longo deste processo.

À Universidade de Coimbra que durante estes dois anos de mestrado me recebeu e ajudou a moldar o meu futuro e à Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro onde realizei a minha licenciatura, e que foi como uma segunda casa durante todos esses anos.

Agradeço também aos professores e colegas do DEEC e da ESAC, em especial à prof. Marta Lopes e à Eng<sup>a</sup>. Sandra Santos cuja ajuda e disponibilidade enriqueceram o meu entendimento sobre o tema desta dissertação. As vossas contribuições foram inestimáveis para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais e irmãos, que sempre estiveram ao meu lado, oferecendo apoio emocional, incentivo e compreensão durante os momentos de dificuldade e de dedicação intensa a este projeto.

Aos meus grandes amigos, Rita, João, Sampaio e Maria que desde o primeiro dia da universidade estiveram presentes nos momentos mais marcantes desta minha caminhada, tivessem sido bons ou maus, e sempre se demonstraram com vontade de ajudar.

À minha namorada, Lúcia, que durante todo este tempo demonstrou enorme paciência e me acompanhou durante todo o processo de elaboração desta dissertação. Agradeço por ser a minha fonte de inspiração e motivação.

Gostaria ainda de agradecer a todos os que de alguma forma contribuíram para este trabalho, mesmo que não mencionados especificamente aqui. As suas contribuições foram importantes para o meu sucesso.

Por último e não menos importante, gostaria de agradecer a mim, por nunca ter desistido e ter sempre encontrado a força suficiente para continuar apesar das adversidades.

Este trabalho não seria possível sem o apoio e contribuição de cada um de vocês. Muito obrigado.

Rui



## Resumo

---

A presente dissertação tem como objetivo investigar e implementar estratégias de autossuficiência energética e gestão da procura numa instituição de ensino superior. O crescente interesse pela sustentabilidade e pelas energias renováveis têm impulsionado a procura por soluções que reduzam a dependência de fontes de energia de origem fóssil e minimizem o impacto ambiental. Nesse contexto, as instituições de ensino superior têm um papel fundamental a desempenhar como agentes de mudança e inovação.

A presente pesquisa tem como base a análise do consumo desagregado de energia de certos equipamentos da Escola Superior Agrária de Coimbra, bem como a energia disponível gerada localmente. A gestão dinâmica da procura será uma componente essencial da dissertação, abordando o desenvolvimento de um sistema inteligente para otimizar o consumo de energia. Ao longo da dissertação, serão estudadas metodologias que permitem controlar o consumo de energia com base em critérios de eficiência, custo e disponibilidade de energia. Serão consideradas restrições operacionais, como períodos de pico de consumo, preferência do utilizador e potência contratada, para garantir a estabilidade do sistema elétrico da instituição.

Através de simulações, irão ser avaliados os benefícios da implementação das estratégias propostas, tendo em conta aspetos como redução de custos, autonomia energética. Serão também abordados possíveis desafios, como questões financeiras e de integração de novas tecnologias de armazenamento ao sistema existente.

Os resultados desta dissertação incluem um caminho para a implementação de medidas de autossuficiência energética e gestão da procura na instituição, tendo em consideração as características específicas do local e as necessidades energéticas. Os resultados mostram ainda os benefícios da integração de tecnologias de armazenamento quando existe meios de produção de energia fotovoltaica local.

Palavras-chave: autossuficiência energética, gestão da procura, instituição de ensino superior, energias renováveis, armazenamento de energia.



# Abstract

---

This dissertation aims to investigate and implement energy self-sufficiency and demand management strategies in a higher education institution. The growing interest in sustainability and renewable energies has driven the search for solutions that reduce dependence on fossil-based energy sources and minimize environmental impact. In this context, higher education institutions have a fundamental role to play as agents of change and innovation.

This research is based on analyzing the disaggregated energy consumption of certain equipment at the Coimbra School of Agriculture, as well as the available energy generated locally. Dynamic demand management will be an essential component of the dissertation, addressing the development of an intelligent system to optimize energy consumption. Throughout the dissertation, methodologies will be studied that allow energy consumption to be controlled based on efficiency, cost, and energy availability criteria. Operational restrictions will be taken into account, such as peak times for loads, user preference, and contracted power, to guarantee the stability of the institution's electrical system.

Through simulations, the benefits of implementing the proposed strategies will be evaluated, taking into account aspects such as cost reduction and energy autonomy. Possible challenges will also be addressed, such as financial issues and the integration of new storage technologies into the existing system.

The results of this dissertation include a path for implementing energy self-sufficiency and demand management measures in the institution, considering the specific characteristics of the site and the energy needs. The results also show the benefits of integrating storage technologies when there is local photovoltaic energy production.

Keywords: energy self-sufficiency, demand management, higher education institution, renewable energies, energy storage.



# Índice

---

Agradecimentos .....	v
Resumo .....	vii
Abstract .....	ix
Índice .....	xi
Índice de figuras .....	xiii
Índice de tabelas.....	xv
Lista de Acrónimos .....	xvii
1 Introdução .....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura da dissertação .....	2
2 Estado da arte.....	5
2.1 Políticas energéticas .....	5
2.2 Enquadramento energético .....	7
2.3 Uso eficiente de energia em edifícios .....	10
2.4 Gestão da Procura .....	12
2.4.1 Metodologias de gestão da procura .....	15
2.5 Auditorias energética .....	17
2.5.1 Conceito e objetivos .....	17
2.5.2 Tipos de Auditoria .....	18
2.5.3 Metodologia .....	18
3 Caso de estudo - Enquadramento ESAC.....	21
3.1 Caracterização das cargas.....	24
3.1.1 Equipamentos de frio .....	26
3.1.2 Estufas.....	28
3.1.3 Autoclaves .....	29
3.1.4 Motores .....	30
4 Metodologia.....	33

4.1	Descrição do problema.....	33
4.2	Formulação matemática .....	35
5	Resultados .....	41
5.1	Caso base.....	41
5.2	Caso sem bateria .....	43
5.3	Caso com bateria.....	45
5.4	Discussão de resultados.....	49
6	Conclusão e trabalhos futuros.....	53
6.1	Conclusão.....	53
6.2	Trabalhos Futuros.....	54
	Bibliografia .....	57

# Índice de figuras

---

Figura 1: Metas a serem atingidas para o horizonte 2030 em relação a 2005.[5] .....	6
Figura 2: Produção de eletricidade em Portugal 2022. [6] .....	8
Figura 3: Evolução do consumo vs produção de energia em Portugal [6] .....	9
Figura 4: Evolução do consumo em Portugal por setor [9].....	10
Figura 5: Técnicas de GP [22] .....	13
Figura 6: Fluxograma do funcionamento de uma AE .....	19
Figura 7: Estrutura do campus ESAC [40] .....	23
Figura 8: Exemplo da produção fotovoltaica ao longo de uma semana .....	23
Figura 9: Fluke 1730 Analisador de Energia Trifásico [41].....	26
Figura 11: USB Temperature Data Logger with Display[42].....	26
Figura 10: Event, Count and State Data Logger with USB .....	26
Figura 12: Diagrama diário de carga e temperatura de uma arca frigorífica .....	27
Figura 13: Diagrama de carga com temperatura de uma arca congeladora .....	27
Figura 14: Diagrama de carga típico de um ciclo de trabalho de uma estufa .....	29
Figura 15: Diagrama de carga de vários ciclos de funcionamento de uma autoclave .....	30
Figura 16: Diagrama de carga diário de um motor de captação de água .....	31
Figura 17: Fluxos de potência entre o Edifício e RESPsem uso de métodos de otimização .....	42
Figura 18: Consumo diário vs produção fotovoltaica (caso base) .....	43
Figura 19: Escalonamento diário das cargas em estudo .....	43
Figura 20: Fluxos de potência entre o Edifício e RESP com uso de métodos de otimização sem bateria .....	44
Figura 21: Consumo diário vs produção fotovoltaica (sem bateria) .....	45
Figura 22: Escalonamento diário das cargas em estudo .....	45
Figura 23: SOC diário bateria 18 kWh.....	46
Figura 24: Fluxos de potência entre o Edifício e RESP com uso de métodos de otimização com bateria .....	47
Figura 25: Consumo diário vs produção fotovoltaica (com bateria).....	48
Figura 26: Escalonamento diário das cargas em estudo .....	48
Figura 27: Comparativo preço diário das várias soluções.....	50



## Índice de tabelas

---

Tabela 1: Restrições do escalonamento .....	34
Tabela 2: Comparativo do preço diário .....	49
Tabela 3: Comparativo ROI.....	50
Tabela 4: Comparativo dos indicadores energéticos (kWh).....	51



## Lista de Acrónimos

---

AE – Auditoria Energética

BTE – Baixa Tensão Especial

DC – Diagramas de Carga

EE – Eficiência Energética

ELPRE – Estratégias de Longo Prazo para a Reabilitação de edifícios

ESAC – Escola Superior Agrária de Coimbra

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

GEE – Gases Efeito de Estufa

GP – Gestão da Procura

HEMS – Home Energy Management Systems

HPV – Produção fotovoltaica alta

IES – Instituição de Ensino Superior

LPV – Produção fotovoltaica fraca

MILP – Mixed Integer Linear Programming (Programação Linear Inteira Mista)

MPV – Produção fotovoltaica média

PNAEE – Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética

PNAER – Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis

PNEC – Plano Nacional de Energia e Clima

PNEC – Plano Nacional de Energia e Clima 2030

PV – Produção Fotovoltaica

RESP – rede elétrica de serviço público

ROI – Return of Investment (Retorno do Investimento)

SACE – Sistemas de automatização e controlo de edifícios

SOC – State of Charge (Estado da Carga)

UE – União Europeia



# I Introdução

---

## I.1 Motivação

O tema da autossuficiência energética com recurso à gestão da procura tem ganho uma crescente importância no contexto atual de transição energética, dada a urgente necessidade de mudança para fontes de energia renováveis. Uma vez que as instituições de ensino superior desempenham um papel crucial na formação de futuros profissionais, têm também o dever moral e social de adotarem boas práticas em termos de sustentabilidade. A implementação de medidas alinhadas com sustentabilidade e eficiência energética nas suas instalações permite alertar e sensibilizar toda a comunidade académica para esta temática e a necessidade de contribuir ativamente para um futuro mais verde e neutro em carbono.

Com a introdução de planos nacionais como o Plano Nacional de Energia e Clima (PNEC) 2030 e europeus como o REPowerEU, Portugal colocou metas para que certas quotas energéticas sejam atingidas, não só no consumo final de energia como também na sua produção. As instituições de ensino superior (IES) apresentam uma responsabilidade de liderar pelo exemplo em medidas ambientais e sociais na busca pela sustentabilidade nomeadamente através da capacidade de produzir parte da sua própria energia e utilizar a mesma eficientemente, podendo assim diminuir a sua pegada carbónica e ainda ter um modo de lidar com eventuais flutuações de preço dos combustíveis fósseis, garantindo uma menor dependência de energia comprada à rede [1], [2].

É também uma grande vantagem as IES estarem na vanguarda da eficiência energética (EE), uma vez que a busca pela autossuficiência energética impulsiona a inovação e o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e sustentáveis. Isso não só beneficia a instituição, mas também contribui para o progresso da sociedade como um todo.

## 1.2 Objetivos

O desenvolvimento e estudo desta dissertação tem como principal objetivo identificar e definir uma estratégia para gestão de cargas suscetíveis de serem controladas em termos de ciclo operacional, com vista a maximizar a energia produzida localmente na Escola Superior Agrária de Coimbra (ESAC), podendo assim minimizar a sua fatura energética e consequentemente a sua pegada carbónica.

Tendo por base a identificação, recolha e posterior estudo e análise dos diagramas de carga (DC) de diversas cargas nos mais diversos locais das instalações e conhecendo assim os seus ciclos de consumo e períodos horários de utilização é possível estudar as possibilidades que estas apresentam para otimizar o consumo e fazer o matching com a produção renovável, minimizando a fatura energética da ESAC. Para este fim, são analisados os DCs, identificadas as restrições operacionais de cada uma das cargas controláveis e, com o auxílio de métodos e algoritmos de otimização, desenvolver uma estratégia com o objetivo de minimizar a fatura de energia elétrica, tirando partido da produção local. A estratégia apresentada pode ser complementada futuramente com a aquisição de equipamentos extra, tais como sensores e atuadores, que permitam recolher dados em tempo real e controlar o funcionamento destas cargas sem a necessidade de intervenção humana direta. Os resultados já obtidos, que consiste na alocação ótima do ciclo de funcionamento das várias cargas controláveis, considerando variáveis tais como a produção local, permite a redução da fatura de energia elétrica.

## 1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está dividida em 6 partes.

O primeiro capítulo é constituído por uma breve motivação para a realização do trabalho em curso e os objetivos do desenvolvimento do mesmo.

No segundo capítulo é elaborado um estado da arte, dividido em cinco diferentes temas, apresentando um resumo das políticas energéticas vigentes sobre o tema em estudo, uma pequena análise do consumo energético em Portugal, nomeadamente o consumo de energia final em edifícios, as fases de uma auditoria energética, e por fim um breve resumo sobre diversos métodos de otimização mais utilizados na área de estudo.

O terceiro capítulo descreve a Escola Superior Agrária de Coimbra, as suas instalações e funcionamento geral típico das mesmas, bem como os locais de maior

## **Autossuficiência energética e gestão da procura numa instituição de ensino superior**

interesse de trabalho para esta dissertação, na segunda parte é feito o levantamento e a caracterização das cargas com potencial de controlo.

O quarto capítulo apresenta a metodologia usada para a otimização do funcionamento de cargas controláveis e respetivas restrições. É ainda apresentado o modelo matemático que irá otimizar a alocação diária das cargas.

No quinto capítulo são apresentados os resultados derivados dos diversos casos de estudo bem como a discussão e comparação dos mesmos.

No sexto e último capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho bem como pistas de trabalho futuro.



## 2 Estado da arte

---

### 2.1 Políticas energéticas

Embora não existam regras ou diretivas que diretamente restrinjam a forma como abordamos a autossuficiência energética, existem sim as que encorajam e impulsionam uma transição mais suave e eficiente, transição esta bastante necessária para combater as emissões de gases efeito de estufa, visto que aproximadamente 73% das emissões nacionais de Portugal são atribuídas ao setor de energia, incluindo o setor dos transportes, como a principal fonte de emissões de gases de efeito de estufa GEE [3].

Foram elaborados planos e programas como parte de uma política que apoia um modelo de energia sustentável, com o objetivo de garantir e promover a competitividade económica e aumentar a qualidade de vida dos cidadãos, bem como a eficiência energética e redução dos consumos, que por sua vez irá permitir a redução de emissões de GEE. Essas iniciativas promovem e implementam medidas em diferentes níveis para convergir em direção a objetivos específicos. Alguns desses planos são:

- PNAEE – Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética;
- PNAER – Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis;
- PNEC – Plano Nacional de Energia e Clima 2030;
- ELPRE – Estratégias de Longo Prazo para a Reabilitação de edifícios.

No que diz respeito à eficiência energética, o PNAEE abrange seis áreas: transportes, residencial e serviços, indústria, estado, comportamentos e agricultura. Estas áreas incluem dez programas que propõem várias medidas de melhoria da eficiência energética direcionadas para a procura de energia. Estes programas são mensuráveis e rastreáveis, com o objetivo de atingir as metas estabelecidas como a redução do consumo de energia, aumento da eficiência energética, estimular a competitividade e a inovação e a promoção da educação e sensibilização para comportamentos mais sustentáveis [4].

O PNAER tem como objetivo geral alcançar uma meta global de 31% do consumo final bruto seja proveniente de energias renováveis até 2020, e uma quota de 60% de eletricidade de origem renovável até ao mesmo período. Para isso, o PNAER estabelece

metas para a adoção de fontes de energia renovável nos três principais setores: transporte, eletricidade e aquecimento/arrefecimento.

O Plano Nacional de Ação para Energias Renováveis para o período de 2013-2020 e o Plano Nacional de Ação para Eficiência Energética para o período de 2013-2016 foram adotados e publicados através da Resolução nº 20/2013. Portugal estabeleceu uma meta mais ambiciosa de redução de 25% no consumo de energia primária, em conformidade com as metas revisadas estabelecidas pela Diretiva (UE) 2018/2002, que fixa um limite máximo para o consumo de energia primária em 2020, equivalente a uma redução de 20% relativamente a 2005.

O Plano Nacional Integrado de Energia e Clima (PNEC), estabelecido em 11 de dezembro de 2018, pelo Regulamento (UE) 2018/1999 do Parlamento Europeu e do Conselho, delinea as principais iniciativas e contribuições para o avanço de Portugal em eficiência energética, apoio a fontes de energia renovável e mitigação de emissões de gases de efeito estufa, substituindo desta forma os planos PNAER e PNAEE. O PNEC representa o plano de política energética e climática mais significativo de Portugal para o período de 2020 a 2030.[2] As cinco dimensões do plano - descarbonização, eficiência energética, segurança de abastecimento, mercado interno de energia e pesquisa, inovação e competitividade - são descritas no PNEC, juntamente com a situação atual de energia e clima. Para cumprir os compromissos globais da UE, o plano também descreve contribuições nacionais, regulamentações e iniciativas planeadas, incluindo a redução de emissões de gases de efeito estufa, o aumento de energia renovável, o aprimoramento de interligações e a melhoria da eficiência energética. A Figura 1 demonstra as principais metas a serem alcançadas pelo PNEC2030 relativamente a 2005.

