



Eduardo Lourenço Gamas

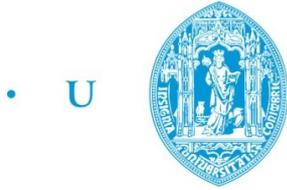
Modelação de Sistemas de Energia Renovável em Edifícios

Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica
na Especialidade de Energia e Ambiente

setembro 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA
DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Modelação de Sistemas de Energia Renovável em Edifícios

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na
Especialidade de Energia e Ambiente

Modeling of Renewable Energy Systems in Buildings

Autor:

Eduardo Lourenço Gamas

Orientadores:

Adélio R. M. Gaspar (Prof. Auxiliar, DEM, FCTUC)

Eugénio M. S. Rodrigues (Investigador, ADAI-LAETA, FCTUC)

Júri:

Presidente **Doutor José Joaquim da Costa**
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais **Doutor Álvaro Filipe Peixoto Cardoso de Oliveira Gomes**
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Doutor Eugénio Miguel de Sousa Rodrigues
Investigador da Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial

Coimbra, setembro 2017



Este trabalho tem o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) via COMPETE - Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI), no âmbito do projeto Ren4EEnIEQ (PTDC/EMS-ENE/3238/2014 e POCI-01-0145-FEDER-016760, respetivamente).

"It is during our darkest moments that we must focus to see the light."

Aristóteles

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer ao Professor Doutor Adélio Gaspar, Doutor Eugénio Rodrigues e Doutor Marco Fernandes por todo o apoio e disponibilidade ao longo destes últimos 7 meses. Foram três pessoas fundamentais para o sucesso desta dissertação, expressando sempre os seus conselhos, opiniões, analisando as minhas dúvidas e dando toda a ajuda necessária, sempre com boa disposição e proximidade.

Da mesma forma, quero agradecer ao André Bernardo por toda a ajuda e companheirismo manifestado ao longo deste trabalho.

Quero também agradecer ao meu grupo de amigos que ao longo destes 5 anos me proporcionaram momentos únicos e que para sempre irei recordar.

Por fim, mas com igual importância, quero agradecer à minha família, em especial à minha Mãe, ao meu Pai, ao meu Irmão e à Carolina por estarem sempre ao meu lado em todos os momentos deste percurso, apoiando todas as minhas decisões e dando sempre a força necessária à continuação desta caminhada. Sem eles não seria possível acabá-la com sucesso pelo que lhes ficarei eternamente grato.

Resumo

Numa altura em que a introdução de energia renovável em edifícios se torna cada vez mais importante devido às metas Europeias, no âmbito do programa Europa 2020, é necessário conseguir selecionar os equipamentos de produção de energia que consigam fazer o melhor aproveitamento dos recursos naturais, altamente disponíveis em Portugal, com a maior eficiência possível.

Neste contexto, foram implementados modelos de sistemas de produção de energia através de painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas, no algoritmo de uma ferramenta computacional, que permite avaliar, simular e otimizar o desempenho térmico, energético e o conforto visual de edifícios gerados por essa ferramenta.

Esta implementação conteve as fases de modelação dos sistemas no *software Energy-Plus*, seguida da criação dos objetos do sistema numa base de dados e a implementação dos sistemas no algoritmo. Por fim, foram realizados casos de estudo que permitiram chegar à conclusão sobre quais os melhores sistemas a implementar para cada uma das cinco localizações estudadas em Portugal.

O objetivo principal deste desenvolvimento será conseguir modelar as melhores soluções de microgeração de energia, prevendo os consumos energéticos de cada edifício e evitando o sobre-dimensionamento e consequente injeção de energia na rede.

Foi possível perceber que, com os preços praticados atualmente, um sistema de produção deste tipo não tem o benefício expectável comparando com o elevado investimento no sistema mas, prevendo uma diminuição dos preços dos equipamentos ao longo dos anos e um aumento do preço de venda da energia, o investimento num sistema deste tipo tornar-se-á mais vantajoso.

Palavras-chave: Energia renovável, Eficiência energética, Desempenho térmico e energético, *EnergyPlus*, Painéis fotovoltaicos, Turbina eólica, Microgeração.

Abstract

As renewable energy in buildings is gaining more importance nowadays due to European targets under Europe 2020 program, it is necessary to be capable of selecting energy production equipments that can make a better use of natural resources, highly available in Portugal, with the best efficiency possible.

In this context, models of photovoltaic and wind turbine energy production systems were implemented in an algorithm of a computational tool that access, evaluate and optimize thermal and energetic performance and also visual comfort of the buildings generated by that tool.

This implementation contained the stages of system modeling in *EnergyPlus* software followed by the creation of a database with the objects needed in the system and the implement of the systems in the algorithm. Finally, case studies were conducted in order to conclude which are the ideal systems to select in each of the five studied locations in Portugal.

The main objective of this development will be the ability to model the best micro-generation energy solutions, predicting energetic consumptions of each building and avoid over-dimensioning and consequent energy waste.

It was possible to realize that energy production systems equal to the ones tested don't have the expected revenue when comparing with the high investment, considering today's prices but, predicting a decrease in the cost of equipments during the years and an increase in the price of energy sold, an investment in these types of systems will become more profitable.

Keywords: Renewable energy, Energy efficiency, Thermal and energetic performance, *EnergyPlus*, Photovoltaic panels, Wind turbine, Microgeneration.

Conteúdo

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas	xiv
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Estado da Arte	1
1.2.1 Eficiência Energética	1
1.2.2 <i>Nearly Zero Energy Buildings</i>	4
1.2.3 Avaliação do Desempenho de Edifícios	5
1.3 Motivação	7
1.4 Objetivo	8
1.5 Estrutura da Dissertação	9
2 Procedimento	11
2.1 EPSAP, BPS e FPOP	13
2.2 Simulação Energética de Edifícios	15
2.3 Sistema de Produção de Energia	16
2.3.1 Painéis Fotovoltaicos	16
2.3.2 Geradores	17

2.3.3	Inversor	17
2.3.4	Armazenamento e Conversor	18
2.3.5	Transformador	19
2.3.6	Distribuição	20
2.4	Base de Dados	21
2.5	Programação	21
3	Casos de Estudo	25
3.1	Localização	25
3.2	Edifício	28
3.3	Climatização	31
3.4	Equipamentos e Ocupação	32
3.5	Sistema de Produção de Energia	33
4	Resultados e Discussão	37
4.1	Produção de Energia	37
4.2	Simulações com Aquecimento Ambiente	38
4.3	Simulações com Aquecimento e Arrefecimento Ambiente	41
4.4	Análise Económica	42
5	Conclusão	51
	Referências Bibliográficas	53
A	Análise económica	57

Lista de Figuras

1.1 Custos de decisão e os seus impactos no desempenho do edifício ao longo da sua vida útil [Fonte: Al-Homoud (2001)].	6
1.2 Disponibilidade solar na Europa [Fonte: GeoModel Solar].	7
2.1 Esquema de ligação dos algoritmos do SAPTool.	12
2.2 Esquema dos objetos necessários à produção de energia.	13
2.3 Fluxograma do <i>EPSAP</i> e do <i>FPOP</i> [Fonte: Rodrigues et al. (2013b, 2014)].	15
2.4 Esquema de ligação entre os componentes do <i>Electric Load Center</i> [Fonte: Berkeley Lab (2016b)].	18
2.5 Ligação entre a rede elétrica e o <i>Electric Load Center</i> [Fonte: Berkeley Lab (2016b)].	20
2.6 Exemplo da programação do objeto <i>GeneratorWindTurbine</i>	23
2.7 Programação necessária para criação do ficheiro IDF.	24
3.1 Zonas climáticas de inverno e verão em Portugal continental [Fonte: Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013].	26
3.2 Soluções construtivas.	30
3.3 "Melhor" edifício gerado pelo <i>EPSAP</i>	31
3.4 "2º melhor" edifício gerado pelo <i>EPSAP</i>	31
3.5 Esquema de ligação do sistema de produção de energia.	35
3.6 Edifício com os painéis fotovoltaicos.	35

4.1	Produção de energia solar mensal.	38
4.2	Produção de energia eólica mensal.	38
4.3	Retorno do investimento inicial - aquecimento e arrefecimento ambiente. .	47
4.4	Relação entre investimento e retorno.	47

Lista de Tabelas

3.1	Municípios de acordo com a NUTS III.	25
3.2	Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência de elementos opacos e de vãos envidraçados, U_{ref} [W/m ² .°C] [Fonte: Portaria n.º 379-A/2015].	27
3.3	Fatores solares máximos admissíveis de vãos envidraçados, $g_{T_{max}}$ [Fonte: Portaria n.º 379-A/2015].	27
3.4	Zonas climáticas, U_{ref} e $g_{T_{max}}$	28
3.5	Soluções construtivas - Parede exterior.	29
3.6	Soluções construtivas - Pavimento Sobre o Terreno.	29
3.7	Soluções construtivas - Cobertura Sobre o Exterior.	29
3.8	Perfis de uso e ocupação.	32
3.9	Potência do ar condicionado para as diferentes localizações determinada através de <i>autosize</i>	33
3.10	Características dos equipamentos.	33
3.11	Posicionamento geográfico e inclinação ótima de cada painel.	34
4.1	Relação entre a energia comprada e vendida em Bragança, para o caso de aquecimento ambiente.	39
4.2	Relação entre a energia comprada e vendida em Faro, Funchal, Lajes e Lisboa, para o caso de aquecimento ambiente.	40

4.3	Relação entre a energia comprada e vendida para as cinco localizações, para o caso de climatização com aquecimento e arrefecimento ambiente. . .	41
4.4	Preços e vida útil dos equipamentos.	43
4.5	Custo de investimento dos equipamentos.	43
4.6	Energia produzida anualmente [kWh].	44
4.7	Poupança a 25 anos [€] - Aquecimento ambiente.	46
4.8	Poupança a 25 anos [€] - Aquecimento e arrefecimento ambiente.	46
4.9	Poupança a 25 anos [€] - Aquecimento ambiente.	49
4.10	Poupança a 25 anos [€] - Aquecimento e arrefecimento ambiente.	49
4.11	Comparação entre a energia vendida - exercício com veículo elétrico. . . .	50
A.1	Previsão dos preços de compra e venda da energia.	57
A.2	Valores de amortização do investimento.	58

Simbologia

U	<i>Coefficiente global de transmissão de calor</i>	[W/m ² .°C]
$g_{T_{max}}$	<i>Fator solar máximo admissível de vãos envidraçados</i>	ad.
e	<i>Espessura</i>	[m]
ρ	<i>Massa volúmica</i>	[kg/m ³]
λ	<i>Condutividade térmica</i>	[W/m.°C]
C_p	<i>Calor específico</i>	[J/kg.°C]
R_i	<i>Resistência interna</i>	[m ² .°C/W]
M	<i>Massa superficial</i>	[kg/m ²]
C	<i>Comprimento</i>	[m]
L	<i>Largura</i>	[m]
H	<i>Altura</i>	[m]
D	<i>Diâmetro</i>	[m]
N	<i>Número de pás</i>	un.

Siglas

<i>AC</i>	<i>Alternating Current</i>
<i>ASHRAE</i>	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
<i>AVAC</i>	<i>Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado</i>
<i>BPS</i>	<i>Building Performance Simulation</i>
<i>COP</i>	<i>Coefficient of Performance</i>
<i>DC</i>	<i>Direct Current</i>
<i>EER</i>	<i>Energy Efficiency Ratio</i>
<i>EIFS</i>	<i>Exterior Insulation and Finishing System</i>
<i>ELC</i>	<i>Electric Load Center</i>
<i>EPBD</i>	<i>Energy Performance of Buildings Directive</i>
<i>EPS</i>	<i>Expanded PolyStyrene</i>
<i>EPSAP</i>	<i>Evolutionary Program for the Space Allocation Problem</i>
<i>ETICS</i>	<i>External Thermal Insulation Composite Systems</i>
<i>FER</i>	<i>Fontes de Energia Renovável</i>
<i>FPOP</i>	<i>Floor plan Performance Optimization Program</i>
<i>GEE</i>	<i>Gases com Efeito de Estufa</i>
<i>GUI</i>	<i>Graphical User Interface</i>
<i>IDF</i>	<i>Input Data File</i>
<i>IEA</i>	<i>International Energy Agency</i>
<i>LNEG</i>	<i>Laboratório Nacional de Energia e Geologia</i>
<i>LSP</i>	<i>Layout Specification Program</i>
<i>NUTS</i>	<i>Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos</i>
<i>nZEB</i>	<i>Nearly Zero Energy Buildings</i>
<i>PNAER</i>	<i>Plano Nacional de Acção para as Energias Renováveis</i>
<i>SAP</i>	<i>Space Allocation Problem</i>
<i>SCE</i>	<i>Sistema de Certificação Energética dos Edifícios</i>
<i>UE</i>	<i>União Europeia</i>

1. Introdução

1.1 Enquadramento

Nos dias que correm e na sociedade em que nos inserimos, as necessidades de consumo de energia são cada vez maiores mas, ao mesmo tempo, somos levados a utilizar essa energia de forma mais eficiente, sem que isso prejudique o nosso conforto. Foram definidas metas pela UE para redução dos consumos energéticos e o aumento da eficiência energética em 20% até 2020 no âmbito do programa Europa 2020 para um crescimento inteligente e sustentável, de acordo com o Eurostat (Statistical Office of the European Communities 2016). Para tal, os equipamentos e os sistemas vão sendo otimizados, mas isso só não é suficiente. Neste contexto, as dificuldades do projetista em desenhar *a priori* um edifício que seja energeticamente eficiente, incentiva ao desenvolvimento de ferramentas de apoio à decisão.

1.2 Estado da Arte

1.2.1 Eficiência Energética

O termo eficiência energética surge com várias definições na literatura. Patterson (1996) refere eficiência energética como sendo o uso de uma menor quantidade de energia para produzir o mesmo serviço ou resultado. Da mesma forma, a IEA (Internacional Energy Agency 2016b) define que é o aumento na quantidade de serviços produzidos a partir da mesma quantidade de energia, dizendo que é essencial para transitar para um sistema energético seguro e sustentável que gera prosperidade para o futuro. De um modo geral pode-se afirmar que eficiência energética é a utilização de energia de uma forma racional sem que prejudique as nossas necessidades e o bem estar.

Há várias razões pelas quais a eficiência energética tem sido muito abordada nos

últimos anos destacando-se, principalmente, a redução do desperdício de energia, a redução das emissões de gases com efeito de estufa (GEE), a redução do consumo de combustíveis de origem fóssil e também a promoção da segurança no abastecimento energético.

Relacionado com a eficiência energética, há um efeito negativo denominado *"rebound effect"*. O *"rebound effect"* consiste no efeito que a redução dos custos de energia, devido ao aumento da eficiência energética através do progresso tecnológico, tem no comportamento das pessoas e também nas políticas energéticas dos países (Fronzel 2004). Os efeitos do *"rebound effect"* podem ser divididos em três categorias: efeitos diretos, relacionados com o facto da melhoria da eficiência energética de um determinado produto ou serviço ir diminuir o preço desse produto ou serviço, incorrendo, assim, num aumento do consumo desse produto ou serviço; efeitos indiretos, relacionados com a diminuição do preço da energia que vai, assim, gerar maior disponibilidade financeira havendo desta forma gastos noutros bens, serviços e produtos que também requerem energia; efeitos económicos devidos à diminuição do preço real da energia dando origem a alterações na procura de bens, produtos e serviços levando, posteriormente, a uma série de ajustes de preços e quantidade desses bens, produtos e serviços, com os sectores com mais intensidade energética a terem maior procura relativamente aos que têm menos requisitos energéticos (Greening et al. 2000, Dimitropoulos & Sorrell 2006).

Segundo os dados do Eurostat (Bertoldi et al. 2016) o consumo energético dos edifícios na UE representa cerca de 40%, sendo que em Portugal, os dados mais recentes da IEA (Internacional Energy Agency 2016a) apontam para 17% para consumo doméstico e 12% para os serviços, perfazendo um total de 29% no consumo energético dos edifícios.

