



André Filipe da Silva

**Simulação dinâmica de edifícios integrando
sistemas BIPV**



André Filipe da Silva

Simulação dinâmica de edifícios integrando sistemas BIPV

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de Nelson Amadeu Dias Martins, do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

O júri / The jury

Presidente / President

Prof. Doutor Fernando José Neto da Silva

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Prof. Doutor Nelson Amadeu Dias Martins

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro (orientador)

Prof. Doutor Romeu da Silva Vicente

Professor Auxiliar da Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Agradecimentos / Acknowledgements

Começo por expressar o meu agradecimento ao meu orientador científico o Professor Doutor Nelson Martins pela orientação, diálogo e sugestões importantes no desenvolvimento desta dissertação.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica e à Universidade de Aveiro pelo acolhimento e condições disponibilizadas durante esta fase tão importante da minha vida pessoal. A todos com quem me cruzei a nível educacional e profissional, o meu obrigado pela disponibilidade e competência demonstrada.

Ao NEEMec-AAUAV e a todos os meus colegas pela oportunidade que me concederam de trabalhar e coordenar este núcleo que proporciona a união e desenvolve trabalho em função da comunidade académica do curso. A eles um obrigado também pelas vivências e amizades que me possibilitaram.

À cidade e Universidade de Maribor que me acolheu durante o meu programa Erasmus pelas condições e experiências que me proporcionaram. Aos amigos que conheci em Erasmus e que me ajudaram a viver essa grande experiência. E aqui, um agradecimento especial à minha amiga Daniela pela Amizade, pelo companheirismo e força que me transmitiu durante esse e outros períodos da minha vida, a ela um bem haja.

À CRITICAL KINETICS, por me ter dado a oportunidade de trabalhar na área da minha dissertação e pelos conhecimentos e competências que me proporcionou. Aos meus colegas, que comigo na empresa diariamente trabalham, pelo companheirismo, amizade, apoio e motivação durante este período.

Aos meus fantásticos amigos que me acompanharam nesta caminhada, pela amizade, companheirismo, apoio, confiança e carinho que me proporcionaram e que fazem também de mim aquilo que sou hoje.

À Emília, pelo carinho e amor, pela cumplicidade e pela motivação que me transmitiu durante a realização deste trabalho.

À minha família, em especial aos meus Pais aos quais quero agradecer do fundo meu coração pela oportunidade que me concederam e por todo o amor, apoio e educação que sempre me dão.

A todos um muitíssimo obrigado!

Palavras-chave

BIPV; Fotovoltaico; NZEB; Balanço Energético; Climatização; Autoconsumo

Resumo

O desenvolvimento económico resultou num aumento do consumo de energia primária, sendo o setor dos edifícios um dos maiores consumidores a nível europeu. A União Europeia tem vindo a propor medidas que obrigam este setor a melhorar o seu desempenho energético. Para tal, desenvolveram-se políticas energéticas e diretivas comunitárias de eficiência energética nas quais se pode enquadrar a produção de energia de forma local e descentralizada. A EPBD revista, publicada em 2010, veio obrigar os estados membros (incluindo Portugal) a tomar medidas. Algumas dessas medidas obrigam a que os edifícios comecem a tornar-se *Net Zero Energy Buildings* a partir de 2018, podendo a tecnologia genericamente designada por *Building Integrated Photovoltaic* ser uma solução viável para atingir essas metas.

A presente dissertação pretende compreender qual o efeito que a integração de painéis fotovoltaicos na fachada opaca vertical tem nos consumos do sistema de climatização de um edifício de serviços em Portugal, no contexto da reabilitação urbana. Para cumprir este objetivo foi necessário compreender qual o software de simulação que faz a simulação dinâmica e ao mesmo tempo a simulação de produção do sistema fotovoltaico. Este ponto torna-se fundamental para provar se o sistema fotovoltaico tem uma influência positiva ou negativa nos consumos do sistema de AVAC do edifício e qual pode ser a melhor espessura de isolamento para uma situação de *BIPV*.

No desenvolvimento do trabalho recorreu-se às ferramentas de simulação *Design Builder* e *Energy Plus*. Para estudar o problema considerou-se uma fração autónoma de um edifício com vários andares, estando este localizado em diversos pontos do país: Bragança, Porto, Lisboa e Faro. Inicialmente efetuou-se um estudo para cada localização, de forma a compreender quais as que representavam situações mais críticas, quer na estação de inverno, quer na de verão. Após este estudo, analisaram-se quais os efeitos que o perfil de utilização do edifício e espessura de isolamento teriam nos consumos do sistema de AVAC dessas situações consideradas críticas, mais concretamente em Bragança e Faro.

No final do estudo, através da criação de um indicador, constatou-se que o sistema fotovoltaico, ainda que exerça influência nos consumos da climatização, é benéfico na globalidade para o balanço energético do edifício. Contudo, é importante compreender que a inclinação de 90° não é muito favorável em termos de produção de energia, principalmente no verão, podendo estudar-se futuramente numa solução fotovoltaica que tenha um comportamento melhor à radiação difusa.

Keywords

BIPV; Photovoltaic; NZEB; Energy Buildings; Self-consumption; HVAC and Phovoltaic

Abstract

The economic development occasioned a large intensification of energy consumption; in Europe, buildings are pointed as great responsible for this increase. European Union has, therefore, start proposing actions to implement improvements in the energetic balance of buildings. For that, the EU has developed energy policies and directives of energy efficiency for local and decentralized energy production. The most important document is EPBD recast of 2010 that stated that every member countries had to improve their regulations and policies. In what concerns to Portugal, those actions required that service buildings should start to be converted in Net Zero Energy Building until 2018. Technologies such as Building Integrated Photovoltaic present themselves as good solutions to achieve these goals.

This master thesis intends to comprehend how HVAC service consumption is affected by the photovoltaic integration on vertical opaque façade, inserted in urban renewal. To accomplish this goal is necessary to find proper software to perform a dynamic simulation that, at the same time, is able to evaluate the energy production of photovoltaic. This is fundamental to verify if the influence of photovoltaic is positive or negative in the HVAC consumption and, therefore, understand which thermal insulation is best suitable for BIPV technology.

The software used to perform simulations was Design Builder and Energy Plus. The simulation was accomplished by means of a test cell with both adiabatic floor and roof to simulate an isolated building with several floors that would be located in different areas of Portugal from north to south. After the location study, the user profile and the thermal insulation thickness was analyzed, as an attempt to understand which effects they cause in HVAC consumption of BIPV.

Despite the adverse effect of inclination in the production of energy was proved through an indicator that for the energetic balance of BIPV is advantageous. Nevertheless, the 90° of inclination is not very encouraging for energy production, mainly during summer. In the future, is important to study a solution with other photovoltaic technology with a better behavior to diffuse radiation.

Conteúdo

Lista de Tabelas	iii
Lista de Figuras	vi
Lista de Símbolos e Acrónimos	vii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.1.1 Energia solar Fotovoltaica no panorama Europeu	1
1.1.2 A Energia Solar Fotovoltaica	3
1.1.3 O Conceito BIPV	4
1.2 Objetivos	5
1.3 Revisão Bibliográfica	5
1.3.1 <i>Sistemas fotovoltaicos integrados na envolvente de edifícios</i>	5
1.3.2 Cogeração associada a tecnologia BIPV	9
1.3.3 Análise aos materiais BIPV	13
1.3.4 Ferramentas de Simulação	14
1.4 Síntese da Revisão Bibliográfica	17
1.5 Contributo da dissertação	18
1.6 Estrutura do documento	18
2 Tecnologia BIPV	21
2.1 Energia Solar	21
2.1.1 Movimento e ângulos solares	22
2.1.2 Penalizações por Sombreamento	23
2.1.3 Arquitetura Bioclimática	24
2.2 Tecnologia BIPV	25
2.2.1 Tipologia de instalação BIPV	25
2.2.2 Módulos Fotovoltaicos	26
2.2.3 Tecnologia BIPV associada à reabilitação urbana	28
2.3 Regulamentação e legislação	29
2.3.1 Autoconsumo Fotovoltaico e Net Metering	29
2.3.2 Regulamentação Energética	31
2.4 Síntese do Capítulo	33

3	Interação da instalação BIPV com a Climatização	35
3.1	Caraterização detalhada do problema nas suas diversas vertentes	35
3.1.1	Mecanismos de transmissão de Calor através da Envolvente	36
3.2	Simulação dinâmica e ferramenta a utilizar	38
3.2.1	Análise da ferramenta de simulação a utilizar	38
3.3	Síntese do capítulo	41
4	Análise quantitativa recorrendo a modelo computacional	43
4.1	Modelo de Simulação da célula teste virtual	43
4.1.1	Perfis de utilização de referência dos edifícios	43
4.1.2	Ganhos Internos	45
4.1.3	Renovações de ar interior	45
4.1.4	Sistema de climatização	46
4.1.5	Caraterização da célula teste virtual	47
4.1.6	Caraterização do Sistema Fotovoltaico	49
4.1.7	Dados Climáticos	51
4.1.8	Abordagem ao problema	51
4.2	Avaliação qualitativa da célula teste virtual	53
4.3	Síntese do capítulo	59
5	Estudo paramétrico e análise de resultados	61
5.1	Sumário do Capítulo	61
5.2	Estudo da influência da localização da instalação	61
5.2.1	Lisboa	61
5.2.2	Porto	63
5.2.3	Bragança	65
5.2.4	Faro	67
5.3	Estudo da influência do perfil de utilização do edifício	69
5.3.1	Análise ao perfil de utilização do edifício <i>BIPV</i> de Faro	70
5.3.2	Análise ao perfil de utilização do edifício <i>BIPV</i> de Bragança	70
5.4	Estudo da influência do nível de isolamento da envolvente	73
5.4.1	Análise ao isolamento térmico do edifício <i>BIPV</i> de Faro	74
5.4.2	Análise ao isolamento térmico do edifício <i>BIPV</i> de Bragança	76
5.5	Síntese do Capítulo	79
6	Conclusão	81
6.1	Sugestão para desenvolvimento futuro	83
A	Anexos	89

Lista de Tabelas

1.1	Taxas de eficiência das diferentes tecnologias PV	14
3.1	Parâmetros de entrada e de saída de uma simulação em Energy Plus	39
4.1	Ganhos internos considerados no modelo de simulação [5][22]	45
4.2	Classificação do desempenho energético das unidade de tipo <i>chiller</i>	47
4.3	Solução construtiva da parede exterior da célula teste virtual	48
4.4	Estratigrafia do Painel Fotovoltaico e propriedades.	50
4.5	Características elétricas do painel fotovoltaico [10]	50
4.6	Critérios para a determinação da zona climática de inverno [32].	51
4.7	Critérios para a determinação da zona climática de verão [32].	51
5.1	Indicador I_{BIPV} para as diferentes localizações	68
5.2	Densidade e perfil de ocupação para edifícios de Faro e Bragança	70

Lista de Figuras

1.1	Gráfico do mercado energético mundial [17]	1
1.2	Gráficos com a eletricidade produzida na Europa em 1990 e 2009 [20]	2
1.3	Energia Consumida e CO ₂ emitido na UE em 2009 [20]	3
1.4	Módulo duplo envidraçado com filme fino (a-Si). [44]	6
1.5	Disposição dos sistema BIPV. [44]	6
1.6	Soluções construtivas de um NZEB em Lisboa [16]	7
1.7	Esquema do sistema BIPV em sombreamento. [45]	8
1.8	Esquema dos quatro sistemas BIPV em telhado. [47]	10
1.9	Esquemática da configuração 1 [35]	11
1.10	Esquemática da configuração 2 [35]	11
1.11	Esquemática da configuração 3 [35]	12
1.12	Esquemática das configurações simuladas por Kim et. al. [25]	13
1.13	Mercado BIPV [14]	14
1.14	Utilização dos elementos em instalações BIPV [14]	15
1.15	Classificação de dez software de simulação dinâmica de edifícios [12]	16
2.1	Esquema percentual de radiação direta, difusa e albedo [38].	22
2.2	Mapas de radiação solar da Europa e Portugal [17].	22
2.3	Declinação Solar. [1]	23
2.4	Integração fotovoltaica em cobertura [42]	26
2.5	Integração em cobertura por intermédio de telhas fotovoltaicas [28]	26
2.6	Integração fotovoltaica em fachada vertical [27]	27
2.7	Integração em vão envidraçado do fabricante [27]	27
2.8	Composição mais comum de um módulo fotovoltaico [43]	28
2.9	Autoconsumo sem acumulação [3]	30
2.10	Autoconsumo com acumulação em baterias [3]	30
2.11	Impacto da EPBD de 2002 na classe energética dos edifícios [2]	32
2.12	Impacto da EPBD de 2002 na classe energética dos edifícios [2]	32
3.1	Caraterização do balanço térmico de um edifício [18].	36
3.2	Diagrama representativo da simulação dinâmica	40
4.1	Perfil percentual de ocupação	44
4.2	Perfil percentual de utilização de equipamentos	44
4.3	Perfil percentual de utilização da iluminação	44
4.4	Concentração média de CO ₂ baseada no perfil de ocupação do espaço. [8]	46
4.5	Renovações de ar por hora da célula teste virtual [7]	47
4.6	Exposição solar conforme a orientação e período do dia. [30]	48