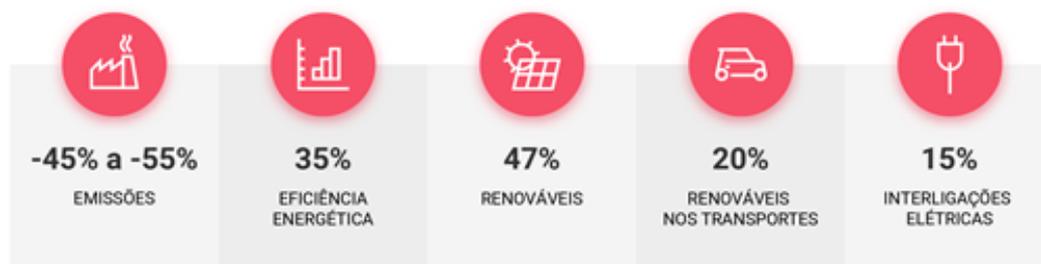


Figura 1: Metas a serem atingidas para o horizonte 2030 em relação a 2005.[5]

Em consonância com todos os pacotes anteriormente descritos, surgem as Estratégias de Longo Prazo para a Reabilitação de edifícios (ELPRE), enfatizando a eficiência energética, a renovação energética do edifício e a promoção de fontes de energia

renováveis, com o intuito de também contribuir para a redução do consumo de energia. Esta estratégia, desenvolvida após uma avaliação minuciosa, identificou e mensurou conjuntos de métricas de melhoria tecnicamente possíveis, considerando o estado do mercado e as características únicas de cada edifício, incluindo localização geográfica e tipologia. A envolvente do edifício deverá ser modificada com a ajuda destes conjuntos de medidas, que também propõem a substituição de sistemas desatualizados por modelos mais eficientes em termos energéticos (bombas de calor, chillers, recuperadores de calor, etc.) e a promoção de fontes de energia renováveis (painéis solares térmicos e fotovoltaicos).

Todas estas medidas têm vindo a ser implementadas e melhoradas ao longo dos últimos anos, impulsionando assim países por todo o mundo a utilizar de forma mais racional e eficiente a energia elétrica, não apenas no seu uso final mas como na produção e nas restantes etapas até ao consumidor.

## **2.2 Enquadramento energético**

Portugal tem observado nos últimos anos um enorme crescimento no que toca à produção de energia através de fontes renováveis. Essa situação resulta de estímulos provenientes de governos e da União Europeia para promover a adoção de fontes de energia menos poluentes, como é o caso da energia solar, eólica e hídrica. Além disso, a utilização de fontes menos poluentes é influenciada pelos problemas com emissões e impactos ambientais de recursos fósseis, como petróleo, gás natural e carvão, os métodos predominantes de energia não renovável. Esta maior aposta nas energias renováveis, pode ser parcialmente atribuída a conflitos geopolíticos que têm vindo a desencadear em diversas regiões globais, refletindo-se no substancial aumento dos seus preços. É um exemplo da forte aposta por parte de entidades públicas e privadas neste setor o marco que foi atingido no início de 2023 onde foi possível alimentar o país apenas com energia proveniente de fontes renováveis. É de notar ainda que estas mesmas fontes entram com uma percentagem de 68,30% no bolo da produção total de eletricidade em Portugal [6].

É possível observar pela Figura 2, que a energia produzida por fontes ditas convencionais (não renováveis) apresentam ainda um valor de 25,20%, valor esse que tem vindo a diminuir, sendo de notar que diminuiu quase 15% desde meados de 2019 até ao fim de 2022. Os combustíveis fósseis nesse ano contribuíram com 40% para a produção total de energia como se pode observar na Figura 3. Esta diminuição deve-se em grande parte a medidas do governo que promovem e financiam entidades públicas e privadas sejam

elas de serviços ou industriais e também entidades individuais como é o caso das residências aumentando desta forma a utilização de energia proveniente de fontes renováveis [6] [7].

Nos últimos anos, a energia solar em Portugal é a tecnologia com maior percentual de crescimento, visto que viu a sua quota aumentada de 3,30% em 2018 para 9,30% em 2022, ou seja, um aumento em quase o triplo. Esta é uma tecnologia que tem um maior potencial de crescimento quando comparada a tecnologias como a hídrica e eólica que contribuem com valores que variam entre os 22% e 29% dependendo do ano devido ao facto de as últimas necessitarem de ultrapassar um maior número de desafios ecológicos e regulamentares para o seu crescimento percentual, tais como limitações geográficas, custos mais elevados e questões ambientais e sociais [6], [7].

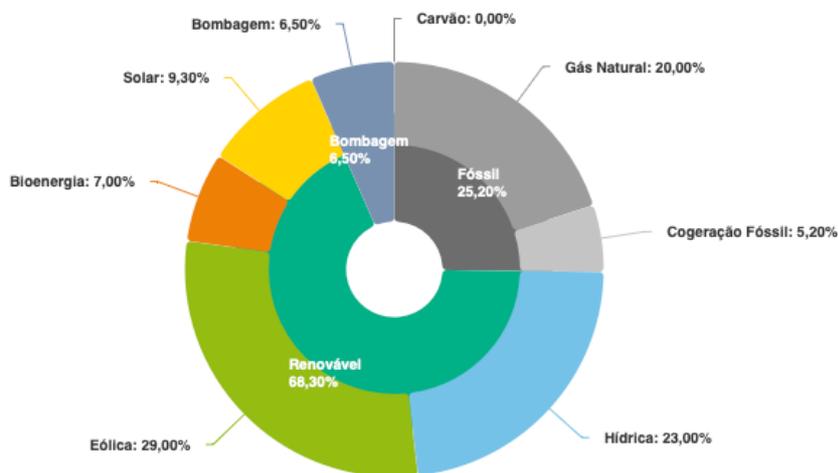


Figura 2: Produção de eletricidade em Portugal 2022. [6]

Através da Figura 3 é possível observar a evolução do consumo e da produção de energia eléctrica em Portugal, sendo evidente a mudança na fonte de energia usada, assinalando-se o aumento da produção de origem renovável e a diminuição de combustíveis fósseis. Este aumento vai ao encontro da diretiva da União Europeia, (EU) 2018/2001 que promove a utilização de energia por fontes renováveis e estabelece metas nacionais para os países membros para que seja atingida uma quota anual para a produção de energia renovável no consumo final [8].

## Autossuficiência energética e gestão da procura numa instituição de ensino superior

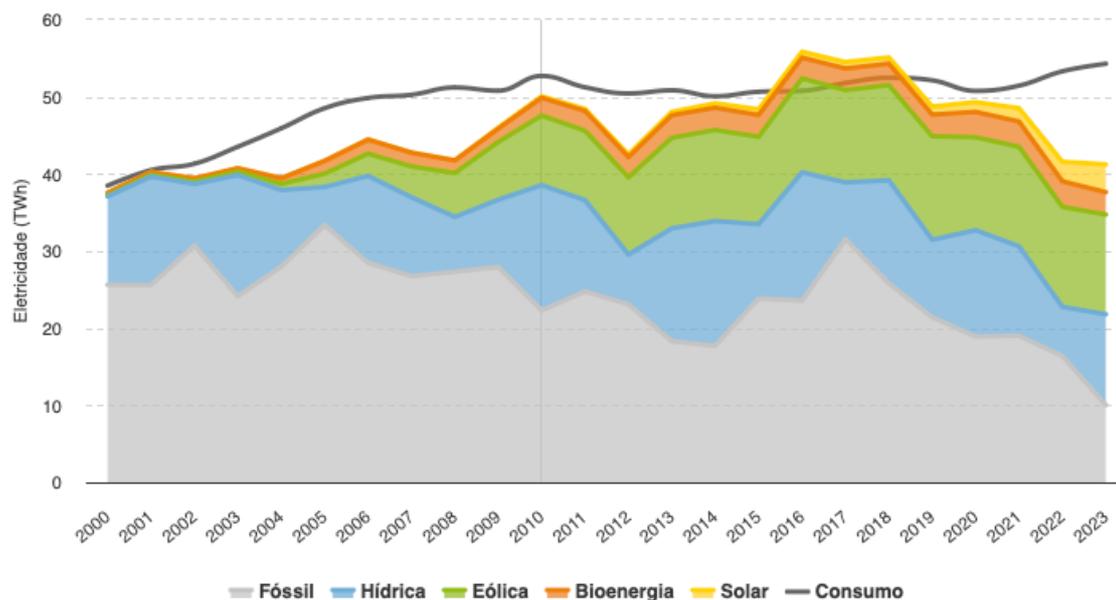


Figura 3: Evolução do consumo vs produção de energia em Portugal [6]

A Figura 4 ilustra o aumento do consumo em Portugal em todos os setores, quando comparado com dados de 1990. De acordo com este gráfico, o setor residencial e o setor comercial e de serviços públicos viram ao longo das últimas duas décadas a sua quota anual subir a níveis particularmente elevados. Isso é igualmente justificável pelo aumento das tecnologias não industriais que dependem significativamente do consumo de energia para operar adequadamente, como é o caso de alguns eletrodomésticos como o forno, fogão e esquentador, que deixaram de utilizar gás natural como fonte de alimentação para usar eletricidade. Esta tendência crescente do consumo de energia ao longo dos anos mostra a necessidade de encontrar formas de controlar este aumento de consumo e contornar esta tendência crescente levando assim à necessidade de criação de metodologias de gestão de energia em edifícios.

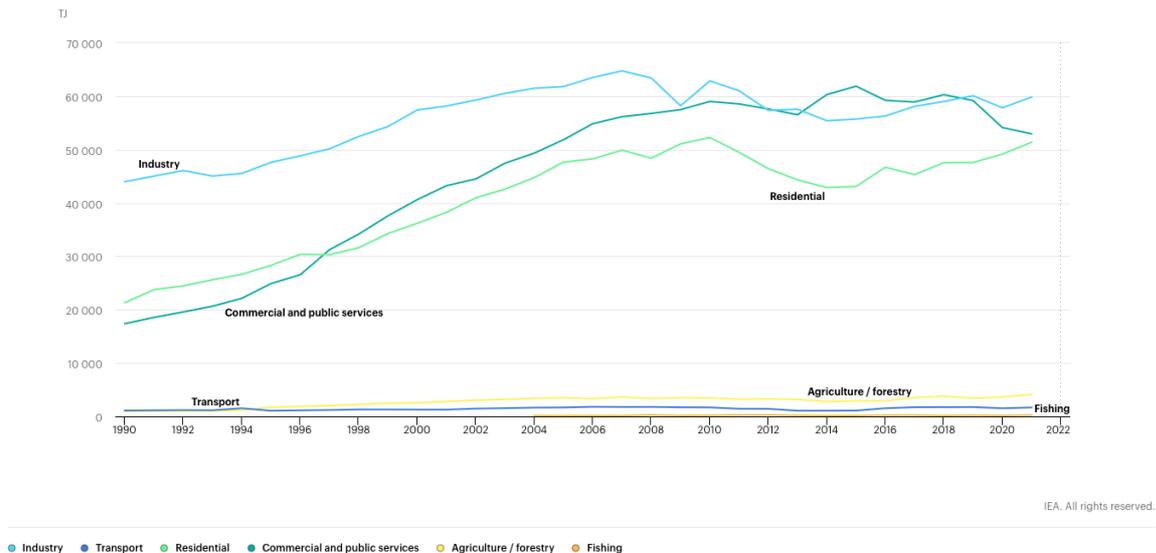


Figura 4: Evolução do consumo em Portugal por setor [9]

### 2.3 Uso eficiente de energia em edifícios

As instituições de ensino superior, tal como muitas entidades públicas e privadas, estão comprometidas no esforço para mitigar a pegada ecológica e dar o exemplo a outras entidades que visam os mesmos interesses ecológicos [10]. Diversos estudos têm vindo a ser desenvolvidos com foco na redução dos consumos de energia e aumento do desempenho energético, como é o caso de [11]. Neste estudo, os autores levaram em conta os dados de consumo de edifícios existentes, onde identificaram padrões de consumo e potenciais áreas de melhoria.

Uma das principais estratégias para o uso eficiente de energia em edifícios é a implementação de medidas de eficiência energética. Isso inclui a instalação de sistemas de iluminação inteligentes e eficientes, como lâmpadas LED e sensores de presença, que permitem o controlo inteligente do uso da luz artificial. Os autores de [12] mostram como os sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (HVAC) são os equipamentos com maior consumo de energia em edifícios. Uma solução que pode ser apresentada é a solução de sistemas HVAC com alto desempenho energético, como os equipamentos com tecnologia de condicionamento de ar de variável refrigerante (VRF), que contribuem para o uso racional de energia [13].

Outra abordagem importante é a utilização de fontes de energia renovável nos edifícios [1]. A instalação de painéis solares fotovoltaicos no telhado ou em áreas externas do edifício permite gerar energia elétrica através de uma fonte verde e renovável, o que irá

## Autossuficiência energética e gestão da procura numa instituição de ensino superior

trazer vários benefícios em várias áreas, uma vez que não só irá contribuir para a redução de emissões de gases de efeito de estufa (GEE) e para diminuir a dependência energética que estes edifícios possuem da rede elétrica de serviço público, mas também a nível económico, através da redução da fatura de energia, sendo este um investimento onde por norma se verifica retorno ao fim de poucos anos, dependendo da capacidade instalada. Este sistema pode também trazer vários benefícios à rede tais como o corte de pontas nos diagramas de consumo, redução de perdas, fiabilidade e resolução de problemas de qualidade de energia [14]. Contudo, existem também algumas desvantagens para estas como o caso de excesso de produção sem que as organizações apresentem uma procura correspondente, originando a sua injeção na rede causando fluxos de potência inversa e instabilidade do sistema [15].

As IES possuem, em geral, grandes laboratórios com equipamentos diversos e consumos elevados. Os autores de [16] apresentam as etapas necessárias para a substituição de equipamentos mais antigos por outros mais eficientes. A substituição destes equipamentos por outros capazes de serem geridos através de sistemas de automatização e controlo (SACE) permitirão aos edifícios uma gestão inteligente dos seus consumos, dotando-os da capacidade de monitorização de consumos em tempo real. A utilização dos SACE, que permite também a monitorização de produção fotovoltaica, facilita o ajuste de consumos de acordo com a procura, com o objetivo, por exemplo, de maximizar o autoconsumo e minimizar a injeção na rede, ou vice-versa, sendo assim possível realizar o chamado *matching* entre a produção e o consumo. Este *matching* é necessário tendo em conta a necessidade de aproveitar ao máximo a energia proveniente das fontes intermitentes visto a sua produção não ser constante nem despachável<sup>1</sup>. Sendo assim, a gestão inteligente de energia mostra ser um método eficaz para alcançar a eficiência energética, tal como é discutido em [17]. Neste estudo, que tem por base a comparação de implementação de medidas de eficiência energética e instalação de produção local em 50 universidades, concluiu-se que a preferência reside nas práticas de gestão de energia ao invés de somente adotar fontes de energia não poluentes.

A constante análise e monitorização dos consumos energéticos é fundamental para identificar novas oportunidades de melhoria e garantir a eficiência e eficácia das medidas já implementadas. Técnicas como modelos de simulação de consumos energéticos e

---

<sup>1</sup> Os geradores despacháveis podem ser ligados ou desligados ou podem ter sua potência ajustada conforme a procura.

auditorias são exemplos de procedimentos que devem ser implementados para medir os atuais níveis de desempenho dos edifícios, sendo que as auditorias permitem ainda identificar áreas de ineficiência e propor soluções individuais para diminuir o consumo de energia.

Os autores de [18] através de um modelo de *lean management practices*, estudam os efeitos causados por práticas de sustentabilidade, como a redução do consumo de água e eletricidade, em instituições de ensino e provam que existem múltiplos benefícios. Estes benefícios existem não só ao nível de redução de consumos, mas também ao nível ambiental e económico, através de soluções de constante desenvolvimento e evolução de medidas energéticas e sociais em edifícios de ensino superior.

O uso eficiente da energia em edifício é assim comprovado como um aspeto crucial na redução de consumos e custos associados a consumos energéticos. A introdução de fontes de energia renovável amplia ainda mais os benefícios de tais práticas ajudando a promover um ambiente mais sustentável. No entanto, tão importante quanto otimizar o uso de energia é saber como gerir de forma eficaz a procura da mesma. A gestão da procura envolve estratégias como a introdução do consumidor a um nível mais ativo e a utilização de sistemas de gestão de energia. Ao integrar o uso eficiente de energia com a gestão da procura, os edifícios podem reduzir a sua fatura energética e contribuir para um futuro com emissões zero.

## 2.4 Gestão da Procura

A Gestão da Procura (GP) é uma estratégia utilizada para gerir o consumo de energia. Esta estratégia surge nos anos 80 como resposta às crises petrolíferas tendo por objetivo reduzir o consumo de energia e estabilizar os preços dos combustíveis [19], [20].

Com o crescente aumento da procura de energia, são necessários inúmeros investimentos em capacidade de geração, seja ela renovável ou não renovável. Através de técnicas de gestão da procura, a curva de consumos pode ser adaptada de forma a maximizar o uso de energia proveniente de fontes intermitentes, facilitando assim a introdução de novas tecnologias e formas de produzir energia. A Figura 5, apresenta alguns exemplos de tecnologias de gestão da procura. As ações principais são o corte de pontas (*peak clipping*), preenchimento de vales (*valley filling*), desvio de consumos (*load shifting*), diagrama flexível (*flexible load shape*), crescimento estratégico (*strategic load growth*) e a conservação estratégica (*strategic conservation*) [21], [22], [23]:

## Autossuficiência energética e gestão da procura numa instituição de ensino superior

- Corte de pontas é usado para suavizar o diagrama de carga e pode ser aplicado por exemplo diminuindo consumos nas horas de maior consumo, se estes consumos forem coincidentes com as pontas, desligando determinadas cargas;
- Preenchimento de vales encoraja os consumidores a utilizar a energia em períodos de menor procura, onde a energia apresenta um preço inferior;
- Desvio de consumos representa cargas variáveis que são deslocadas de horas de pico para horas de menor consumo;
- Diagrama flexível, envolve um contrato entre o consumidor e o fornecedor, com a utilização de equipamentos que reagem a sinais (estímulos tarifários e incentivos) e limitam a energia consumida num determinado momento a um valor que não pode ser ultrapassado. Este valor é definido através de um contrato entre o consumidor e a entidade fornecedora de energia;
- Crescimento estratégico é alcançável através da utilização de sistemas inteligentes e equipamentos mais eficientes para um aumento propositado da energia;
- Conservação estratégica pode ser alcançada pela utilização mais eficiente de energia.