Numa tentativa de mudar o comportamento das pessoas, foram implementadas medidas pela UE para diminuir os consumos energéticos e as emissões de GEE, e para fazer a injeção de mais energia na rede, aumentando o número de fontes de energia de origem renovável (FER). Assim, segundo a reformulação da Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos

edifícios, foram estabelecidas várias metas a cumprir até ao ano 2020 que, variando de país para país, podem ser mais ambiciosas que as impostas pela UE. As metas promovidas pela UE são as seguintes: redução em 20% das emissões de GEE, relativamente aos níveis de 1990, aumento da quota de energia proveniente de FER em 20% e redução do consumo de energia em 20%.

Em Portugal, as medidas são mais ambiciosas, sendo que a redução de energia primária deve ser da ordem dos 25% e no caso do Estado essa redução deve ser de 30%. No que concerne às FER deve verificar-se a incorporação de 35% no consumo final bruto de energia. O PNAER 2020 prevê que haja uma redução de 18% na capacidade instalada de tecnologias baseadas em FER face ao PNAER 2010, mas apesar disso a quota de eletricidade de base renovável é de 60%, de acordo com a Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013.

A situação atual da UE encontra-se favorável, sendo que em 2014 as emissões de GEE diminuíram 23% em comparação aos níveis de 1990, sendo assim expectável que esta meta seja atingida. Da mesma forma, a energia proveniente de FER foi de 16% em 2014, sendo um valor promissor, segundo os dados do Eurostat (Statistical Office of the European Communities 2016).

Em Portugal as metas parecem ser atingíveis, sendo que à data da publicação da Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013, 45% da eletricidade produzida em Portugal é baseada na utilização de FER e 25% do consumo de energia final é satisfeito com recurso a energias renováveis.

Para alcançar estas metas foram ou estão a ser desenvolvidas ferramentas, medidas e conceitos, como por exemplo as *Smart Grids* (rede elétrica que também usa tecnologias de comunicação bi-direcionais, sistemas de controlo e processamento computacional (Soares et al. 2017)), os nZEB, abordados na secção seguinte e o Sistema de Certificação Energética dos edifícios.

O SCE é um instrumento nacional de política energética. Foi primeiramente intro-

duzido em 2002 na Diretiva nº 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro, relativa ao desempenho energético dos edifícios (EPBD), que define que todos os Estados-Membros implementem um sistema de certificação energética nos edifícios e revista em 2010 (Diretiva nº 2010/31/CE), onde foram estabelecidos os requisitos mínimos do desempenho energético, entre outros.

É obrigatória a realização de certificação energética em todos os edifícios novos, edifícios existentes sujeitos a grandes intervenções de reabilitação cujo custo da obra seja superior a 25% do valor do edifício, edifícios existentes que sejam alvos de contratos de venda ou arrendamento e edifícios de comércio e serviços, em função da sua área de pavimento e sector de atividade, de forma a cumprir os requisitos mínimos do desempenho energético.

No certificado energético são indicadas potenciais medidas que podem conduzir a uma melhoria no desempenho energético e conforto, relativamente aos edifícios existentes, de acordo com a Resolução do Conselho de Ministros nº 20/2013.

1.2.2 *Nearly Zero Energy Buildings*

Near Zero Energy Buildings (nZEB) são edifícios que combinam as soluções mais eficientes de acordo com uma perspectiva de custo ótimo e ao mesmo tempo têm implementados sistemas de energia renovável que podem satisfazer uma fração significativa das necessidades energéticas do edifício (Fallis 2013).

Sempre que possível, a energia é produzida no edifício ou em parcela do terreno onde está inserido, de acordo com o Decreto-Lei nº 118/2013 de 20 de Agosto do Ministério da Economia e do Emprego.

O objetivo dos nZEB é atingir um balanço entre a energia consumida e a produzida próximo de zero. Para atingir esse objetivo, há várias estratégias a adotar no projeto destes edifícios: o uso de sistemas eficientes de aquecimento e arrefecimento, sistemas eficientes de iluminação, fachadas opacas eficientes, do lado do uso de energia e sistemas de

energias renováveis e sistemas inteligentes de gestão de energia, do lado do fornecimento de energia (Soares et al. 2017).

Uma vez que o conceito de nZEB é ambíguo e relativamente recente, não é possível definir bem este tipo de edifícios e saber a quantidade existente, sendo que edifícios com classe energética A+ aproximam-se da definição de nZEB (Fallis 2013).

A reformulação da Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios define que até ao final de 2018, todos os edifícios novos pertencentes a entidades públicas têm de ser nZEB e que até ao final de 2020, todos os restantes edifícios novos têm também de pertencer a esta categoria.

1.2.3 Avaliação do Desempenho de Edifícios

A simulação dinâmica é uma das formas de avaliar o desempenho térmico e energético de um edifício através do cálculo das cargas térmicas e dos consumos energéticos dos equipamentos do edifício. São usadas as informações climáticas do local do edifício e de acordo com as soluções construtivas, o perfil de ocupação e uso de equipamentos é possível efetuar os cálculos.

Fazer uma avaliação do desempenho dos edifícios possui várias vantagens das quais se destacam (Al-Homoud 2001):

- Os edifícios têm uma vida útil muito grande pelo que as decisões feitas acerca da *design* e seleção de materiais vão durar muito tempo;
- As decisões feitas na fase inicial do projeto são as mais eficazes. Os custos de alterações para melhorar o desempenho térmico do edifício são cada vez maiores à medida que vão ser feitas em fases mais avançadas da vida do edifício podendo não ser eficazes. A Figura 1.1 representa a evolução dos custos das alterações/eficácia das alterações em função do tempo de vida do edifício. Como se pode observar, o custo das modificações é baixo e a eficácia destas é elevada na fase do desenho

do edifício, sendo que, à medida que se avança para as próximas fases de projeto, construção e posterior manutenção, o custo das modificações vai aumentar e a sua eficácia diminuir, ambas exponencialmente;

- Muitos edifícios não podem funcionar sem sistemas de AVAC para promover as condições de qualidade do ar interior necessárias pelo que uma avaliação das necessidades energéticas para o seu funcionamento é necessária;
- O preço da energia não é estável pelo que uma devida análise, modelação e projeto do edifício e dos sistemas facilita o retorno dos investimentos iniciais.

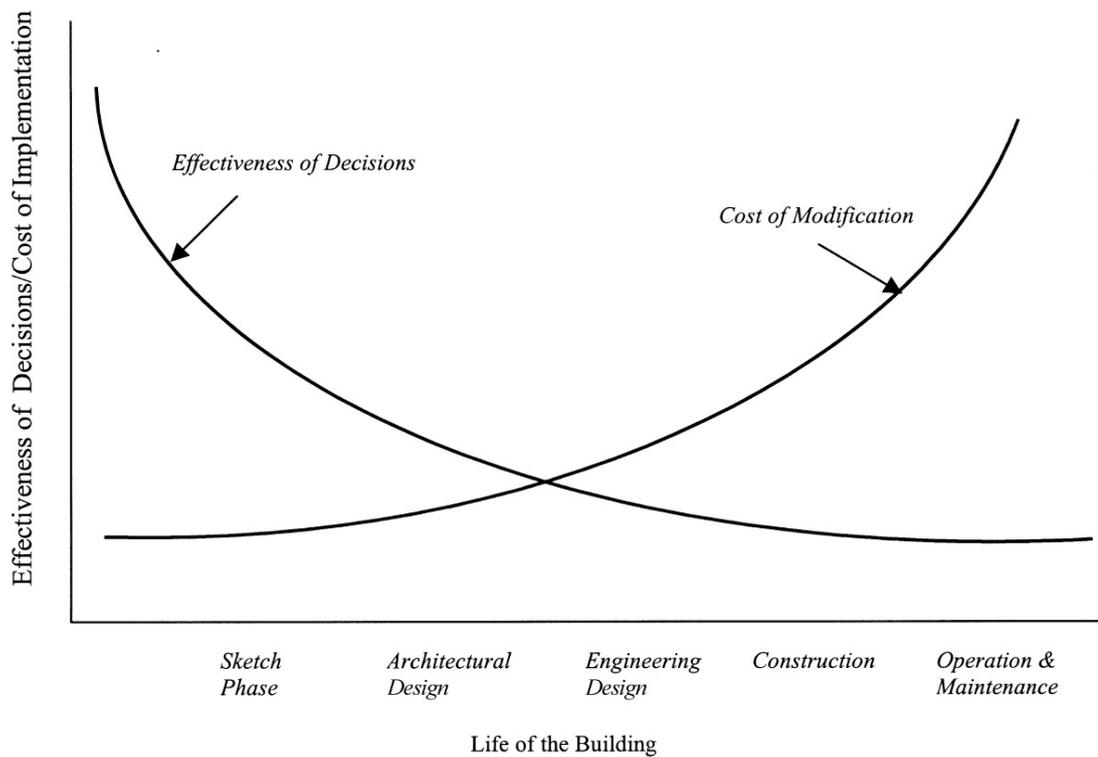


Figura 1.1: Custos de decisão e os seus impactos no desempenho do edifício ao longo da sua vida útil [Fonte: Al-Homoud (2001)].

1.3 Motivação

O aproveitamento dos recursos naturais renováveis e a sua transformação para o nosso proveito, nomeadamente a transformação e produção de energia através do sol e do vento, é um importante passo não só para reduzir a energia comprada à rede e respectiva fatura energética mas também para promover a segurança no abastecimento de energia e, a longo prazo, um futuro sustentável. Sendo Portugal um dos países da Europa com maior disponibilidade solar, como ilustra a Figura 1.2, o uso de energias renováveis, principalmente energia solar, está fortemente em expansão verificando-se cada vez mais habitações com sistemas solares térmicos e/ou sistemas fotovoltaicos.

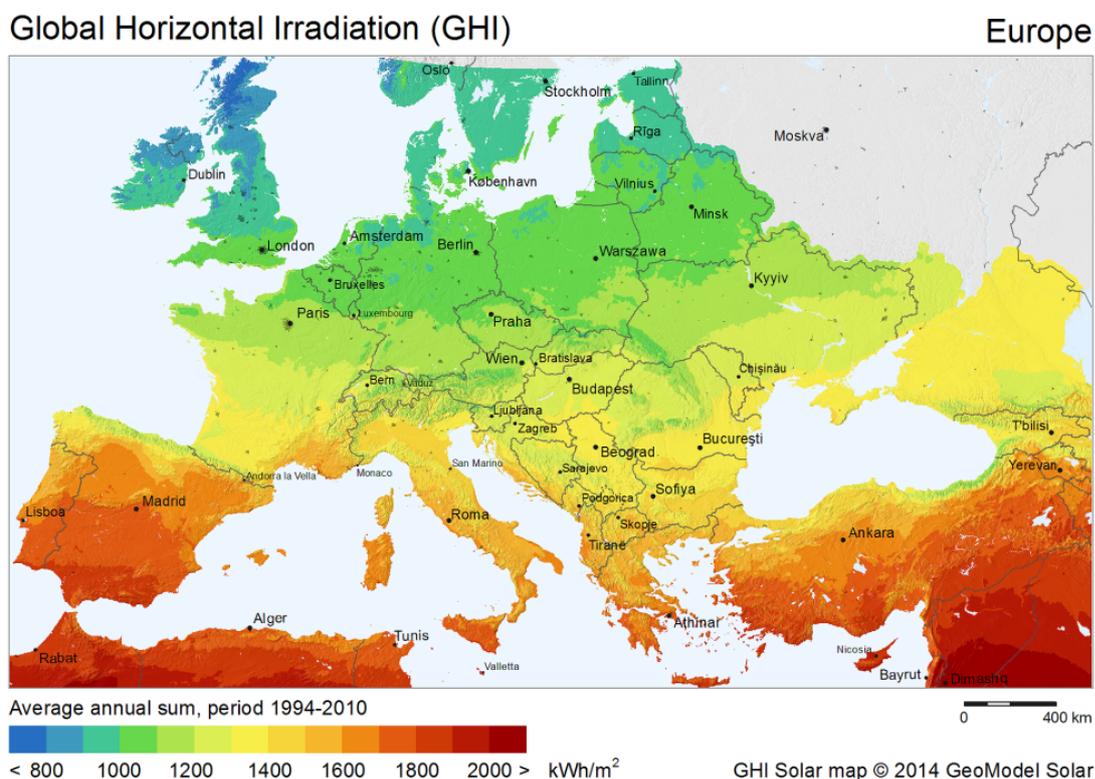


Figura 1.2: Disponibilidade solar na Europa [Fonte: GeoModel Solar].

Os sistemas de produção de energia através de sistemas fotovoltaicos e/ou híbridos, com recurso a uma turbina eólica, podem ter duas vertentes: microgeração ou auto-

consumo. Com a microgeração, a energia produzida é injetada na rede elétrica, sendo vendida e recebendo o produtor uma determinada verba segundo o contratado. O sistema de autoconsumo parte de uma filosofia diferente pois a energia produzida vai servir para ser consumida *in loco*, sendo o remanescente injetado na rede elétrica, normalmente sem verbas associadas para o produtor.

É necessário fazer uma previsão dos consumos energéticos e modelar soluções alternativas de produção de energia para fazer um maior aproveitamento da energia produzida e evitar sobre-dimensionamento.

1.4 Objetivo

O objetivo da presente dissertação consiste em modelar um sistema de produção de energia e implementá-lo na ferramenta SAPTool. O SAPTool consiste numa combinação de algoritmos que fazem a geração de plantas de arquitetura, avaliam o desempenho térmico e energético do edifício e otimizam a planta de modo a que o edifício melhore o seu desempenho.

As três fases de implementação do sistema são:

- Criar modelos de sistemas de produção para um edifício tipo em *EnergyPlus*,
- Desenvolver e implementar os modelos,
- Fazer a análise dos resultados obtidos para validação dos modelos.

A fase de criação de modelos do sistema em *EnergyPlus* consiste em criar um sistema de raiz num edifício tipo que faça a captação da energia através de fontes renováveis e a converta para energia elétrica, com todos os equipamentos necessários a esse processo. É necessário especificar dimensões, número de equipamentos, características técnicas e tipos de funcionamento.

O desenvolvimento dos modelos consiste em adaptar a base de dados existente e in-

cluído para cada componente do sistema uma tabela com dados tipificados de várias marcas com as suas características técnicas, bem como o preço unitário. Esta informação facilitará o utilizador ao escolher o sistema na fase de definição de requisitos. A implementação dos modelos consiste em programar a ferramenta de modo a que adicione o sistema de produção de energia aquando da simulação dinâmica e faça os cálculos correspondentes, fazendo a integração permanente entre o SAPTool e o *EnergyPlus*.

A última fase, de análise dos resultados obtidos para validar os modelos, é realizada através de casos de estudo, com uma tipologia de edifício base para diferentes situações e localizações.

1.5 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, sendo o primeiro esta introdução e uma breve abordagem ao estado da arte com foco em três temas: Eficiência Energética, *Nearly Zero Energy Buildings* e Avaliação do Desempenho de Edifícios.

O segundo capítulo fala do procedimento usado no decorrer do trabalho. Dentro do procedimento fala-se sobre os diferentes algoritmos, o sistema modelado e sobre como foi feita a implementação dos sistemas no programa.

No terceiro capítulo estão apresentados os casos de estudo, com todos os detalhes necessários para os realizar. Nestes, o edifício pode apresentar um sistema de climatização apenas com aquecimento ou também com arrefecimento e um sistema de produção de energia que pode ser solar, eólico ou híbrido.

No quarto capítulo é feita uma análise e discussão dos resultados atingidos, averiguando a produção de energia anual tendo em conta as perdas de eficiência dos equipamentos e avaliando de um ponto de vista económico as soluções mais rentáveis.

No quinto e último capítulo apresentam-se as conclusões e são listadas propostas para trabalhos futuros.

2. Procedimento

O Problema de Alocação de Espaço em arquitetura consiste em determinar a posição e o tamanho das diferentes divisões e aberturas de acordo com o pretendido pelo utilizador (Rodrigues et al. 2013b). Assim, foi desenvolvido o SAPTool, uma ferramenta de apoio à decisão que está em ligação com dois motores de simulação. O primeiro faz análise térmica do edifício (*EnergyPlus*) e o segundo a análise de iluminação e conforto visual (*Radiance*).