4.7	Representação da célula teste virtual	49
4.8	Representação da célula como instalação BIPV	49
4.9	Zonamento climático português [32]	52
4.10	Validação da célula teste virtual através da ocupação	54
4.11	Consumo com o aquecimento num dia tipicamente de inverno	54
4.12	Consumo com o aquecimento num dia tipicamente de Verão	55
4.13	Taxa de condução de calor através da envolvente	55
4.14	Variação da taxa de ganhos solares através da fração envidraçada.	56
4.15	Variação dos consumos elétricos com os sistemas de climatização.	57
4.16	Comparação da produção fotovoltaica entre <i>Energy Plus</i> e Pvsyst	58
4.17	Comparação da produção fotovoltaica entre o método <i>Simple</i> e o Pvsyst	58
4.18	Desvio absoluto e percentual da produção de energia	59
5.1	Comparação dos consumos do sistema de AVAC em Lisboa	62
5.2	Consumos de AVAC e produção de energia em Lisboa	62
5.3	Comparação dos consumos do sistema de AVAC no Porto	63
5.4	Consumos de AVAC e produção de energia no Porto	64
5.5	Comparação dos consumos do sistema de AVAC em Bragança	65
5.6	Consumos de AVAC e produção de energia em Bragança	66
5.7	Comparação dos consumos do sistema de AVAC em Faro	67
5.8	Consumos de AVAC e produção de energia em Faro	67
5.9	Consumos de AVAC e produção de energia consoante a localização	68
5.10	Indicador I_{BIPV} referente à avaliação da influência da localização	69
5.11	Comparação percentual referente ao consumo de AVAC consoante o local	69
5.12	Consumos de AVAC consoante a ocupação em Faro	71
5.13	Comparação percentual dos consumos de AVAC em Faro	71
5.14	Consumos de AVAC consoante a ocupação em Bragança	72
5.15	Diferença percentual dos consumos de AVAC em Bragança	72
5.16	Diferença percentual dos consumos de AVAC variando o perfil de utilização	73
5.17	Consumos de AVAC consoante o isolamento em Faro	74
5.18	Diferença percentual dos consumos de AVAC com a isolamento em Faro	75
5.19	Consumos de AVAC consoante o isolamento em Bragança	76
5.20	Diferença percentual dos consumos de AVAC com o isolamento, Bragança	77
5.21	Indicador I_{BIPV} consoante o isolamento em Bragança e Faro	77
5.22	Diferença percentual nos consumos dos edifícios consoante o isolamento	78
A.1	Comparação do consumo do sistema de climatização em função localização	89
A.2	Peso relativo do sistema de aquecimento em Bragança	90
A.3	Peso relativo do sistema de arrefecimento em Bragança	90
A.4	Peso relativo do sistema de aquecimento em Faro	91
A.5	Peso relativo do sistema de arrefecimento em Faro	91

Lista de Símbolos e Acrónimos

A_{disp}	Área de fachada disponível para a instalação da tecnologia BIPV [m^2]
A_{pv}	Área de Superfície de um painel fotovoltaico [m^2]
A_s	Área de Superfície [m^2]
A_{surf}	Área de superfície [m^2]
A-si	Silício Amorfo
AVAC	Ar, Ventilação e Ar Condicionado
BAPV	Building Applied Photovoltaic
BIPV	Building Integrated Photovoltaic
BIPV/T	Building Integrated Photovoltaic / Thermal System
CdTe	Telureto de Cádmio
CIS	Seleneto de Cobre Índio
COP	Coefficient of Performance
CO_2	Dióxido de Carbono
$E_{BOS,E}$	Energia requerida pelo sistema, incluindo estruturas, equipamentos elétricos e baterias
$E_{LCAoutput}$	Totalidade de energia produzida pela instalação durante o seu ciclo de vida
E_{input}	Energia primária consumida durante conceção e ciclo de vida do fotovoltaico
E_{output}	Energia primária poupada devido à produção fotovoltaica
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
EPBT	Energy Payback Time
EPIA	European Photovoltaic Industry Association
EPS	Expanded polystyrene
f_{activ}	Fração da área de superfície com células fotovoltaicas
FiT	Feed-in Tarif
GD	Graus-dia [$^{\circ}C.dia$]
GHG	Greenhouse Gas Emission Rate
GHG_{BOS,E}	Emissões de gases pelos equipamentos elétricos
GHG_{PV}	Emissões de gases pelos painéis fotovoltaicos
G_T	Radiação Solar total incidente no sistema fotovoltaico [W/m^2]
I_{BIPV}	Indicador de valorização da instalação BIPV
IDF	Input Data File
k	Condutibilidade Térmica [W/m^2K]
LCA	Life Cycle Assessment
mono-si	Silício monocristalino
MPP	Ponto de máxima potência da curva IV do módulo fotovoltaico
NZEB	Near Zero Energy Building
P	Potência elétrica produzida pelo sistema fotovoltaico [W]
PCM	Phase Change Material

poli-si	Silício policristalino
P_{pico}	Potência total a instalar de painéis fotovoltaicos [W]
P_{pv}	Potência do painel fotovoltaico [W]
PV	Fotovoltaico
$q''_{ko}(t)$	Fluxo de calor que atravessa um determinado elemento opaco
Q_{cond}	Calor transferido por condução [W]
Q_{conv}	Calor transferido por convecção [W]
Q_i	Ganhos internos [W]
Q_{rad}	Calor transferido por radiação [W]
Q_S	Ganhos solares [W]
Q_T	Trocas de calor por condução através da envolvente [W]
Q_V	Trocas de calor por renovação de ar [W]
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
RECS	Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios de Comércio e Serviços
rph	Renovações por hora [h^{-1}]
SCE	Sistema de Certificação Energética dos Edifícios
T	Temperatura absoluta [K]
T_s	Temperatura de superfície [K]
T_∞	Temperatura do fluido [K]
U	Coefficiente de transmissão térmica [$W/(m^2.K)$]
U_{opaco}	Coefficiente de transmissão térmica da envolvente opaca [$W/(m^2.K)$]
UE	União Europeia
ZEB	Zero Emission Building
$\frac{dT}{dx}$	Gradiente de temperatura
ε	Emissividade
σ	Constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W/(m^2.K^4)$
η_{cell}	Eficiência do módulo fotovoltaico
η_{invert}	Eficiência de conversão de corrente contínua para corrente alternada
$\theta_{ext,v}$	Temperatura média exterior na estação de verão em Portugal
α	Radiação absorvida
ρ	Radiação refletida
τ	Radiação transmitida
®	Marca Registada

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

Nas últimas décadas, verificou-se um aumento dos problemas energéticos mundiais associado ao consumo de energia primária e do respetivo impacto ambiental, devido às emissões de CO₂. O *International Energy Outlook 2009* previu um crescimento global do mercado energético na ordem dos 44% entre 2006 e 2030, informação suportada pelo gráfico da figura 1.1 [17]. O crescimento do mercado energético aumentou o nível de utilização dos combustíveis fósseis, mas também das energias renováveis para produção de energia primária. Estas tiveram uma crescente aceitação social e os esforços políticos foram, para isso, cruciais, tanto em divulgação quanto em implementação. Nesta conjuntura, a União Europeia (UE) estabeleceu várias metas a atingir em termos energéticos para os países membros, nomeadamente através do programa para a Energia e Alterações Climáticas, desingado por metas "20 – 20 – 20"[21] . Este programa pretendeu estabelecer metas para: redução das emissões de CO₂ de 20%, redução de consumo de energia em 20% e uma quota de renováveis também de 20% . De forma a cumprir os objetivos, a energia solar fotovoltaica, no que concerne aos edifícios, ganhou maior importância.

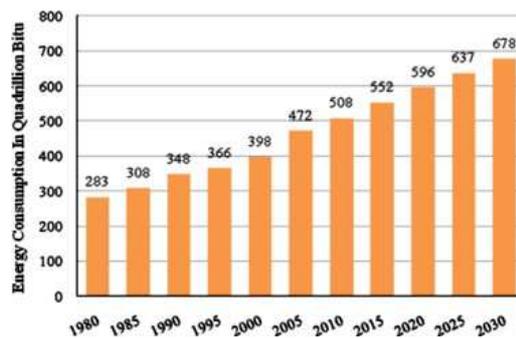


Figura 1.1: Gráfico do mercado energético mundial [17]

1.1.1 Energia solar Fotovoltaica no panorama Europeu

As exigências Europeias na utilização de energia elétrica produzida através de combustíveis fósseis, exigem, no futuro, um consumo mais moderado dos mesmos. A dependência

destes combustíveis para a produção de energia está representada no gráfico da figura 1.2 presente no relatório de 2011, elaborado pela União Europeia (UE) 1.2 [20]. Este cenário exigiu uma reformulação do sistema energético atual, onde se verificava uma utilização em grande escala destes combustíveis, facto que levou ao aumento do efeito estufa no planeta. Assim, foi exigida uma mudança de mentalidades sociais e políticas que vem sendo verificada na UE pelas metas traçadas para 2020, referidas anteriormente 1.1. Vários estudos analisaram os diversos setores de mercado na Europa. Um deles, reportado em um relatório da UE [20], verificou que os edifícios, quer a nível residencial, quer de serviços ou industrial, são, na sua globalidade, aqueles que mais energia dispendem e CO₂ emitem, como se pode observar nos gráficos seguintes. Desta forma, este setor impôs uma maior urgência de atuação, principalmente através do melhoramento da eficiência energética, com a redução de consumos e diminuição das emissões de CO₂. As normas europeias, com a publicação da EPBD legislaram a favor da sustentabilidade energética dos edifícios, pressupondo também a implementação de energias renováveis no conceito construtivo.

A promoção política das energias renováveis utilizou vários programas de incentivo à instalação destes sistemas. Os programas mais utilizados são o *Feed-in tariff (FiT)*, o *Green Certificate* entre outros programas de incentivo fiscal ou de suporte para investimentos [39]. O principal programa de entre os já referenciados, é o *FiT*, que pressupõe a oferta de contratos a longo prazo com preços fixos para a energia produzida, oferecendo, assim, garantia compensatória ao longo dos anos. Analisando concretamente a energia fotovoltaica é, atualmente, a Alemanha o país com mais potência instalada no Mundo. [39][41]. Na Europa, existem ainda outros grandes mercados com muita potência fotovoltaica instalada, caso da Espanha, que, neste momento, não permite o consumo de eletricidade produzida, sendo toda ela vendida à rede. Também em Itália se triplicou a potência instalada em 2009 e, em 2010, se duplicou. Contudo, nestes países, o crescimento não será tão acentuado como em países como Suíça, Portugal e Bulgária que são vistos como mercados mais atrativos, oferecendo excelentes condições e contrapartidas para os interessados. A Suíça é o país que oferece melhores condições, prevendo, dessa forma, um crescimento da energia gerada por meio de painéis fotovoltaicos em 30% até 2030. Portugal e Bulgária são países com excelente exposição solar e que também apresentam contrapartidas vantajosas para os consumidores. Em outros países como Bélgica, Polónia, Roménia e Reino Unido os *Green Certificate* são muito bem aceites pelos cidadãos que não desejam ter custos com a eletricidade [39].

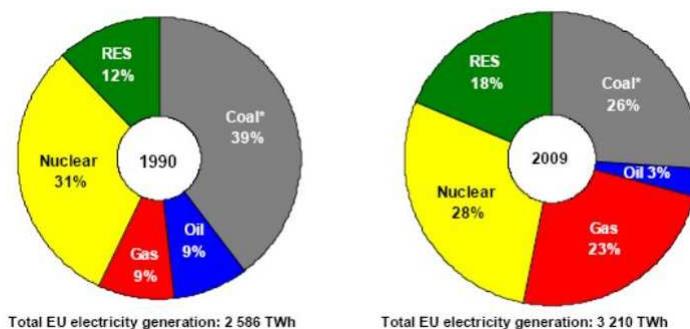


Figura 1.2: Gráficos com a eletricidade produzida na Europa em 1990 e 2009 [20]

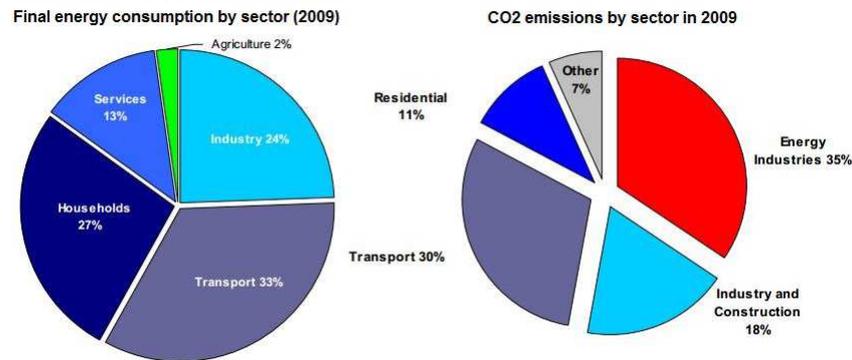


Figura 1.3: Gráficos da Energia consumida e do CO₂ emitido na União Europeia em 2009 [20]

1.1.2 A Energia Solar Fotovoltaica

A tecnologia fotovoltaica consiste no aproveitamento da energia fornecida pelo sol, sendo os painéis fotovoltaicos os recetores da radiação solar, transformando esta energia em eletricidade. No entanto, a eficiência dos painéis ainda é diminuta e muito dependente da temperatura de superfície dos mesmos, considerando-se temperaturas ideais para um bom rendimento situadas entre os 20°C e os 30°C.