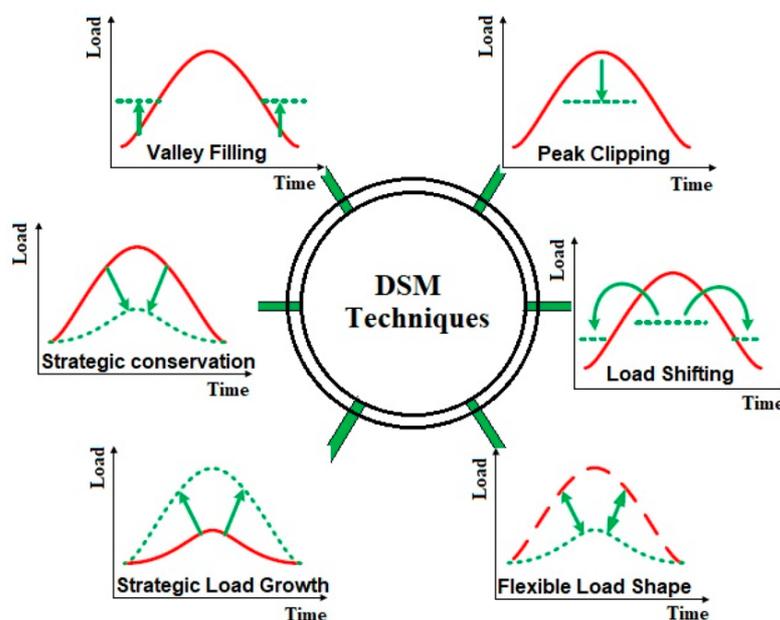


Figura 5: Técnicas de GP [22]

Para que a GP possa ser um método fiável e se mantenha a par com a evolução dos equipamentos mais usados no dia a dia, é necessária a implementação de novas tecnologias,

e práticas que capacitem os consumidores a gerir de forma ativa o uso de energia, adaptando-o conforme as condições da rede elétrica e os custos associados.

A GP pode assim ser alcançada por meio da automação de sistemas inteligentes, como o caso da iluminação e climatização que podem utilizar os mais variados sensores para garantir um funcionamento mais eficiente, e pela integração de fontes de energia renovável. Esta é uma abordagem que proporciona uma série de benefícios. Em primeiro lugar, permite reduzir os picos da procura quando necessário além de permitir gerir a procura de energia com o objetivo de obter um melhor *matching* entre a produção renovável variável e a procura. Outro benefício prende-se com o adiamento da necessidade de investimentos elevados na expansão de infraestruturas elétricas [24].

Os recentes avanços na pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de GP têm desempenhado um papel importante na futura distribuição de energia devido ao seu desempenho aprimorado e à flexibilidade para alcançar uma maior eficiência energética e redução dos custos de energia, impulsionando a economia doméstica e a competitividade empresarial/industrial [25], [26].

Assim, ao fomentar a participação ativa dos consumidores na gestão do consumo de energia, a gestão da procura desempenha um papel crucial na transição para um futuro energético mais sustentável e na construção de sistemas elétricos mais robustos, resilientes e acessíveis para todos.

Ainda que os utilizadores finais queiram ter um papel mais ativo na gestão da procura e na eficiência energética, muitas das vezes deparam-se com um grande problema que está relacionado com a falta de conhecimento sobre os seus próprios gastos energéticos e de que forma estão a utilizar a energia.

A gestão da procura de energia destaca a importância da realização de auditorias energéticas como uma medida fundamental para se conseguir identificar o modo como a energia é usada e possíveis ineficiências. As auditorias energéticas oferecem ao utilizador uma análise detalhada do uso atual de energia nas suas instalações, sejam elas edifícios, instalações industriais ou qualquer outro ambiente, identificando áreas de desperdício e oportunidades de eficiência energética. Ao entender melhor como a energia é consumida num determinado momento ou contexto, as organizações podem implementar medidas específicas para reduzir o consumo desnecessário, melhorar a eficiência dos equipamentos e sistemas, e consequentemente, reduzir os custos operacionais.

### 2.4.1 Metodologias de gestão da procura

A gestão da procura de energia elétrica é uma área de pesquisa amplamente explorada devido à sua relevância na eficiência operacional, sustentabilidade ambiental e estabilidade do sistema elétrico. A complexidade inerente aos sistemas de energia, caracterizada pela interconexão de múltiplos agentes, variabilidade de fontes de geração e dinâmica da procura, tem impulsionado um extenso corpo de literatura dedicado ao desenvolvimento e aplicação de métodos de otimização. Esta vasta gama de abordagens reflete a diversidade de desafios enfrentados na gestão da procura de energia elétrica, desde a previsão precisa da procura até a alocação eficiente de recursos de geração e distribuição. Neste contexto, esta secção visa explorar e sintetizar os principais métodos de otimização utilizados na gestão da procura de energia elétrica, destacando suas aplicações, vantagens e limitações. Ao examinar criticamente o estado atual da literatura, busca-se fornecer *insights* valiosos para aprimorar a compreensão e abordagem desses desafios complexos, contribuindo assim para o avanço contínuo no campo da gestão de energia elétrica.

Os autores de [27], [28] abordam a gestão da procura de energia elétrica, destacando a importância da resposta à procura para a eficiência operacional e integração de fontes renováveis. Ambos revisam métodos de otimização e oferecem *insights* para pesquisadores e profissionais. No entanto, enquanto o primeiro estudo se concentra em programas de resposta à procura em redes inteligentes, com foco em métodos de preços e algoritmos de otimização, o segundo estudo aborda a otimização da resposta à procura em sistemas elétricos de forma mais ampla, incluindo modelação da procura e tecnologias de comunicação. Além disso, o segundo estudo apresenta estudos de caso e exemplos práticos de implementação, enquanto o primeiro não menciona análises de casos reais. Já os autores de [29] oferecem uma análise abrangente sobre os sistemas de gestão de energia residencial (Home Energy Management Systems - HEMS), concentrando-se na modelação e na complexidade associada a esses sistemas. Os autores analisam uma variedade de abordagens de modelos utilizados para representar o comportamento dos utilizadores, a dinâmica dos consumos energéticos e a interação com dispositivos e fontes de energia residenciais. Além disso, o artigo explora a complexidade inerente à implementação e operação de HEMS, considerando fatores como a heterogeneidade dos dispositivos, a variabilidade do comportamento dos utilizadores e os desafios de integração com a infraestrutura elétrica existente. Ao destacar as principais tendências e desafios nessa área, os autores oferecem *insights* valiosos para investigadores, profissionais da indústria e políticos envolvidos no desenvolvimento e na adoção de HEMS, visando a eficiência energética e a sustentabilidade.

O primeiro passo no desenvolvimento de modelos de gestão de consumos é a recolha e análise de dados relevantes sobre o consumo de energia da instituição ou edifício em estudo. Isso inclui dados históricos de consumo, informações sobre os sistemas de geração de energia existentes (como painéis solares, turbinas eólicas ou sistemas de cogeração) e dados sobre a procura de energia em diferentes períodos do dia ou ao longo do ano, para serem conhecidas as variações dos consumos mediante as estações do ano e as suas características [30].

Com a crescente preocupação de introduzir fontes de produção renovável nos edifícios para assim reduzir a compra de energia à rede através do aumento do autoconsumo, é necessário olhar para algumas das desvantagens que a introdução das principais tecnologias instaladas apresenta. No caso da produção de energia por fontes fotovoltaicas, um dos maiores problemas é a intermitência da geração ao longo de um dia, semana ou mês, pelo que se torna importante conseguir maximizar o uso desta produção através da flexibilidade das cargas disponíveis nos edifícios [31], [32].

Os autores de [33] propõem a utilização de modelos de programação linear inteira mista (MILP), para a otimização integrada do uso dos recursos energéticos para minimizar a fatura da energia com a utilização de sistemas de controlo a nível residencial, que apesar de ser desenvolvido em torno de cargas presentes no setor residencial pode também ser adaptado a um contexto de maior dimensão como o caso das fábricas e edifícios de serviços. No seguimento da utilização de algoritmos MILP, os autores de [34] estudam formas de minimizar os custos de operação e manutenção de uma central de cogeração onde lidam com restrições como preços variáveis, cargas variáveis e diversas condições de ambiente. Este estudo promove assim um menor uso de energia primária e também uma diminuição nas emissões de dióxido de carbono.

Ainda que exista uma enorme literatura que ofereça uma visão detalhada sobre os mais derivados algoritmos de otimização disponíveis, para obtermos o melhor resultado possível para o caso de estudo é necessário escolher o método que mais se adequa à natureza específica do problema e também das restrições nele envolvidas.

O desenvolvimento de modelos e algoritmos de GP para maximizar a autossuficiência energética e minimizar os custos é assim uma abordagem eficaz para alcançar um sistema energético mais sustentável e economicamente viável.

## **2.5 Auditorias energética**

### **2.5.1 Conceito e objetivos**

Uma auditoria energética (AE) consiste no processo de análise e avaliação de um sistema ou edifício com o objetivo de identificar oportunidades de redução dos consumos energéticos [35]. A caracterização da AE envolve a recolha e análise detalhadas de dados relacionados com o consumo de energia em equipamentos elétricos, sistemas de iluminação, ventilação, refrigeração e outros usos finais.

As auditorias energéticas visam identificar áreas de ineficiência energética, contabilizar os consumos energéticos e propor soluções que visam melhorar o conforto dos ocupantes dos edifícios, reduzir o consumo de energia e os custos operacionais e minimizar o impacto ambiental decorrente do aumento dos consumos energéticos. As auditorias energéticas podem ser realizadas em edifícios residenciais, edifícios comerciais, industriais ou institucionais.

Os principais objetivos que se esperam alcançar após uma auditoria energética devidamente realizada são [36]:

- ◆ Apresentar e detalhar as formas de energia utilizadas;
- ◆ Examinar os modos de utilização de energia e respetivos custos;
- ◆ Estabelecer uma estrutura para o consumo de energia;
- ◆ Determinar os consumos por equipamento ou processo;
- ◆ Relacionar a produção com o consumo de energia;
- ◆ Identificar possibilidades de melhoria dos rendimentos energéticos;
- ◆ Propor um programa para ações e investimentos a empreender;
- ◆ Propor um esquema operacional de gestão de energia na entidade auditada;
- ◆ Propor a substituição de equipamentos por outros mais eficientes, caso se considere necessário;
- ◆ Propor a alteração de fontes de energia, caso se considere necessário.

### 2.5.2 Tipos de Auditoria

Uma AE pode ser dividida em 4 fases distintas [37]:

- **Auditoria Sintética:** Consiste na análise de dados com recurso à faturação das diferentes fontes de energia e síntese dos consumos, envolvendo o estudo dos vetores energéticos e os respetivos custos;
- **Auditoria Deambulatória:** Consiste numa vistoria às condições de funcionamento das principais instalações e equipamentos, verificando uma *check-list* resumida tendo em conta as medições e tipo de edifício que está a ser auditado;
- **Auditoria Analítica:** Consiste na elaboração de monitorizações a equipamentos e estudar os seus padrões de funcionamento e consumos de energia local nos diferentes períodos horários e ainda verificar a qualidade da energia que é fornecida a estes equipamentos, verificando uma *check-list* exaustiva;
- **Auditoria Tecnológica:** Consiste na alteração de processos pouco eficientes por outros com superior eficiência energética, sendo que os resultados da mesma permitem tomar decisões relativas a eventuais alterações.

### 2.5.3 Metodologia

Uma metodologia bem executada e elaborada é a peça chave para que a AE seja realizada com sucesso e obtenha os melhores resultados possíveis [35], [37].

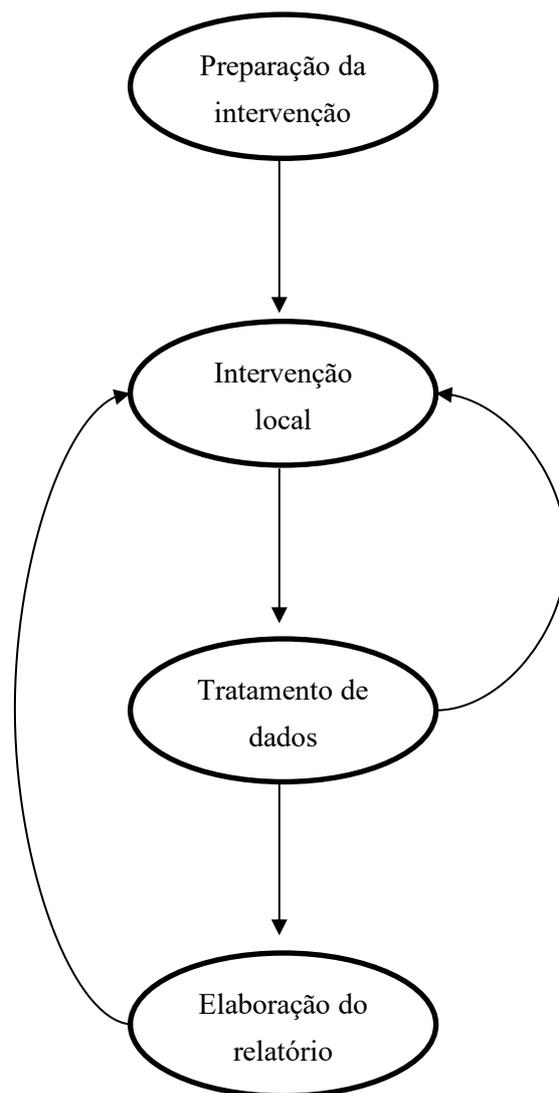


Figura 6: Fluxograma do funcionamento de uma AE

Através da Figura 6 é possível observar que podemos dividir os passos para a realização de uma auditoria energética nas seguintes fases:

### 1. Preparação da intervenção:

- i) Recolha e análise de informação documental;
- ii) Análise do processo produtivo e energético;
- iii) Recolha de informações relativas a tecnologias disponíveis no mercado;
- iv) Preparação da intervenção em campo;

## **2. Intervenção em campo:**

- i) Recolha da informação energética da entidade;
- ii) Análise do processo produtivo;
- iii) Estabelecimento dos fluxos de energia;
- iv) Instalação de equipamento de monitorização;

## **3. Tratamento de dados:**

- i) Tratamento dos dados recolhidos na etapa anterior, como balanços energéticos, consumos em determinados períodos horários, etc;
- ii) Avaliação do potencial de economias de energia;
- iii) Retirar conclusões sobre a qualidade dos dados ou se é necessário efetuar novas medições;

## **4. Elaboração do relatório da auditoria:**

- i) Informações básicas sobre a entidade auditada;
- ii) Contabilidade energética;
- iii) Análise da utilização de energia por equipamento ou processo;
- iv) Oportunidades de racionalização de energia;

A Figura 6 mostra de forma simplificada alguns dos passos seguidos durante a elaboração desta dissertação para que possam ser obtidos valores fidedignos para a obtenção de resultados ótimos. A obtenção destes valores marca assim um ponto importante desta dissertação uma vez que permite o primeiro contacto com os hábitos energéticos da instituição de estudo e irá permitir o seu tratamento e análise para que seja possível oferecer propostas de melhoria e otimizações. As boas aplicações destes passos são fundamentais qualquer que seja a complexidade da auditoria a realizar, uma vez que cobre os passos necessários para que sejam minimizados os erros e desperdício de tempo.

### 3 Caso de estudo - Enquadramento ESAC

---

A Escola Superior Agrária de Coimbra (ESAC) é uma instituição de ensino superior integrada no Instituto Politécnico de Coimbra atuando nas áreas da agricultura biológica, agropecuária, ambiente, biotecnologia, ecoturismo, enfermagem veterinária, florestas, gastronomia e tecnologia alimentar. Esta instituição apresenta uma área superior a 140 hectares com extensas áreas dedicadas à produção agropecuária (83.8 ha, 12 dos quais certificados para produção biológica) e florestais (23.0 ha) [38].

O período normal de funcionamento da instituição é das 8h às 20h, de segunda a sábado, com períodos de férias escolares no mês de agosto, Natal, Páscoa e semana académica, em que, embora não existam aulas, a instituição mantém um nível médio de atividade, associado aos serviços à comunidade, investigação e serviços administrativos.

Como é possível observar pela Figura 7, a ESAC é uma instituição com uma grande dimensão e um *campus* diversificado, o que justifica a existência de cargas com os mais diversos objetivos de uso final. Para que seja possível controlar algumas destas cargas de um modo integrado, são necessários sistemas de gestão que permitam algum tipo de automação, nomeadamente o deslocamento de cargas para horários em que ocorra produção de energia local. A abordagem integrada que combina a autossuficiência energética e a gestão dinâmica da procura permitirá maximizar o uso da energia gerada localmente, reduzir a energia comprada e otimizar a utilização dos recursos energéticos.

A adoção conjunta das medidas integradas apresentadas anteriormente vem ao encontro do compromisso com a sustentabilidade assumido pela ESAC onde promove entre os seus alunos, docentes e demais utilizadores das instalações a adesão de práticas mais sustentáveis, a gestão eficiente dos recursos naturais e a valorização dos produtos locais e da biodiversidade [39].

A ESAC tem vindo a apostar fortemente em projetos de eficiência energética e adoção de boas práticas comportamentais, tendo por exemplo os sistemas de iluminação já sido substituídos por sistemas mais eficientes e dotados de algum grau de automação, e vários edifícios alvos de intervenção para melhoria do seu desempenho energético, o que se traduziu já num elevado grau de poupança na fatura energética. Deste modo, esta

dissertação foca-se num leque limitado de cargas que ainda não foram anteriormente alvo de estudo e identificação do seu potencial de controlo. Neste contexto, e também dada a dimensão do terreno que engloba a Escola Superior Agrária (Figura 7), esta dissertação foca-se apenas alguns dos edifícios do *campus* visto que nem todos podem ser alvo de uma análise desagregada de energia e nem todas as cargas apresentam um grau de controlo justificável para que este estudo seja aplicado a um nível global.

Os pontos de foco para este estudo passaram por cargas controláveis e presentes nos seguintes edifícios/terrenos, com especial foco no bloco principal:

- Bloco principal (constituído pelos blocos A, B, C, D, E, F, G, H);
- Laticínios;
- Ginásio;
- Campo de rugby;
- Picadeiro;
- Hospital veterinário;

A maioria das medições foi efetuada nos vários blocos do edifício principal, visto ser o local onde se situa a maioria dos laboratórios e também cargas com maior potencial de controlo, bem como bombas de captação e injeção de água na rede da escola.