O SAPTool encontra-se estruturado da seguinte forma:

- Definição das especificações de construção, sistema de climatização, sistema de produção de energia e localização, pretendidas pelo utilizador - LSP;
- Geração das plantas de arquitetura mediante os requisitos acima referidos - EP-SAP;
- Transposição das especificações do edifício para o software *EnergyPlus* - IDFParse;
- Transposição das especificações do edifício para o software *Radiance* - RADParse;
- Simulação dinâmica do edifício - BPS;
- Otimização das plantas e sistemas de acordo com vários parâmetros definidos pelo utilizador - FPOP.
- Visualização das plantas e dos vários relatórios e gráficos correspondentes à simulação dinâmica - GUI;

Uma descrição mais aprofundada pode ser observada na Figura 2.1.

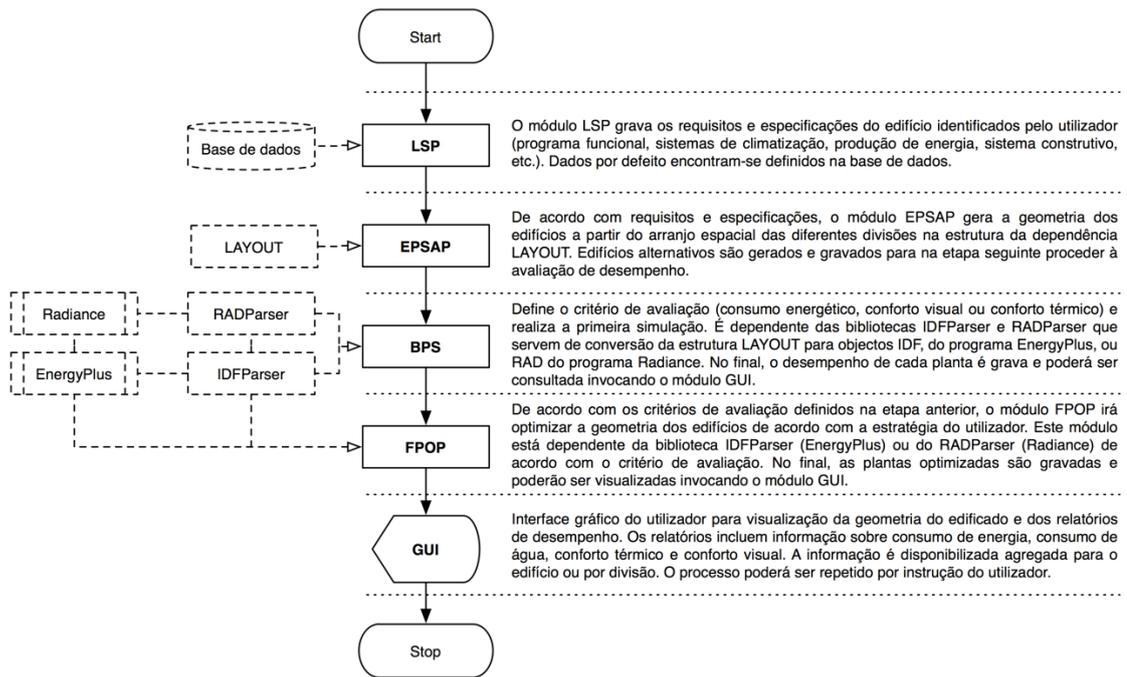


Figura 2.1: Esquema de ligação dos algoritmos do SAPTool.

Em primeiro lugar corre-se o LSP para guardar as especificações do edifício, em seguida corre-se o EPSAP para ser gerada a planta e por fim, caso não seja feita uma otimização do edifício, corre-se o BPS para avaliar o desempenho deste. O IDFParser e o RADParser são bibliotecas das quais o BPS e o FPOP estão dependentes para converter os dados na informação dos motores de simulação. Para se inserir os sistemas em estudo no algoritmo tiveram de ser modelados através de dois casos de estudo fornecidos. Estes sistemas consistem num sistema fotovoltaico apoiado por uma turbina eólica e serão simulados em *EnergyPlus*. Para a sua modelação é necessário, como esquematizado na Figura 2.2, vários campos do *EnergyPlus*. Consultando o *Input Output Reference* (Berkeley Lab 2016b) é possível perceber melhor cada objeto.

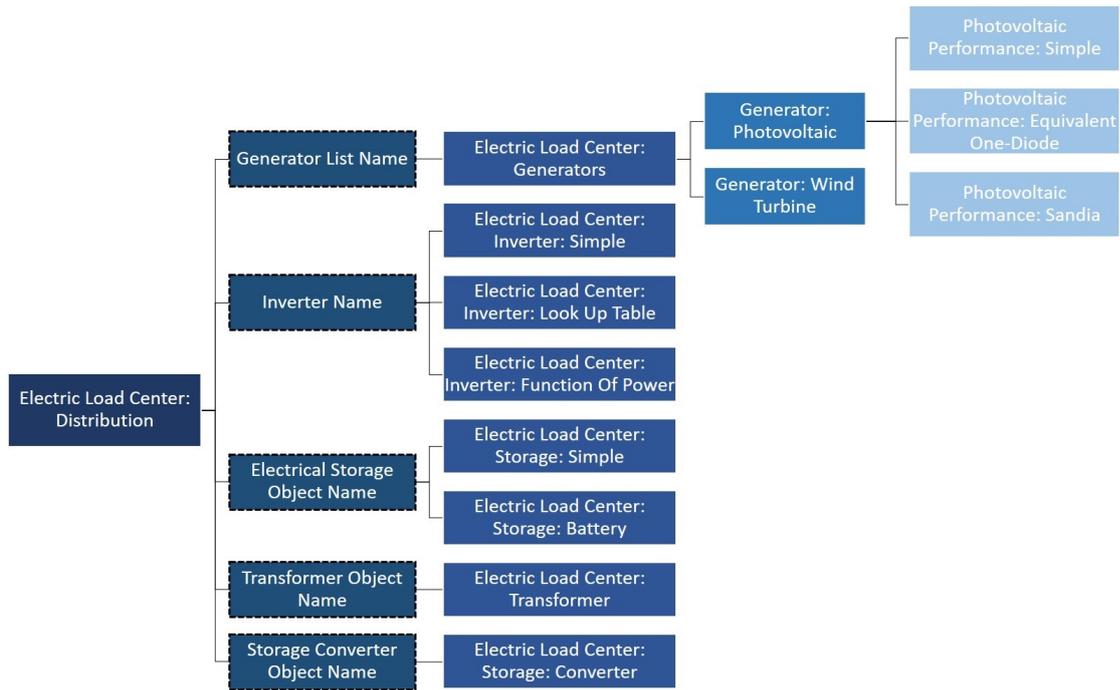


Figura 2.2: Esquema dos objetos necessários à produção de energia.

2.1 EPSAP, BPS e FPOP

Como descrito em Rodrigues et al. (2013b), o EPSAP usa uma combinação de duas estratégias (*Evolutionary Strategy* (ES) e *Stochastic Hill Climbing* (SHC)) que combinam características de busca globais e locais para fazer a geração automática de plantas de arquitetura e sua transformação até gerar a planta final. O objetivo desta ferramenta é ajudar o arquiteto, numa fase inicial de projeto, a gerar um conjunto de plantas de arquitetura diferentes e diversificadas mas de acordo com determinadas especificações base.

Durante a geração das plantas, estas têm de cumprir certos requisitos de tipologia, como a adjacência dos espaços, a sua conectividade e orientação das aberturas exteriores e requisitos geométricos, para não sobrepor espaços, aberturas e edifícios adjacentes e

para definir corretamente as dimensões dos espaços. Para tal, uma função custo que agrega 17 funções objetivo serão usadas para minimizar as penalizações por não cumprir os critérios definidos pelo utilizador.

Na Figura 2.3 (a) encontra-se esquematizado o modo de funcionamento do EPSAP.

Também é possível gerar edifícios multi-piso em que o algoritmo cria a abertura de escadas, com vários tipos de configuração, e elevadores consoante o pretendido pelo utilizador (Rodrigues et al. 2013a).

O BPS permite a interação entre as plantas geradas pelo EPSAP, o *EnergyPlus* e o *Radiance*, realizando a simulação dinâmica e a análise de iluminação e do conforto visual do edifício de acordo com os critérios definidos pelo utilizador, gerando os relatórios pretendidos. Os critérios podem ser o consumo de energia, consumo de água, conforto térmico e o conforto visual. O conforto térmico pode ser de acordo com o modelo térmico pretendido, sendo estático, adaptativo para a Europa, ou adaptativo para os EUA segundo a ASHRAE.

A etapa seguinte à geração automática das plantas e da simulação do seu desempenho é a sua otimização. Rodrigues et al. (2014) fala da importância das ferramentas de *design* e do *software* de simulação dinâmica estarem interligados para melhorar a *performance* do *design* dos edifícios. A otimização consiste em melhorar o comportamento térmico das plantas geradas automaticamente usando um procedimento de optimização sequencial de alteração das variáveis geométricas. A Figura 2.3 (b) representa o esquema de funcionamento do algoritmo do FPOP. Ele começa por importar as plantas geradas pelo EPSAP e em seguida vai proceder à otimização de acordo com os objetos que se pretenda aperfeiçoar na ordem escolhida. De seguida, é feita a análise térmica de cada *design* após cada alteração feita através da simulação dinâmica até serem encontradas as melhores soluções, em termos de *performance* térmica.

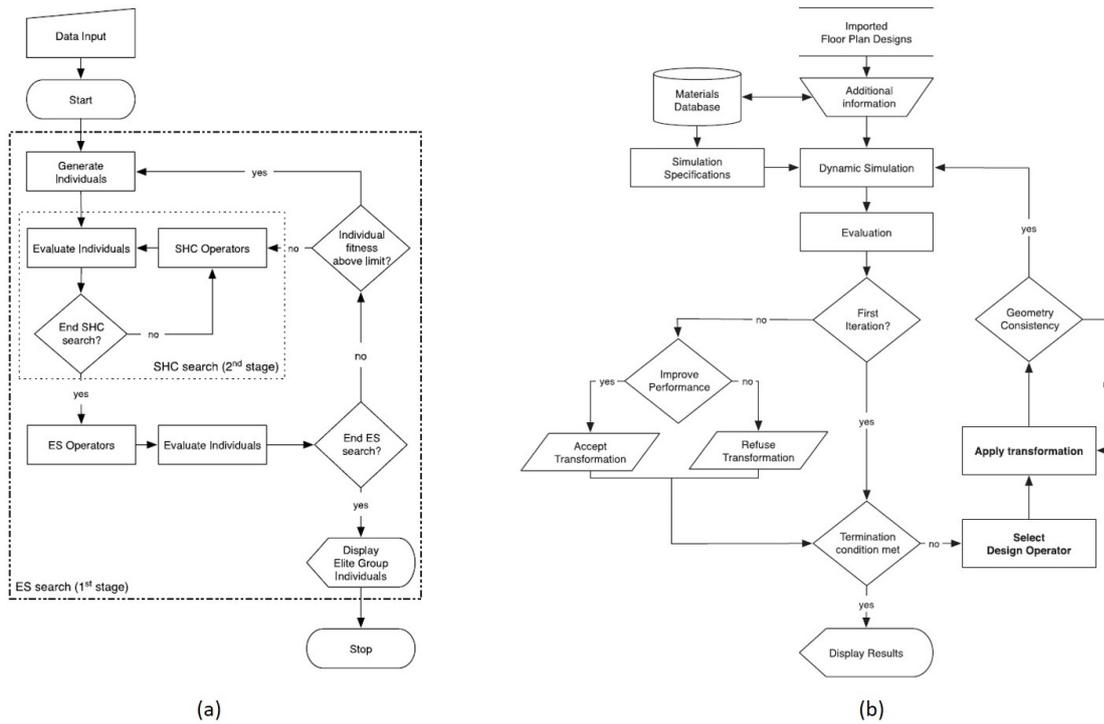


Figura 2.3: Fluxograma do *EPSAP* e do *FPOP* [Fonte: Rodrigues et al. (2013b, 2014)].

2.2 Simulação Energética de Edifícios

Estes algoritmos estão interligados com o *software* de simulação dinâmica *EnergyPlus* que vai avaliar o desempenho energético do edifício.

O *EnergyPlus* é um programa de simulação de cargas térmicas e análise energética baseado na descrição do utilizador do edifício. Faz o cálculo das cargas térmicas de aquecimento e arrefecimento necessárias para manter o conforto térmico dos espaços, dimensiona as potências dos equipamentos de AVAC e calcula os consumos energéticos. Também faz os cálculos de outros detalhes necessários para que a simulação se assemelhe ao máximo ao comportamento que o edifício terá na realidade (Berkeley Lab 2016a).

2.3 Sistema de Produção de Energia

2.3.1 Painéis Fotovoltaicos

O primeiro elemento a definir é o tipo de painel fotovoltaico a inserir de um conjunto de três opções: *PhotovoltaicPerformance:Simple*, *PhotovoltaicPerformance:EquivalentOne-Diode* e *PhotovoltaicPerformance:Sandia*.

O tipo *PhotovoltaicPerformance:Simple* é, de entre os três objetos, o mais simples e o que vai ser usado ao longo das simulações nos casos de estudo deste trabalho, onde apenas é necessário definir a fração de área de superfície com células solares ativas, o modo de cálculo da eficiência (pode ser fixa ou variável, de acordo com uma tabela de variação de eficiência), a eficiência das células e a tabela de eficiência caso esta não seja fixa. Como os fabricantes não fornecem a eficiência das células, mas sim do painel, considerou-se que a fração da superfície do painel com células ativas é de 100% e que a eficiência das células é igual à eficiência do painel, apresentada nos dados do fabricante.

O objeto *PhotovoltaicPerformance:EquivalentOne-Diode* usa um circuito elétrico equivalente onde se prevê o comportamento das células sob várias condições ambientais (Tamrakar et al. 2015). É necessário fornecer as intensidades de corrente e voltagens para as condições máximas de funcionamento e para as condições a uma temperatura de referência. É necessário também fornecer uma série de outros parâmetros, sendo a maior parte normalmente fornecidos nas especificações técnicas dos produtos.

O objeto *PhotovoltaicPerformance:Sandia* é baseado no trabalho desenvolvido no *Sandia National Lab.* em Albuquerque, EUA, por David King, entre outros, e usa um amplo número de coeficientes empíricos obtidos através de extensos testes e medições (Berkeley Lab 2016b).

2.3.2 Geradores

De seguida, é necessário escolher o tipo de gerador, neste caso, *Generator:Photovoltaic* para o sistema fotovoltaico e *Generator:WindTubine* para a turbina eólica.

No caso de o gerador ser um ou mais painéis fotovoltaicos, estes têm de ser associados a uma superfície que tem de ser criada, em que o mais usual é ser no telhado, orientados a Sul e com uma inclinação de 30°, mas esse critério vai depender de vários fatores, entre eles, a latitude do local do edifício e o seu perfil de consumo. É necessário definir o tipo de objeto, de entre os três referidos anteriormente (*PhotovoltaicPerformance*), o número de painéis em série e em paralelo e o método de transferência de calor do painel, para calcular a temperatura das células, pois esta afeta o rendimento do painel.

Se o gerador for uma turbina eólica é necessário definir o diâmetro do rotor, a altura entre o cubo do rotor e o solo, a potência e velocidades nominais, as velocidades para qual a turbina começa e para de girar, a eficiência, a velocidade média anual do vento para a localização do edifício e a altura correspondente, entre outros campos.

2.3.3 Inversor

Tanto num painel fotovoltaico como numa turbina eólica a energia produzida é em corrente contínua (DC), sendo necessário inserir um inversor que faz a conversão DC/AC (corrente alternada). Assim, primeiro é necessário escolher o tipo de inversor de entre três que o programa dispõe. Estes são: *ELC:Inverter:Simple*, *ELC:Inverter:LookUpTable* e *ELC:Inverter:FunctionOfPower*.