A energia solar, é uma fonte tremendamente capaz, e, segundo alguns estudos, podia fornecer aproximadamente 1000 vezes a energia mundial requerida, contudo apenas 0.02% é aproveitada [17]. Para além disso, é uma fonte com um baixo impacto ambiental quando comparada com os combustíveis fósseis, e é vista também como um investimento financeiro com elevado retorno [29]. Os gastos energéticos na conceção dos painéis fotovoltaicos diminuíram ao longo dos anos e a produção de energia fotovoltaica tornou-se sustentável. Existem três formas de avaliar a sustentabilidade e desempenho ambiental dos sistemas fotovoltaicos: LCA - *Life Cycle Assessment*, EPBT - *Energy Payback Time* e GHG - *Greenhouse Gas Emission Rate* [36]. A LCA avalia a sustentabilidade do sistema. Esta analisa e compara a energia usada e impactos ambientais associados durante o ciclo de vida dos painéis fotovoltaicos, desde a sua produção até à sua utilização. Relativamente ao EPBT, é um indicador que quantifica os anos necessários ao sistema fotovoltaico para gerar uma determinada quantidade de energia primária que compense não só o consumo de energia durante o ciclo de vida, mas também durante a sua conceção, transporte, instalação, operação e manutenção. Este indicador pode ser calculado através da seguinte equação:

$$EPBT = \frac{E_{input} + E_{BOS,E}}{E_{output}} \quad (1.1)$$

em que E_{input} corresponde à energia primária consumida durante conceção e ciclo de vida, já mencionados anteriormente; $E_{BOS,E}$ refere-se à energia requerida por todo o sistema, incluindo estruturas, equipamentos elétricos e baterias; E_{output} é a quantidade de energia primária poupada devido à eletricidade produzida pelo sistema fotovoltaico. Por fim, outro método de avaliação frequentemente utilizado é o GHG, que quantifica as emissões dos *greenhouse gases* por unidade de eletricidade gerada. Esta taxa é calculada

através da seguinte equação:

$$GHG_{e-rate} = \frac{GHG_{PV} + GHG_{BOS,E}}{E_{LCAoutput}} \quad (1.2)$$

onde, GHG_{PV} e $GHG_{BOS,E}$ correspondem, respetivamente, às emissões de gases pelos painéis fotovoltaicos e pelo material elétrico. Já $E_{LCAoutput}$, refere-se à totalidade de energia elétrica produzida pela instalação, durante o seu ciclo de vida.

Atualmente, os painéis fotovoltaicos mais comuns são os de silício amorfo (a-Si), monocristalino (mono-Si) ou policristalino (poli-Si) e os filmes finos como o Telureto de Cádmio (CdTe) e o Seleneto de Cobre Índio (CIS). Todos eles com diferentes níveis de eficiência e custos associados à sua produção, bem como, diferentes emissões de CO_2 [36]. Em relação aos custos na produção da tecnologia fotovoltaica, um estudo da *European Photovoltaic Industry Association* (EPIA) revelou que até 2020 o potencial da redução do custo da mesma pode chegar a 50% [19].

1.1.3 O Conceito BIPV

Os edifícios de energia zero e emissões de CO_2 zero, denominados por ZEB, *Zero Emission Buildings* pressupõem uma equivalência entre o consumo energético do edifício e a capacidade que o mesmo tem em produzir a sua energia. A tecnologia fotovoltaica associada ao conceito construtivo do edifício, *Building Integrated Photovoltaic* permite que a produção de energia elétrica ocorra localmente. Estes edifícios energeticamente eficientes utilizam células solares fotovoltaicas integradas na sua envolvente e podem representar uma ferramenta versátil para alcançar as metas referidas anteriormente. Para além disso, existem soluções estéticas, económicas e técnicas capazes de surpreender [24]. Todavia, os PV devem ser integrados apropriadamente, de forma a maximizar a produção de energia solar e aumentar a relação custo benefício [35]. Ao produzir a energia de forma local, estamos perante o conceito de produção descentralizada de energia, dado que o consumidor se torna também produtor.

A integração das células fotovoltaicas na envolvente dos edifícios permitiu estabelecer uma diferença para com os denominados *Building Applied Photovoltaic*, BAPV, que utilizam a tecnologia fotovoltaica para produção de energia, contudo, não estando o sistema fotovoltaico integrado fisicamente na envolvente do edifício. Esta diferença, entre conceitos (BIPV e BAPV), referiu-se essencialmente a aspetos físicos e visuais. Contudo, a fronteira entre ambos os conceitos pode ser ténue em determinadas situações. Assim, é importante salientar que o conceito BIPV, representa mais do que uma simples integração na envolvente, pois confere um impacto a nível térmico no edifício, ou seja, apenas se pode considerar tecnologia BIPV, quando exista influência, quer seja por condução, convecção ou radiação na temperatura interior da fração. Isto, decorre do facto de a integração da tecnologia fotovoltaica na fachada funcionar ao mesmo tempo como uma fonte calor, dada a temperatura que as células podem atingir e por isso influenciar o desempenho térmico do edifício em causa. A temperatura dos painéis fotovoltaicos pode tornar-se prejudicial no aumento de consumo com a climatização, associado à transferência de calor que pode ocorrer para o interior do edifício. Todavia, também a produção de energia é afetada pela temperatura, pois diminui a eficiência das células fotovoltaicas. Assim, o efeito da temperatura que atingem os painéis fotovoltaicos conduziu ao aparecimento de sistemas fotovoltaicos associados a cogeração, *Building Integrated Photovoltaic / Thermal*, BIPV/T. Estes, tal como os BIPV, incorporam os fotovoltaicos

na envolvente do edifício. Porém, enquanto geram energia elétrica tal como os BIPV, também têm a função de aproveitar o calor gerado pela temperatura dos painéis fotovoltaicos, aproveitando esse calor de forma útil para o sistema dinâmico que é o edifício, assemelhando-se a sistemas de cogeração. Esta funcionalidade é alcançada através da inclusão de um fluido circulante, maioritariamente água, com o objetivo de arrefecer as células fotovoltaicas, melhorando, conseqüentemente, a eficiência dos painéis [6]. O aproveitamento do calor gerado por parte dos BIPV/T, ocorre, tanto em sistemas de aquecimento como na produção de águas quentes sanitárias.

1.2 Objetivos

Esta dissertação insere-se num setor em crescimento, não só a nível tecnológico como também a nível cultural e político, nomeadamente através das imposições associadas a normas europeias para 2020. É por isso, um documento que tem o intuito de avaliar a capacidade das instalações fotovoltaicas integradas na envolvente dos edifícios em Portugal, tanto no que respeita à produção de energia elétrica, como no domínio termodinâmico associado ao consumo da climatização. Para isso, recorreu-se à utilização de uma ferramenta computacional apropriada para a realização da simulação dinâmica dos sistemas em análise, i.e., edifícios com sistemas fotovoltaicos integrados na própria fachada. Assim, o objetivo específico definido para a dissertação é:

- Recorrendo a ferramentas computacionais, integrar um sistema fotovoltaico na fachada opaca vertical de um edifício de serviços em Portugal e avaliar o impacto dessa integração nos consumos do sistema de AVAC desse edifício.

1.3 Revisão Bibliográfica

A energia é cada vez mais uma preocupação mundial devido ao crescimento económico e industrial que tem vindo a ser cada vez mais acentuado. Assim, a poupança de energia e também a sua produção estão de forma inerente relacionadas a um maior desenvolvimento. O setor dos edifícios é um dos principais consumidores de energia mundial e por isso a chegada de novos conceitos para melhorar a sua eficiência energética é vista com grande expectativa. O conceito de *Building Integrated Photovoltaic* e o seu necessário desenvolvimento é dessa forma uma tecnologia que se enquadra nas necessárias características energéticas dos edifícios. Essa tecnologia incorpora módulos fotovoltaicos na envolvente dos edifícios, como em telhados, sombreamento e fachadas verticais [37]. Estas últimas, e, devido ao desenvolvimento já conseguido em termos de materiais fotovoltaicos, permitem a substituição das normais paredes exteriores, bem como de fachadas envidraçadas.

1.3.1 *Sistemas fotovoltaicos integrados na envolvente de edifícios*

Um estudo realizado na Coreia por Yoon et. al., em 2008, abordou a geração de potência de um sistema BIPV com filme fino transparente. O estudo teve também por objetivo comparar os dados simulados pelo software TRNSYS e dados reais medidos. Esta abordagem utilizou o filme fino, em detrimento do silício cristalino. Tal opção deveu-se na sua essência, ao facto de o filme fino ser capaz de produzir maiores quantidades de energia sob

altas temperaturas comparativamente ao silício cristalino. O sistema BIPV é composto por módulo duplo envidraçado com filme fino (a-Si), como o apresentado na figura 1.4. A sua instalação foi disposta com diferentes inclinações, variando os ângulos entre os 0° (horizontal), 30° e 90° (vertical). A figura 1.5 representa a disposição dos sistema.

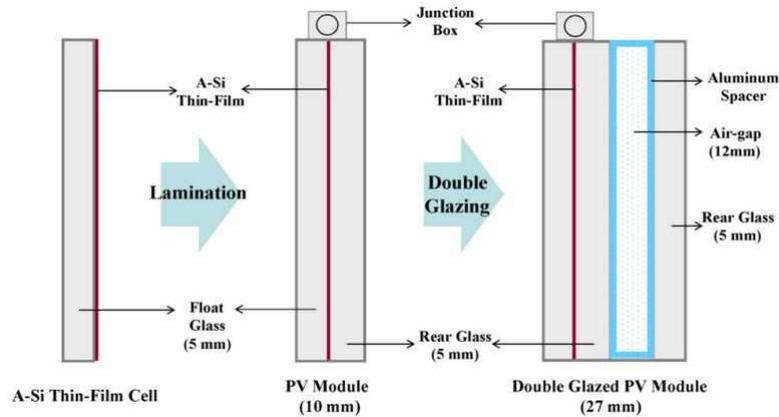


Figura 1.4: Módulo duplo envidraçado com filme fino (a-Si). [44]

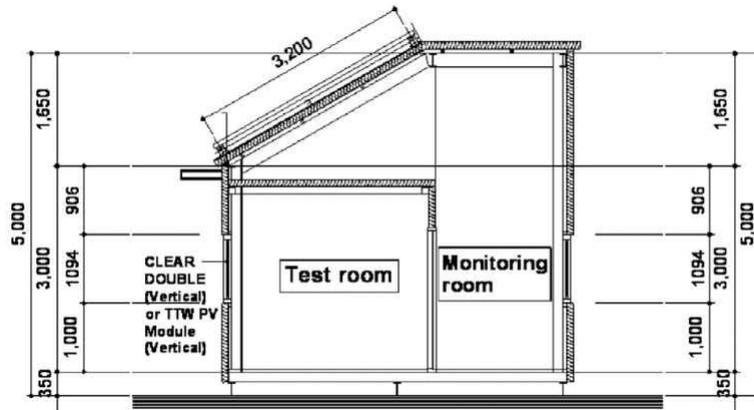


Figura 1.5: Disposição dos sistema BIPV. [44]

Os resultados dos estudo mostram que a inclinação de 30° obteve uma maior exposição à radiação solar, em média $528,4W/m^2$ e consequentemente, uma maior produção elétrica ao meio-dia, com uma média de $19,9W$. Em oposição, a inclinação a 90° apresentou os piores resultados de radiação e produção elétrica ao meio-dia, $385W/m^2$ e $8,6W$ respetivamente. Contudo, a radiação recebida e a produção elétrica para cada mês depende da inclinação do ângulo do módulo fotovoltaico. As simulações realizadas em TRNSYS apresentaram um erro de 8,5% em relação aos dados reais obtidos. Concretamente, para uma inclinação de 30°, os dados reais obtidos cifraram-se num valor de $1060kWh/kWp$, enquanto que os dados obtidos pela simulação permaneceram em $977kWh/kWp$. Foram também simulados neste estudo, os mesmos painéis para diferentes ângulos de Azimute. Esta análise verificou, que para diferentes ângulos de Azimute, o módulo com 30° de inclinação apresentou os melhores resultados e o módulo com 90°

de inclinação apresentou resultados opostos. Em suma, verificou-se que o módulo com 30° de inclinação apresentou invariavelmente um desempenho geral melhor, sendo que, atingiu o melhor desempenho quando localizado a sul, ou seja, com ângulo de Azimute de 0° .