Foram também realizadas medições nos restantes locais indicados anteriormente, como centros de hipismo, campos de rugby e futebol, mas devido ao facto de a maioria das cargas se apresentar de uma forma agregada, coloca uma barreira para o seu estudo nesta dissertação. É ainda importante mencionar que ao longo da auditoria realizada foram identificados equipamentos que apresentavam falhas no seu funcionamento, impossibilitando assim o seu uso no presente estudo, mas contribuindo para a sua substituição por equipamentos mais eficientes.

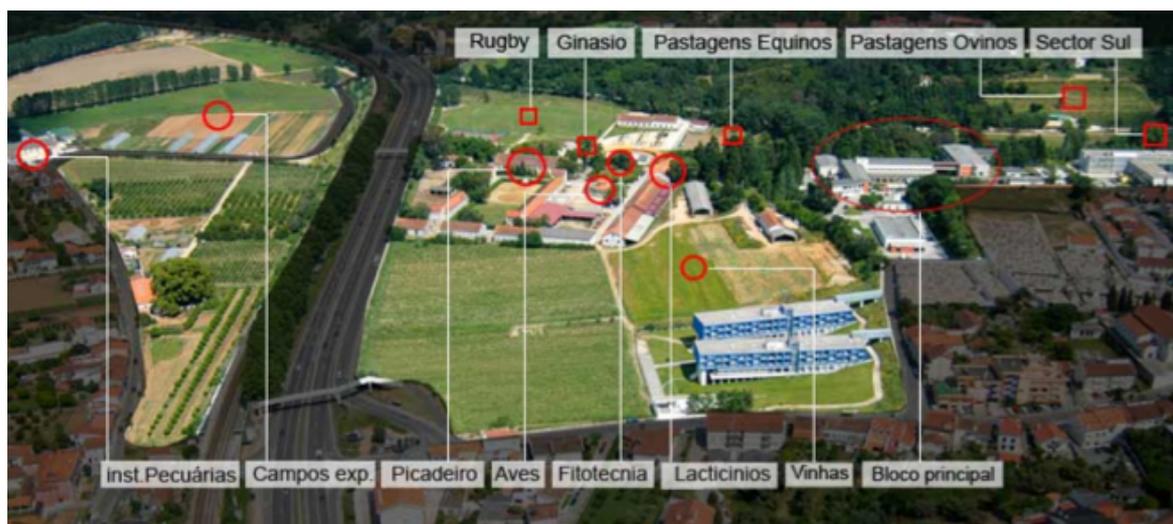


Figura 7: Estrutura do campus ESAC [40]

A ESAC está ainda dotada de vários locais de produção de energia fotovoltaica, contudo apenas será considerada a instalação localizada na cobertura do edifício principal, com uma potência de 50 kW, uma vez que esta se destina a autoconsumo. Na Figura 8 podemos observar um diagrama de produção para uma semana em que existe uma variação nos valores da produção, e onde é facilmente visível a variabilidade deste tipo de produção, o que demonstra ainda mais a importância de aproveitar e maximizar o uso da energia produzida localmente quando esta está disponível.

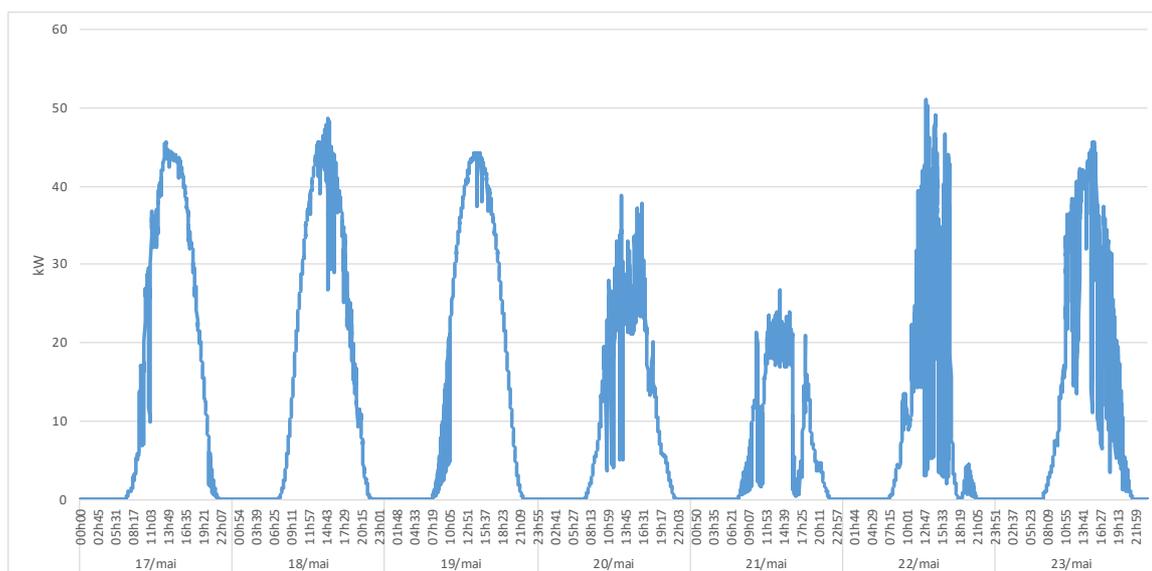


Figura 8: Exemplo da produção fotovoltaica ao longo de uma semana

Como este método de produção de energia é variável e de forma a ser obtido um espetro de resultados mais coerente com o dia a dia, foram utilizados mais do que um dia de valores de produção fotovoltaica para a análise de resultados. Uma vez que é incorreto admitir uma produção ideal todos os dias, é preciso cobrir os vários cenários possíveis, logo, foram utilizados valores que representam dias de boa, fraca e média produção relativamente à potência nominal instalada obtendo assim vários cenários de produção local.

### 3.1 Caracterização das cargas

Enquanto algumas cargas podem ser ajustadas em termos de horário de utilização, outras estão rigidamente vinculadas às necessidades dos utilizadores, não oferecendo flexibilidade quanto ao momento de uso.

Podemos então classificar as cargas em dois grupos distintos: as não controláveis e as controláveis. As cargas não controláveis englobam todos os dispositivos que não podem ser temporariamente desativados, interrompidos durante o seu ciclo de utilização ou reconfigurados, tais como, iluminação, equipamentos informáticos e audiovisuais, etc. A ESAC apresenta um grande número deste tipo de cargas, visto possuir um grande número de gabinetes administrativos e gabinetes de docentes onde se encontram este tipo de equipamentos, que apesar de não serem passíveis de controlo, não devem ser utilizados de forma inapropriada de modo a evitar consumos desnecessários.

Contrariamente às cargas não controláveis, as cargas controláveis são aquelas em que o seu ciclo de funcionamento pode ser deslocado no tempo (antecipado ou adiado) ou mesmo interrompido durante breves instantes, sem que comprometam a qualidade do serviço de energia prestado. Dentro das cargas controláveis podemos observar 3 diferentes tipos de controlo:

- Cargas reparametrizáveis, que são cargas por norma termostáticas, em que os valores de referência do termostato possam ser ligeiramente alterados, aumentando ou diminuindo a temperatura sem que exista, para o utilizador, uma grande diferença no resultado final de utilização. Exemplos destas cargas podem ser sistemas de ar condicionado e equipamentos de frio, sejam eles com ou sem capacidade de congelação;
- Cargas passíveis de deslocação de consumo, ou seja, o seu ciclo de consumo pode ser alterado para um horário diferente ao longo do dia, de forma a não

prejudicar o resultado do seu uso, como é o caso de estufas, autoclaves, etc. Visto se tratar de uma instituição de ensino superior, a maioria dos utilizadores irá necessitar que estes equipamentos estejam disponíveis durante o período normal de funcionamento da escola de modo a não afetar o desenrolar dos seus trabalhos, uma vez que é raro haver atividades fora do horário normal de funcionamento das 8h-18h;

- Cargas controláveis por interrupção, são aquelas em que o serviço pode ser brevemente interrompido sem que se note alterações no uso final, como por exemplo cargas cuja função é de arrefecimento e aquecimento;

Para um melhor entendimento de como funcionam as cargas, uma vez que, algumas são menos usuais e não são usadas no contexto residencial, foram realizadas auditorias de modo a obter os diagramas de carga dos equipamentos que serão estudados e utilizados no escalonamento de cargas. As cargas escolhidas, para além de apresentarem um bom potencial de controlo pela sua capacidade de serem utilizadas ao longo do dia sem intervenção contínua do utilizador, foram também escolhidas devido ao facto de existir um elevado número das mesmas por todo o campus da ESAC. Pode existir uma extrapolação do escalonamento para todas as cargas do mesmo tipo obtendo assim resultados com um impacto mais significativo quando comparado a cargas unitárias.

No contexto desta dissertação e considerando o estudo em questão, foram estudados diversos tipos de cargas distintas, tais como equipamentos de refrigeração, autoclaves, motores e estufas. Para a obtenção de seus respetivos DC, foram empregues os dispositivos apresentados nas Figuras 9 a 11.

No sentido de obter medições o mais precisas possíveis, foram utilizados dois aparelhos distintos. O Fluke 1730, representado na Figura 9, foi utilizado para medir a potência utilizada pelos equipamentos trifásicos visto ser um equipamento com capacidade de leitura de dados ao minuto, o que providencia uma amostra fina que pode ser estudada com um rigor mais elevado.



Figura 9: Fluke 1730 Analisador de Energia Trifásico [41]

Já para medir os equipamentos monofásicos foi utilizado um *data logger*, como está representado na Figura 10, e um contador. Este equipamento é um medidor de impulsos, sendo que o contador emite um impulso por Wh consumido. Visto que este aparelho foi utilizado para medir cargas de refrigeração, foi utilizado também um medidor de temperatura como mostrado na Figura 11. A utilização deste equipamento é crucial uma vez que permite observar o comportamento térmico das cargas a par do consumo de energia.



Figura 10: Event, Count and State Data Logger with USB



Figura 11: USB Temperature Data Logger with Display[42]

### 3.1.1 Equipamentos de frio

Os equipamentos de frio podem ser divididos em duas categorias: equipamentos de refrigeração ou equipamentos de congelação. Os equipamentos de refrigeração podem ser encontrados a nível residencial em praticamente todas as habitações, uma vez que possuem uma taxa de posse de 99,3% nos agregados familiares [43]. Devido à grande necessidade de preservação de amostras que necessitam de ser guardadas a temperaturas específicas, este tipo de equipamentos pode ser encontrados por todo o campus da ESAC nas suas duas especificações, quer seja apenas como frigorífico ou combinado, equipamento que junta a arca frigorífica com a arca congeladora. Já para amostras ou materiais que exigem

## Autossuficiência energética e gestão da procura numa instituição de ensino superior

temperaturas de armazenamento negativas, a escola possui um vasto número de arcas congeladoras para esse efeito.

Nas Figura 12 e Figura 13, é possível observar o comportamento de uma arca frigorífica e de uma arca congeladora, respetivamente, instaladas no campus da ESAC nos seus laboratórios.

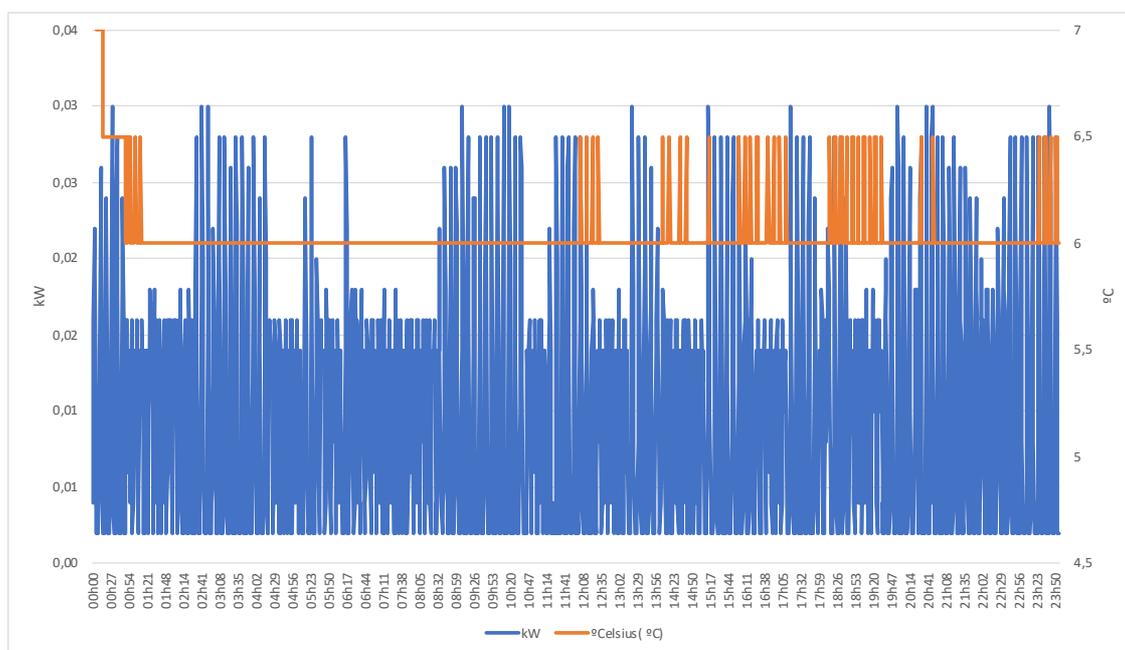


Figura 12: Diagrama diário de carga e temperatura de uma arca frigorífica

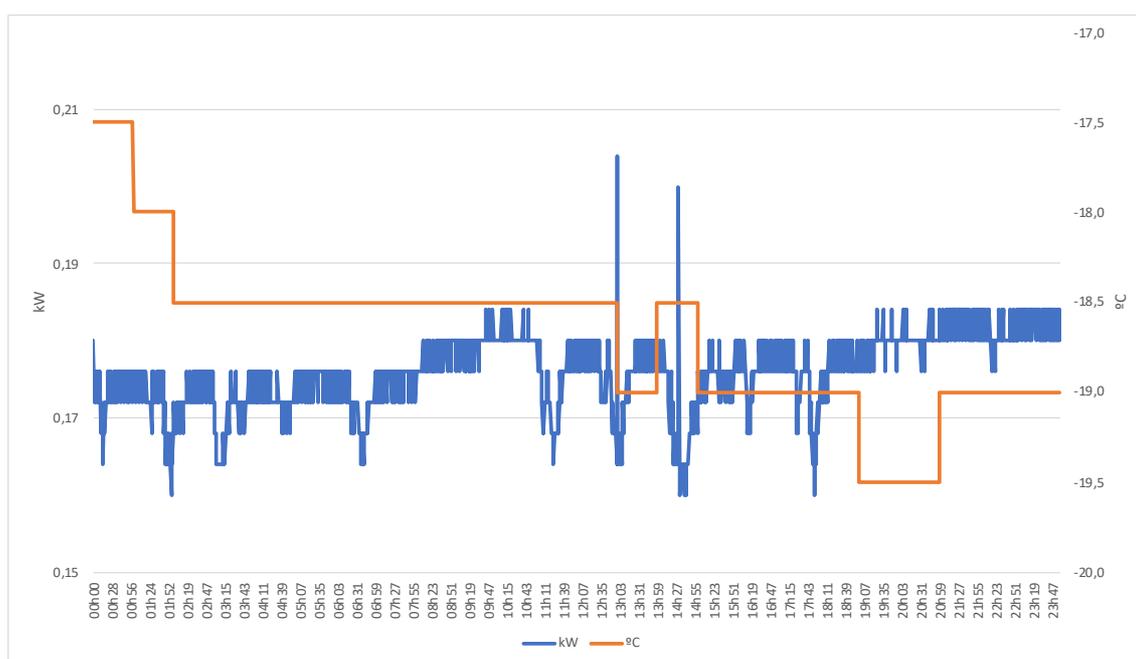


Figura 13: Diagrama de carga com temperatura de uma arca congeladora

Ao serem analisados os consumos de dispositivos de refrigeração, é possível observar que a sua função reside em retirar o calor do seu interior, mantendo uma temperatura estável. A eficácia desse procedimento está intrinsecamente ligada à qualidade da construção do equipamento, o que, em determinados casos, viabiliza a interrupção do seu ciclo de funcionamento sem alterações significativas na temperatura e conservação dos elementos nele colocados. Isso confere uma certa flexibilidade na gestão de tais cargas. Importa salientar que o consumo desses aparelhos se mantém praticamente constante, salvo durante a abertura da porta e a inserção/remoção de alimentos, instâncias que resultam num transitório aumento da temperatura interna e, por conseguinte, num acréscimo no consumo de energia elétrica, como pode ser comprovado pela análise dos respetivos DC.

### 3.1.2 Estufas

Ao contrário dos equipamentos apresentados no ponto anterior, as estufas são equipamentos elétricos menos usuais e vistos apenas em laboratórios e outros estabelecimentos com necessidades mais específicas. Na ESAC estão ao dispor dos estudantes, professores e outros utilizadores uma variedade de estufas de esterilização e secagem com diferentes potências para satisfazer as várias necessidades dos trabalhos realizados. Assim, a Figura 14 mostra o comportamento típico do funcionamento de uma dessas estufas ao longo do seu ciclo de utilização normal de cerca de 330 minutos em que no fim é ainda representado um momento de 120 minutos onde é possível verificar a diminuição da temperatura.