O objeto *ELC:Inverter:Simple* é o modelo mais simples disponível no *EnergyPlus* e usa uma eficiência fixa. Vai ser este o tipo de inversor usado durante as simulações. Pelo contrário, o *ELC:Inverter:FunctionOfPower* apresenta uma eficiência variável em função da potência que passa no inversor. Essa eficiência variável é definida de acordo com uma curva de eficiência. No *ELC:Inverter:LookUpTable* são definidas as eficiências para 10, 20, 30, 50, 75 e 100 por cento da potência nominal.

2.3.4 Armazenamento e Conversor

O *EnergyPlus* tem a opção de adicionar armazenamento de energia através de dois métodos: um simplificado, que pode ser por baterias ou de outra forma, e outro específico por baterias. O tipo de corrente que alimenta o armazenamento, AC ou DC, depende da configuração (*Electrical Buss Type*) do *ELC* definido no *ELC:Distribution*. A Figura 2.4 ilustra a ligação entre estes componentes, no modo de funcionamento usado nas simulações, ou seja, corrente e armazenamento DC (*Electrical Buss Type - Direct Current With DC Storage*).

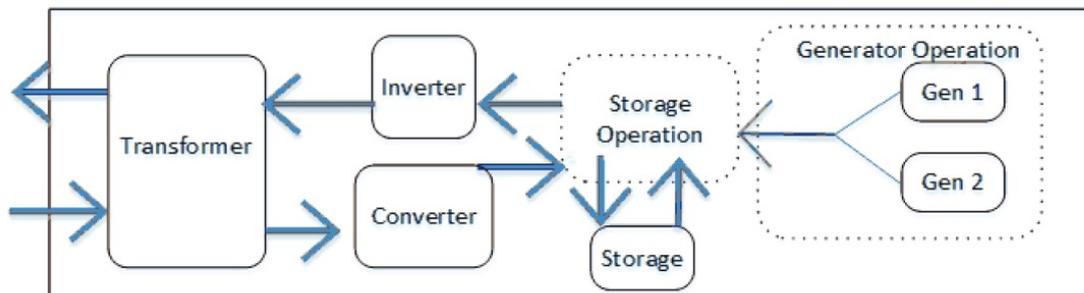


Figura 2.4: Esquema de ligação entre os componentes do *Electric Load Center* [Fonte: Berkeley Lab (2016b)].

O objeto *ELC:Storage:Simple* é o modo mais simplificado e são necessários definir poucos campos, como por exemplo a capacidade máxima de armazenamento, o estado inicial de carga, as potências máximas de carga e descarga, entre outros, enquanto que o objeto *ELC:Storage:Battery* é um modelo mais elaborado em que são necessários definir muitos campos do objeto. Este modelo baseia-se no modelo KiBaM (*Kinetic Battery Model*) e simula um banco de baterias composto por um ou mais módulos. Dado o excesso ou défice de potência de um período anterior este objeto consegue modelar a voltagem, intensidade e perdas de energia no carregamento e descarregamento durante cada período (Berkeley Lab 2016b). Também é possível calcular a vida útil da bateria usando este modelo.

O campo *ELC:Storage:Converter* define um conversor AC para DC se o utilizador

quiser que o armazenamento seja feito também através de energia da rede. O conversor tem um funcionamento oposto ao do inversor e apenas é necessário definir a eficiência, a tabela de eficiência caso esta não seja fixa, a disponibilidade do conversor e a fração radiativa.

Nas simulações nos casos de estudo deste trabalho vai ser usado o objeto *ELC:Storage:Simple*.

2.3.5 Transformador

Este objeto (*ELC:Transformer*) serve para simular as perdas de um transformador, não sendo obrigatório defini-lo. Nas simulações nos casos de estudo realizadas não foi usado este objeto, contudo, se fosse definido, este iria estar a funcionar em modo *Load Center Power Conditioning* para igualar a voltagem proveniente do *ELC* (subpainel) à voltagem do painel elétrico principal do edifício. Como este *ELC* vai drenar potência do painel principal para fazer o armazenamento de energia, assume-se que o transformador trabalha em ambas as direções e com uma performance igual.

Na Figura 2.5 pode-se perceber melhor o funcionamento do transformador.

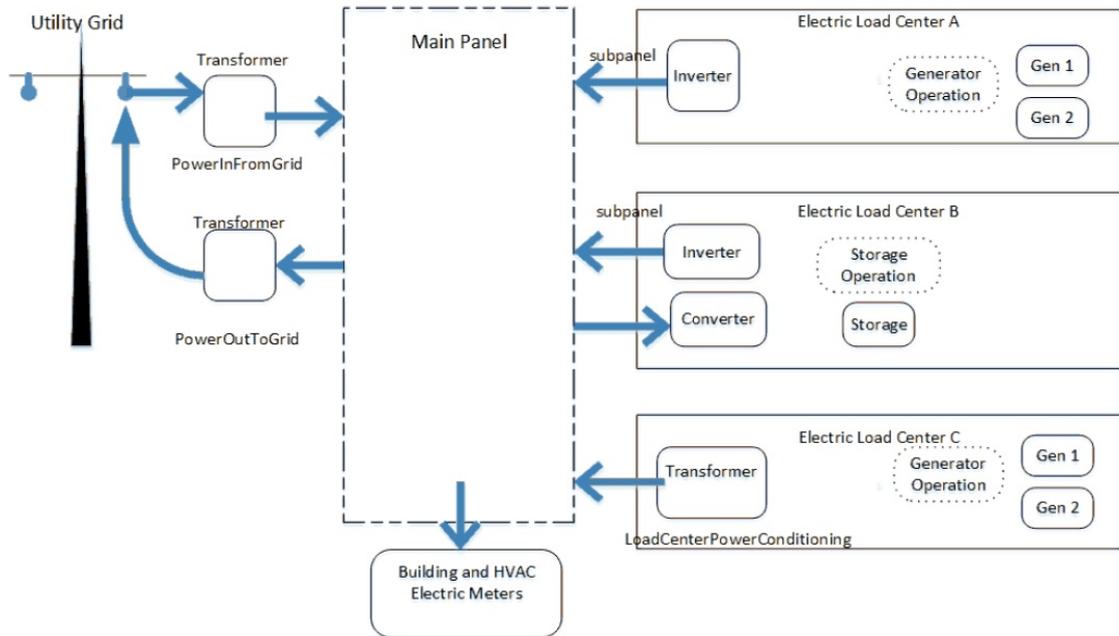


Figura 2.5: Ligação entre a rede elétrica e o *Electric Load Center* [Fonte: Berkeley Lab (2016b)].

2.3.6 Distribuição

Por fim, e para fazer a distribuição de energia, define-se um *ELC:Distribution* onde é necessário invocar a lista dos geradores, o inversor, o objeto do armazenamento, o conversor e o transformador, bem como o esquema de operação dos geradores, entre outros.

Este esquema de operação dos geradores define como estes vão estar disponíveis, sendo que o usado nas simulações nos casos de estudo foi o esquema *Baseload* em que os geradores estão sempre em funcionamento mesmo que a energia produzida exceda a energia consumida, permitindo assim o armazenamento da energia e a injeção na rede elétrica.

Foi considerado que todos os objetos anteriores estão disponíveis 24 horas por dia.

2.4 Base de Dados

É na base de dados onde estão todos os objetos, suas características e especificações, que permitem ao EPSAP gerar os edifícios e ao BPS fazer as simulações dinâmicas.

Após a modelação do sistema, os componentes foram criados em tabelas na base de dados. Nessas tabelas foram inseridos todos os dados necessários à rápida seleção e uso, por parte do utilizador. Após criadas as tabelas, foram acrescentados componentes teste para as primeiras simulações, provenientes de exemplos do *EnergyPlus* e posteriormente foram adicionados componentes reais, de acordo com as especificações dos catálogos dos fabricantes.

Para além dos componentes inseridos durante este trabalho, já se encontravam na base de dados os componentes necessários à construção do edifício, como os materiais, as paredes, os envidraçados, os sistemas construtivos, entre muitos outros.

2.5 Programação

Foi necessário fazer um conjunto de alterações ao código da ferramenta para esta poder invocar os parâmetros dos sistemas, armazenar as preferências do utilizador, definir o ficheiro de entrada da simulação, ler os resultados da simulação e o desempenho de cada componente, avaliar o desempenho de acordo com o critério e apresentar os relatórios de desempenho do edifício. A linguagem de programação usada foi JAVA e esta encontra-se estruturada em três categorias: projetos, pacotes e classes. Os projetos são pastas que contêm todos os ficheiros necessários ao projeto, podendo eles ser pacotes, ficheiros java ou bibliotecas. Permitem organizar o código separando os ficheiros que apenas são necessários para aquele projeto. Os pacotes contêm todos os ficheiros necessários para uma determinada tarefa, sendo que estes têm todos extensão .java. As classes são *templates* de estados e comportamentos. Estes *templates* são usados para definir objetos (por exemplo, janela, porta, espaço, etc.). Os projetos podem ser invocados noutros

projetos se alguma das classes já existentes seja necessária numa outra classe de um projeto diferente.

Neste desenvolvimento adicionou-se ao SAPTool dois pacotes e 16 classes, sendo que uma delas foi adicionada a um pacote já existente, prefazendo um total de 3710 linhas de código.

O primeiro passo para a implementação no código foi criar dois pacotes, em que num deles estão os componentes dos geradores e no outro os componentes do *ELC*. Estes pacotes foram criados no projeto “*SAPTool_LSP*”. Este projeto é o que vai conter as especificações do *layout* do edifício, ou seja, o tipo de construção e o tipo de componentes e equipamentos.

Cada componente é criado numa classe, onde são definidas as variáveis correspondentes a cada campo do *EnergyPlus*, com o nome do tipo “*ComponenteSpec*”, como por exemplo, *GeneratorPhotovoltaicSpec*. Estas classes contêm campos que serão preenchidos com os valores presentes na base de dados, havendo uma ligação entre o programa e a base de dados. Estes campos só serão lidos quando se realiza a simulação. Tal como na base de dados, se um componente for necessário ser invocado noutra, o código vai buscar esse objeto.

Como se pode observar na Figura 2.6, os dados da base de dados são importados para o objecto da classe *GeneratorWindTurbineSpec* e guardados nos diferentes campos da classe.

Em seguida, no projeto “*SAPTool_FPOP_EnergyPlus*” foi criado um pacote com o nome “*fpop.energyplus.parser.electricloadcenter*” e uma classe, com o nome *ELCDistributionParser*, em que são especificados todos os componentes necessários no *ELCDistribution* e os seus objetos que são precisos invocar, passando-os para texto para criar o ficheiro IDF de *input* para a simulação no *EnergyPlus*. Na Figura 2.7 encontra-se um excerto da programação necessária para passar os objetos criados anteriormente para texto de modo a criar o ficheiro IDF com toda a informação necessária.

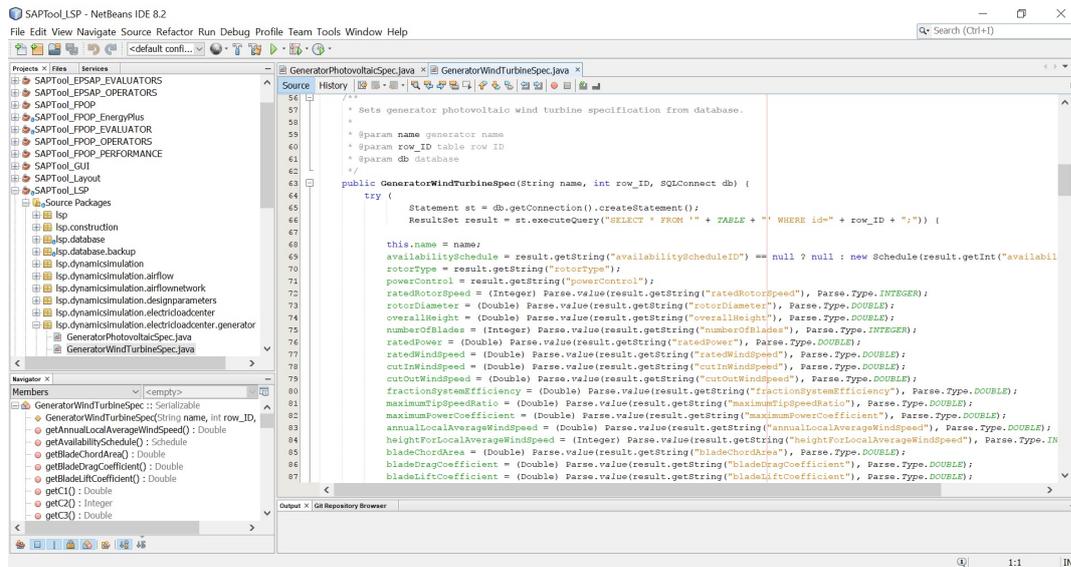


Figura 2.6: Exemplo da programação do objeto *GeneratorWindTurbine*.

Ainda no mesmo projeto, na classe *EnergyPlus* do pacote *”fpop.energyplus”*, foram adicionadas as variáveis de output a estudar, que tinham sido anteriormente criadas na classe *Equipment* do pacote *”fpop.performance”* no projeto *”SAPTool_FPOP_Performance”*. Para fazer o balanço de energia, foi descontada à soma das energias consumidas a energia produzida pelos geradores, na classe *”ObjectiveFunctionEnergyConsumption”* do pacote *”fpop.evaluator”* no projeto *”SAPTool_FPOP_Evaluator”*.

Por fim, no projeto *”SAPTool_GUI”*, na classe *”KeyOptionsEquipmentPerformance”* foi adicionada uma combinação de teclas para mostrar o gráfico com o *output* de energia do inversor e o balanço da energia comprada à rede, quando se usa a *GUI*.

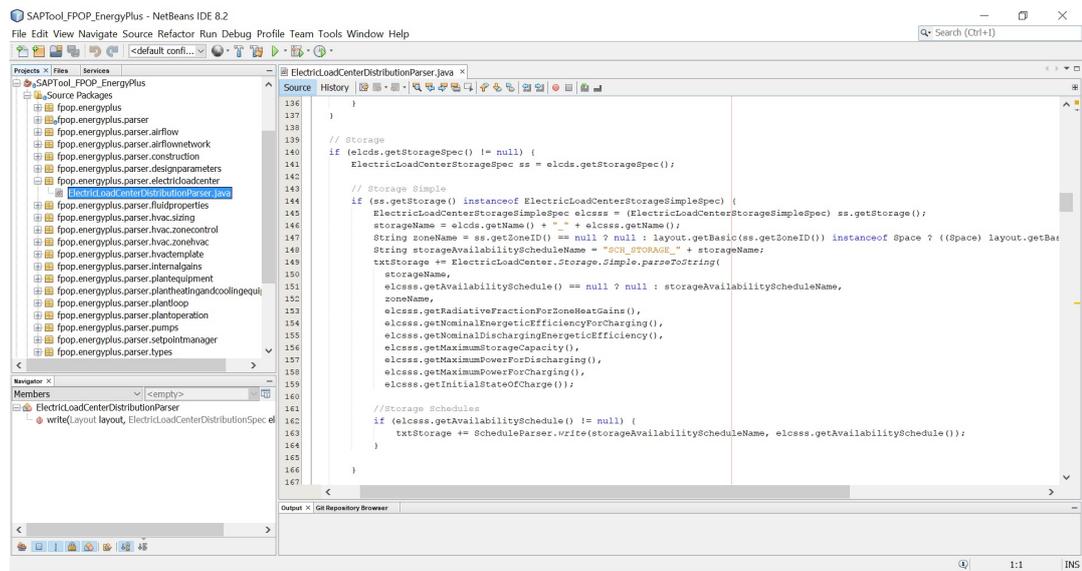


Figura 2.7: Programação necessária para criação do ficheiro IDF.

3. Casos de Estudo

Todos os ficheiros IDF referentes aos vários casos de estudo e às varias simulações estão disponíveis no *website* figshare (Gamas et al. 2017).

3.1 Localização

Para a realização das simulações foram usados dados climáticos de cinco localizações distintas: Bragança, Lisboa, Faro, Lajes e Funchal. É necessário determinar as zonas climáticas para cada localização para posteriormente calcular o coeficiente global de transmissão de calor (U) de referência e assim escolher as soluções construtivas. O zoneamento climático do País baseia-se na NUTS III cujas tabelas estão disponíveis no Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013. Assim, as cidades usadas são divididas da seguinte forma:

Tabela 3.1: Municípios de acordo com a NUTS III.