Os edifícios com instalações BIPV possuem uma ligação com os edifícios *Net Zero Energy Building*, NZEB. Estes são edifícios de balanço energético quase nulo, ou seja, o consumo energético dos mesmos é compensado pela produção de energia gerada por esses edifícios. Assim, em 2010, Graça, Augusto e Lerer, realizaram um estudo sobre os NZEB no sul Europeu, mais precisamente em Lisboa. Este estudo abordou dois tipos de soluções construtivas diferentes. Uma delas, denominada de Casa Passiva e outra numa conjuntura cada vez mais utilizada, uma solução com grande área de envidraçados. Saliente-se que a primeira solução apresentou uma área de envidraçados de 21%, em contraste com os 55% da segunda solução. Os sistemas de sombreamento utilizados também foram diferentes, pois a Casa Passiva foi equipada com sombreamento exterior e a Casa com maior área envidraçada com sombreamento interior como se pode observar na figura 1.6. Também foram aplicados sistemas de energias renováveis, nomeadamente, sistemas solares térmicos e sistemas fotovoltaicos.

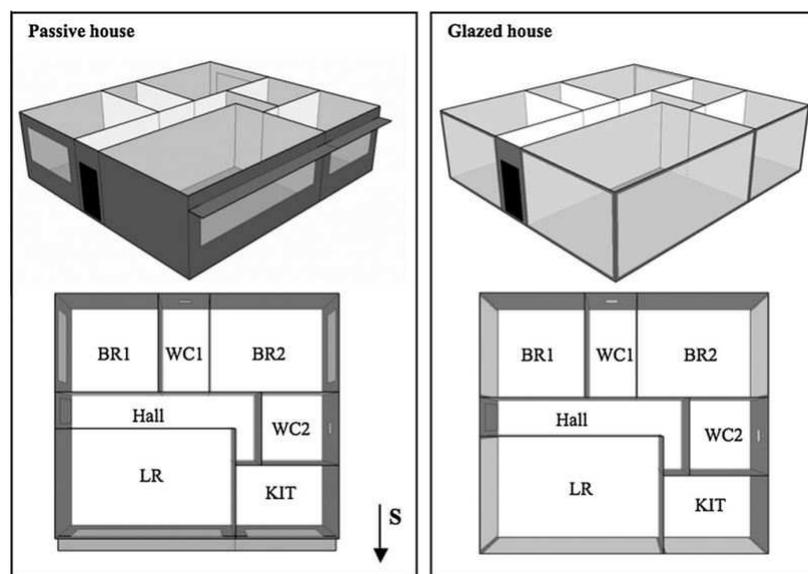


Figura 1.6: As duas soluções construtivas do estudo sobre *Zero Building Energy* em Lisboa [16]

Neste estudo percebeu-se que a exigência de arrefecimento na casa com maior percentagem de envidraçados é muito superior à outra. Essa diferença verificou-se principalmente na estação quente e fachada sul, com as temperaturas a ultrapassarem os $30^\circ C$ no seu interior. Em relação às exigências de aquecimento, estas são ligeiramente superiores na Casa Passiva. Em termos energéticos, esta conjuntura de exigências refletiu-se em grandes diferenças, com a Casa Passiva a exigir muito menos em termos de consumo energético do que a Casa Envidraçada. De destacar ainda, que este estudo considerou que os painéis fotovoltaicos tiveram uma eficiência total a rondar os 10.7%, sendo eles orientados para sul com 35° de inclinação. Previu-se ainda uma produção elétrica

de $1363Wh/Wp$ com o sistema instalado. Neste estudo abordou-se ainda o custo de eletricidade e o acesso a subsídios de micro geração de energia. Estes são dois fatores preponderantes no *Payback Time*, variando este fator entre os 8 e 15 anos. Os preços de construção aumentam cerca de 11% para a solução Passiva e 22% para a solução envidraçada. Ainda assim, concluiu-se que os ZEB podem ser uma solução realista e viável no sul Europeu [16].

Uma análise sobre a tecnologia BIPV em sombreamento, foi realizado no ano de 2010 em Hong Kong por Sun et. al.. O esquema do sistema é apresentado na figura 1.7. De referir, que existiu uma relação entre a altura de parede com módulos fotovoltaicos instalados e a altura total de parede. Assim, as análises executadas tiveram esta relação como condição, sendo feitas simulações para frações de 20% até 100% com incrementos de 20%. Foi também importante definir um comprimento máximo de 1,5m para as palas de sombreamento podendo estas, ter um comprimento menor que o já referido.

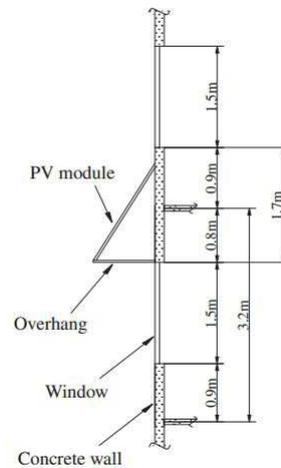


Figura 1.7: Esquema do sistema BIPV em sombreamento. [45]

Os resultados e conclusões recaíram no ângulo de Azimute e na fração de fotovoltaicos na fachada. Em relação às ilações sobre o ângulo de Azimute, o estudo apontou que as fachadas sul e sudoeste foram aquelas que apresentaram os melhores resultados em termos de produção energética. No entanto, esta também diminuiu largamente quando o ângulo de inclinação foi superior a 40° . Concluiu-se ainda, que a fachada sudoeste apresentou uma maior exigência de arrefecimento. Contudo, foram também verificadas as maiores reduções de carga de arrefecimento nessa mesma fachada obtido através do sombreamento. Relativamente à área de parede com módulos fotovoltaicos instalados e área de parede total, o estudo mostrou que a maior produção de potência elétrica deu-se quando esta fração era de 100%. Ainda em relação a reduções de cargas de arrefecimento, foi também com a fração de 100% que se verificaram maiores reduções. Em suma, quanto maior esta fração, maior a produção de potência elétrica e, também, a redução de carga de arrefecimento. Por fim, foi também importante, considerar as poupanças de eletricidade por unidade de área, e, neste aspeto, confirmou-se que a fachada sudoeste com um ângulo de inclinação de 30° , mas com a menor fração, de 20%, foi aquela que permitiu a maior poupança, cerca de $239kWh/m^2$ [45].

1.3.2 Cogeração associada a tecnologia BIPV

A tecnologia fotovoltaica nos edifícios ainda não se tornou suficientemente eficaz. Este facto, focou-se principalmente em três problemas: orientação dos módulos fotovoltaicos, problemas de sombreamento e temperatura demasiado elevada das células fotovoltaicas [26]. Devido a isto, a produção elétrica decresce bastante e conseqüentemente decresce a eficiência do sistema fotovoltaico. Relativamente ao último dos três problemas descritos, a solução que tem vindo a ser tomada é a utilização da tecnologia *Building Integrated Photovoltaic Thermal System*, BIPV/T. Esta tecnologia, para além da produção energética confere a possibilidade de obter um aproveitamento térmico benéfico ao balanço energético do edifício, visto, aproveitar o fluido com a função de elemento refrigerador dos painéis fotovoltaicos para utilizar em outros consumos energéticos dos edifícios, nomeadamente águas quentes sanitárias e aquecimento. Esses fluidos, são normalmente ar e água. Em paralelo à abordagem feita à tecnologia BIPV/T, tornou-se importante analisar um estudo sobre fachadas ventiladas em Portugal no ano de 2008, por Carvalhal. Em suma, este estudo que comparou a utilização de fachadas verticais tradicionais e fachadas ventiladas, podendo verificar-se que as segundas provocavam uma diminuição em termos de consumos em aquecimento e arrefecimento [13].

Numa abordagem focada na tecnologia BIPV/T, Wang et. al. em 2005, desenvolveram uma análise de sistemas BIPV na China. De salientar que naquela região da China as temperaturas de Verão são muito próximas das temperaturas do sul Europeu, visto as temperaturas exteriores atingirem os 33°C. Desta forma, executaram-se análises no software TRNSYS para quatro diferentes sistemas de telhado, sendo três deles, sistemas BIPV. Assim, as quatro soluções analisadas podem ser observadas na figura 1.8. Estas diferem em pequenos aspetos, nomeadamente na utilização de fotovoltaicos integrados e no espaçamento de ar presente ou ausente na instalação. Começando pela solução D (figura 1.8) esta apresentou um telhado normal sem fotovoltaico e sem espaçamento de ar. Por seu turno, à solução C (figura 1.8) foram acrescentados painéis fotovoltaicos tornando o telhado numa instalação BIPV. As soluções A e B (figura 1.8), apenas adicionam à solução anteriormente referida (solução C) o espaçamento de ar entre a envolvente e o módulo fotovoltaico. Contudo a diferença entre A e B reside na ventilação existente e não existente nesse mesmo espaçamento, respetivamente.

Este estudo revelou que na estação quente a solução que apresentou um melhor rendimento na conversão da energia solar para elétrica, tal como, nas reduções de carga de arrefecimento foi a solução A (solução BIPV com espaçamento de ar). É importante salientar, que o aumento verificado em termos de eficiência foi de 6% em comparação com os outros telhados com instalações BIPV. Isto ocorreu, dada a diferença de temperatura máxima dos módulos fotovoltaicos que se cifrou nos 14°C. Em relação à redução máxima em carga de arrefecimento, existiu um decréscimo na ordem dos 46% e 51% em relação ao telhado normal (D) e ao telhado sem espaçamento de ar (C) mas com sistema fotovoltaico, respetivamente [47].

Em 2010, Corbin e Zhai desenvolveram um estudo sobre o desempenho de um sistema BIPV/T localizado num telhado. Os resultados previram um melhoramento na eficiência elétrica do sistema fotovoltaico até 5,3%. Este coletor permitiu, também, fornecer água quente para uso doméstico ou aquecimento durante a produção de energia, sem necessidade de espaço adicional no telhado. Assim, a conjugação de produção de energia elétrica e produção de água quente levou a uma eficiência global do sistema na ordem

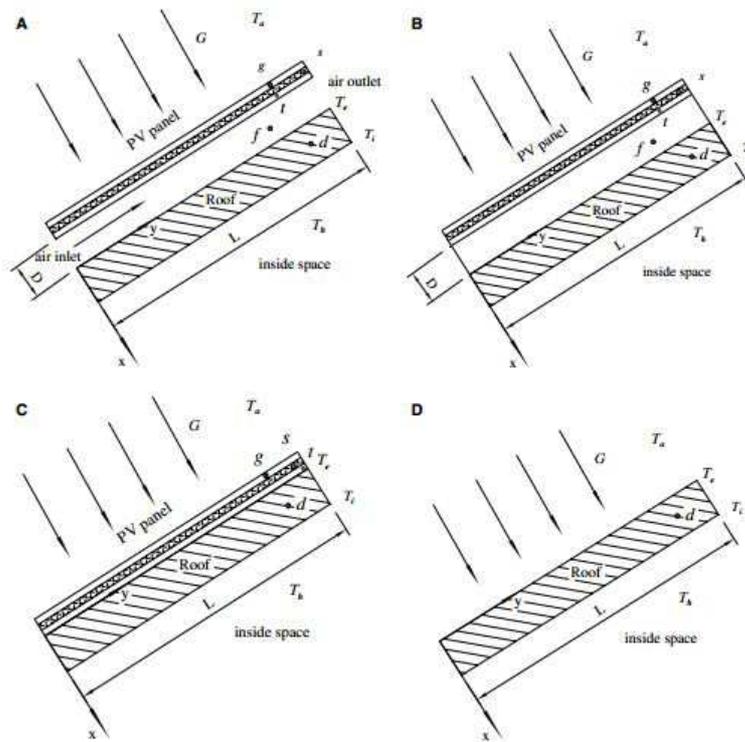


Figura 1.8: Esquema dos quatro sistemas BIPV em telhado. [47]

dos 34% [15].