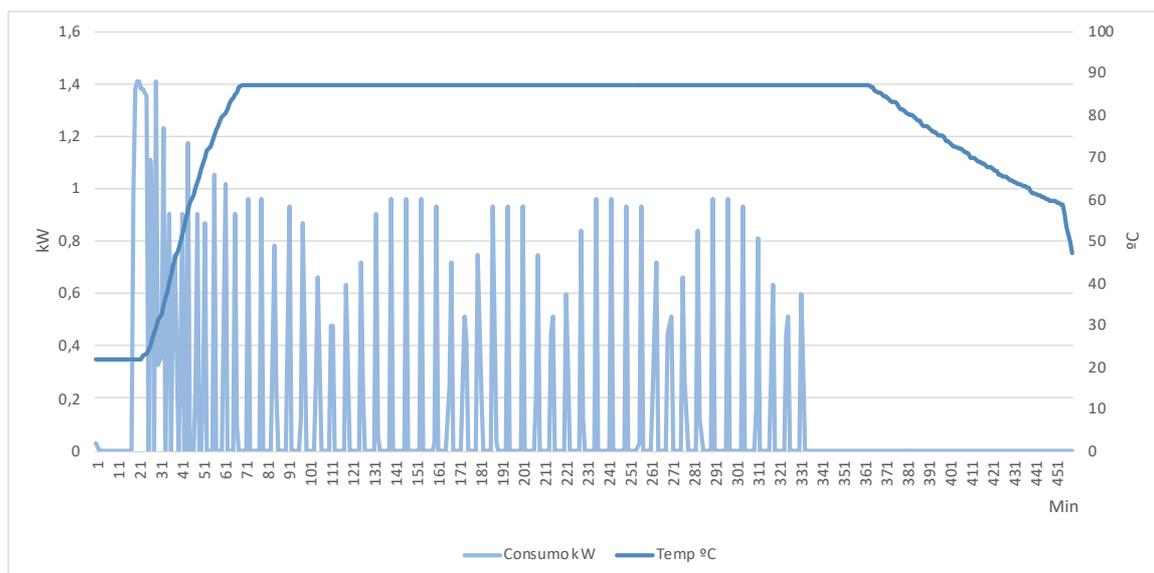


Figura 14: Diagrama de carga típico de um ciclo de trabalho de uma estufa

Estas estufas apresentam um comportamento semelhante a uma carga termostática uma vez que o principal objetivo é obter e manter uma certa temperatura durante o seu ciclo de funcionamento de modo a esterilizar, preservar ou secar as amostras colocadas no seu interior. O controlo da temperatura na câmara é realizado por meio de um termóstato [44].

### 3.1.3 Autoclaves

Uma autoclave é um instrumento que utiliza vapor a alta pressão para eliminar micro-organismos. Este tipo de equipamentos são fundamentais em ambientes laboratoriais uma vez que as altas temperaturas e pressões que estes equipamentos conseguem produzir, eliminam todo o tipo de bactérias e fungos capazes de causar infeções ou doenças [45].

Na Figura 15 é possível observar quatro diferentes ciclos de utilização destes equipamentos ao longo de um dia. Estes ciclos diferem tanto na potência como na sua duração, o que se traduz em consumos energéticos diferentes.

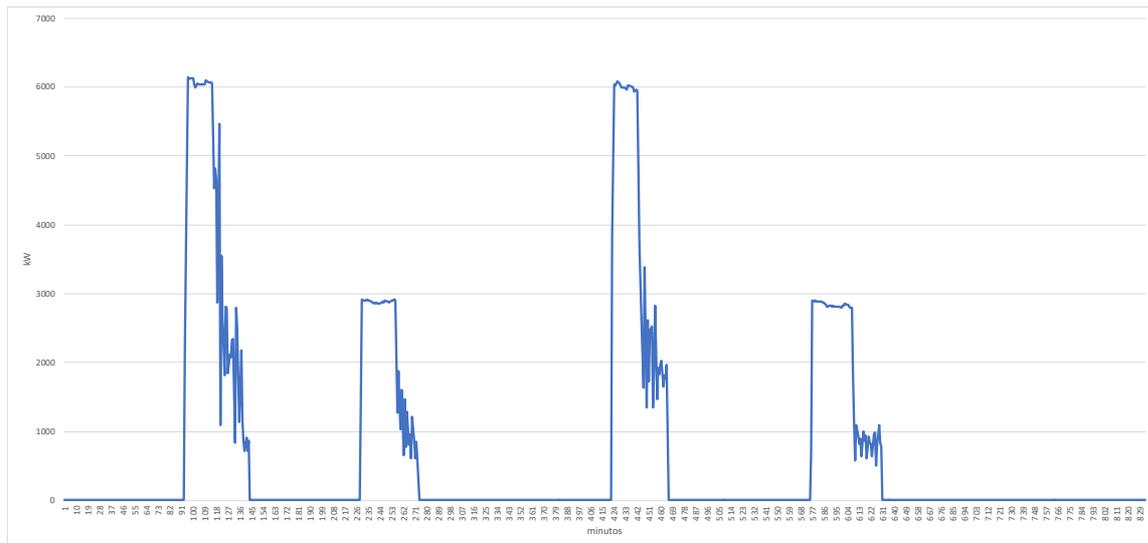


Figura 15: Diagrama de carga de vários ciclos de funcionamento de uma autoclave

A energia elétrica desempenha papel é fundamental no funcionamento da autoclave, visto ser fonte de energia que alimenta o sistema de aquecimento responsável por gerar o vapor necessário para esterilizar os materiais. O aquecimento é feito através de resistências elétricas, convertendo a energia elétrica em calor, elevando a temperatura dentro da autoclave. O correto aumento da temperatura é essencial visto ser um elemento-chave para a esterilização correta dos materiais e assim eliminar de forma eficaz os micro-organismo.

### 3.1.4 Motores

Com o intuito de aumentar ainda mais a autossuficiência, a ESAC possui estratégias que promovem a utilização de recursos naturais de forma a depender menos de recursos fornecidos pelas redes de distribuição pública. Desta forma, vai ser incluído no estudo o consumo de motores de captação de água que recolhem água e a armazenam posteriormente em tanques para que possa ser distribuída pelos serviços necessários.

Assim, a Figura 16 ilustra o funcionamento ao longo de um dia do motor que faz a captação de água para os tanques de armazenamento que por sua vez são utilizados na rede de água sanitária da instituição e no fornecimento de água para os animais.

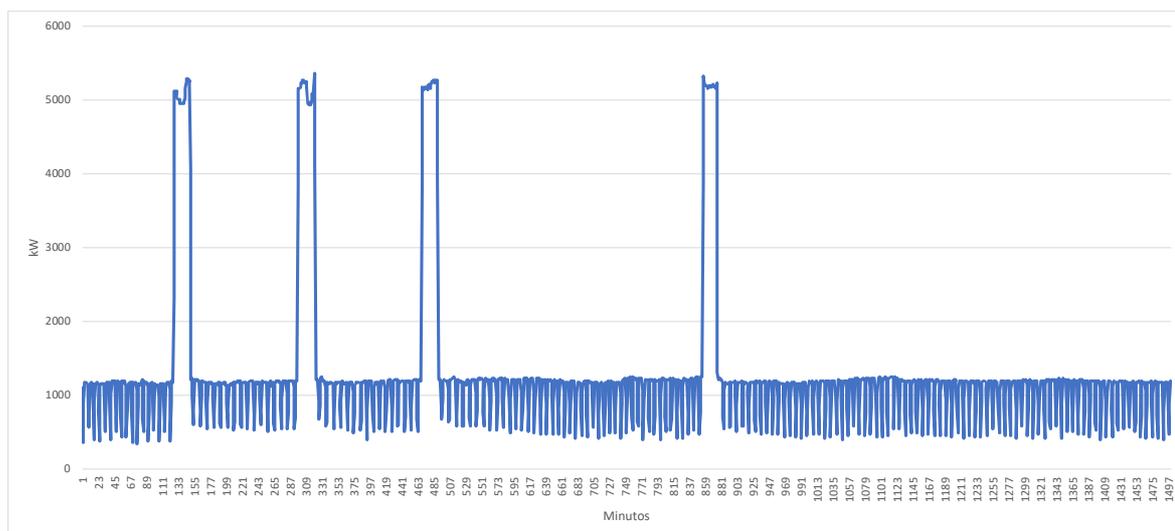


Figura 16: Diagrama de carga diário de um motor de captação de água

É importante referir, que no tratamento desta carga, é necessário garantir que os tanques nunca ficam abaixo de um nível de segurança de capacidade que consiga continuar o normal abastecimento da água.

O seu funcionamento, ainda que bastante simples, pode ser melhorado e otimizado. A captação é feita num poço usando uma bomba submersível e a água armazenada em reservatórios até ser necessária. O sistema é gerido por dispositivos que efetuam a monitorização do nível de água no tanque e ajustam o fluxo conforme necessário, garantindo um abastecimento constante para a rede de águas. A otimização do seu funcionamento pode envolver a eficiência da própria bomba; ou seja, uma bomba mais eficiente consumirá menos energia. A utilização de dispositivos que permitam o controlo automático que monitorizam os dados fornecidos como fluxo de entrada e saída do tanque, nível de água, etc, bem como a sua utilização durante as horas de produção de energia através de fontes renováveis.



## 4 Metodologia

---

Neste capítulo será demonstrada a metodologia desenvolvida que permita maximizar a autossuficiência da ESAC e ao mesmo tempo reduzir a fatura da eletricidade. Vão ser desenvolvidos modelos para as cargas que podem ser alocadas noutros períodos horários e que não podem ser interrompidas, como por exemplo as estufas, autoclaves etc.

A consideração do ciclo operacional é essencial pois representa o funcionamento físico real do equipamento, e a potência necessária em cada fase do ciclo de trabalho é significativamente diferente. Portanto, para cada carga ajustável, nos modelos aqui propostos:

- É considerada a duração do seu ciclo de funcionamento e a potência necessária em cada instante durante o seu funcionamento;
- O consumidor deve fornecer os intervalos de tempo de conforto para a operação da carga de acordo com as suas preferências que podem ser disjuntos no período de planeamento;

### 4.1 Descrição do problema

Já foi mencionado anteriormente que no contexto das cargas elétricas e/ou na utilização do serviço de energia fornecido, existem restrições técnicas e preferências do consumidor que devem ser consideradas no processo de escalonamento. De maneira geral, é possível identificar dois tipos de restrições no escalonamento de cargas: restrições rígidas e restrições suaves. As restrições rígidas referem-se à necessidade de cumprir requisitos específicos, enquanto as restrições suaves envolvem requisitos desejáveis, mas não obrigatórios. Por exemplo, se um consumidor identificar dois intervalos de tempo viáveis para o funcionamento de um dispositivo, isso é considerado uma restrição rígida, e o dispositivo deve operar num desses intervalos. No entanto, se o consumidor expressa uma preferência por um intervalo em relação ao outro, isso é considerado uma restrição suave. A violação dessas restrições resulta em penalidades na função objetivo, que avalia o desempenho de possíveis soluções para o problema.

As restrições de conforto relacionadas à utilização dos serviços de energia geralmente dizem respeito ao cumprimento de *slots* de tempo que minimizam o impacto nas rotinas do utilizador. Os *slots* de tempo representam intervalos nos quais o utilizador permite o funcionamento de uma carga específica. As preferências em relação a esses *slots* de tempo podem refletir diversas expressões, como a renúncia a parte do conforto em troca de um custo mais baixo de energia elétrica ou a busca por comodidade na utilização dos serviços de energia. A Tabela 1 apresenta assim as restrições por parte dos utilizadores para os slots de tempo do escalonamento.

Tabela 1: Restrições do escalonamento

<b>Carga</b>	<b>Período de funcionamento permitido</b>	<b>Duração do ciclo de funcionamento</b>
<b>Autoclave</b>	8h30 - 17h30	35 min
<b>Motor</b>	0h - 24h	15 min
<b>Estufa</b>	0h - 24h	330 min

Existe ainda tipicamente uma restrição relativa ao limite de potência, que impede ultrapassar a potência estabelecida no contrato, tal como considerados nos trabalhos [33-34]. Contudo, no corrente caso de estudo, essa restrição será tida em conta de um modo mais amplo, visto que a potência contratada pela ESAC diz respeito a todo o *campus* e não apenas a certas áreas do complexo onde se foca a dissertação, pelo que um ajuste do valor será necessário para que os resultados façam sentido e será tido em consideração a potência máxima permitida em regime de baixa tensão especial (BTE), fixada nos 41,4kVA.

Por último, a preferência pela segurança é determinada com base na potência disponível entre o escalonamento total das cargas e a potência contratada, visando minimizar o risco de interrupção do fornecimento de energia elétrica diante de variações não previstas na carga, que não foram consideradas no processo de escalonamento.

Para o caso de estudo em específico, é também considerada uma carga de base que não é passível de ser controlada, bem como a produção fotovoltaica existente no telhado do edifício principal.

O problema de otimização consiste na decisão de compra ou venda energia, na alocação temporal das cargas em estudo, considerando como *inputs* a geração local, o preço

de compra da energia à rede e o consumo base. Como restrições existem as preferências relativas às *time slots* para operação das cargas controláveis, a potência contratada, etc. A solução do problema de otimização consiste nos fluxos de potência e na alocação das cargas controláveis.

O período considerado é de um dia, constituído por  $T$  intervalos de tempo, em que cada um apresenta uma duração  $\Delta t$ , indexado por  $t = 1, \dots, T$ . O intervalo  $\Delta t$  depende da discretização adotada sendo que neste caso foi escolhido um grau de recolha de dados mais fino, ou seja,  $\Delta t = 1$  minuto, para um período de 24 h.

Relativamente ao preço de aquisição de energia à rede, a ESAC possui uma tarifa tetra-horária, ou seja, possui quatro períodos ao longo do dia com tarifas de preço diferentes. Estas tarifas,  $C_t^{buy}$ , são dados de entrada do modelo de otimização. O modelo matemático geral está representado em formulação matemática e tem como principal objetivo minimizar os custos de energia e maximizar o uso de produção fotovoltaica local tendo em conta as preferências e restrições de uso.

## 4.2 Formulação matemática

O modelo proposto baseia-se em trabalhos anteriormente desenvolvidos por [33], tendo sido adaptado para se adequar especificamente ao caso de estudo previamente apresentado. As cargas controláveis no âmbito desta dissertação caracterizam-se por poderem ter os seus ciclos de funcionamento agendados em diferentes períodos do dia, sem que ocorra degradação do serviço de energia prestado e respeitando as preferências de tempo do utilizador. As cargas deslocáveis no tempo são então: Autoclaves, motores e estufas.

Considerando  $J$  o número de cargas deslocáveis, com  $j \in \{1, \dots, J\}$ , os respetivos diagramas de carga (apresentados em 3.1) são então caracterizados pelas variáveis de entrada:

- $d_j$  - duração do ciclo de funcionamento da carga  $j$
- $g_{jr}$  - potência da carga  $j$  no instante  $r$  do seu ciclo de funcionamento, com  $r = (1, \dots, d_j)$
- $[T_{Lj}, \dots, T_{Uj}]$  - intervalo de tempo em que o utilizador permita que a carga opere com  $T_{Lj}$  representando o instante a partir do qual a carga pode iniciar o seu ciclo

de funcionamento e  $T_{Uj}$  o instante em que o seu ciclo de funcionamento tem de estar concluído.

O controlo é definido pela variável binária  $w_{jrt}$ , sendo  $w_{jrt} = 1$  se a carga está em funcionamento no instante  $r$  do seu ciclo de operação no tempo  $t$  do período de planeamento,  $w_{jrt} = 0$  se carga não está em funcionamento.

A variável auxiliar  $P_{jt}^{Sh}$  corresponde à potência pedida à rede, em kW, pela carga  $j$  no instante  $t$  com  $j \in \{1, \dots, J\}$  e  $t \in \{1, \dots, T\}$ . Esta potência é 0 quando  $t$  não pertence ao intervalo  $[T_{Lj}, \dots, T_{Uj}]$ .

As restrições que modelam este tipo de cargas garantem que:

- Cada carga  $j$  opera precisamente uma vez no instante  $r$  contido no intervalo de preferências do utilizador (1);
- Em cada instante  $t$  do período de planeamento, cada carga  $j$  pode estar desligada ou ligada no instante de tempo  $r$  do seu ciclo de operação (2);
- Se a carga  $j$  está em funcionamento no instante  $t$  e em  $r$  com  $r < d_j$ , então também tem de estar ligada no instante  $t + 1$  e instante  $r + 1$ , para  $r = (1, \dots, d_j - 1)$  (3);
- A carga  $j$  deve iniciar a sua operação o mais tardar no instante  $T_{Uj} - d_j + 1$  de modo garantir que o seu funcionamento não termina após  $T_{Uj}$  (o que estaria fora do intervalo de funcionamento indicado pelo utilizador) (4);

As equações (5) e (6) permitem definir o valor de potência pedida à rede por cada carga  $j$  em cada instante  $t$ .

$$\sum_{t=T_{Lj}}^{T_{Uj}} w_{jrt} = 1, j = 1, \dots, J, r = 1, \dots, d_j \quad (1)$$

$$\sum_{r=1}^{d_j} w_{jrt} \leq 1, j = 1, \dots, J, t = T_{Lj}, \dots, T_{Uj} \quad (2)$$

$$w_{j(r+1)(t+1)} \geq w_{jrt}, j = 1, \dots, J, t = T_{Lj}, \dots, (T_{Uj} - 1), \\ r = 1, \dots, (d_j - 1) \quad (3)$$

$$\sum_{t=T_{Lj}}^{T_{Uj}-d_j+1} w_{j1t} = 1, j = 1, \dots, J \quad (4)$$

## Autossuficiência energética e gestão da procura numa instituição de ensino superior

$$P_{jt}^{Sh} = \sum_{r=1}^{d_j} g_{jr} * w_{jrt}, j = 1, \dots, J, t = T_{Lj}, \dots, T_{Uj} \quad (5)$$

$$P_{jt}^{Sh} = 0, j = 1, \dots, J, t < T_{Lj} \vee t > T_{Uj} \quad (6)$$

A função objetivo é a minimização do custo de energia consumida (eq 7)

$$\min custo_{sh} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J C_t^{buy} P_{jt}^{Sh} \Delta t \quad (7)$$

sendo que  $C_t^{buy}$  representa o preço de energia (€/kWh),  $t \in \{1, \dots, T\}$ .