Alto Trás-os-Montes	Bragança
Grande Lisboa	Lisboa
Algarve	Faro
Região Autónoma dos Açores	Praia da Vitória (Lajes)
Região Autónoma da Madeira	Funchal

Existem três zonas climáticas de inverno (I1, I2 e I3) e três zonas climáticas de verão (V1, V2 e V3). Os critérios para a sua determinação encontram-se disponíveis no Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013. Pode-se observar essas zonas climáticas no continente de acordo com a Figura 3.1.

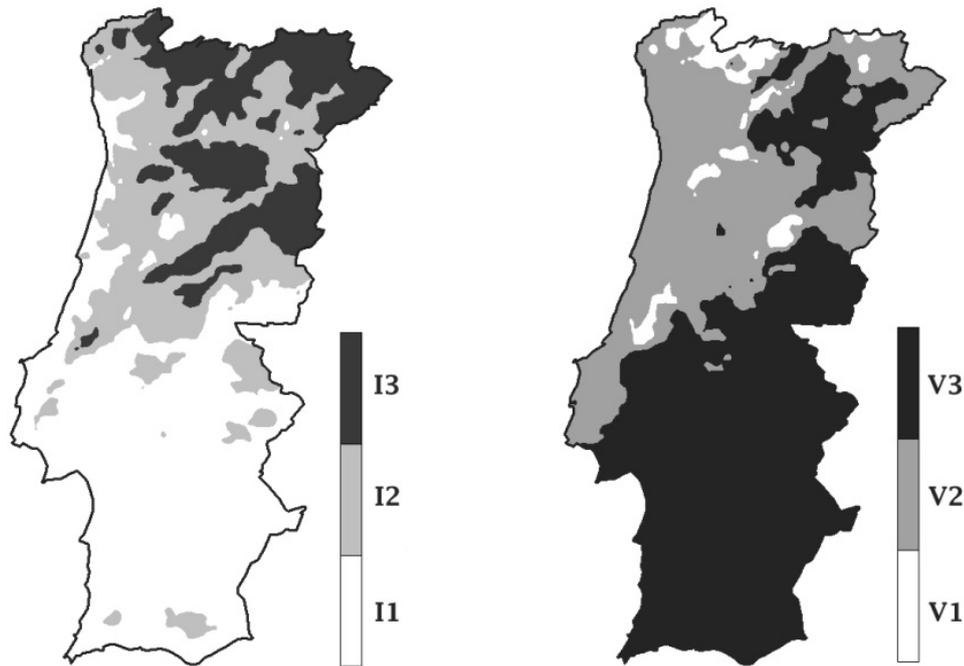


Figura 3.1: Zonas climáticas de inverno e verão em Portugal continental [Fonte: Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013].

Para calcular especificamente cada zona climática para cada localização, usa-se uma equação (3.1) que usa valores de referência para cada local ajustados por uma relação linear em função da altitude do local.

$$X = X_{ref} + a(z - z_{ref}) \quad (3.1)$$

Os valores a substituir encontram-se no Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013. Para a estação de aquecimento, as zonas climáticas determinam-se através do número de graus-dias na base de 18°C. Para a estação de arrefecimento, as zonas climáticas determinam-se através da temperatura exterior média. Os valores do U_{ref} e do $g_{T_{max}}$ são obtidos a partir das Tabelas 3.2 e 3.3.

Tabela 3.2: Coeficientes de transmissão térmica superficiais de referência de elementos opacos e de vãos envidraçados, U_{ref} [$W/m^2 \cdot ^\circ C$] [Fonte: Portaria n.º 379-A/2015].

U_{ref} [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$]		Zona Climática					
		Portugal Continental					
Zona corrente da envolvente:		Com a entrada em vigor do presente regulamento			A partir de 1 de janeiro de 2016		
		I1	I2	I3	I1	I2	I3
em contacto com o exterior ou com espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas $b_{tr} > 0.7$	Elementos opacos verticais	0,50	0,40	0,35	0,50	0,40	0,35
	Elementos opacos horizontais	0,40	0,35	0,30	0,40	0,35	0,30
em contacto com outros edifícios ou espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas $b_{tr} \leq 0.7$	Elementos opacos verticais	1,00	0,80	0,70	0,80	0,70	0,60
	Elementos opacos horizontais	0,80	0,70	0,60	0,60	0,60	0,50
Vãos envidraçados (portas e janelas) (U_w)		2,90	2,60	2,40	2,80	2,40	2,20
Elementos em contacto com o solo		0,50			0,50		
Zona corrente da envolvente:		Regiões Autónomas					
		Com a entrada em vigor do presente regulamento			A partir de 31 de dezembro de 2015		
em contacto com o exterior ou com espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas $b_{tr} > 0.7$ <th>I1</th> <th>I2</th> <th>I3</th> <th>I1</th> <th>I2</th> <th>I3</th>		I1	I2	I3	I1	I2	I3
		0,80	0,65	0,50	0,70	0,60	0,45
em contacto com outros edifícios ou espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas $b_{tr} \leq 0.7$	Elementos opacos verticais	0,55	0,50	0,45	0,45	0,40	0,35
	Elementos opacos horizontais	1,60	1,50	1,40	0,90	0,80	0,70
em contacto com outros edifícios ou espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas $b_{tr} \leq 0.7$	Elementos opacos verticais	1,60	1,50	1,40	0,90	0,80	0,70
	Elementos opacos horizontais	1,00	0,90	0,80	0,70	0,70	0,60
Vãos envidraçados (portas e janelas) (U_w)		2,90	2,60	2,40	2,80	2,40	2,20
Elementos em contacto com o solo		0,50			0,50		

Tabela 3.3: Fatores solares máximos admissíveis de vãos envidraçados, g_{Tmax} [Fonte: Portaria n.º 379-A/2015].

g_{Tmax}	Zona Climática		
	V1	V2	V3
Fraca	0.15	0.10	0.10
Média	0.56	0.56	0.50
Forte	0.56	0.56	0.50

Desta forma, obtém-se os seguintes dados apresentados na Tabela 3.4:

Tabela 3.4: Zonas climáticas, U_{ref} e $g_{T_{max}}$.

Localização	Zonas Climáticas		U_{ref}				$g_{T_{max}}$
	Inverno	Verão	El. Opacos Vert.	El. Opacos Horiz.	El. Contacto Solo	Envidraçados	Envidraçados
Bragança	I3	V2	0.35	0.30	0.50	2.20	0.56
Lisboa	I1	V3	0.50	0.40	0.50	2.80	0.50
Faro	I1	V3	0.50	0.40	0.50	2.80	0.50
Lajes	I1	V2	0.70	0.45	0.50	2.80	0.56
Funchal	I1	V2	0.70	0.45	0.50	2.80	0.56
Construção Usada	-	-	0.31	0.26	0.41	2.00	0.50

3.2 Edifício

Os edifícios gerados pelo EPSAP vão ser residências uni-familiares com um único piso e uma típica tipologia T3, tendo três quartos, duas casas de banho, uma sala e uma cozinha. As Tabelas 3.5, 3.6 e 3.7 mostram as soluções construtivas usadas.

Para as paredes exteriores a solução construtiva escolhida foi uma parede simples com isolamento pelo exterior. É composta por um acabamento superficial EIFS, isolamento (EPS), um bloco térmico e placas de gesso cartonado. É bastante usual hoje em dia este sistema, vulgarmente conhecido por Capotto ou ETICS, uma vez que tem características que favorecem a relação preço/qualidade a longo prazo.

O bloco térmico é de fácil aplicação e com bom isolamento térmico e acústico. Aplicado ao ETICS permite que haja uma diminuição do risco de condensação pois a parede é mantida a uma temperatura mais alta, aumenta a inércia térmica pois a maior parte da massa da parede encontra-se pelo interior do isolamento térmico, melhora a impermeabilidade da parede, entre muitas outras vantagens. Assim, a inércia térmica do edifício foi considerada como sendo forte.

Tabela 3.5: Soluções construtivas - Parede exterior.

Parede Exterior - ETICS							
Camada	Material	e [m]	ρ [kg/m ³]	λ [W/m.°C]	C_p [J/kg.°C]	R_i [m ² .°C/W]	M [kg/m ²]
Exterior	Acabamento EIFS	0.002	1700	0.700	1000	0.003	3.4
2	EPS - ETICS	0.080	15	0.040	1400	2.000	1.2
3	Bloco Térmico	0.250	680	0.268	1000	0.935	170.0
4	Placa de gesso cartonado	0.020	950	0.220	840	0.091	19.0
Resistência Interna Rsi						Fluxo Horizontal	0.130
Resistência Interna Rse						Fluxo Horizontal	0.040
Somatórtios		0.352				3.198	193.6
						U [W/m ² °C]	0.31

Tabela 3.6: Soluções construtivas - Pavimento Sobre o Terreno.

Pavimento Sobre o Terreno							
Camada	Material	e [m]	ρ [kg/m ³]	λ [W/m.°C]	C_p [J/kg.°C]	R_i [m ² .°C/W]	M [kg/m ²]
Exterior	Betão	0.200	2246	1.730	837	0.116	449.1
2	Isolamento	0.080	32	0.040	836	2.000	2.6
3	Argamassa de enchimento	0.020	1600	0.800	840	0.025	32.0
4	Camada de regularização	0.010	950	0.220	840	0.045	9.5
5	Madeira maciça	0.020	825	0.200	2385	0.100	16.5
Resistência Interna Rsi						Fluxo Vertical Descendente	0.170
Resistência Interna Rse						NA	0.000
Somatórtios		0.330				2.456	509.7
						U [W/m ² °C]	0.41

Tabela 3.7: Soluções construtivas - Cobertura Sobre o Exterior.

Cobertura Sobre o Exterior							
Camada	Material	e [m]	ρ [kg/m ³]	λ [W/m.°C]	C_p [J/kg.°C]	R_i [m ² .°C/W]	M [kg/m ²]
Exterior	Seixo Rolado	0.015	881	1.440	1674	0.010	13.2
2	Película impermeabilizante	0.010	1121	0.190	1674	0.053	11.2
3	Isolamento denso	0.140	91	0.040	837	3.500	12.8
4	Betão	0.200	2246	1.730	837	0.116	449.1
5	Placa de gesso cartonado	0.020	950	0.220	840	0.091	19.0
Resistência Interna Rsi						Fluxo Vertical Ascendente	0.100
Resistência Interna Rse						Fluxo Vertical Ascendente	0.040
Somatórtios		0.385				3.910	505.3
						U [W/m ² °C]	0.26

O pavimento sobre o terreno é composto por betão, isolamento, argamassa de enchimento, camada de regularização e madeira maciça. A cobertura sobre o exterior é feita de seixo rolado, uma película impermeabilizante, isolamento denso, betão e placas de gesso cartonado.

As Figuras 3.2 (a), (b) e (c) mostram uma representação destas três soluções construtivas.

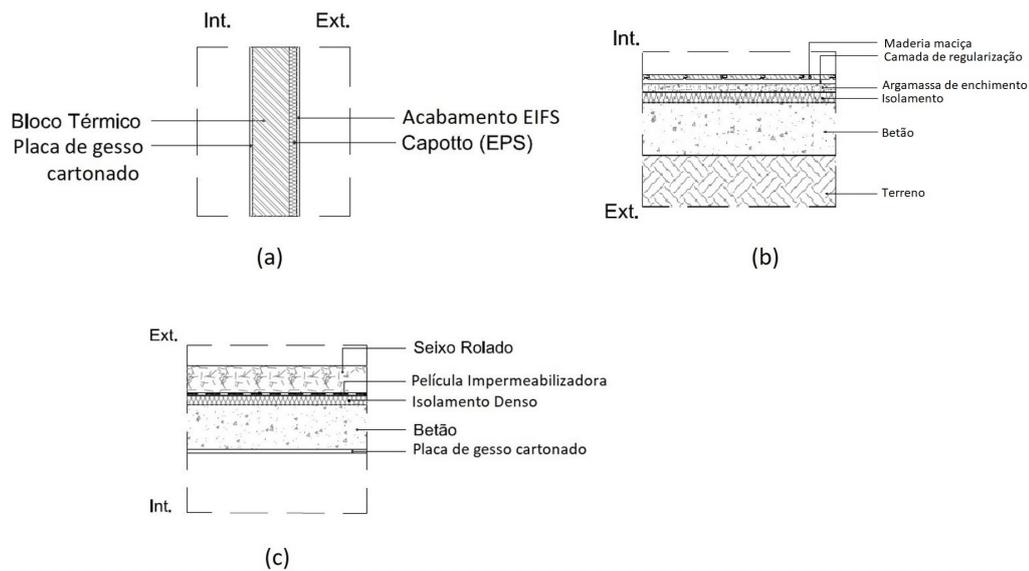


Figura 3.2: Soluções construtivas.

Assim, é necessário definir na base de dados as soluções construtivas escolhidas, compilar o código e correr o LSP, para posteriormente se correr o EPSAP e gerar as plantas com a construção desejada. Foram criados dois edifícios, sendo que um deles vai ser o escolhido para fazer as simulações. Esse edifício escolhido foi o considerado "o melhor" de entre os dois apresentados pelo programa, de acordo com os vários critérios da função custo do EPSAP. Os edifícios gerados e respectiva planta encontram-se ilustrados nas Figuras 3.3 e 3.4.

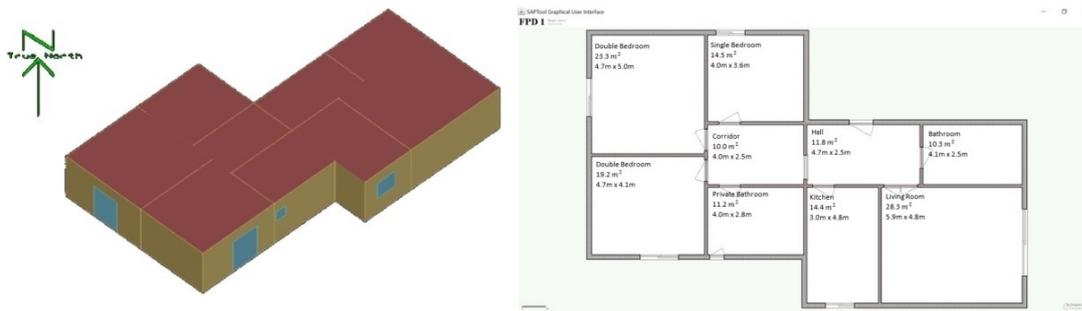


Figura 3.3: "Melhor" edifício gerado pelo EPSAP.

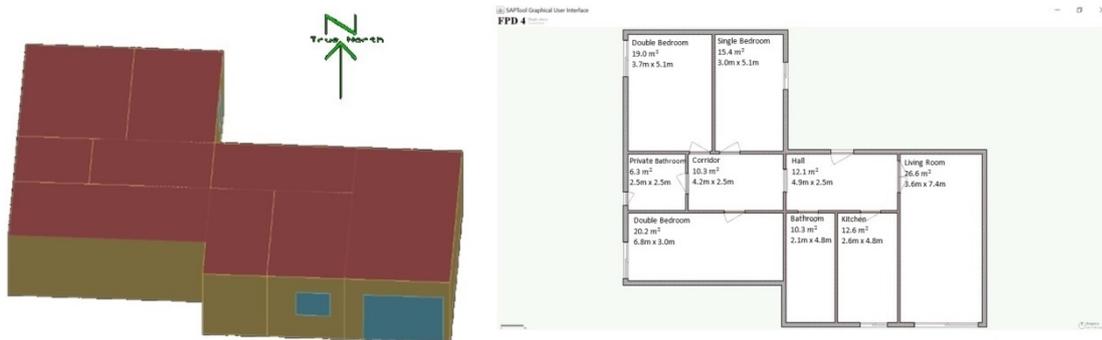


Figura 3.4: "2º melhor" edifício gerado pelo EPSAP.