No mesmo ano de 2010, Pantic et. al., realizaram um estudo relativo ao desempenho de três configurações diferentes para BIPV/T conectados ao sistema de AVAC. A configuração 1: caso base com os painéis fotovoltaicos com espaçamento de ar abaixo deles; configuração 2: adicionou-se à anterior configuração um coletor envidraçado vertical para aumentar a temperatura do ar à saída; configuração 3: adicionou-se à configuração 1 uma cobertura de envidraçado sobre as células fotovoltaicas. As configurações podem ser observadas nas figuras 1.9, 1.10 e 1.11, respectivamente. Nessas figuras é também possível observar as diferentes conexões ao sistema de AVAC. A potência fotovoltaica utilizada em todas as configurações foi de 7kW, sendo um sistema com 40 painéis mono-cristalinos integrados nas fachadas sul de cada configuração.

Os resultados indicaram que o fluxo de ar deve ser selecionado, função da temperatura de saída e consumo de energia. De referir ainda, a importância da espessura da cavidade de ar, dado que a velocidade do ar e a velocidade do vento, têm um efeito muito significativo no desempenho energético dos BIPV/T sem a componente envidraçada. Concretamente, em relação às três diferentes configurações, foi concluído que as configurações 2 e 3 podem ser utilizadas quando se pretende um aumento do rendimento térmico e da temperatura do ar à saída. É de salientar também, que a configuração 3 apresentou uma redução significativa na produção de eletricidade em relação às outras duas. Em suma, as configurações 1 e 2 apresentam as melhores relações entre rendimento térmico e produção elétrica. Outra conclusão deste estudo, referiu que um sistema BIPV/T ligado a um coletor solar vertical é adequado para uma ligação com armazenamento térmico

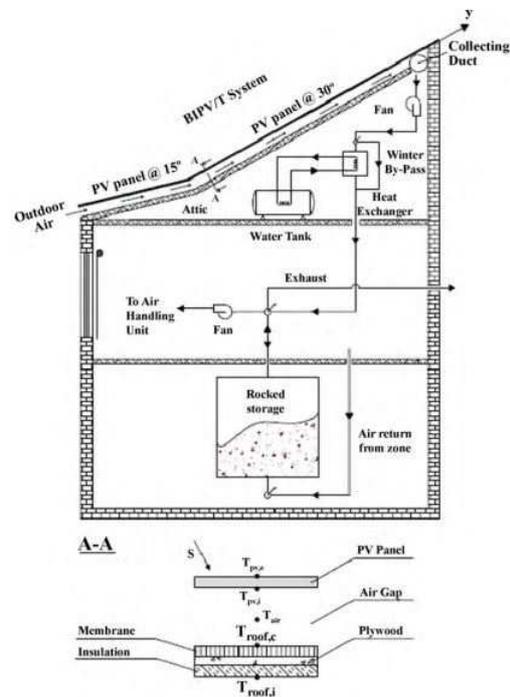


Figura 1.9: Esquemática da configuração 1 [35]

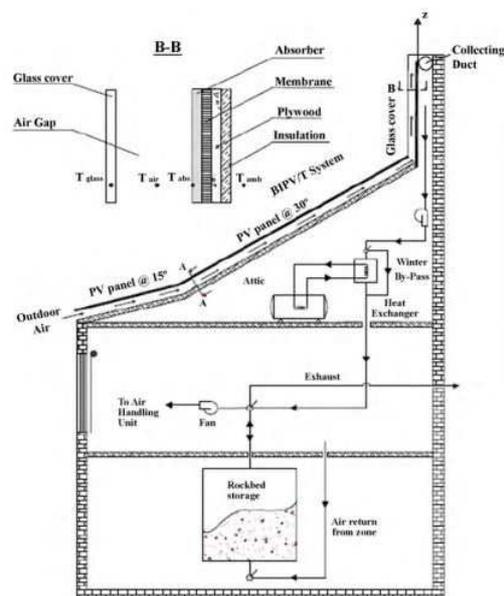


Figura 1.10: Esquemática da configuração 2 [35]

devido à grande produção de energia elétrica durante o período de inverno [35].

Yin et al. , em 2011, desenvolveram um estudo sobre o desempenho térmico de sistemas PVT, *Photovoltaic/thermal system* integrados em edifícios, nomeadamente no telhado, utilizando painéis fotovoltaicos incorporados entre uma camada transparente

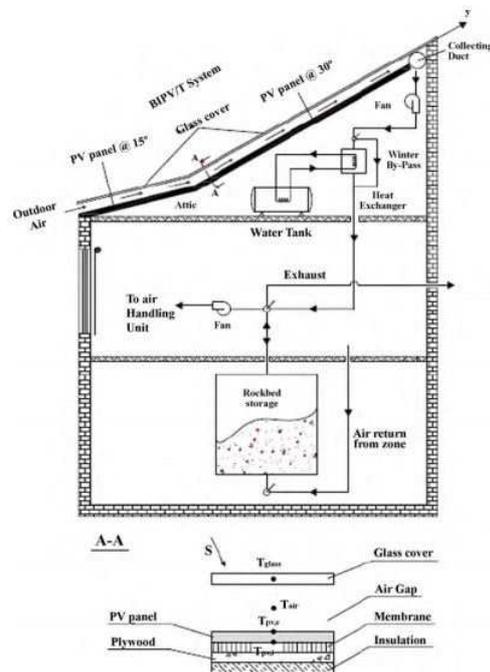


Figura 1.11: Esquemática da configuração 3 [35]

e protetora e FGM, *Functionally graded material*. Neste estudo, o FGM era composto por alumínio condutor e polietileno de alta densidade, revestindo os tubos de água. Verificou-se que o fluxo de água controlou a temperatura dos painéis, principalmente no verão, maximizando a eficiência dos mesmos, em cerca de 95%. No inverno, a água quente produzida poderia ser utilizada no aquecimento interior ou extração da neve dos painéis. Enquanto no Verão, seria armazenada em PCM's, *Phase Change Material*, podendo o calor gerado ser extraído durante a noite através de um permutador de calor[48].

Num estudo idêntico ao realizado por Carvalhal em Portugal 1.3.2, mas integrando módulos fotovoltaicos na envolvente, Peng et. al., no ano de 2012 em Hong Kong, local com temperaturas na estação quente idênticas às de Portugal, determinaram que a espessura do espaço de ar ideal para a parede fotovoltaica em fachadas ventiladas foi de 0,06m. Foi também concluído, que durante a estação quente existiu uma redução das temperaturas da superfície interior e exterior do edifício [37].

Através de um estudo realizado em 2012 por Leonforte et. al., considerou-se que a fração solar (relação entre a energia fornecida pela tecnologia solar e a energia total requerida) é um fator chave para avaliar o desempenho dos sistemas PVT. Desse modo, realizaram-se estudos em três cidades italianas Milão (clima continental), Roma (clima temperado) e Palermo (clima Mediterrâneo), representativas do clima do sul europeu. De referir que a ferramenta de simulação utilizada foi o TRNSYS, uma das ferramentas computacionais mais utilizadas à escala mundial nos últimos anos, tendo um erro médio entre os resultados fornecidos pela simulação e resultados reais inferior a 10%. Os resultados obtidos através da simulação mostraram que a fração solar não é uma função linear em relação à área de superfície, sendo que para sistemas PVT híbridos o valor ótimo de fração solar situa-se ente os 40-60% [11].

No mesmo ano, Kim et. al., efetuaram um estudo similar ao de Wang 1.3.2, pois

abordaram quatro instalações de BIPV distintas para um edifício de escritórios. As simulações foram realizadas em TRNSYS, e tiveram como base comparativa um edifício já existente sem qualquer instalação fotovoltaica. Os outros três casos estão exemplificados na figura 1.12, onde o primeiro apresenta uma instalação normal BIPV na fachada, o segundo uma instalação BIPV/T com fachada ventilada exterior e o terceiro representou uma instalação BIPV/T com fachada ventilada interior. De referir que nas duas última configurações, os espaçamentos de ar entre os módulos fotovoltaicos e a parede foram de 10cm. Para os três casos a aplicação dos painéis ocorreu sempre na fachada sul do edifício de escritórios.

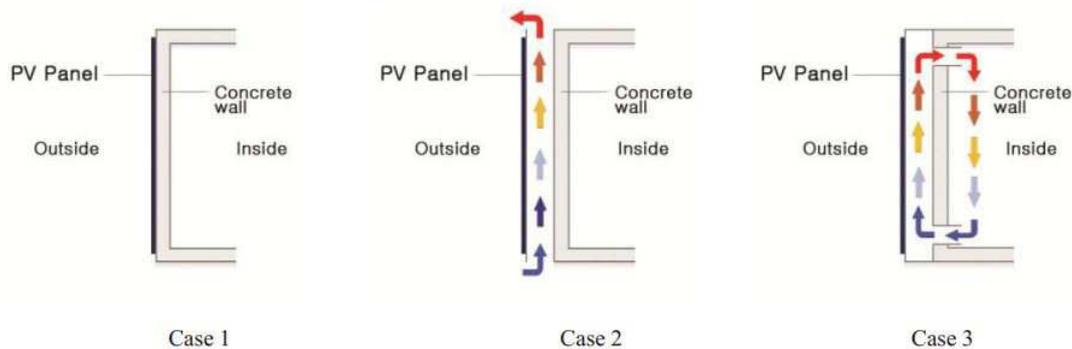


Figura 1.12: Esquemática das configurações simuladas por Kim et. al. [25]

Os resultados obtidos neste estudo mostraram que a configuração dois foi aquela que apresentou menores temperaturas nos módulos fotovoltaicos e também a melhor eficiência energética. A grande diferença de valores comparativamente com o caso três, ocorreu principalmente na estação quente, na qual as temperaturas são idênticas às do sul Europeu. Relativamente ao caso 1, sem ventilação, este apresentou altos valores de temperatura dos módulos fotovoltaicos e por isso uma menor eficiência dos mesmos. Outra conclusão mencionada relacionou-se com a temperatura da fachada, sendo a configuração 3, aquela que apresentou menores temperaturas da fachada com tecnologia fotovoltaica. As diferenças, nesta situação, foram superiores quando comparadas com a configuração 1, isto, relativamente à estação quente [25].

1.3.3 Análise aos materiais BIPV

As aplicações BIPV apresentam desempenhos, que frequentemente, dependem dos materiais fotovoltaicos a utilizar. Neste contexto, em 2012 foi realizado por Cerón et. al., um estudo sobre os materiais utilizados na tecnologia BIPV. Estes foram subdivididos em dois grupos principais, classificados por: módulos BIPV (BIPV-M) e elementos construtivos (PV-CE), como se pode observar no gráfico da Figura 1.13. Em relação à tecnologia fotovoltaica, a abordagem seguida neste estudo, dividiu os módulos fotovoltaicos em dois grupos principais: Silício cristalino (c-Si) e Filme fino (TFSC). Concretamente, os módulos fotovoltaicos de c-Si, apresentaram melhores eficiências na conversão de potência, representando uma maior fiabilidade para as instalações BIPV, dada a melhor relação entre ocupação de área e produção de energia elétrica. Relativamente aos módulos fotovoltaicos TFSC, as suas principais vantagens foram a sua diminuta espessura, tornando-os

geométrica e dimensionalmente mais flexíveis. Estas características permitem a utilização em diferentes materiais, como vidro, polímeros ou metais flexíveis, possibilitando a existência de transparência e flexibilidade. A maior variedade de integração é também mais favorável, no entanto, ao contrário dos anteriores a sua eficiência decresce significativamente, Tabela 1.1. Em termos de utilização, verificou-se que o Silício monocristalino (mono-Si), foi o mais utilizado em elementos para telhado, particularmente em telhas, cerca de 95,5%. Nas fachadas de edifícios, os elementos mais utilizados são os sistemas de silício amorfo (a-Si). A sua maior utilização esteve relacionada com a possibilidade de construção das tradicionais fachadas com grandes dimensões, pequenas espessuras e transparência. Foi referido ainda, que o Silício cristalino também permite transparência na sua aplicação, representando a Figura 1.14 as principais utilizações dos diferentes produtos fotovoltaicos [14].