Para a bateria foi considerado que o estado da bateria é dado em energia, sendo as unidades kWh e tendo como restantes parâmetros:

$$\eta_B^{ch}, \eta_B^{dch} = \text{eficiência de carga e descarga da bateria, respetivamente} \quad (8)$$

$$E_B^{min}, E_B^{max} = \text{carga mínima e máxima permitida (kWh)} \quad (9)$$

$$E_B^0 = \text{estado inicial da bateria (kWh) no instante } t = 0 \quad (10)$$

$$E_B^{req} = \text{carga da bateria requerida no final do período de planeamento} \quad (11)$$

$$P_B^{ch,max}, P_B^{dch,max} = \text{potência máxima de carga e descarga da bateria (kW)} \quad (12)$$

As variáveis de decisão e variáveis auxiliares são:

$$P_t^{B2Build} = \text{potência em kW sendo que } P_t^{B2Build} \Delta t \text{ é a energia transferida da bateria para o edifício no instante } t \quad (13)$$

$$P_t^{Build2B} = \text{potência em kW sendo que } P_t^{Build2B} \Delta t \text{ é a energia transferida do edifício para a bateria no instante } t \quad (14)$$

$$E_{B,t} = \text{energia da bateria (kWh) no instante } t (E_{B,t} = E_B^0) \quad (15)$$

$$s_t^{Build2B} = \text{variável binária igual a 1 quando a bateria está a carregar no instante } t \quad (16)$$

$$s_t^{B2Build} = \text{variável binária igual a 1 quando a bateria está a descarregar no instante } t$$

O funcionamento da bateria é dado pelas restrições:

$$E_{B,t} = E_{B,t-1} + (\eta_B^{ch} P_t^{Build2B} \Delta t) - \left( \frac{P_t^{B2Build} \Delta t}{\eta_B^{dch}} \right), \quad t \in T \quad (17)$$

## Metodologia

$$E_B^{min} \leq E_{B,t} \leq E_B^{max}, \quad t \in T \quad (18)$$

$$0 \leq P_t^{Build2B} \leq P_B^{ch\_max} s_t^{Build2B}, \quad t \in T \quad (19)$$

$$0 \leq P_t^{B2Build} \leq P_B^{dch\_max} s_t^{B2Build}, \quad t \in T \quad (20)$$

$$s_t^{Build2B} + s_t^{B2Build} \leq 1, \quad t \in T \quad (21)$$

$$E_{B,T} \geq E_B^{req} \quad (22)$$

$$s_t^{Build2B}, s_t^{B2Build} \in \{0, 1\}, \quad t \in T \quad (23)$$

A equação 17 permite calcular a energia na bateria considerando a sua carga e descarga. A equação 18 garante uma quantidade mínima e máxima de energia em cada unidade de tempo. As equações 19, 20 e 21 limitam a taxa de carga máxima ( $s_t^{Build2B} = 1$ ) e descarga máxima ( $s_t^{B2Build} = 1$ ), respetivamente. A equação 22 garante que a bateria apenas pode operar num determinado estado (carga ou descarga). A equação 23 garante que no final do período de planeamento, a energia na bateria é a pretendida pelo utilizador.

O modelo global inclui ainda os seguintes parâmetros, dados e variáveis de decisão para todo  $t \in \{1, \dots, T\}$ :

$$B_t = \text{potência base não controlável (kW)} \quad (24)$$

$$P_t^{PV} = \text{potência em kW sendo que } P_t^{PV} \Delta t \text{ é a produção local fotovoltaica no intervalo de tempo } t \text{ (kWh)} \quad (25)$$

$$P_t^{PV2X} = \text{potência em kW sendo que } P_t^{PV2X} \Delta t \text{ é a produção local fotovoltaica no intervalo de tempo } t \text{ (kWh) usada no edifício (incluindo carregamento da bateria)} \quad (26)$$

$$P^{cont} = \text{potência contratada (kVA)} \quad (27)$$

$$P_t^{G2Build} = \text{potência em kW sendo que } P_t^{G2Build} \Delta t \text{ é a energia (kWh) transferida da rede para o edifício no intervalo de tempo } t \text{ a um custo } C_t^{buy} \text{ (€/kWh)} \quad (28)$$

$$s_t^{G2Build} = \text{variável binária igual a 1 quando a energia flui da rede para o edifício no instante de tempo } t \quad (29)$$

$$C^{cont} = \text{termo fixo diário associado à potência contratada (€/kW)} \quad (30)$$

$$C_t^{buy} = \text{preço de energia (€/kWh), } t \in \{1, \dots, T\}. \quad (31)$$

A função objetivo é dada por

## Autossuficiência energética e gestão da procura numa instituição de ensino superior

$$\min \text{custo}_{total} = \sum_{t=1}^T C_t^{buy} * P^{G2Build} * \Delta t \quad (32)$$

Sujeito a

restrições 1 – 25,

$$0 \leq P_t^{G2Build} \leq P^{cont} * S_t^{G2Build}, \quad t = 1, \dots, T \quad (33)$$

$$P_t^{G2Build} + P_t^{PV2X} = B_t + \sum_{j=1}^J P_{jt}^{Sh} + (P_t^{Build2B} - P_t^{B2Build}), \quad \forall t \in T \quad (34)$$

$$P_t^{PV2X} \leq B_t + \sum_{j=1}^J P_{jt}^{Sh} + (P_t^{Build2B} - P_t^{B2Build}), \quad \forall t \in T \quad (35)$$

$$P_t^{PV2X} \leq P_t^{PV}, \quad \forall t \in T \quad (36)$$

$$S_t^{G2Build} \in \{0,1\}, \quad t = 1, \dots, T \quad (37)$$

É importante referir que neste modelo não é injetada energia na rede.

O modelo implementado no *software* de otimização IBM® ILOG® CPLEX® Studio IDE, foi tendo-se recorrido a um computador com um processador AMD Ryzen 5 3500U 2.10GHz.



## 5 Resultados

---

Após a realização de várias simulações para diferentes cenários foram obtidas diferentes soluções que são analisadas e discutidas neste capítulo.

Na Figura 8, está representada uma semana de produção da geração local com recurso a painéis fotovoltaicos instalados no edifício principal da ESAC. Foram escolhidos três dias com produções distintas de modo a simular o que seria a produção em dias com condições atmosféricas distintas:

- LPV – produção fotovoltaica fraca;
- MPV – produção fotovoltaica média;
- HPV – produção fotovoltaica alta;

Tendo em conta a localização geográfica da ESAC e a boa capacidade de produção PV anual, o caso HPV mostra ser o mais indicado para as simulações seguintes.

### 5.1 Caso base

Na análise do caso base, não foi aplicada nenhuma medida de otimização aos períodos de consumo, logo estes foram realizados ao longo do dia sem nenhum cuidado relativo à poupança e eficiência energética.

Tendo em conta as cargas apresentadas no capítulo 4, foram escolhidas para as simulações as seguintes:

- 3 autoclaves;
- 3 motores;
- 2 estufas;

A Figura 17, mostra os fluxos de potência entre o edifício e a rede elétrica de serviço público (RESP), tendo em conta os preços da compra da energia e a produção fotovoltaica, para uma análise mais detalhada.

## Resultados

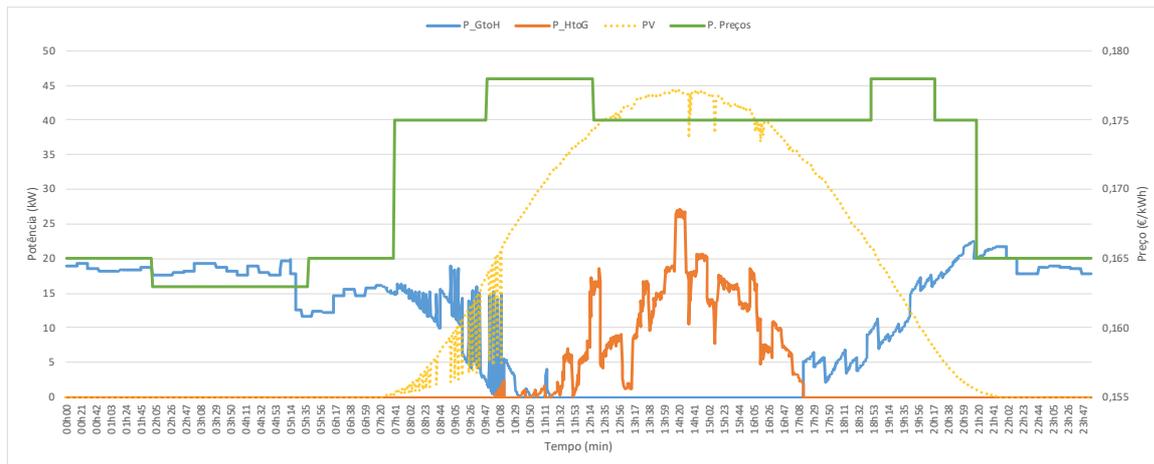


Figura 17: Fluxos de potência entre o Edifício e RESP sem uso de métodos de otimização

É possível observar que quando a produção fotovoltaica ultrapassa o consumo total temos um excedente de energia, que uma vez que não existe venda à rede, é energia disponível não é utilizada.

Ao longo de um dia, o edifício principal da ESAC consome cerca de 550 kWh de energia, em que 65% deste consumo é colmatado pela produção fotovoltaica que produz 358,86 kWh no mesmo período.

A Figura 18 representa o caso base que é aquele em que as cargas são utilizadas sem haver uma gestão para utilizar os seus consumos onde há maior produção PV ou os custos por kWh são menores. É possível observar que estas são utilizadas desde o início da manhã até ao fim da tarde, apanhando assim os períodos do dia em que os preços se encontram mais elevados e, caso houvesse uma gestão das cargas, algumas dessas podiam ser colocadas a funcionar durante o período de maior produção fotovoltaica. Contudo, graças à boa capacidade fotovoltaica instalada, esse consumo negligente consegue ser mitigado.

Consequentemente, devido à falta de controlo sobre os padrões de consumo ao longo do dia, parte da energia produzida não é aproveitada. Do total de produção, 67,19 kWh não são utilizados. Assim, dos 358,86 kWh produzidos localmente, apenas 291,67 kWh são de facto utilizados o que equivale a cerca de 81%. E, conforme observado na Tabela 2, onde é feita a comparação dos preços diários pelas várias simulações, é possível observar que esse dia específico teria um custo de aproximadamente 43,34€ para a ESAC.

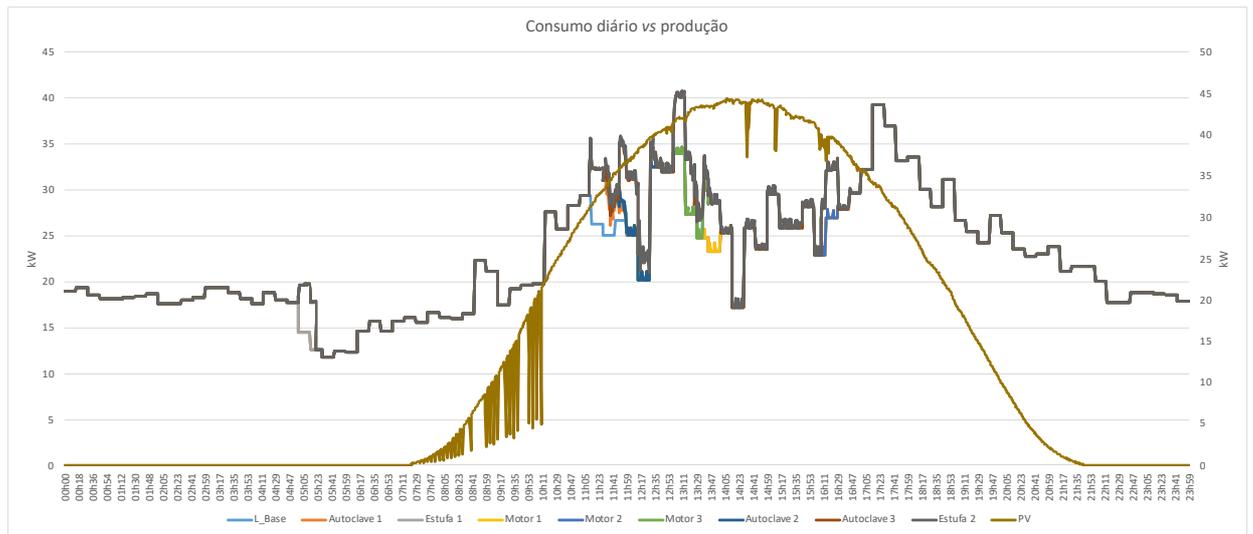


Figura 18: Consumo diário vs produção fotovoltaica (caso base)

A Figura 19 coloca de uma forma mais detalhada como é distribuída diariamente a utilização das cargas em estudo quando apenas se tem em consideração as necessidades imediatas do utilizador.

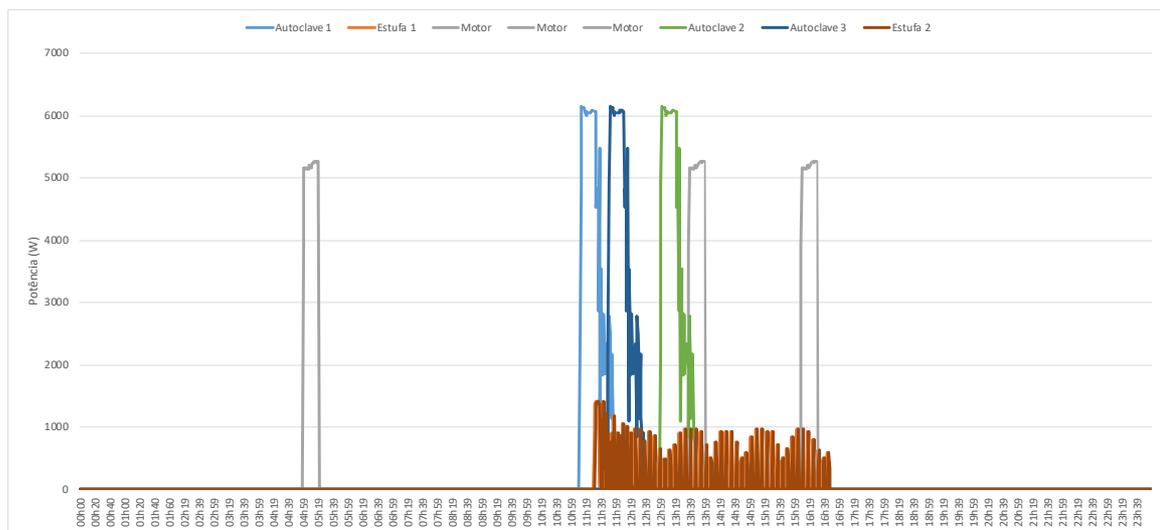


Figura 19: Escalonamento diário das cargas em estudo

## 5.2 Caso sem bateria

O primeiro caso com recurso à metodologia apresentada na secção 4.2, é o caso sem recurso a baterias, o que de momento é o caso real da ESAC. Este caso foi escolhido para base de comparação com os cenários seguintes em que será avaliada a fatura energética aquando do recurso a baterias.

Para este caso as restrições da Tabela 1 foram usadas para os horários de funcionamento das cargas em estudo.

## Resultados

Pela análise da Figura 20 é possível observar o mesmo que foi evidenciado no caso base, ou seja, durante o pico da produção fotovoltaica, esta é suficiente para colmatar as necessidades energéticas do edifício e produz um excesso de energia, que sem a possibilidade de armazenamento ou de venda, não será utilizada.

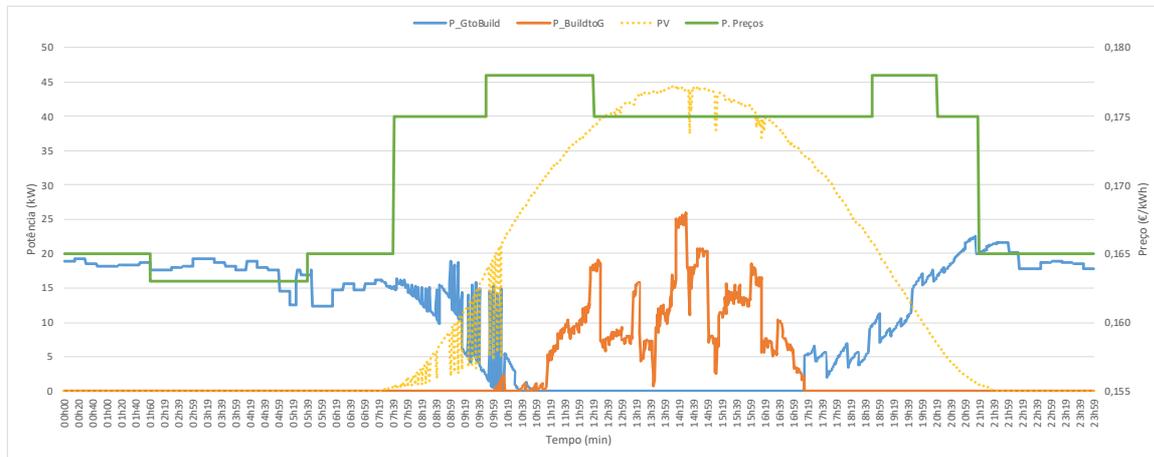


Figura 20: Fluxos de potência entre o Edifício e RESP com uso de métodos de otimização sem bateria

O padrão do gráfico do consumo ao longo do dia é bastante semelhante ao caso anterior visto que o horário de funcionamento da ESAC é entre as 8h-18h que coincide com o período em que existe maior produção PV, logo mesmo sem o uso de métodos de otimização, as cargas serão utilizadas no instante de produção. Visto que a central fotovoltaica fornece energia suficiente, a otimização que não permita o armazenamento de energia não trará grandes benefícios comparativamente a não utilizar métodos de otimização. Pode ainda ser comprovado pela percentagem de energia utilizada que é proveniente da produção local.

No caso anterior eram utilizados 291,67 kWh provenientes do fotovoltaico e neste caso são utilizados 291,85 kWh, o que corresponde a 53% do consumo total diário, que a nível percentual mantém-se semelhante ao caso base. Dos 358,86 kWh produzidos localmente, 81,33% serão utilizados para consumo próprio, o que equivale a 291,85 kWh. Uma vez que os indicadores energéticos são semelhantes entre o caso base e o caso sem bateria, é expectável que o mesmo ocorra a nível de custo diário. Dado que o custo diário para esta simulação é de 43,31€, confirma-se o que era esperado.