3.3 Climatização

Vão ser feitas simulações usando dois tipos de climatização: o primeiro apenas com aquecimento na estação de aquecimento, com recurso a equipamentos elétricos (irradiadores a óleo, por exemplo) e o segundo com um sistema dedicado de climatização do tipo *split* (ar condicionado), durante todo o ano. A vantagem da utilização destes sistemas dedicados de climatização no *EnergyPlus* é que é feito um *autosize* da potência, logo o programa vai determinar a potência ideal que o equipamento deve ter, não havendo desperdício de energia. O sistema de climatização está programado para funcionar de acordo com o perfil de ocupação das divisões onde está inserido e os *setpoints* estão definidos para 20°C no inverno e 25°C no verão. Este sistema foi implementado por Bernardo (2017).

3.4 Equipamentos e Ocupação

O aquecimento de águas sanitárias é feito através de um termoacumulador elétrico. A listagem dos diferentes tipos de equipamentos usados, os seus perfis de uso e os perfis de ocupação encontra-se na Tabela 3.8 (a) e (b).

Tabela 3.8: Perfis de uso e ocupação.

(a)

	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00
Cozinha	L - R	L - r						E - P - AQS				
Sala												
Quarto Individual	P - AC											
Quarto Casal	P - AC											
	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00
Cozinha	E - P					E - P	E		E - P		AQS	
Sala									E - P - A/AC	E - P - A/AC	E - P - A/AC	
Quarto Individual										P - A	P - A	P - A/AC
Quarto Casal										A	A	P - A/AC

(b)

	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00
Cozinha								E - P - AQS				
Sala												
Quarto Individual	P - AC	P - AC	P - AC	P - AC	P - AC	P - AC	P - AC	P - AC				
Quarto Casal	P - AC	P - AC	P - AC	P - AC	P - AC	P - AC	P - AC	P - AC				
	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	24:00
Cozinha	E - P	L - R	L - r			E - P	E - AQS		E - P			
Sala									E - P - A/AC	E - P - A/AC	E - P - A/AC	
Quarto Individual										P - A	P - A	P - A/AC
Quarto Casal										A	A	P - A/AC

E - Equipamento elétrico não especificado P - Ocupação por pessoas A - Aquecimento elétrico AC - Ar condicionado
 AQS - Uso de águas quentes sanitárias R - Máquina de lavar roupa L - Máquina de lavar loiça
 (Quando estão representadas letras minúsculas significa que o equipamento é apenas usado durante metade do período representado)
 (A negrito observa-se os equipamentos alvo da deslocação de cargas)

Foi realizada uma deslocação de cargas que se pode verificar nas tabelas apresentadas, que vai ser explicada na discussão dos resultados.

Os equipamentos elétricos foram adicionados em cada um dos três quartos, tendo uma potência de 400 W e na sala, com uma potência de 800 W. As potências dos equipamentos de ar condicionado estão representadas na Tabela 3.9. Estes têm um COP de 4 e uma EER de 3.2.

Tabela 3.9: Potência do ar condicionado para as diferentes localizações determinada através de *autosize*.

		Bragança	Faro	Funchal	Lajes	Lisboa
Zona	Tipo	Potência [W]				
Sala	Arrefecimento	805	810	748	603	760
	Aquecimento	788	348	183	314	430
Quarto Single	Arrefecimento	335	342	226	215	248
	Aquecimento	371	156	109	663	203
Quarto Duplo	Arrefecimento	581	555	374	396	454
	Aquecimento	488	173	125	229	272
Quarto Duplo	Arrefecimento	428	426	318	282	400
	Aquecimento	451	129	72	212	212

3.5 Sistema de Produção de Energia

O número ideal de painéis fotovoltaicos que vão satisfazer as necessidades de energia do edifício vai ser definido por tentativa e erro. Assim, vai ser aumentado gradualmente o número de painéis até atingir a quantidade ideal de energia produzida de modo a rentabilizar o investimento. Na Tabela 3.10 estão as características dos equipamentos usados.

Tabela 3.10: Características dos equipamentos.

Equipamento		Potência [W]	Capacidade [kWh]	Eficiência [%]	Dimensões [m]		
Painel	BenQ SunForte PM096B00	325	-	19.9	C: 1.559	L: 1.046	H: 0.046
Bateria pequena	LG CHEM RESU10	-	8.8	95	-	-	-
Bateria	Pika Coral A	-	14	99	-	-	-
Turbina	Xzeres Skystream 3.7	2100	-	-	D: 3.72	H: 12	N: 3
Inversor	Pika X3001	3000	-	96	-	-	-

Os equipamentos selecionados foram aqueles que apresentavam melhor relação rendimento/preço, de acordo com as potências necessárias para o edifício. O painel fotovoltaico escolhido apresenta uma potência de 325 W e rendimento de 19.9%, que é o

rendimento mais elevado encontrado para painéis fotovoltaicos desta potência, sendo que o seu preço encontra-se dentro da média. A escolha da bateria baseou-se na relação entre capacidade de armazenamento e o seu custo. Considerando a relação potência/preço, a turbina selecionada tem 2100 W de potência. O inversor escolhido foi projetado para trabalhar com sistemas híbridos. Também pode funcionar apenas com sistemas fotovoltaicos ou eólicos, em separado.

As inclinações ótimas dos painéis são determinadas pela latitude. Para cada localização foram determinadas as inclinações ótimas, a partir do *software* Solterm, desenvolvido pelo LNEG, sendo que estes valores encontram-se na Tabela 3.11.

Tabela 3.11: Posicionamento geográfico e inclinação ótima de cada painel.

Nome	Latitude [°]	Longitude [°]	Altitude [m]	Inclinação Ótima do painel [°]
Bragança	41.80	-6.73	692.00	37
Lisboa	38.73	-9.15	71.00	34
Faro	37.02	-7.97	4.00	32
Lajes	38.77	-27.10	55.00	34
Funchal	32.65	-16.92	380.00	28

Após inserir o sistema de produção de energia vai-se proceder à realização das simulações. Para cada localização e cada sistema de climatização foram feitas várias simulações, de acordo com o sistema de produção usado.

O esquema da instalação do sistema pode ser observado na Figura 3.5, onde é mostrado o sistema híbrido, com turbina e painéis fotovoltaicos, sendo que podem funcionar ambos em separado, a ligação à bateria e ao inversor e posterior uso doméstico e venda à rede, quando necessário.

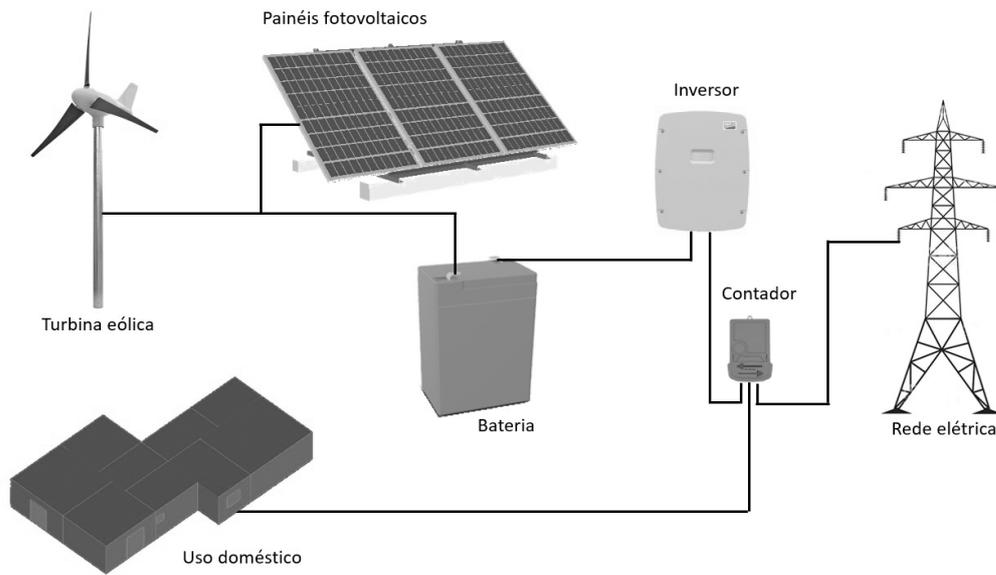


Figura 3.5: Esquema de ligação do sistema de produção de energia.

Pode-se observar na Figura 3.6 o edifício já com os painéis inseridos.

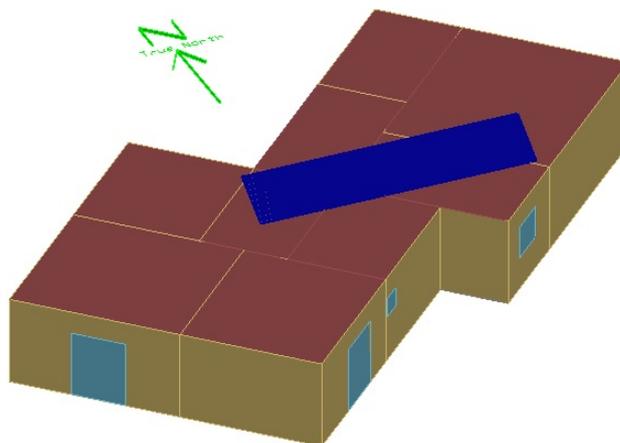


Figura 3.6: Edifício com os painéis fotovoltaicos.

4. Resultados e Discussão

Vão ser analisados os dois cenários, ou seja, um onde o edifício tem aquecimento através de equipamentos elétricos e o outro é climatizado com ar condicionado. O seu perfil de uso está demonstrado na Tabela 3.8 apresentada no capítulo anterior. O ar condicionado tem potência variável de acordo com a localização e divisão onde está inserido, pois esta potência foi determinada através da função *autosize* do *EnergyPlus*, ou seja, é autodimensionada de modo a não haver sobre-dimensionamento. O perfil de uso é de acordo com a ocupação das divisões onde está inserido (três quartos e sala) e pode também ser visto na Tabela 3.8.

4.1 Produção de Energia

Como seria de esperar, à medida que se avança para os meses de verão, há uma maior produção solar devido aos dias serem maiores, a radiação ser mais intensa e não haver tanta nebulosidade. Já na produção eólica acontece o inverso, pois geralmente nos meses de inverno há mais disponibilidade de vento que nos meses de verão. Os gráficos das Figuras 4.1 e 4.2 evidenciam isso mesmo: a produção solar praticamente duplica na época de verão enquanto que a produção eólica diminui significativamente nesse período, sendo mais visível no caso do Funchal.

De notar que estes gráficos foram feitos com a mesma potência instalada para todas as localizações, ou seja, o mesmo sistema de produção, composto por sete painéis, bateria e turbina eólica.

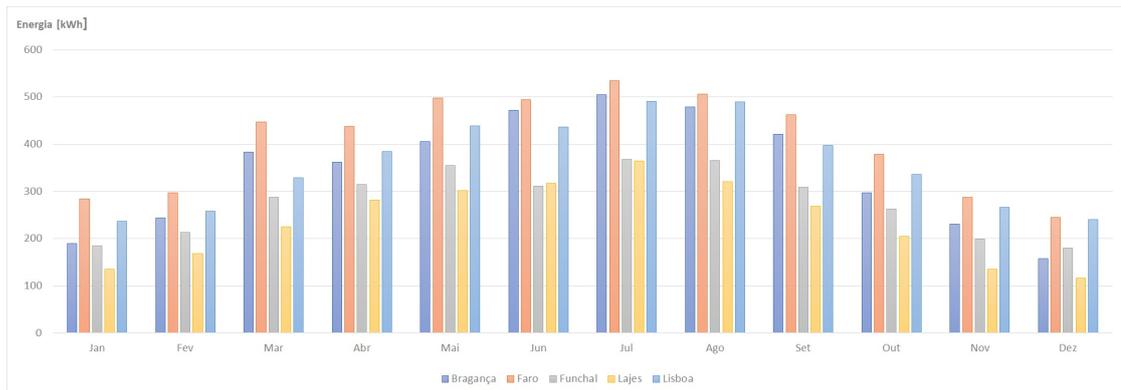


Figura 4.1: Produção de energia solar mensal.

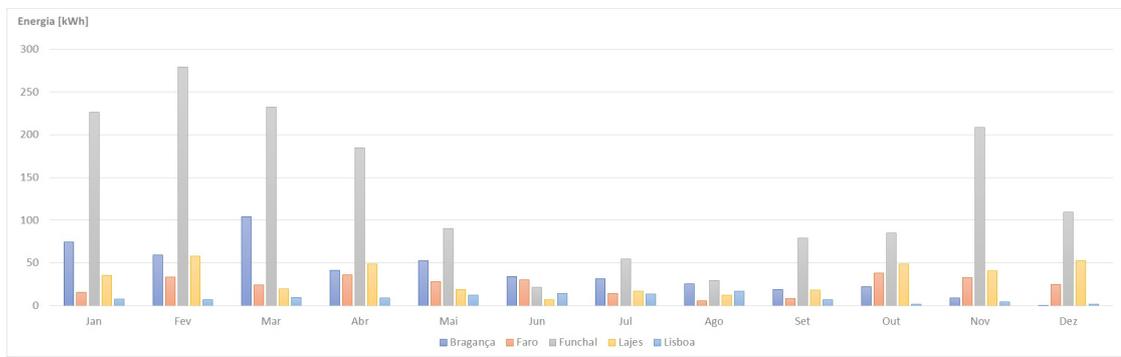


Figura 4.2: Produção de energia eólica mensal.

4.2 Simulações com Aquecimento Ambiente

As primeiras simulações foram realizadas apenas com aquecimento, para Bragança. Após uma primeira análise dos resultados obtidos, e numa tentativa de reduzir a energia comprada e a não aproveitada, ou seja, energia vendida à rede, de modo a aumentar a eficiência e a rentabilizar o sistema, foi realizada uma deslocação de cargas, apresentada nas Tabelas 3.8 (a) e (b). Esta deslocação de cargas encontra-se representada a negrito na Tabela 3.8 (b). Consistiu no uso de equipamentos que consomem elevada quantidade de energia em horas onde se verifica produção, neste caso, o uso das máquinas de lavar roupa e loiça no período do início da tarde, em vez do período da madrugada, e do uso

de águas quentes sanitárias ao fim da tarde, onde se verifica produção de energia em cerca de metade do ano, em vez de se usar ao fim da noite.

Na Tabela 4.1 podem-se comparar as diferenças antes e após ser feita a deslocação de cargas. Estas diferenças não foram da ordem de grandeza esperada mas, ainda assim, as restantes simulações foram feitas com o segundo perfil de uso.

Tabela 4.1: Relação entre a energia comprada e vendida em Bragança, para o caso de aquecimento ambiente.

Cenários	Energia [kWh]							
	s/ deslocação		c/ deslocação		Diferença absoluta		Diferença em %	
	Comprada	Vendida	Comprada	Vendida	Comprada	Vendida	Comprada	Vendida
1 painel	7015	371	6871	226	144	144	2	39
2 paineis, bateria pequena	6144	0	6117	0	27	0	0	26
4 paineis, bateria pequena	5323	257	5068	26	256	231	5	90
4 paineis, bateria pequena, turbina	5041	417	4746	144	295	273	6	65
4 paineis, bateria, turbina	4536	30	4520	23	16	7	0	22
5 paineis, bateria	4402	0	4392	0	10	0	0	59
5 paineis, bateria, turbina	3996	44	3976	33	20	11	1	24
6 paineis, bateria	3844	0	3834	0	10	0	0	25
6 paineis, bateria, turbina	3475	81	3437	52	38	29	1	36
7 paineis, bateria	-	-	3310	30	-	-	-	-
7 paineis, bateria, turbina	-	-	2998	168	-	-	-	-
8 paineis, bateria	-	-	2968	247	-	-	-	-
8 paineis, bateria, turbina	-	-	2713	444	-	-	-	-
9 paineis, bateria	-	-	2732	568	-	-	-	-
9 paineis, bateria, turbina	-	-	2505	793	-	-	-	-
10 paineis, bateria	-	-	2551	952	-	-	-	-
10 paineis, bateria, turbina	-	-	2339	1193	-	-	-	-

Analisando a Tabela 4.1 consegue-se perceber a necessidade de inclusão de uma bateria, pois vai reduzir significativamente a quantidade de energia injetada (vendida, nesta análise) à rede, que na situação económica atual é de evitar. Também podemos observar que uma bateria com maior capacidade, para as mesmas condições (quatro painéis e turbina) permite não só comprar menos energia, como também vender menos, cerca de 500 e 400 kWh anualmente, respetivamente.