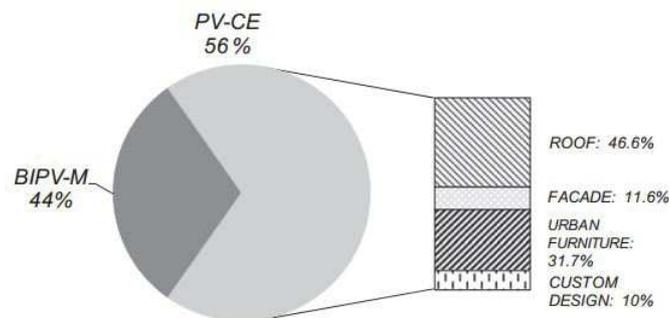


Figura 1.13: Mercado BIPV [14]

Tabela 1.1: Taxas de eficiência das diferentes tecnologias PV

Tecnologia		Eficiência
Silício cristalino	mono-Si	14%-19%
	multi-Si	12%-15%
	HIT ^a	15%-19%
Células de filme fino	a-Si	5%-7%
	CIS	10%-13%
	CIGS	11%-13%
	CdTe	10%-12%

1.3.4 Ferramentas de Simulação

O projeto termodinâmico de um edifício devia ser sustentado por simulações dinâmicas, de forma a prever-se o comportamento térmico do mesmo. São, por isso, de grande importância as ferramentas de simulação em edifícios numa fase embrionária do projeto, sendo a sua utilização requerida para fornecer importantes informações sobre um sistema dinâmico como é o edifício, particularmente em relação aos sistemas de AVAC. Contudo, os BIPV, como tecnologia que prevê a produção de energia ao mesmo tempo que interage com o desempenho térmico do edifício, obrigou a utilização de uma ferramenta computacional que permita estimar a produção de energia fotovoltaica.

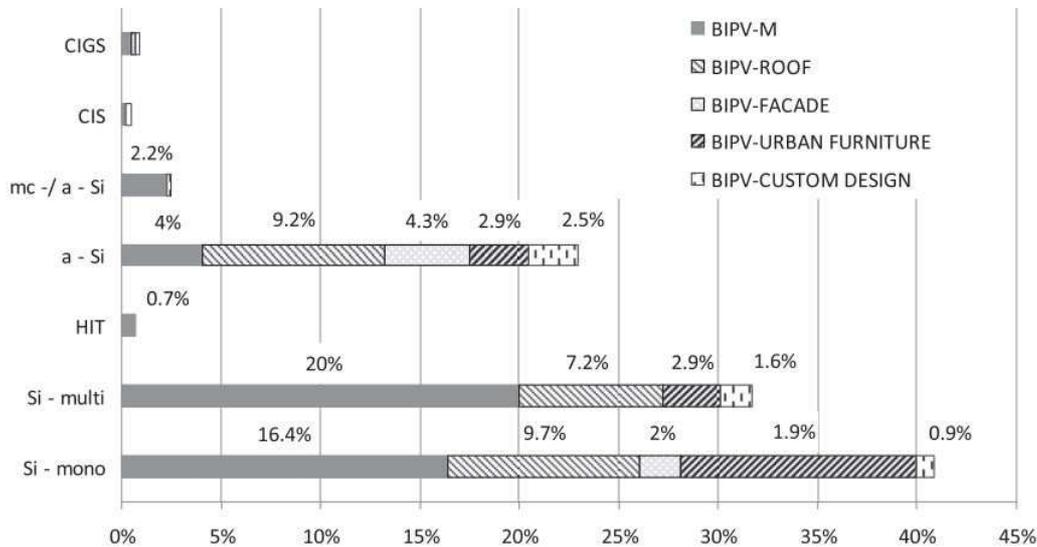


Figura 1.14: Utilização dos elementos em instalações BIPV [14]

A abordagem a este problema, foi reportada em 2009 por Wittkopf et. al. numa conferência em Glasgow, Escócia. Assim, a análise decorreu de forma a avaliar o desempenho de uma ferramenta que integrasse a capacidade de simulação dinâmica do edifício e também a capacidade de simulação a sistemas fotovoltaicos integrados no edifício. Neste contexto, os investigadores utilizaram as capacidades de simulação dinâmica do programa EnergyPlus e associadas à capacidade de modelação 3D do edifício através do Google Sketchup. Adicionalmente a estas ferramentas, serviram-se do *plugin* OpenStudio para editor de geometria do EnergyPlus, com o intuito de conferir ao edifício modelado no Google Sketchup as funcionalidades de um sistema BIPV. Em termos de resultados, eficiência prevista pelo EnergyPlus para os fotovoltaicos foi idêntica à eficiência medida na realidade. As percentagens de eficiência foram cada uma delas de 9.83% e 9.05%, respetivamente, apresentando o EnergyPlus uma boa precisão a simular a produção de energia fotovoltaica. No entanto, a análise à instalação BIPV não apresentou resultados ao nível do impacto no desempenho térmico do edifício associado à tecnologia BIPV, representando apenas, uma escala de cores associada à temperatura interior do edifício criado. [40].

No mesmo contexto, foi realizado um estudo sobre várias ferramentas de simulação e sobre a sua capacidade de simular e avaliar a tecnologia BIPV. O estudo decorreu em 2011, por Attia e focou-se na análise de dez ferramentas de simulação nas fases iniciais dos projetos: HEED, e-Quest, Energy-10, Vasari, Solar Shoebox, Open Studio Plugin, IES-VE-Ware, Design Builder, ECOTECH e BEopt. Em suma, estes softwares de simulação dinâmica deviam responder a aspetos específicos relacionados com os edifícios, nomeadamente:

- Geometria;
- Nível de conforto e climatização;
- Estratégias Passivas;

- Eficiência energética;
- Sistemas de Energias Renováveis;
- Soluções e tecnologias inovadoras;

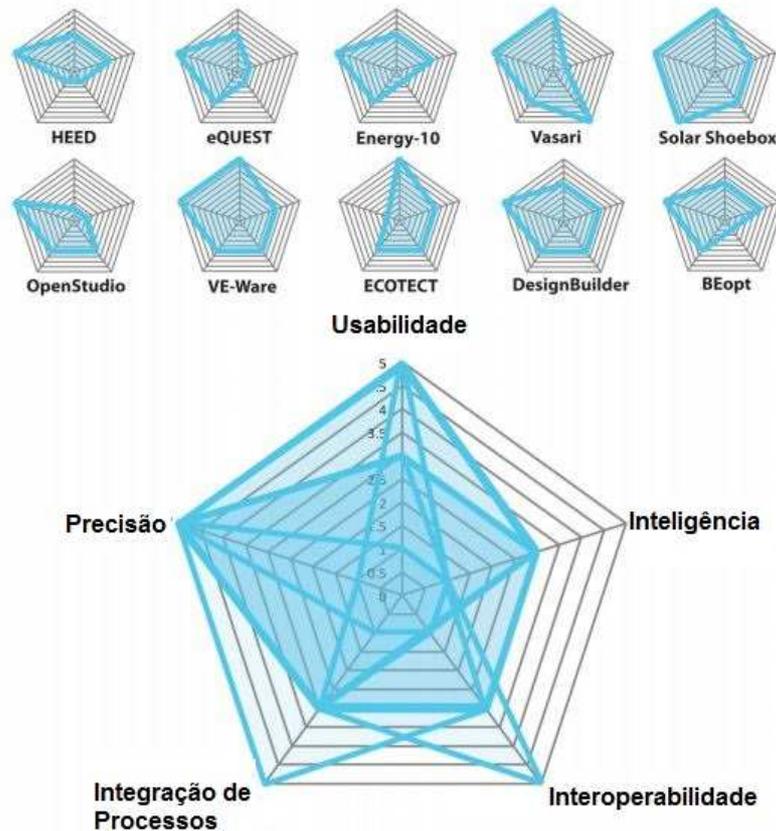


Figura 1.15: Gráficos classificativos dos dez softwares de simulação dinâmica de edifícios [12]

De referir que a avaliação foi realizada através de cinco critérios:

- usabilidade: avalia a inclusão dos parâmetros de entrada e a interpretação dos resultados finais;
- inteligência: foca-se na capacidade de o programa em responder às necessidades do projeto, concretamente em termos de bancos de dados para construção, de sistemas de AVAC, horários e localização. Uma importante conclusão deste estudo relacionou-se com a dificuldade em analisar os resultados, dadas as incorreções nas análises paramétricas e otimizações elaboradas pelos softwares;
- interoperabilidade: centrou-se na avaliação da troca de geometria, que não se verificou acessível na maioria dos softwares analisados;

- precisão: apresentou-se como um fator de bastante importância para praticamente todos os softwares testados, com a avaliação e validação dos resultados a ser baseada nos critérios da ASHRAE;
- integração de processos: revelou-se um critério ainda a melhorar nas diversas ferramentas, embora já permitam uma integração num projeto em equipa, não só em termos de fases como em termos de utilizadores.

Concluiu-se que os softwares que apresentam avaliações (Figura 1.15) que sugerem a sua utilização são: o Solar Shoebox, IES VE-Ware e o Design Builder [12].

1.4 Síntese da Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica efetuada apresentou diversas abordagens a considerar no desenvolvimento desta dissertação. Os focos principais desta revisão foram:

- Analisar os desempenhos das tecnologias BIPV e BIPV/T em diversos cenários;
- Conhecer o estado da arte do material utilizado nas células fotovoltaicas e as suas principais características;
- Analisar os tipos de ferramentas computacionais existentes que permitam executar simulações dinâmicas e estimar a produção de energia fotovoltaica de edifícios integrando tecnologia BIPV.

Em suma, o conhecimento adquirido com a revisão bibliográfica, permitiu perceber, que o desempenho da tecnologia BIPV está diretamente relacionado com o material do sistema fotovoltaico a utilizar, tal como o tipo de instalação. Relativamente ao método e tipo de instalação BIPV, revelaram-se importantes os ângulos de inclinação e azimutal quando foi efetuada a avaliação concreta à produção de energia fotovoltaica. Contudo, ficou ainda demonstrado, o impacto que a tecnologia BIPV provocou no desempenho térmico dos edifícios quando integrados em fachadas. Esta relevância beneficiou os consumos da climatização, particularmente em situações do tipo BIPV/T e em termos de arrefecimento.

Neste ponto, importa salientar que a tecnologia BIPV foi essencialmente utilizada em edifícios novos. Todavia, a importância da integração da tecnologia fotovoltaica na envolvente dos edifícios, particularmente no panorama português, dadas as circunstâncias sociais e económicas do país, pode assumir maior importância quando relacionada com o conceito de Reabilitação Urbana, do qual fazem parte edifícios existentes.

Relativamente aos materiais utilizados nas células fotovoltaicas, o mais comum é o silício. Contudo, a sua estrutura mineralógica foi a principal diferença identificada. Assim, quando ao relacionar-se a produção de energia fotovoltaica com a área útil disponível, foi o silício cristalino que melhores resultados apresentou, e ainda, tem a possibilidade de ter transparência na aplicação. No entanto, em termos de características físicas e mecânicas, aquele que revelou uma melhor adaptabilidade e flexibilidade, foi o filme fino de silício amorfo.

Por fim, os estudos realizados às ferramentas computacionais revelaram a boa capacidade de três delas: Solar Shoebox, IES VE-Ware e o Design Builder.

1.5 Contributo da dissertação

O principal contributo desta dissertação consiste na avaliação do impacto que a tecnologia *BIPV* tem no desempenho térmico do edifício. A revisão bibliográfica demonstrou que a utilização desta tecnologia ocorreu essencialmente em edifícios novos. Contudo, as condições económicas em Portugal, particularmente difíceis nos últimos anos, conduziram a uma diminuição efetiva na nova construção. Ao invés, a reabilitação urbana tem diversos instrumentos de apoio ao investimento, e ao mesmo tempo, é um conceito no qual a integração de sistemas fotovoltaicos na envolvente pode ser bastante interessante, permitindo uma melhoria significativa nas condições do património imobiliário e urbanístico. Desta forma, o principal contributo desta dissertação consiste na avaliação do impacto que a tecnologia *BIPV* tem no desempenho térmico e energético de um edifício urbano existente através das seguintes metas traçadas:

- Analisar e avaliar, recorrendo a ferramentas computacionais, qual o impacto que a integração de um sistema fotovoltaico na fachada opaca vertical tem nos consumos do sistema de AVAC de um edifício de serviços em Portugal;

Para além do que já foi mencionado, o presente trabalho apresenta ainda contributos secundários, mas ainda assim importantes tais como:

- Avaliar qual a influência da localização do edifício nos consumos de uma instalação *BIPV*;
- Quantificação de qual a influência do perfil de utilização do edifício nos consumos de uma instalação *BIPV*;
- Avaliar qual o nível de isolamento térmico mais adequado para a tecnologia *BIPV* num edifício urbano existente;

1.6 Estrutura do documento

Este documento é composto por seis capítulos. O primeiro, no qual se fez uma abordagem ao tema, também foi aquele onde foi realizado a revisão bibliográfica, através da qual se traçaram os objetivos e o contributo para a sociedade, no qual se identificou a reabilitação urbana como um setor propício à integração da tecnologia *BIPV*.

O capítulo 2 começou por fazer um enquadramento à energia solar, identificando os principais movimentos e ângulos solares. Posteriormente, apresentou-se a tecnologia *BIPV* e a intervenção que esta tecnologia pode proporcionar em termos de reabilitação urbana. Por fim, abordou-se qual enquadramento legal relativo, não só, à certificação energética dos edifícios, mas também à produção distribuída de energia em Portugal.