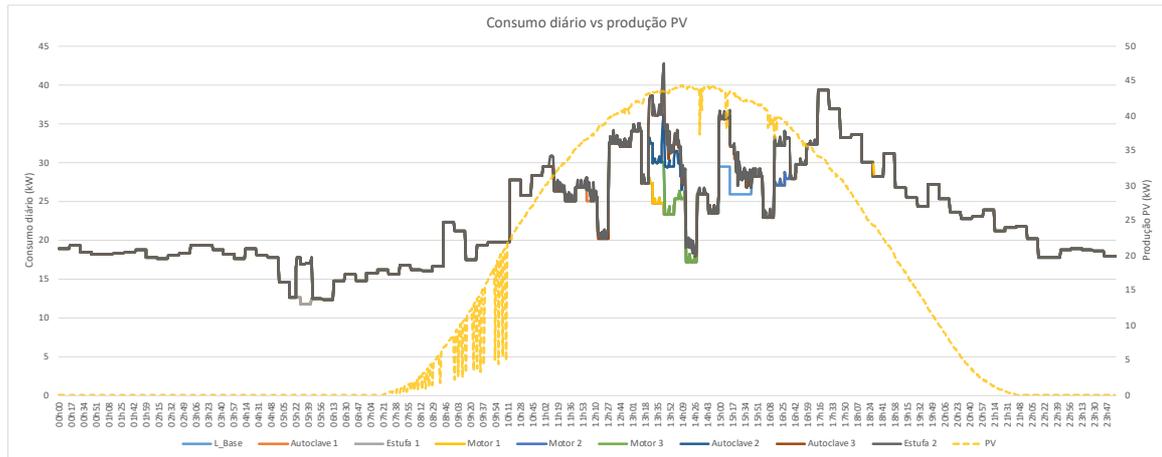


Figura 21: Consumo diário vs produção fotovoltaica (sem bateria)

Semelhante ao observado pela Figura 19, a Figura 22 demonstra o escalonamento diário das cargas em maior pormenor. Nesta, é possível observar a diferença entre o período de funcionamento das cargas, que neste caso, os equipamentos que possuem um menor ciclo de funcionamento, funcionam durante o pico da produção fotovoltaica.

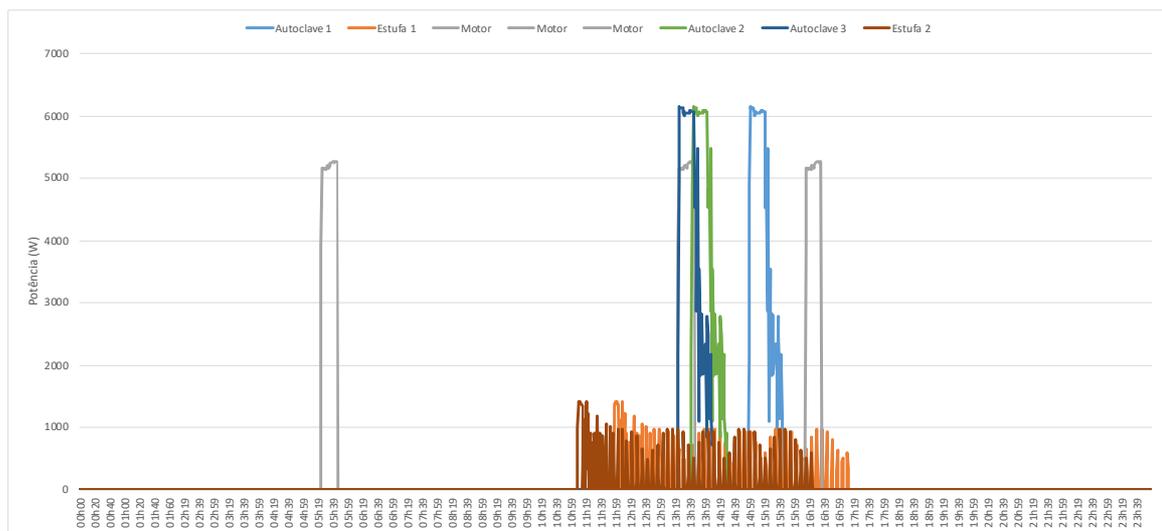


Figura 22: Escalonamento diário das cargas em estudo

### 5.3 Caso com bateria

Neste último caso de estudo, foi utilizado um método de otimização com os *inputs* iguais ao caso anterior com a diferença de ter sido utilizada uma bateria com uma capacidade de 18 kWh. Ainda que tenham sido realizadas várias simulações com baterias de capacidades diferentes, a bateria selecionada é a que apresenta um melhor custo benefício como será comprovado na secção de discussão de resultados

## Resultados

A Figura 23 apresenta o gráfico que representa o estado da carga (*State of Charge*) da bateria ao longo do dia e como o seu comportamento funciona comparativamente à produção local.

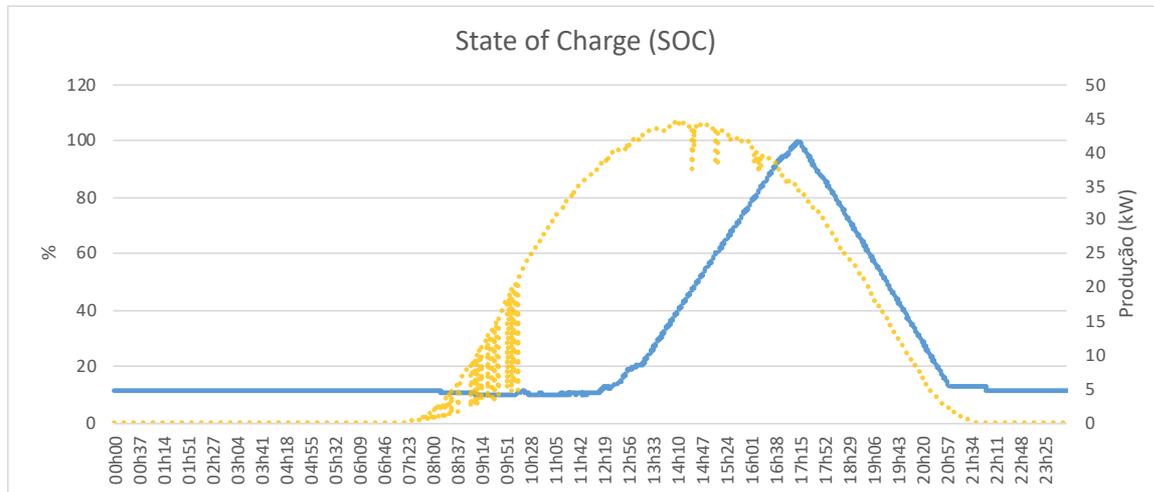


Figura 23: SOC diário bateria 18 kWh

A análise da figura anterior revela que o processo de carregamento diário da bateria é realizado dentro do intervalo horário compreendido entre as 13 e as 17 horas, coincidindo com um período de superávit na produção fotovoltaica, conforme ilustrado na Figura 24, seguido imediatamente pelo início da sua descarga após atingir a sua capacidade de carga máxima. Tal padrão de consumo de energia é expectável, uma vez que pela Figura 25 é visível que às 17 horas, quando a produção local já não é suficiente para cobrir todo o consumo do edifício, ocorre o terceiro pico de consumo do dia, associado igualmente ao segundo maior preço de compra de energia diário, com um custo de 0,175€ por kWh. Dessa forma, a utilização da bateria mostra-se estratégica ao permitir o armazenamento de energia excedente durante períodos de sobreprodução fotovoltaica, viabilizando a sua utilização durante momentos de alta procura, caracterizados por custos mais elevados de aquisição de energia da RESP. Este procedimento contribui para a minimização da necessidade de aquisição de energia externa, alinhando-se, assim, com objetivos de otimização e sustentabilidade energética.

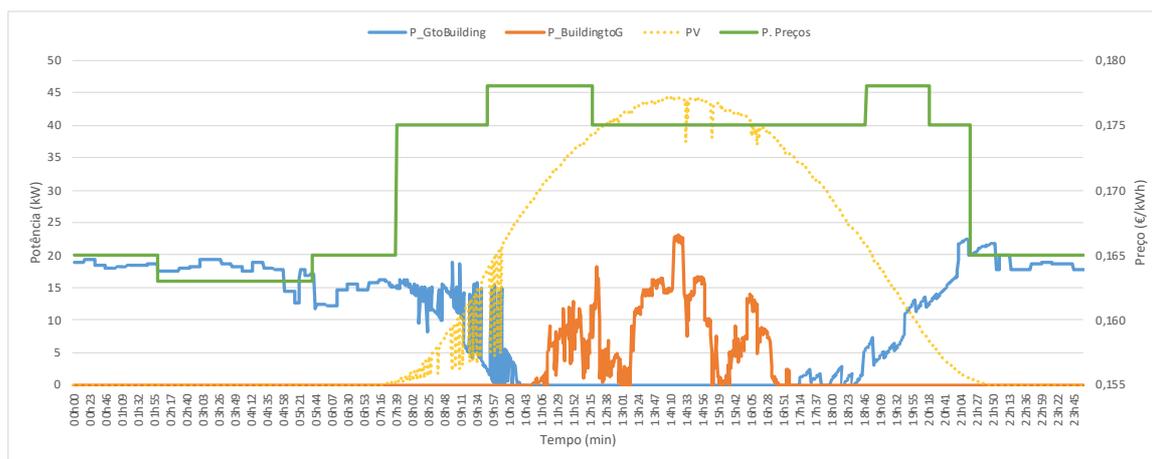


Figura 24: Fluxos de potência entre o Edifício e RESP com uso de métodos de otimização com bateria

Tal como aconteceu nos casos anteriores, e justificável também devido às várias restrições horárias impostas pelos utilizadores, a Figura 25 demonstra que o grosso da alocação das cargas ocorre durante os maiores períodos de produção fotovoltaica, na Figura 26, estes períodos são perceptíveis com maior detalhe uma vez que este gráfico ilustra a alocação diária individual de cada carga. Neste caso de estudo, a energia utilizada proveniente da produção local já apresenta valores melhorados quando comparado ao caso de referência e ao caso sem uso de tecnologias de armazenamento de energia. Para este caso de estudo, obteve-se um maior aproveitamento da potência fotovoltaica instalada, visto que foram usados 309,24 kWh dos 358,86 kWh produzidos localmente, o que equivale a 86,16% do total disponível, o que apresenta um aumento percentual aproximadamente de 5% comparativamente ao apresentado no caso anterior.

No caso de referência e no caso sem bateria, o custo diário manteve-se semelhante, que por sua vez no caso com bateria esse custo foi diminuindo quanto maior a capacidade da bateria, uma vez que reduz a necessidade de compra de energia à rede, sendo o custo diário desta simulação de 40,56€.

## Resultados

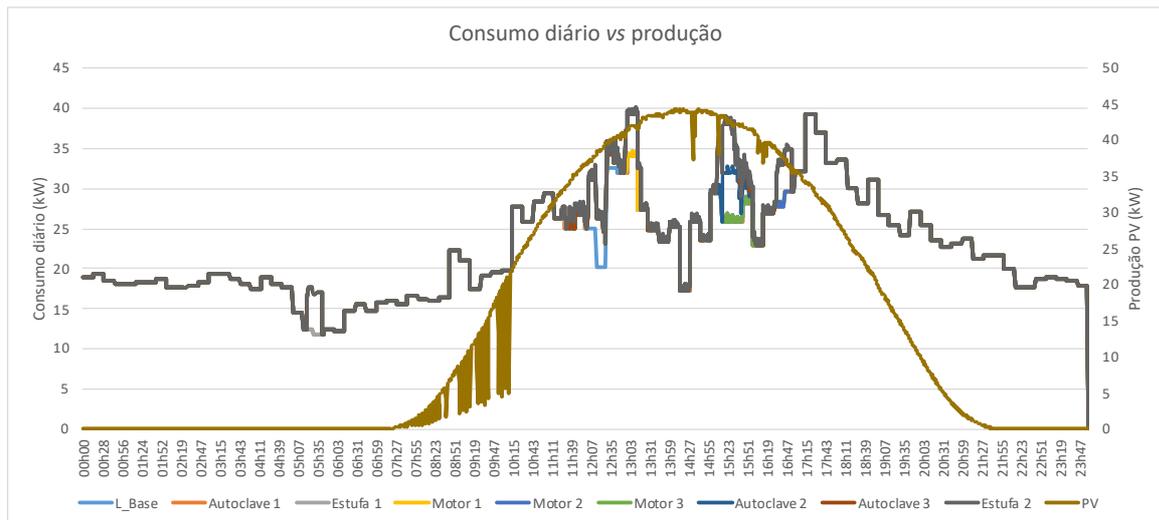


Figura 25: Consumo diário vs produção fotovoltaica (com bateria)

Ao analisar a alocação diária das cargas representada na figura 26, as diferenças quando comparado ao caso base são notadas no horário escolhido pelo modelo de otimização para a utilização das autoclaves que ao apresentarem uma potência de pico considerável, é ideal o seu uso ser alocado para momentos do dia em que o consumo base seja menor e a produção local seja maior.

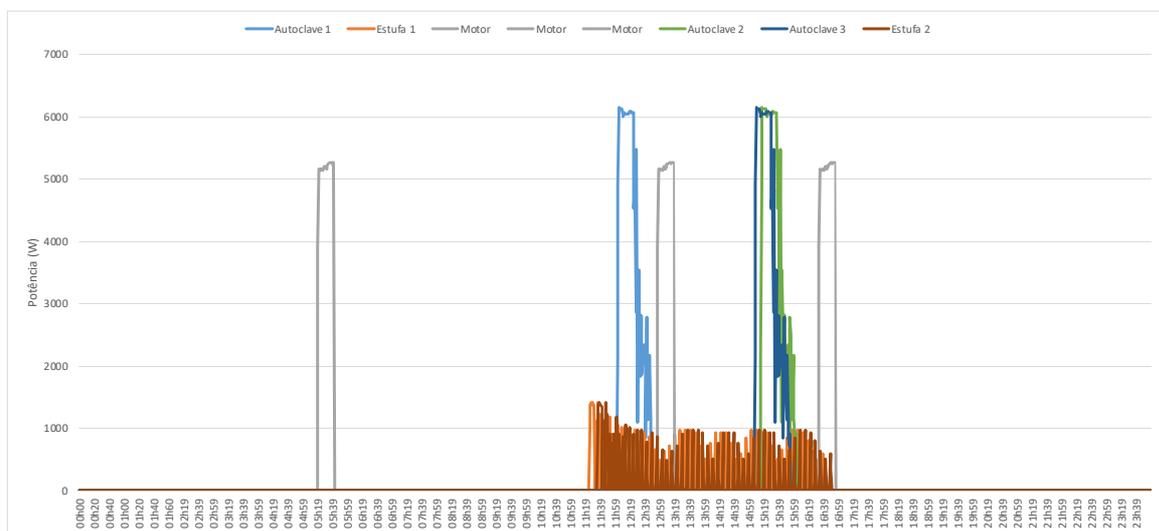


Figura 26: Escalonamento diário das cargas em estudo

## 5.4 Discussão de resultados

Durante períodos de alta produção fotovoltaica, é possível observar que a bateria atinge a sua capacidade máxima de carga e é empregue para suprimir a procura energética do edifício durante as horas da tarde, quando a produção fotovoltaica começa a diminuir. Para avaliar qual bateria é a mais indicada para o estudo em questão, foram testadas três variantes com capacidades distintas, especificamente de 8, 12 e 18 kWh, a fim de determinar a opção mais apropriada. As baterias selecionadas são da marca Pylontech e apresentam um custo por kWh de 283€, resultando em preços individuais de 2264€, 3396€ e 5094€, respetivamente. A escolha da marca assume relevância significativa, uma vez que a qualidade da bateria influencia diretamente a sua vida útil e desempenho. Os valores mencionados foram obtidos através de um orçamento fornecido por uma empresa externa, detalhado nos anexos do presente estudo.

Para simulações envolvendo produção fotovoltaica de baixa e média intensidade, foram adotadas baterias de menor capacidade e, portanto, custos de aquisição reduzidos, com capacidades de 4 kWh para produção fotovoltaica de baixa intensidade (LPV) e 6 kWh para produção fotovoltaica de média intensidade (MPV), tendo o custo de 1132€ e 1698€, respetivamente. A escolha de baterias de menor capacidade para os cenários LPV e MPV, em comparação com aquelas que foram consideradas para produção fotovoltaica superior, justifica-se pelo facto de que estas últimas não atingem a sua capacidade máxima de carga, não utilizando, portanto, a sua capacidade total caso possuíssem as mesmas especificações.

A partir dos dados apresentados na Tabela 2 e na Figura 27 é possível fazer uma análise comparativa das diversas soluções propostas, demonstrando a diferença dos custos diários dos vários casos de estudo considerados e estudados. Nesta análise é possível corroborar os resultados apresentados anteriormente sobre as diferenças a nível de custo diário dos vários casos em estudo no cenário HPV. Assim, como é possível observar, a opção mais vantajosa é o caso com bateria, que quanto maior for a sua capacidade mais rentável se torna. É ainda de salientar que não existe uma diferença notável entre o caso base e o caso otimizado sem recurso a tecnologias de armazenamento de energia.

Tabela 2: Comparativo do preço diário

Caso estudo \ PV	LPV		MPV		HPV			
	C/Bateria	S/Bateria	C/bateria	S/bateria	S/bateria	8 kWh	12 kWh	18 kWh
Caso Base	-	68,58 €	-	56,16 €	43,34 €	-	-	-
Caso S/bateria	-	68,50 €	-	55,93 €	43,31 €	-	-	-
Caso c/bateria	68,50 €	-	55,53 €	-	-	42,06 €	41,46 €	40,56 €

## Resultados

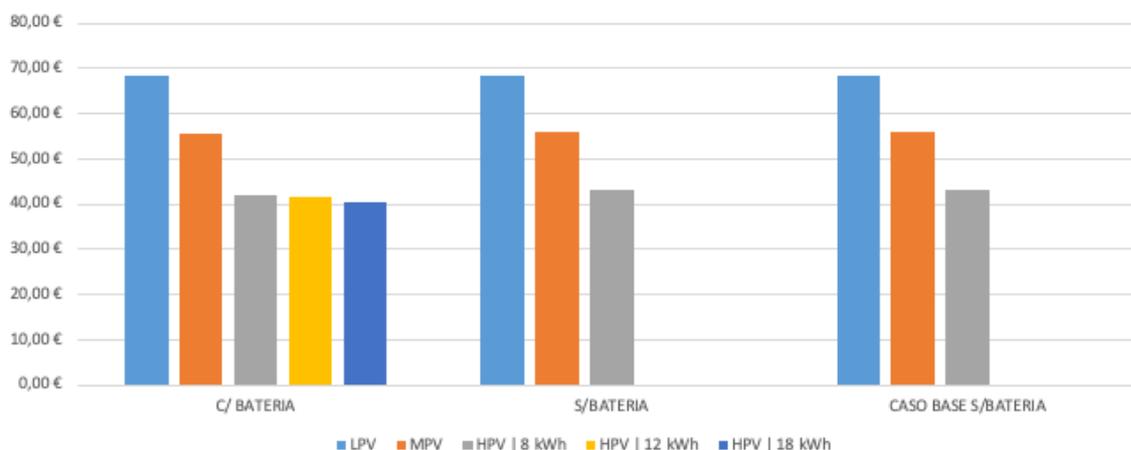


Figura 27: Comparativo preço diário das várias soluções

Pela análise da Tabela 3, é possível observar a poupança anual que é possível e expectável em cada um dos casos em estudo, bem como o retorno do investimento (*ROI – Return Of Investment*) esperado ao utilizar cada uma das opções.