A deslocação de cargas permitiu economizar pouca energia, apenas chegando a 1% da energia comprada em alguns casos. Embora nos casos de estudo realizados esta deslocação de cargas não tenha um impacto muito significativo na redução da energia comprada, é uma questão importante pois vai permitir dimensionar o sistema de acordo com as necessidades do edifício, ajustando a possibilidade da incorporação de baterias e o seu número ideal, otimizando assim o investimento inicial.

O número de painéis foi obtido por tentativa e erro de modo a satisfazer ao máximo as necessidades energéticas, com ou sem a inclusão de uma turbina. As tentativas foram terminadas quando a energia comprada tomava os valores mais baixos possíveis mantendo ao mesmo tempo a quantidade de energia vendida o mais baixo possível.

Na Tabela 4.2 são apresentados os valores de energia correspondentes às restantes localizações. Nestas simulações descartaram-se os casos em que havia menos de quatro painéis fotovoltaicos, bem como a bateria de menor capacidade. Consegue-se perceber facilmente que a inclusão de uma turbina eólica, excepto no Funchal, não traz grandes aumentos de produção de energia.

Tabela 4.2: Relação entre a energia comprada e vendida em Faro, Funchal, Lajes e Lisboa, para o caso de aquecimento ambiente.

Cenários	Energia [kWh]							
	Faro		Funchal		Lajes		Lisboa	
	Comprada	Vendida	Comprada	Vendida	Comprada	Vendida	Comprada	Vendida
5 painéis, bateria	3596	0	4694	0	4999	0	4076	0
5 painéis, bateria, turbina	3320	0	3560	392	4641	0	3977	0
6 painéis, bateria	2945	0	4244	0	4618	0	3498	0
6 painéis, bateria, turbina	2674	6	3171	455	4260	0	3400	0
7 painéis, bateria	2386	96	3794	1	4238	0	2982	62
7 painéis, bateria, turbina	2199	188	2801	538	3880	0	2913	91
8 painéis, bateria	2097	462	3404	61	3870	15	2640	303
8 painéis, bateria, turbina	1933	576	2497	685	3517	20	2586	348
9 painéis, bateria	-	-	-	-	3539	64	-	-
9 painéis, bateria, turbina	-	-	-	-	3195	78	-	-
10 painéis, bateria	-	-	-	-	3248	157	-	-
10 painéis, bateria, turbina	-	-	-	-	2914	181	-	-

No caso do Funchal, a turbina produz uma quantidade elevada de energia, que vai fazer com que também haja uma elevada venda à rede. Ainda assim, numa primeira análise a melhor solução pode passar por um sistema híbrido. Uma análise económica será feita posteriormente de modo a avaliar quais as melhores soluções.

4.3 Simulações com Aquecimento e Arrefecimento Ambiente

No caso do edifício ter climatização através de ar condicionado, comparando com a Tabela 4.2, pode-se observar na Tabela 4.3 que a energia comprada, para os mesmos equipamentos de produção, é inferior. Isso deve-se ao facto da potência do ar condicionado, no geral, ser menor do que a potência do equipamento elétrico, deste ter termostatos que ligam e desligam o sistema consoante a temperatura interior esteja dentro ou fora dos limites dos *setpoints* definidos, mesmo estando o ar condicionado a trabalhar todo o ano e durante toda a noite, e principalmente devido ao equipamento de ar condicionado ter um COP de 4 e um EER de 3,2, ou seja, permite no limite (em aquecimento) quadruplicar a energia útil com a mesma energia fornecida.

Tabela 4.3: Relação entre a energia comprada e vendida para as cinco localizações, para o caso de climatização com aquecimento e arrefecimento ambiente.

Cenários	Energia [kWh]									
	Bragança		Faro		Funchal		Lajes		Lisboa	
	Comprada	Vendida	Comprada	Vendida	Comprada	Vendida	Comprada	Vendida	Comprada	Vendida
4 painéis, bateria	4677	0	-	-	-	-	-	-	-	-
4 painéis, bateria, turbina	4253	26	-	-	-	-	-	-	-	-
5 painéis, bateria	4123	0	2833	0	3762	0	4082	0	3320	0
5 painéis, bateria, turbina	3711	38	2557	0	2714	480	3723	0	3221	0
6 painéis, bateria	3565	0	2182	0	3311	0	3700	0	2742	0
6 painéis, bateria, turbina	3170	55	1910	5	2333	551	3342	0	2644	0
7 painéis, bateria	3015	4	1547	19	2860	0	3320	0	2193	28
7 painéis, bateria, turbina	2680	120	1347	97	1970	641	2962	0	2116	49
8 painéis, bateria	2635	183	1213	340	2456	47	2949	12	1814	232
8 painéis, bateria, turbina	-	-	1048	454	1663	786	2597	18	1757	274
9 painéis, bateria	-	-	-	-	-	-	2616	60	-	-
9 painéis, bateria, turbina	-	-	-	-	-	-	2271	74	-	-
10 painéis, bateria	-	-	-	-	-	-	2321	150	-	-
10 painéis, bateria, turbina	-	-	-	-	-	-	1984	172	-	-

4.4 Análise Económica

Para verificar se é viável usar um sistema de produção de energia igual ao implementado vai ser feita uma análise económica.

Em primeiro lugar foi previsto o preço de compra de eletricidade, medido em €/kWh, para os próximos 25 anos (tempo de vida útil dos painéis fotovoltaicos), calculando a taxa de crescimento média das taxas de crescimento anuais, desde a entrada em vigor do Euro em Portugal. Foram usados os valores do histórico dos preços da energia disponíveis no *website* PORDATA (2017). Foi considerado um crescimento anual constante do preço do kWh. Da mesma forma foi previsto o preço de venda de eletricidade. Para calcular a taxa de crescimento foi usada a Equação 4.1, sendo que o valor do preço do kWh é calculado através da Equação 4.2. A taxa de crescimento médio do período calculado foi de 2.9754%. Os valores do preço do kWh, de compra e venda, encontram-se na Tabela A.1 do Apêndice A.

$$t_x = \frac{Preço_n - Preço_{n-1}}{Preço_{n-1}} \quad (4.1)$$

$$Preço_{n+1} = Preço_n * (1 + t_{x_m})^{n+1} \quad (4.2)$$

De seguida foi calculado o investimento nos equipamentos de produção. Considerou-se que nos 25 anos tem de se substituir a bateria e o inversor duas vezes pois estes só têm vida útil de 10 anos. Na Tabela 4.4 é possível verificar os preços de cada equipamento. Estes preços foram obtidos através dos catálogos dos fabricantes, disponíveis no *website* do fabricante ou de empresas especializadas de venda destes equipamentos. A bateria de menor capacidade foi desprezada na análise económica. O custo total de investimento pode ser visto na Tabela 4.5, para cada caso estudado.

Tabela 4.4: Preços e vida útil dos equipamentos.

Equipamento		Preço [€]	Instalação, manutenção e consumíveis a 25 anos [€]	Vida útil [anos]	Substituições [un.]
Painel	BenQ SunForte PM096B00	300	2500	25	0
Inversor	Pika Energy X3001	2000	200	10	2
Turbina Eólica	Xzeres Skystream3.7	5100	1500	30	0
Bateria	Pika Coral A	8000	200	10	2

Tabela 4.5: Custo de investimento dos equipamentos.

Painéis	Turbina	Custo de investimento com preços constantes [€]	Custo de investimento com preços variáveis [€]	Potência Instalada [W]
4	-	34100	22176	1300
4	1	40700	28776	3400
5	-	34400	22476	1625
5	1	41000	29076	3725
6	-	34700	22776	1950
6	1	41300	29376	4050
7	-	35000	23076	2275
7	1	41600	29676	4375
8	-	35300	23376	2600
8	1	41900	29976	4700
9	-	35600	23676	2925
9	1	42200	30276	5025
10	-	35900	23976	3250
10	1	42500	30576	5350

O próximo passo consistiu em calcular a energia produzida em cada ano considerando as perdas de rendimento do sistema. O painel tem um *output* de energia garantido de 95% nos primeiros 5 anos e uma degradação linear até 87% até aos 25 anos. A turbina tem uma perda de eficiência (considerada linear) de 15% durante a sua vida útil de 30 anos e o inversor tem uma perda de eficiência, também considerada linear, de 5% durante os 10 anos de vida útil. As perdas da bateria estão contabilizadas nas perdas do inversor. A Figura 4.6 evidencia o decréscimo de energia produzida ao longo do

tempo. Pode-se verificar que neste caso em particular, constituído por sete painéis e uma turbina, localizado em Bragança, a energia produzida diminuiu 500 kWh em 25 anos, ou seja, cerca de 11%.

Tabela 4.6: Energia produzida anualmente [kWh].

Decremento de eficiência			Ano	Painéis	Turbina	Inversor
Painel	Turbina	Inversor				
-	-	-	2017	4147	473	4390
1.00%	0.50%	0.50%	2018	4106	470	4368
1.00%	0.50%	0.50%	2019	4065	468	4347
1.00%	0.50%	0.50%	2020	4024	466	4325
1.00%	0.50%	0.50%	2021	3984	463	4303
1.00%	0.50%	0.50%	2022	3944	461	4282
			2023	3927	459	4260
			2024	3911	456	4239
		
0.42%	0.50%	0.50%
		
			2040	3656	421	3912
			2041	3640	419	3893

De seguida calculou-se o preço gasto em energia anualmente, caso não houvesse sistema de produção, e o preço gasto no caso de haver produção de energia, para cada combinação usada de painéis, com e sem turbina. Também se calculou o preço de venda do excedente de energia.

Por fim estão reunidas as condições para ver se efetivamente é viável implementar, atualmente, um sistema destes. O método usado para este cálculo consistiu em ver as poupanças anuais relativamente a um edifício que não possua produção de energia, adicionando o rendimento da venda do excedente de energia. A esta parcela foi subtraído

o custo do investimento inicial e o custo das substituições dos equipamentos. Para uma melhor compreensão, são apresentadas as Equações 4.3 e 4.4 usadas no cálculo.

Para o ano n :

$$Balanço_n = - Investimento + \left(Valor_{compra_s/painel_n} - Valor_{compra_c/painel_n} \right) + Valor_{venda_n} \quad (4.3)$$

Para o ano $n + 1$:

$$Balanço_{n+1} = Balanço_n + \left(Valor_{compra_s/painel_{n+1}} - Valor_{compra_c/painel_{n+1}} \right) + Valor_{venda_{n+1}} - Substituição_{equipamento_{n+1}} \quad (4.4)$$

Desta forma, vão ser apresentados na Tabela 4.7 e 4.8 os casos em que compensa introduzir o sistema produtor, para o edifício com aquecimento e ar condicionado, respetivamente.

No cenário (1), o preço de venda à rede foi considerado o atual, sendo atualizado para os anos seguintes com a taxa calculada anteriormente. O cenário (2) é um caso hipotético de o preço de venda ser metade do valor do preço de compra, para cada ano, atualizado também com a taxa calculada anteriormente. Este segundo cenário foi estudado apenas de modo a tentar rentabilizar ao máximo o sistema.

Na generalidade dos casos apresentados, optar por instalar um sistema deste tipo está longe de ser ideal, pois a poupança que é feita ao longo dos 25 anos de vida útil do sistema é demasiado baixa para o elevado investimento.

No caso de haver só aquecimento, as elevadas discrepâncias verificadas nos casos de Bragança e Faro, vistos na Tabela 4.7 deve-se ao facto de haver um excesso de energia produzida, que vai ser vendida à rede. Esse excesso de energia não consegue ser aproveitado devido ao perfil de utilização não ser compatível com a produção e devido à bateria esgotar a sua capacidade máxima. Com aquecimento só há dois casos favoráveis

economicamente pois, e mesmo esgotando a capacidade da bateria quando há produção, quando há consumo, principalmente nos meses de inverno, esta atinge a capacidade mínima tendo de haver compra de energia da rede.

Tabela 4.7: Poupança a 25 anos [€] - Aquecimento ambiente.

	Caso	Cenário (1)	Cenário (2)
Bragança	10 painéis e bateria	257	1985
Faro	8 painéis e bateria	1510	1934

No caso de haver ar condicionado verifica-se, através da Tabela 4.8, um aumento dos casos favoráveis. Esse aumento deve-se ao facto de o sistema de ar condicionado ter menor potência, no inverno, e apesar de funcionar também no verão, possui um COP elevado que permite obter melhores resultados. Estas como não são muito elevadas, e como a construção usada no edifício favorece a manutenção da temperatura dos espaços, é possível uma melhor gestão da energia, havendo menos energia comprada e menos energia vendida, aumentando assim a rentabilidade do sistema.

Tabela 4.8: Poupança a 25 anos [€] - Aquecimento e arrefecimento ambiente.

	Caso	Cenário (1)	Cenário (2)
Bragança	8 painéis e bateria	1414	1487
Faro	7 painéis e bateria	2323	2325
	8 painéis e bateria	7414	7633
	8 painéis, bateria e turbina	2688	3069
Funchal	8 painéis e bateria	2765	2772
	8 painéis, bateria e turbina	2629	3949
Lisboa	8 painéis e bateria	2719	2832

O gráfico da Figura 4.3 representa o tempo até ter retorno do investimento, de acordo com a Tabela 4.8. Apenas foram inseridos os valores do cenário (2) para melhorar a visualização.

De notar que nas Lajes não surgem casos rentáveis, pois a produção de energia é inferior às restantes localizações, para um consumo semelhante, como é verificado nas Figuras 4.1 e 4.2. As condições meteorológicas menos propícias à produção são a causa, pois em grande parte dos dias a radiação solar encontra-se bloqueada pelas nuvens.

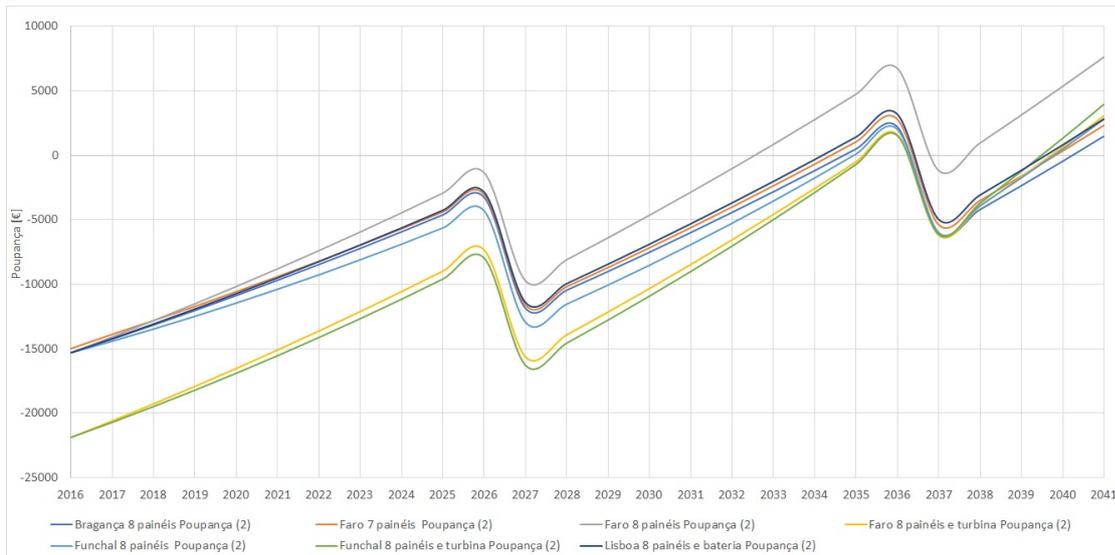


Figura 4.3: Retorno do investimento inicial - aquecimento e arrefecimento ambiente.



Figura 4.4: Relação entre investimento e retorno.