Relativamente ao capítulo 3, este começou por descrever o problema e as suas vertentes. Posteriormente, analisou-se as ferramentas computacionais a utilizar para efetuar a simulação dinâmica e estimativa de produção de energia fotovoltaica.

No capítulo 4 procedeu-se à caracterização do edifício segundo o regulamento português SCE. Foi também neste capítulo que se fez uma avaliação qualitativa do modelo através de análises de sensibilidade, de forma a garantir a qualidade dos resultados a obter posteriormente no capítulo 5.

Como referido antes, é no capítulo 5 que se desenvolveu todo o estudo, apresentando-se os resultados alcançados e realizando diversos estudos paramétricos para a análise de resultados.

Por fim, o capítulo 6 compartimentou a conclusão da dissertação e as sugestões para desenvolvimento de trabalho futuro.

Capítulo 2

Tecnologia BIPV

A energia solar foi sempre aproveitada pelo ser humano para as mais variadas atividades. No entanto, o desenvolvimento tecnológico aperfeiçoou o aproveitamento que o ser humano faz do Sol, concretamente, através da produção de energia, sendo, por esta altura já uma mais valia na redução dos custos associados à energia elétrica. Dessa forma, a arquitetura e a engenharia encontraram um elo de ligação muito forte e que pode ser cada vez mais, considerado, como uma mais valia pelos técnicos das ciências já referenciadas. Assim, tornou-se imperativa a necessidade de conciliar competências entre engenheiros e arquitetos na conceção de edifícios, tornando-os cada vez menos exigentes em termos energéticos.

O aparecimento da tecnologia fotovoltaica, e a adequabilidade que esta adquiriu ao longo tempo, despertou uma "visão mais verde" por parte das entidades governantes. Ao mesmo tempo, também as ideologias de *Passive House* e *Near Zero Energy Building* ganharam força e são consideradas, não só o presente, como também o futuro dos edifícios. Dessa forma, a união entre o fotovoltaico e o edifício traduziu-se no conceito *Building Integrated Photovoltaic*.

2.1 Energia Solar

No panorama atual, a aposta nas energias limpas tornou-se numa solução para a sustentabilidade energética, pois o planeta dispõe de fontes de energias renováveis inesgotáveis e que têm tido um subaproveitamento. Reportando à energia solar, essa não teve ainda um destaque tão grande quanto a sua potencialidade, dado ser das maiores fontes de energia no planeta. O seu aproveitamento ocorre através da luz emitida pelo Sol, a radiação solar que se pode dividir em três tipos:

- Radiação direta: chega diretamente do Sol;
- Radiação difusa: é a luz que chega ao planeta após a influência de obstáculos da atmosfera terrestre, podendo ser refletida, absorvida e difundida pelas nuvens, gases e outros obstáculos;
- Radiação albedo: é a componente de radiação que é refletida pela superfície terrestre.

As percentagens de cada uma destas radiações podem ser observadas na figura 2.1.

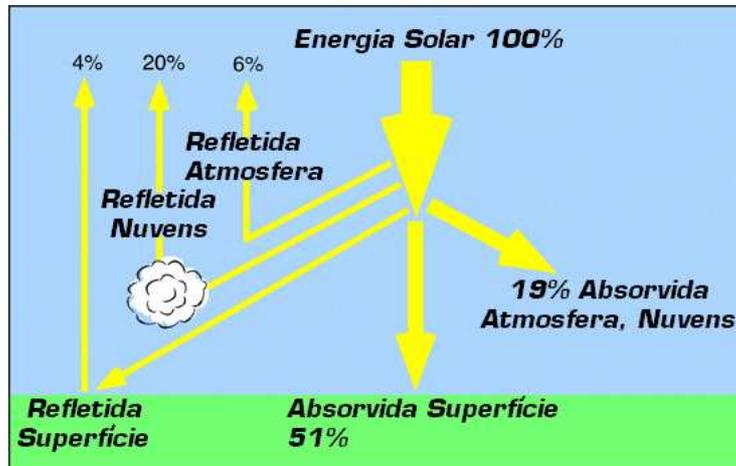


Figura 2.1: Esquema percentual de radiação direta, difusa e albedo [38].

Com isto, é ainda importante saber quantificar a radiação incidente por unidade de área, de forma a estabelecer um parâmetro de melhor perceptibilidade. Este conceito tem por nome irradiação. É esta a medida normalmente utilizada para verificar o nível de exposição solar de uma região no globo. A nível Europeu, Portugal é dos países com maior nível de exposição solar como pode ser observado na Figura 2.2.

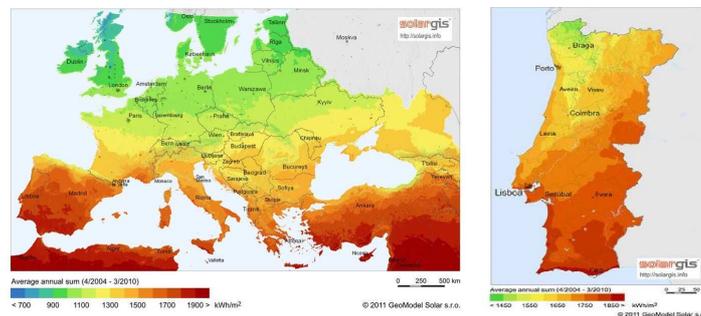


Figura 2.2: Mapas de radiação solar da Europa e Portugal [17].

2.1.1 Movimento e ângulos solares

Para um melhor entendimento em relação à orientação e inclinação da instalação fotovoltaica, é importante conhecer o movimento da terra em relação ao sol ao longo do dia e do ano. Só assim se pode otimizar a captação da radiação solar. Desta forma, é de referir que a Terra descreve um movimento elíptico em relação ao Sol, estando o seu eixo polar inclinado cerca de $23,5^\circ$. Esta inclinação implicou que se estabelecesse um novo termo de real importância para sistemas de energia solar, a declinação. Esta, é denominada como o ângulo entre a direção da radiação ao meio-dia solar e o plano do Equador podendo variar entre: $-23^\circ 27'$ e $23^\circ 27'$. Na Figura 2.3 pode-se observar a variação da declinação solar em relação à radiação solar. É importante referir que a declinação máxima e mínima define os Solstícios de verão e inverno do Hemisfério Norte, respetivamente. Quando a declinação é nula, está-se perante os Equinócios de primavera e outono.

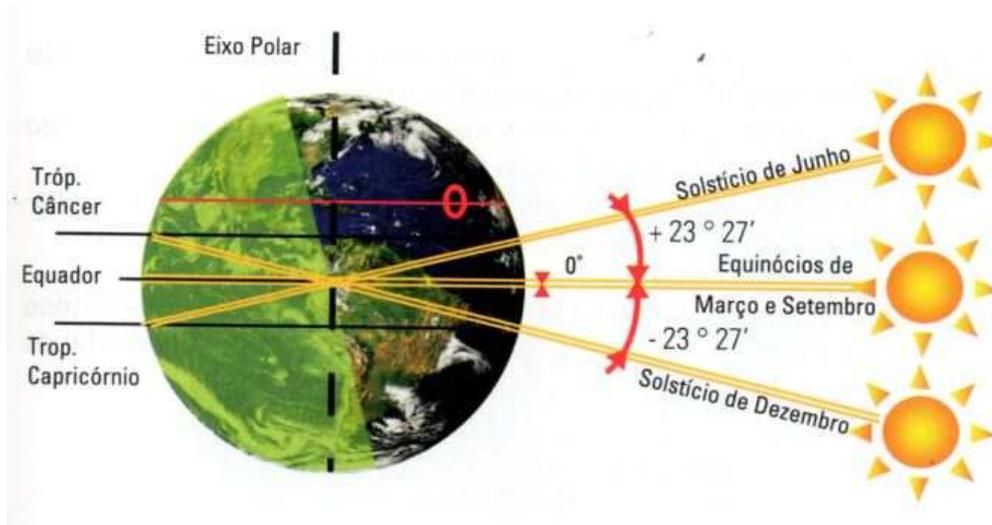


Figura 2.3: Declinação Solar. [1]

É ainda essencial abordar outras definições como: ângulo de inclinação, altura solar, ângulo de incidência e ângulo de azimute solar. O ângulo de inclinação é aquele que a superfície em que incide a radiação faz com a horizontal. Relativamente à altura solar, esta corresponde ao ângulo que a projeção no plano horizontal do raio solar faz com a direção do mesmo. Esta altura solar pode ser calculada com base na latitude do local em causa e o ângulo de declinação. É ainda de referir, que quanto maior for a latitude do local menor a altura solar. O ângulo de incidência, por sua vez, é, provavelmente, aquele que menor precessão transmite, sendo, por isso, o mais complicado de visualizar. Assim, pode descrever-se este ângulo como aquele que a radiação direta exerce na superfície do objeto e a perpendicular desta mesma superfície. Por fim, e talvez aquele que desempenha a maior importância no rendimento dos painéis fotovoltaicos, é o azimute solar. Este é o ângulo que representa o movimento do sol na sua projeção horizontal ao longo do dia, desde que o sol nasce até se pôr. Quando o azimute solar é de 0° significa que a instalação está perfeitamente orientada a Sul (se localizada no hemisfério Norte), podendo obter-se um rendimento máximo nesta situação [1]. É, ainda, importante, perceber-se qual a capacidade de captação que uma superfície pode ter, podendo o total da radiação incidente ser dividida em radiação absorvida α , refletida ρ ou transmitida τ , como pode ser verificado na seguinte equação:

$$1 = \alpha + \rho + \tau \quad (2.1)$$

2.1.2 Penalizações por Sombreamento

O objetivo principal do fotovoltaico é a produção de energia elétrica, dessa forma existem fatores que influenciam positivamente e negativamente essa mesma produção, apresentando, assim, uma elevada importância quando não se pretende ter penalizações na energia produzida pelo módulo fotovoltaico. Isto, porque o sombreamento que incide sobre os módulos tem um papel redutor na energia produzida, visto que cada módulo fotovoltaico tem uma curva característica de potência e apenas existe um ponto nessa

curva em que o funcionamento é máximo, chamado o ponto de máxima potência, *MPP*. Quando o sombreamento incide sobre o módulo fotovoltaico, automaticamente desvia o *MPP* desse módulo, o que leva não só à diminuição de potência do módulo em causa e consequentemente da produção, podendo ainda danificar a própria célula. É importante clarificar que existem outros fatores para que ocorra o desvio do *MPP*, nomeadamente a temperatura e arranjo entre módulos.

Os sombreamentos podem ser de cariz temporário, resultado da deposição de matérias sobre os módulos: folhas de árvores, dejetos de aves ou até mesmo neve em alguns países. Mas também, poderão existir sombreamentos contínuos ao longo do ano mediante a localização e orientação do sistema fotovoltaico, tais como palas de sombreamento que pertencem à própria fachada do edifício ou objetos e prédios adjacentes, no caso de ser uma instalação *BIPV*. É importante que na fase de projeto se procure evitar estes sombreamentos contínuos de forma a maximizar a produção de energia.

Ainda sobre o sombreamento de cariz temporário, este pode danificar as próprias células, pois se essa penalização for efetiva numa célula esta ficará inversamente polarizada, transformando a energia elétrica em energia térmica, criando um ponto quente. Estes pontos quentes poderão ser evitados através de a instalação de díodos de *by-pass* no módulo. Esse díodo de *by-pass*, funciona como um derivador da corrente e ao desviar a corrente impede que a célula fique com tensões inversas que por sua vez levam ao aquecimento [1].

O sombreamento contínuo ao longo do ano, fruto de obstáculos que podem ser do próprio edifício, perfil de horizonte ou de edifícios adjacentes serão prejudiciais na produção de energia. Para evitar um efeito ainda mais prejudicial, poderão ser distribuídos pelas diferentes fileiras, díodos de fileira. Estes, tal como os díodos de *by-pass* têm o objetivo de evitar que exista uma redução de produção acentuada. Ocasionalmente, em todo o campo fotovoltaico poderão estar sombreadas apenas algumas das fileiras do campo total. Consequentemente, com a instalação destes equipamentos de proteção apenas estarão penalizadas pelo efeito do sombreamento aquelas que, efetivamente, sofrem esse efeito, podendo as restantes fileiras manter a sua performance de produção normalizada, não sendo influenciadas pelas fileiras sombreadas. Mais uma vez, tudo isto depende do projeto e do arranjo de fileiras em cada inversor.

2.1.3 Arquitetura Bioclimática

"A arquitetura bioclimática, pode ser definida como a projeção e construção de um edifício tendo em conta a análise do contexto climático em que este se insere, promovendo, consequentemente, uma melhoria das condições de conforto e uma minimização do consumo energético"[9].