Para a poupança anual foi utilizado o preço das baterias indicado no orçamento recebido, e utilizado um valor representativo de 220 dias onde se assume ser a média de dias com radiação solar suficiente para o caso em estudo.

Tabela 3: Comparativo ROI

	LPV 4 kWh	MPV 6 kWh	HPV 8 kWh	HPV 12 kWh	HPV 18 kWh
Poupança anual	17,16 €	138,82 €	282,98 €	414,65 €	612,26 €
ROI (anos)	65,97	12,23	8,00	8,19	8,32

Uma bateria de lítio que é usualmente utilizada para armazenamento de energia residencial e comercial, apresenta um tempo de vida útil que aguenta vários milhares de ciclos. Apresenta uma degradação gradual ao longo dos anos e mantém a sua capacidade útil entre os 70%-80% após os primeiros 10 anos dependendo das condições de utilização e operação, logo, se for necessário um tempo superior a este para que exista um retorno do investimento da bateria, este deixa de fazer sentido do ponto de vista económico, eliminando assim as baterias de 4 e 6 kWh.

A Tabela 3 apresenta o período de tempo necessário para que o investimento na bateria comece a ser lucrativo. Através da análise, foi constatado que, quando combinada com uma produção fotovoltaica eficiente, a bateria de 18 kWh destaca-se como a opção de melhor custo-benefício para o presente estudo. Com um retorno do investimento (ROI) alcançado após 8,32 anos, a taxa de retorno é cerca de 87,42% mais rápida em comparação

## Autossuficiência energética e gestão da procura numa instituição de ensino superior

com o cenário de baixa produção fotovoltaica (LPV) utilizando uma bateria de 4 kWh, e de 31,95% em relação ao cenário de produção fotovoltaica de média intensidade (MPV) com uma bateria de 6 kWh.

Quando considerada uma produção fotovoltaica igual, a bateria de 18 kWh demonstra um ROI mais lento em aproximadamente 4%, em comparação com a bateria de 8 kWh. No entanto, ao longo do ciclo de vida útil, proporciona um retorno financeiro mais substancial, acumulando um montante adicional de 565,92€ após os 10 anos de utilização. Além disso, ao ser comparada com a bateria de 12 kWh, esta última apresenta um ROI 1,59% mais rápido, porém resulta num retorno financeiro inferior em 278€ após o mesmo período de 10 anos.

A tabela 4, apresenta o resumo dos indicadores energéticos dos três casos estudados de forma a ser mais fácil entender as comparações que foram feitas ao longo da apresentação dos resultados das simulações.

Tabela 4: Comparativo dos indicadores energéticos (kWh)

Caso de Estudo	Energia consumida	Energia produzida	Energia não utilizada	Energia PV utilizada
Caso Base	548,87	358,86	67,19	291,67
Caso S/Bateria	548,87	358,86	67,01	291,85
Caso C/Bateria	548,87	358,86	49,62	309,24

Desta forma, de todos os casos estudados, utilizar uma bateria de 18 kWh será o caso mais rentável e o que merece um estudo mais aprofundado como uma realidade futura de implementação na Escola Agrária de Coimbra, que pode servir de exemplo para que exista mais investigação e investimento na área por parte da ESAC e de outras entidades.



## 6 Conclusão e trabalhos futuros

---

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões retiradas ao longo do estudo e elaboração desta dissertação, bem como apresentação de propostas de trabalhos futuros que podem ser aprofundados e desenvolvidos na sequência do presente trabalho.

### 6.1 Conclusão

Para a elaboração desta dissertação foram estudados e explorados alguns desafios e oportunidades associados à gestão energética na Escola Superior Agrária de Coimbra e foram estabelecidos dois objetivos principais: minimizar a fatura energética da instituição e aumentar a autossuficiência da mesma aproveitando a energia produzida localmente através de painéis fotovoltaicos.

Foi necessário identificar e caracterizar cargas com algum potencial de flexibilidade e realizar o levantamento dos seus consumos e respetivos diagramas de carga. Com base nos dados recolhidos, foi adaptado um modelo de otimização com recurso a programação linear inteira mista que permite reduzir os custos operacionais, minimizando a compra de energia à rede em horários com tarifas mais elevadas e aumentar a utilização *in loco* da energia produzida localmente, respeitando as restrições da potência contratada e as preferências e restrições horárias para o funcionamento das cargas previamente identificadas como controláveis, para que não exista descontentamento por parte do utilizador.

Foi ainda explorada a possibilidade da adoção de tecnologias de armazenamento em forma de baterias e foi conduzida uma análise da viabilidade da aquisição deste tipo de sistemas., sendo que de momento não é uma tecnologia em utilização na ESAC.

O caso base possibilita uma forma de comparação com as soluções apresentadas pela metodologia de otimização e é baseado numa alocação das cargas controláveis ao longo do dia, sem que exista uma correspondência intencional com os períodos de maior produção fotovoltaica ou com os períodos horários com preços de energia mais reduzidos.

Tendo em consideração que a ESAC possui um ciclo BTE tetra-horário, estes preços alternam várias vezes ao dia entre quatro valores diferentes.

O caso otimizado sem o uso de tecnologias de armazenamento demonstra algumas diferenças nos períodos de alocação das cargas comparativamente ao caso base, tendo em atenção os preços de energia e o a potência contratada. Os valores de custo diário não registam grandes diferenças quando comparado ao caso base uma vez que existe produção fotovoltaica suficiente para suprir grande parte do consumo durante o horário de maior peso na carga base mesmo no caso base.

Por sua vez, quando são utilizadas tecnologias de armazenamento de energia, é possível armazenar parte da produção fotovoltaica, que caso contrário não seria utilizada, e fazer a sua descarga em momentos que não exista produção local ou o preço de compra de energia à rede seja mais elevado. Apesar de não existirem grandes diferenças nos períodos de alocação das cargas quando comparado ao caso otimizado sem uso de baterias, o custo diário é significativamente menor quanto maior for a capacidade da bateria.

Embora a capacidade das baterias estudadas não represente uma grande parte quando comparada ao consumo base do edifício estudado, o seu contributo financeiro através da poupança obtida durante o seu ciclo de vida útil de utilização pode ajudar na aquisição de novos equipamentos, e por mais que pareça insignificante é sempre uma contribuição para uma transição energética verde que beneficia todas as partes da equação.

Uma vez que tanto no caso otimizado sem uso de baterias como no caso otimizado com uso destas tecnologias de armazenamento, foram obtidas reduções no custo diário, confirma-se que é possível em conjunto com a alocação ótima das cargas, minimizar a fatura energética da ESAC e maximizar a autossuficiência cumprindo desta forma os objetivos principais propostos para esta dissertação.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Como futuro para o presente trabalho, vê-se a possibilidade de modelar um número superior de cargas, não só do tipo *shiftable* como as que foram estudadas, mas também com características diferentes, nomeadamente cargas termostáticas como as que foram apresentadas, mas que devido à falta de equipamento de atuação e sensorização extra não foi possível o seu estudo e posterior otimização.

Existe também a possibilidade de estudar cargas noutras zonas do campus da ESAC, como por exemplo no hospital veterinário, sendo que o seu estudo, incluindo recolha de

## **Autossuficiência energética e gestão da procura numa instituição de ensino superior**

dados, pode oferecer uma melhor visão sobre os gastos energéticos dessa zona bem como oportunidades de redução dos mesmos.



## Bibliografia

---

- [1] *communication from the commission to the european parliament, the european council, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions repowereu plan*. 2022. acessado: 20 de setembro de 2023. [em linha]. disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/txt/?uri=com%3a2022%3a230%3afin&qid=1653033742483>
- [2] «pniec-2030-plano-nacional-energia-e-clima.pdf». acessado: 12 de setembro de 2023. [em linha]. disponível em: <https://bcsdportugal.org/wp-content/uploads/2020/12/pniec-2030-plano-nacional-energia-e-clima.pdf>
- [3] «20230315memoemissoes2023.pdf». acessado: 13 de novembro de 2023. [em linha]. disponível em: [https://apambiente.pt/sites/default/files/\\_clima/inventarios/20230421/20230315memoemissoes2023.pdf](https://apambiente.pt/sites/default/files/_clima/inventarios/20230421/20230315memoemissoes2023.pdf)
- [4] «pnaee», pnaee. acessado: 16 de dezembro de 2023. [em linha]. disponível em: <https://www.pnaee.pt/pnaee/>
- [5] «pniec: o que é e o que significa para a minha empresa? | edp». acessado: 13 de novembro de 2023. [em linha]. disponível em: <https://www.edp.pt/empresas/empresas-com-energia/pniec-o-que-significa-para-a-minha-empresa/>
- [6] «apren - produção». acessado: 13 de setembro de 2023. [em linha]. disponível em: <https://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/producao>
- [7] «produção de energia elétrica: total e a partir de fontes renováveis». acessado: 13 de setembro de 2023. [em linha]. disponível em: <https://www.pordata.pt/portugal/producao+de+energia+eletrica+total+e+a+partir+de+fontes+renovaveis-1127-9115>
- [8] «diretiva (ue) 2018/ 2001 do parlamento europeu e do conselho - de 11 de dezembro de 2018 - relativa à promoção da utilização de energia de fontes renováveis».
- [9] «iea – international energy agency», iea. acessado: 7 de janeiro de 2024. [em linha]. disponível em: <https://www.iea.org>
- [10] m. rodgers, «pathways to eliminate carbon emissions via renewable energy investments at higher education institutions», *electr. j.*, vol. 34, p. 106952, mar. 2021, doi: 10.1016/j.tej.2021.106952.
- [11] l. li, «green and energy-saving ecological renovation design of buildings based on energy consumption monitoring data», *multiscale multidiscip. model. exp. des.*, pp. 1–15, mar. 2024, doi: 10.1007/s41939-024-00382-x.

- [12] l. pérez-lombard, j. ortiz, e c. pout, «a review on buildings energy consumption information», *energy build.*, vol. 40, n.º 3, pp. 394–398, 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007.
- [13] v. c. p. duarte, «universidade federal de santa catarina centro tecnológico programa de pós-graduação em engenharia civil», 2014.
- [14] r. ribeiro, a. cerqueira, e j. baptista, «voltage profile improvement and losses minimization in radial grids, with optimal location of distributed generation systems», em *2021 international conference on electrical, computer and energy technologies (icecet)*, dez. 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/icecet52533.2021.9698750.
- [15] r. viral e d. k. khatod, «optimal planning of distributed generation systems in distribution system: a review», *renew. sustain. energy rev.*, vol. 16, n.º 7, pp. 5146–5165, set. 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.05.020.
- [16] a. kim, y. sunitiyoso, e l. medal, «understanding facility management decision making for energy efficiency efforts for buildings at a higher education institution», *energy build.*, vol. 199, jun. 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.06.044.
- [17] w. filho *et al.*, «a comparative study of approaches towards energy efficiency and renewable energy use at higher education institutions», *j. clean. prod.*, vol. 237, p. 117728, jul. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117728.
- [18] l. klein, a. alves, m. abreu, e t. feltrin, «lean management and sustainable practices in higher education institutions of brazil and portugal: a cross country perspective», *j. clean. prod.*, vol. 342, p. 130868, fev. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.130868.
- [19] c. w. gellings, *the smart grid: enabling energy efficiency and demand response*. crc press, 2020.
- [20] «demand side management (dsm) | definition, how it works, & benefits». acedido: 26 de setembro de 2023. [em linha]. disponível em: <https://www.carboncollective.co/sustainable-investing/demand-side-management-dsm>
- [21] p. palensky e d. dietrich, «demand side management: demand response, intelligent energy systems, and smart loads», *ieee trans. ind. inform.*, vol. 7, n.º 3, pp. 381–388, ago. 2011, doi: 10.1109/tii.2011.2158841.
- [22] j. a. sa'ed, z. wari, f. abughazaleh, j. dawud, s. favuzza, e g. zizzo, «effect of demand side management on the operation of pv-integrated distribution systems», *appl. sci.*, vol. 10, n.º 21, art. n.º 21, jan. 2020, doi: 10.3390/app10217551.
- [23] j. medina, n. muller, e i. roytelman, «demand response and distribution grid operations: opportunities and challenges», *ieee trans. smart grid*, vol. 1, n.º 2, pp. 193–198, set. 2010, doi: 10.1109/tsg.2010.2050156.
- [24] j. aghaei e m.-i. alizadeh, «demand response in smart electricity grids equipped with

renewable energy sources: a review», *renew. sustain. energy rev.*, vol. 18, pp. 64–72, fev. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.09.019.

[25] e. sarker *et al.*, «progress on the demand side management in smart grid and optimization approaches», *int. j. energy res.*, vol. 45, n.º 1, pp. 36–64, 2021, doi: 10.1002/er.5631.

[26] h. j. jabir, j. teh, d. ishak, e h. abunima, «impacts of demand-side management on electrical power systems: a review», *energies*, vol. 11, n.º 5, art. n.º 5, mai. 2018, doi: 10.3390/en11051050.

[27] a. r. jordehi, «optimisation of demand response in electric power systems, a review», *renew. sustain. energy rev.*, vol. 103, pp. 308–319, abr. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.12.054.

[28] «a survey on demand response programs in smart grids: pricing methods and optimization algorithms | ieee journals & magazine | ieee xplore». acedido: 8 de maio de 2024. [em linha]. disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6861959>

[29] m. beaudin e h. zareipour, «home energy management systems: a review of modelling and complexity», *renew. sustain. energy rev.*, vol. 45, pp. 318–335, mai. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.01.046.

[30] p. s. moura e a. t. de almeida, «multi-objective optimization of a mixed renewable system with demand-side management», *renew. sustain. energy rev.*, vol. 14, n.º 5, pp. 1461–1468, jun. 2010, doi: 10.1016/j.rser.2010.01.004.

[31] z. wang, q. li, h. liang, y. liu, y. li, e t. huang, «requirement assessment of demand-side flexibility for new power systems with high penetration of renewable generation», em *2022 asia power and electrical technology conference (apet)*, nov. 2022, pp. 334–339. doi: 10.1109/apet56294.2022.10073110.

[32] «flexibility solutions to support a decarbonised and secure eu electricity system — european environment agency». acedido: 12 de abril de 2024. [em linha]. disponível em: <https://www.eea.europa.eu/publications/flexibility-solutions-to-support>

[33] c. henggeler antunes, m. j. alves, e i. soares, «a comprehensive and modular set of appliance operation milp models for demand response optimization», *appl. energy*, vol. 320, p. 119142, ago. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119142.

[34] a. bischi *et al.*, «a detailed milp optimization model for combined cooling, heat and power system operation planning», *energy*, vol. 74, pp. 12–26, set. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.02.042.

[35] «npiso050002\_2017.pdf».

[36] «enquadramento». acedido: 13 de setembro de 2023. [em linha]. disponível em: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/eficiencia-energetica/auditorias->

energeticas/enquadramento/

[37] «gee\_2022-23\_05\_auditorias.pdf».

[38] «sobre a esac – esac». acessado: 25 de setembro de 2023. [em linha]. disponível em: <https://www.esac.pt/index.php/a-esac/sobre-a-esac/>

[39] «sustentabilidade – esac». acessado: 25 de setembro de 2023. [em linha]. disponível em: [https://www.esac.pt/index.php/a-esac/po\\_seur/](https://www.esac.pt/index.php/a-esac/po_seur/)

[40] «esac – agrarian school of coimbra – cernas». acessado: 13 de setembro de 2023. [em linha]. disponível em: <https://cernas.org/host-institutions/ipc-polytechnic-institute-of-coimbra/esac/>

[41] «1730 three-phase electrical energy loggers - fluke | mouser». acessado: 15 de outubro de 2023. [em linha]. disponível em: <https://www.mouser.fr/new/fluke/fluke-1730-three-phase-electrical-energy-logger/>

[42] «lascar electronics». acessado: 16 de outubro de 2023. [em linha]. disponível em: <https://www.lascarelectronics.com/>

[43] «agregados privados com os principais equipamentos domésticos (%)». acessado: 27 de outubro de 2023. [em linha]. disponível em: [https://www.pordata.pt/portugal/agregados+privados+com+os+principais+equipamentos+domesticos+\(percentagem\)++-191-558](https://www.pordata.pt/portugal/agregados+privados+com+os+principais+equipamentos+domesticos+(percentagem)++-191-558)

[44] «o que é um estufa de esterilização secagem? guia de compras». acessado: 2 de novembro de 2023. [em linha]. disponível em: <https://www.splabor.com.br/blog/estufa-de-esterilizacao-e-secagem/o-que-e-um-estufa-de-esterilizacao-e-secagem-como-ela-funciona/>

[45] a. malafaia, «autoclave: o que é, tipos, como funciona e onde comprar». acessado: 2 de novembro de 2023. [em linha]. disponível em: <https://www.mobiloc.com.br/blog/autoclave-o-que-e/>

## Anexos

---

**MC** **Mauro Costa** 17 de abril de 2024 às 16:08  
Orçamento Bateria Lítio  
Para: rui@bribeiro@gmail.com

Boa tarde Rui,

Como pretendido, o valor orçamentado para uma bateria de lítio da marca Pylontech fica em 230€/kWh + IVA.

Os melhores cumprimentos,

**Mauro Costa**  
R&D | Innovation Manager  
(+351) 910 986 813

**dstsolar**



[LinkedIn](#) — [Instagram](#) — [Facebook](#) — [YouTube](#) — [Website](#)  
DST Solar, S.A — Alvará de Construção n.º 68450 - PUB  
[Política de Privacidade e Tratamento de Dados Pessoais](#)