Ainda assim, os casos favoráveis são inferiores ao que seria de esperar. Nestes casos estudados considerou-se que o preço dos equipamentos se manteria inalterado no período considerado de 25 anos, o que na realidade seria difícil de acontecer pois o progresso tecnológico e a investigação nesta área está em crescente, logo, a tendência é que os preços dos equipamentos baixem, nomeadamente o preço das baterias e dos inversores. Assim, foi considerado que nos primeiros 10 anos há uma redução de 35% dos preços dos equipamentos praticados hoje e nos segundos 10 anos há uma redução de 25% do preço anterior, de acordo com Naumann et al. (2015). Um exemplo da folha de cálculo usada encontra-se na Tabela A.2 do Apêndice A, sendo o respectivo gráfico apresentado na Figura 4.4. O caso apresentado contém oito painéis fotovoltaicos e uma bateria.

Procedendo de novo ao cálculo da rentabilidade, agora com o preço dos equipamentos alterado, obtém-se as Tabelas 4.9 e 4.10.

Com este ajuste de custos, a implementação dum sistema de produção de energia nos edifícios residenciais torna-se uma opção muito interessante, havendo vários casos por onde optar, podendo poupar até um máximo de cerca de 19 500€ em 25 anos, caso a habitação esteja localizada em Faro. No entanto, à exceção do Funchal, o sistema apenas deve ser solar, pois a relação custo/benefício da turbina não compensa o investimento.

Tabela 4.9: Poupança a 25 anos [€] - Tabela 4.10: Poupança a 25 anos [€] - Aquecimento ambiente. Aquecimento e arrefecimento ambiente.

	Caso	Cenário (1)	Cenário (2)		Caso	Cenário (1)	Cenário (2)
Bragança	7 painéis e bateria	3575	3578	Bragança	5 painéis e bateria	722	722
	7 painéis, bateria e turbina	521	585		6 painéis e bateria	4997	4997
	8 painéis e bateria	7537	7672		6 painéis, bateria e turbina	2063	2072
	8 painéis, bateria e turbina	3932	4352		7 painéis e bateria	9235	9236
	9 painéis e bateria	10374	11083		7 painéis, bateria e turbina	6253	6286
	9 painéis, bateria e turbina	6067	7349		8 painéis e bateria	13338	13411
	10 painéis e bateria	12181	13909		5 painéis, bateria e turbina	1389	2073
10 painéis, bateria e turbina	7744	10095	6 painéis e bateria	2109	2109		
Funchal	7 painéis, bateria e turbina	971	1984	Funchal	6 painéis, bateria e turbina	4491	5297
	8 painéis e bateria	920	429		7 painéis e bateria	5769	5769
	8 painéis, bateria e turbina	3785	4869		7 painéis, bateria e turbina	7458	8444
Lajes	10 painéis e bateria	2001	2065	8 painéis e bateria	14689	14696	
Faro	5 painéis e bateria	1946	1946	Lajes	8 painéis, bateria e turbina	14552	15873
	6 painéis e bateria	4352	4352		8 painéis e bateria	1918	1919
	6 painéis, bateria e turbina	17	18		9 painéis e bateria	4717	4728
	7 painéis e bateria	8256	8277		9 painéis, bateria e turbina	1045	1060
	7 painéis, bateria e turbina	3289	3360		10 painéis e bateria	7450	7507
	8 painéis e bateria	13434	13857		10 painéis, bateria e turbina	3765	3833
	8 painéis, bateria e turbina	8551	9199		5 painéis e bateria	7358	7358
Lisboa	6 painéis e bateria	528	528	Faro	5 painéis, bateria e turbina	390	390
	7 painéis e bateria	4938	4948		6 painéis e bateria	9766	9766
	8 painéis e bateria	8952	9150		6 painéis, bateria e turbina	5433	5433
	8 painéis, bateria e turbina	3014	3273		7 painéis e bateria	14247	14248
				7 painéis, bateria e turbina	9454	9474	
				8 painéis e bateria	19337	19557	
				8 painéis, bateria e turbina	14614	14993	
				Lisboa	5 painéis e bateria	1580	1580
					6 painéis e bateria	6017	6017
					6 painéis, bateria e turbina	223	223
					7 painéis e bateria	10438	10441
					7 painéis, bateria e turbina	4637	4644
					8 painéis e bateria	14642	14756
					8 painéis, bateria e turbina	8742	8898

Como no Funchal há uma elevada disponibilidade de vento, foi realizado um exercício de modo a tentar aproveitar esse fator: foi acrescentado um veículo elétrico, com uma bateria de 75 kWh de capacidade e que carrega durante a noite (10 horas a 3.375 kWh), todos os dias. Na Tabela 4.11 comparam-se os resultados obtidos com o mesmo caso sem o veículo.

Tabela 4.11: Comparação entre a energia vendida - exercício com veículo elétrico.

Cenário	Energia [kWh]		
	Comprada	Vendida	Consumida
8 painéis, bateria e turbina	1663	786	6044
8 painéis, bateria, turbina e Tesla Model S	13862	287	18739

Consegue-se fazer o aproveitamento de 500 kWh por ano, pelo que a restante energia que é vendida é produzida durante o dia, com a bateria totalmente carregada e sem uso de equipamentos elétricos, ou com esse uso satisfeito.

5. Conclusão

O aproveitamento dos recursos naturais para a produção de energia é uma boa solução para atingir as metas definidas pela UE relativamente ao consumo energético.

Este tipo de ferramentas desenvolvidas de geração e otimização de plantas incorporando *software* de simulação dinâmica podem também contribuir para alcançar essas metas, na medida em que os edifícios gerados cumprem os requisitos energéticos definidos. Estas ferramentas não tem como objetivo substituir o trabalho dos arquitetos e engenheiros mas sim complementá-lo e auxiliá-lo na tomada de decisão na fase inicial do projeto, sendo que a experiência e bom senso destes profissionais não poderá ser substituída por um programa computacional.

De referir que o trabalho desenvolvido é a base para o algoritmo de otimização e no futuro vai ser possível otimizar o dimensionamento do sistema de produção de energia, alterando a orientação, inclinação, número de painéis, necessidade ou não de armazenamento, etc., de acordo com os perfis de utilização e com a produção, de uma forma automática.

Este tipo de estudo realizado pode ser adaptado a outras localizações e pode-se personalizar todas as variáveis de acordo com a construção do edifício, perfis de utilização, equipamentos, entre outros, desejado pelo utilizador, obtendo assim os resultados para cada caso individual.

O estudo realizado permitiu perceber que, na generalidade das habitações, em que o consumo energético durante o dia é muito reduzido, atualmente um sistema deste tipo só compensará assumindo os pressupostos usados na análise económica pois, e como na maioria dos casos a poupança a 25 anos não ultrapassa os 2800€, para o caso de haver aquecimento e arrefecimento ambiente, a poupança toma um valor bastante reduzido quando comparado com o investimento.

No caso de haver a transição para o cenário real de diminuição dos preços dos equipamentos, havendo aquecimento ambiente, as soluções mais rentáveis passam por inserir 10 painéis em Bragança e nas Lajes e oito painéis nas restantes localizações, com o Funchal a ter também a incorporação de uma turbina. As poupanças vão de cerca de 2000€ para as Lajes até um máximo de cerca de 13400€ em Faro, sendo os cenários mais promissores os de Bragança e Faro.

Havendo aquecimento e arrefecimento ambiente, a rentabilidade aumenta, chegando a ser três vezes superior no caso do Funchal e das Lajes, para a mesma opção de equipamento. As soluções mais rentáveis apresentam oito painéis, à excepção do Funchal que incorpora também uma turbina e das Lajes que apresenta 10 painéis. Verifica-se uma poupança de cerca de 7400€ nas Lajes e um máximo de cerca de 19300€ em Faro, com todos os cenários à excepção das Lajes a serem bastante promissores.

Numa tentativa de aumentar a implementação destes sistemas, deveriam ser dados incentivos económicos a quem instalasse um sistema de produção, como aconteceu no passado. Por exemplo, o preço de venda poderia ser alterado para o preço de venda usado do cenário (2) da análise económica. Assim, poderia haver a conjugação do número de painéis e inclusão de turbina entre produção para autoconsumo e produção para venda, de modo a tornar o sistema mais rentável. No entanto, para tal situação acontecer, teriam de ser revistas as regulamentações o que torna esse caso difícil de acontecer. Ainda assim, e numa perspectiva de trabalhos futuros, seria interessante analisar este tipo de situação, em que se conjuga os painéis para autoconsumo e para venda, em vez do caso analisado em que o principal objetivo era o autoconsumo.

Seria também interessante ajustar o sistema de produção aos consumos existentes, isto é, localizar os painéis em diferentes pontos do edifício (telhado, fachada, etc.) e com diferentes orientações de modo a produzir energia apenas de acordo com o perfil de uso.

Referências Bibliográficas

- Al-Homoud, M. S. (2001), ‘Computer-aided building energy analysis techniques’, *Building and Environment* **36**(4), 421–433.
- Berkeley Lab (2016a), *EnergyPlus - Getting Started*.
URL: <http://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-7/getting-started/getting-started-with-energyplus.html>
- Berkeley Lab (2016b), *EnergyPlus - Input Output Reference*.
URL: <http://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-7/input-output-reference/>
- Bernardo, A. (2017), Modelação de sistemas AVAC para software de avaliação e desempenho em contexto pré-projeto, Dissertação de mestrado em engenharia mecânica na especialidade de energia e ambiente, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Bertoldi, P., López Lorente, J. & Labanca, N. (2016), *Energy Consumption and Energy Efficiency Trends in the EU-28 2000-2014*.
- Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de Agosto do Ministério da Economia e do Emprego (2013).
- Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013, do Decreto - Lei n.º 118/2013 (2013).
- Dimitropoulos, J. & Sorrell, S. (2006), ‘The rebound effect: Theoretical basis, extensions and limitations.’, *29th IAEE International Conference*.
- Directiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de Dezembro de 2002 relativa ao desempenho energético de edifícios (2003).
- Directiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação) (2010), pp. 13–35.
- Fallis, A. (2013), ‘2016 Implementing the energy performance of’, *Journal of Chemical Information and Modeling* **53**(9), 1689–1699.
- Frondel, M. (2004), ‘Guest editorial: Energy conservation, the rebound effect, and future energy and transport technologies: An introduction to energy conservation and the rebound effect’, *International Journal of Energy Technology and Policy* **2**(3), 203–208.
- Gamas, E., Rodrigues, E. & Gaspar, A. R. (2017), ‘EnergyPlus Input Data Files used to test renewable energy systems in five different climate regions of Portugal.’.
URL: <http://goo.gl/hJi9EC>

GeoModel Solar (2017), ‘Disponibilidade solar na Europa’. Acedido em 27-07-2017.

URL: <http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/download/europe>

Greening, L. A., Greene, D. L. & Difiglio, C. (2000), ‘Energy efficiency and consumption - the rebound effect - a survey’, *Energy Policy* **28**(6-7), 389–401.

Internacional Energy Agency (2016a), Energy Efficiency Indicators Highlights, Technical report.

Internacional Energy Agency (2016b), Energy Efficiency Market Report, Technical report.

Naumann, M., Karl, R. C., Truong, C. N., Jossen, A. & Hesse, H. C. (2015), ‘Lithium-ion battery cost analysis in PV-household application’, *Energy Procedia* **73**, 37–47.

URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.555>

Patterson, M. G. (1996), ‘What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues’, *Energy Policy* **24**(5), 377–390.

PORDATA (2017), ‘Preços da electricidade para utilizadores domésticos e industriais (Euro/ECU)’. Acedido em 31-07-2017.

URL: [http://www.pordata.pt/Europa/Preços+da+electricidade+para+utilizadores+domésticos+e+industriais+\(Euro+ECU\)-1477](http://www.pordata.pt/Europa/Preços+da+electricidade+para+utilizadores+domésticos+e+industriais+(Euro+ECU)-1477)

Portaria n.º 379-A/2015 de 22 de Outubro do Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia (2015).

Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013 da Presidência do Conselho de Ministros (2013).

Rodrigues, E., Gaspar, A. R. & Gomes, Á. (2013a), ‘An approach to the multi-level space allocation problem in architecture using a hybrid evolutionary technique’, *Automation in Construction* **35**, 482–498.

URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2013.06.005>

Rodrigues, E., Gaspar, A. R. & Gomes, Á. (2013b), ‘An evolutionary strategy enhanced with a local search technique for the space allocation problem in architecture, Part 1: Methodology’, *CAD Computer Aided Design* **45**(5), 887–897.

URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2013.01.001>

Rodrigues, E., Gaspar, A. R. & Gomes, Á. (2014), ‘Improving thermal performance of automatically generated floor plans using a geometric variable sequential optimization procedure’, *Applied Energy* **132**, 200–215.

Soares, N., Bastos, J., Pereira, L. D., Soares, A., Amaral, A., Asadi, E., Rodrigues, E., Lamas, F., Monteiro, H., Lopes, M. & Gaspar, A. (2017), 'A review on current advances in the energy and environmental performance of buildings towards a more sustainable built environment', *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **77**(February 2016), 845–860.

URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117305270>

Statistical Office of the European Communities (2016), Smarter, greener, more inclusive? Indicators to support the Europe 2020 Strategy, Technical report.

Tamrakar, V., Gupta, S. C. & Sawle, Y. (2015), 'Single-Diode Pv Cell Modeling and Study of Characteristics of Single and Two-Diode Equivalent Circuit', *An International Journal (ELELIJ)* **4**(3), 13–24.

A. Análise económica

Tabela A.1: Previsão dos preços de compra e venda da energia.

Ano	Compra	Venda (1)	Venda (2)
	€/kWh		
2017	0.2419	0.0400	0.1210
2018	0.2491	0.0412	0.1246
2019	0.2565	0.0424	0.1282
2020	0.2641	0.0437	0.1320
2021	0.2719	0.0449	0.1359
2022	0.2799	0.0463	0.1400
2023	0.2882	0.0476	0.1441
2024	0.2967	0.0491	0.1484
2025	0.3055	0.0505	0.1527
2026	0.3145	0.0520	0.1573
2027	0.3238	0.0535	0.1619
2028	0.3334	0.0551	0.1667
2029	0.3433	0.0567	0.1716
2030	0.3534	0.0584	0.1767
2031	0.3639	0.0602	0.1819
2032	0.3746	0.0619	0.1873
2033	0.3857	0.0638	0.1928
2034	0.3971	0.0657	0.1986
2035	0.4088	0.0676	0.2044
2036	0.4209	0.0696	0.2105
2037	0.4334	0.0716	0.2167
2038	0.4462	0.0738	0.2231
2039	0.4594	0.0759	0.2297
2040	0.4730	0.0782	0.2365
2041	0.4870	0.0805	0.2435

Tabela A.2: Valores de amortização do investimento.

		Bragança	Faro	Funchal	Lajes	Lisboa
Cenário (2)	2016	-12001	-12001	-12001	-12001	-12001
	2017	-10935	-10766	-11102	-11257	-10900
	2018	-9840	-9498	-10162	-10495	-9768
	2019	-8716	-8196	-9178	-9712	-8606
	2020	-7561	-6858	-8153	-8910	-7413
	2021	-6375	-5485	-7082	-8088	-6188
	2022	-5157	-4074	-5966	-7246	-4929
	2023	-3906	-2626	-4803	-6384	-3637
	2024	-2622	-1138	-3593	-5500	-2310
	2025	-1302	389	-2332	-4595	-947
	2026	48	1958	-1020	-3668	453
	2027	-5066	-2931	-6156	-9218	-4609
	2028	-3647	-1276	-4736	-8245	-3137
	2029	-2194	423	-3260	-7248	-1628
	2030	-704	2168	-1726	-6227	-82
	2031	822	3955	-132	-5181	1502
	2032	2384	5787	1525	-4109	3124
	2033	3986	7665	3245	-3011	4786
	2034	5626	9588	5032	-1887	6489
	2035	7306	11558	6886	-735	8233
	2036	9028	13576	8811	446	10020
2037	5916	10769	5934	-3220	6975	
2038	7722	12887	8006	-1981	8851	
2039	9573	15057	10156	-713	10772	
2040	11469	17280	12385	587	12740	
2041	13411	19557	14696	1919	14756	