A tentativa de alcançar uma sustentabilidade energética dos edifícios está em clara ascensão, promovendo cada vez mais estudos e análises que minimizam os gastos e mantêm ou aumentam o nível de conforto dos edifícios. Neste contexto, e devido às preocupações com a eficiência energética e a procura por *NZEB's*, existem redobradas precauções no que respeita à orientação, localização e própria estrutura do edifício. No fundo, a arquitetura bioclimática preocupa-se em poder aproveitar as condições climáticas de forma a evitar desperdícios de energia, muitas das vezes desnecessários. É notório, pelas afirmações anteriores, que este tipo de arquitetura dá primazia à utilização de recursos naturais, particularmente o sol para preencher certos requisitos necessários às habitações, nome-

adamente no aproveitamento da iluminação natural e aquecimento através do radiação solar. Estes fatores coadjuvados por uma estrutura de edifício bem dimensionada e projetada podem ser realmente eficazes na diminuição dos gastos energéticos. Passou-se, assim, a promover uma eficiência energética de forma passiva nos edifícios. Para além disso, existe ainda associada a esta eficiência energética uma diminuição nas emissões de CO_2 do edifício.

2.2 Tecnologia BIPV

Building Integrated Photovoltaic é um conceito que começará a ser levado em linha de conta num futuro próximo, concretamente em países em grande desenvolvimento. Em outros países este desenvolvimento ocorre mediante a mudança de mentalidade da sua população e principalmente das suas políticas energéticas. Estas ao favorecerem uma aposta em energias renováveis, de forma a garantir a sustentabilidade energética dos edifícios, obrigam a uma aposta nos BIPV. Este pressuposto deve-se substancialmente à capacidade que estes edifícios terão em produzir a sua própria energia, mantendo uma boa integração arquitetónica e aproveitando as vantagens inerentes à utilização do fotovoltaico na própria construção, vindo a obedecer a normas e regulamentos europeus, EPBD.

2.2.1 Tipologia de instalação BIPV

Atualmente, as construções são de facto cada vez mais arrojadas em termos arquitetónicos, o que poderia causar dificuldade na integração do fotovoltaico na própria envolvente do edifício. Este facto, tem um peso considerável no desenvolvimento da solução BIPV adequada, pois confere-lhe outras dificuldades de integração. Não obstante a este fator de nível conceptual e construtivo, a tecnologia fotovoltaica teve uma evolução capaz de contornar as dificuldades já referidas. Assim sendo, a caracterização da tipologia de integração pode dividir-se em:

- Integração em fachada vertical (Figura 2.6)
- Integração em cobertura (Figura 2.4 e 2.5)
- Integração em vãos envidraçados (Figura 2.7)
- Integração em sistemas de sombreamentos

As diferentes possibilidades de integração do fotovoltaico na envolvente do edifício facilitam acentuadamente a sua construção. No entanto, cada tipologia difere em determinadas características que influenciam bastante a produção elétrica da instalação, mas também as necessidades de aquecimento e arrefecimento do edifício. Começando pela Figura 2.4, é de salientar que uma colocação num plano inclinado é sempre mais favorável em termos de exposição solar quando comparada com uma colocação vertical dos painéis, permitindo uma maior produção de energia. A integração em fachada vertical (Figura 2.6) tem esta desvantagem, para além, de estar mais sujeita a penalizações por sombreamento. No entanto, poderá ao mesmo tempo ser um fator chave em relação às necessidades térmicas do edifício, dada a elevada temperatura que os módulos fotovoltaicos atingem. Uma analogia semelhante à anterior, pode ser feita para uma instalação em



Figura 2.4: Integração do fotovoltaico em cobertura exemplificada num edifício com módulos Sapa Solar [42]



Figura 2.5: Integração em cobertura por intermédio de telhas fotovoltaicas [28]

vãos envidraçados (Figura 2.7), normalmente também instalados em fachadas verticais, porém nesta situação o fotovoltaico terá um efeito na iluminação natural, condicionando o edifício neste aspeto. Já a integração em cobertura, poderá ter melhores performances, que dependerão essencialmente do ângulo de inclinação da mesma e na influência que este tem na produção energética. Assim, é passível comparar a instalação do fotovoltaico nas palas de sombreamento a uma instalação em cobertura, fazendo depender a produção do ângulo de inclinação.

2.2.2 Módulos Fotovoltaicos

O módulo solar fotovoltaico é parte fundamental de um BIPV, dessa forma torna-se imperativo clarificar a sua tipologia e morfologia para se perceber ao mesmo tempo o modo de funcionamento.



Figura 2.6: Integração fotovoltaica em fachada vertical exemplificada no edifício Solar XXI do Laboratório Nacional de Energia e Geologia, no qual se verifica alguma penalização por sombreamento.[27]



Figura 2.7: Integração em vão envidraçado do fabricante .[27]

Com o desenvolvimento que a indústria solar vem tendo, a tecnologia fotovoltaica desenvolveu vários tipos de materiais para fazer a composição do módulo, dos quais se destacam naturalmente, o silício pois a maioria dos módulos fotovoltaicos instalados utilizam esse material nas suas células fotovoltaicas. Também importa clarificar que tipo de células fotovoltaicas podem constituir um módulo, já que têm uma função estrutural, mas delas depende também a eficiência do módulo fotovoltaico. Como já foi referido, os módulos são na sua maioria compostos por células de silício, sendo que estas poderão ser de silício monocristalino, policristalino ou até silício amorfo. Todos eles têm diferentes particularidades que podem causar um impacto aquando a escolha do módulo para um determinado edifício.

É ainda importante realçar, que não só o silício pode ser utilizado como célula fotovoltaica, pois existem mais duas que não sendo tão comuns e não tendo tão bom rendimento podem substituir o silício no painel fotovoltaico. São as células de CdTe e CIS.

Ainda assim, o módulo solar não é apenas composto por células fotovoltaicas, pois existem outros materiais na sua composição que desempenham uma grande importância

principalmente a nível estrutural. A sua composição mais comum (Figura 2.8) tem diversos materiais como:

- Vidro temperado com baixo teor de ferro - funciona como proteção das células fotovoltaicas contra condições atmosféricas adversas;
- EVA (etileno de vinil acetato) - É o encapsulante mais frequentemente utilizado nos módulos fotovoltaicos e confere estabilidade mecânica às células fotovoltaicas. O EVA terá também de possuir uma grande resistência à radiação UV;
- Célula Fotovoltaica - Pode ser de silício ou outro material como já foi mencionado. O seu objetivo é transformar a radiação em energia elétrica através do efeito foto-elétrico;
- Tedlar - Confere estabilidade mecânica ao módulo. Quando se trata de um módulo bifacial, ou seja que está projetado para deixar passar a luminosidade, esta parte terá de ser ópticamente transparente.

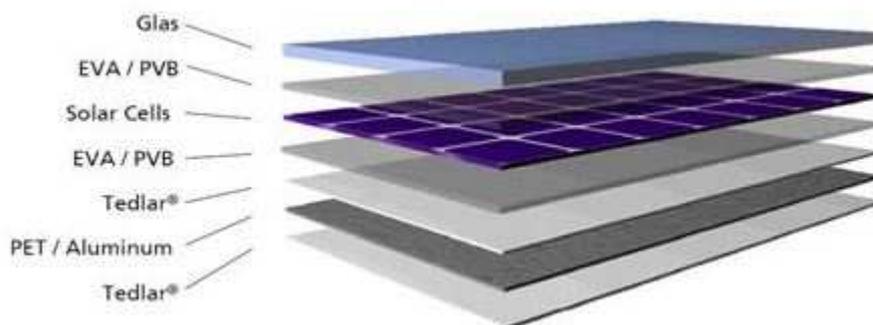


Figura 2.8: Composição mais comum de um módulo fotovoltaico [43]

2.2.3 Tecnologia BIPV associada à reabilitação urbana

A integração do sistema fotovoltaico na envolvente do edifício, quer seja a envolvente opaca ou não, permitiu a utilização dos painéis fotovoltaicos em detrimento de alguns materiais de construção. Isto porque, passaram a ser os painéis fotovoltaicos o elemento de revestimento da envolvente, quer por substituição de tinta ou azulejo, quando falamos de fachadas verticais, quer por substituição do tradicional vão envidraçado ou mesmo pela substituição da cobertura ou tradicional telhado. Este aspeto é fundamental, pois não só permitiu a introdução de um elemento construtivo que permite produção de energia, mas ainda evitou custos na aquisição de outros materiais de revestimentos: tinta, azulejo, vidro ou telhas por exemplo.

"A reabilitação urbana é um processo de intervenção no tecido urbano que tem como objetivo a requalificação de edifícios e espaços públicos das cidades, de forma a contribuir

para uma melhoria do ambiente urbano, do património edificado e da qualidade de vida da população."[46].

A definição anterior representa claramente qual o objetivo concreto do processo de requalificação urbanística, o qual está muitas das vezes associado à recuperação de edifícios. Assim, a utilização da tecnologia BIPV nas suas diferentes tipologias pode ser uma solução interessante.

A reabilitação ocorre diversas vezes em fachadas verticais degradadas, podendo nesta situação, utilizar-se o sistema fotovoltaico como elemento integrante da própria envolvente, contudo a integração tem de ser cautelosa, dada a alteração efetiva ao coeficiente de transmissão térmica da envolvente em causa. De referir que este caso será aquele a ser analisado e avaliado nesta dissertação.

Contudo, a introdução de módulos fotovoltaicos como elemento construtivo não deve ser uma solução apenas arquitetónica, terá de passar a ser uma solução de engenharia respeitando as normas de segurança do edifício e ao mesmo tempo as normas de Engenharia Civil. O estudo a nível de ventos e intempéries também deve ser feito para precaver todo o tipo de situações que possam ocorrer.

Por fim, resta referir, que este documento não apresentou preocupações estéticas ou arquitetónicas, embora seja reconhecido que podem ser questões relevantes na reabilitação urbana. Este documento, apenas pretendeu demonstrar qual a viabilidade técnica da integração da tecnologia BIPV num edifício urbano existente, representada através da avaliação ao impacto do BIPV no desempenho térmico do edifício.

2.3 Regulamentação e legislação

2.3.1 Autoconsumo Fotovoltaico e Net Metering

A instalação de um sistema de produção de energia de base renovável, e aqui, podem ser encaixados todos os tipos de energias endógenas, para além do compromisso ambiental tem associado a si uma remuneração em termos económico-financeiros. No caso do setor fotovoltaico, os incentivos podem ocorrer de formas distintas como referido anteriormente neste documento. São muitos os países no mundo que fazem um apoio à instalação destes sistemas baseado em apoio fiscal, apoio à instalação na forma de subsídios, mas é importante esclarecer que também na pós-instalação existem incentivos inerentes devido à produção de energia elétrica. Estes incentivos diretos variam de país para país e são sempre definidos com base em legislação dedicada aos mesmos. Dirigindo atenções para o caso português, este esquema de incentivos baseou-se, principalmente nos últimos anos, num sistema de remuneração de venda à rede elétrica pública em regime bonificado. Foram criados dois regimes distintos de bonificação: Regime Geral e Regime Bonificado. Ao primeiro a remuneração baseava-se na tarifa de energia elétrica de anos anteriores à instrução de processo, enquanto o segundo era baseado em tarifas bonificadas normalmente superiores à tarifa de energia elétrica. O regime bonificado pressupõe ainda a instalação de um sistema solar térmico. Este tipo de remuneração, através da venda à rede teve um revés no final de 2013, pois as tarifas bonificadas tiveram um decréscimo acentuado e as tarifas em regime geral não são tão atrativas para a maioria. Dessa forma, começou-se a olhar mais para a utilização da energia produzida na alimentação das cargas dos edifícios, o denominado Autoconsumo.

O autoconsumo baseia-se no consumo da energia elétrica produzida, evitando a com-

pra da mesma à rede elétrica pública. Isto, não quer dizer que o edifício deixe de utilizar ou mesmo não necessite da rede elétrica pública, apenas implica que a utilize menos, o que se reflete numa poupança financeira com os custos evitados com a aquisição de energia à rede. Todavia, é relevante clarificar que em Portugal, o autoconsumo até meados de 2014 foi permitido desde que não se injetasse qualquer energia elétrica na rede. O novo enquadramento legal, Regime de Produção Distribuída, já prevê Autoconsumo com venda do excedente à rede a um valor aproximado ao do Mercado Ibérico de Energia [31]. O autoconsumo divide-se em três vertentes distintas: o Autoconsumo sem acumulação, o Autoconsumo com acumulação e o Net Metering. A diferença entre os dois primeiros consiste exatamente na utilização ou não de baterias solares para armazenamento de energia elétrica que seria posteriormente consumida. Este consumo da energia armazenada poderia ocorrer em situações em que a energia produzida pelos painéis não fosse a suficiente para cobrir os consumos do edifício, ou principalmente, durante o período noturno no qual não existe qualquer produção de energia. Nas figuras que se seguem está bastante perceptível em que consiste o conceito de autoconsumo, sem e com acumulação respetivamente.

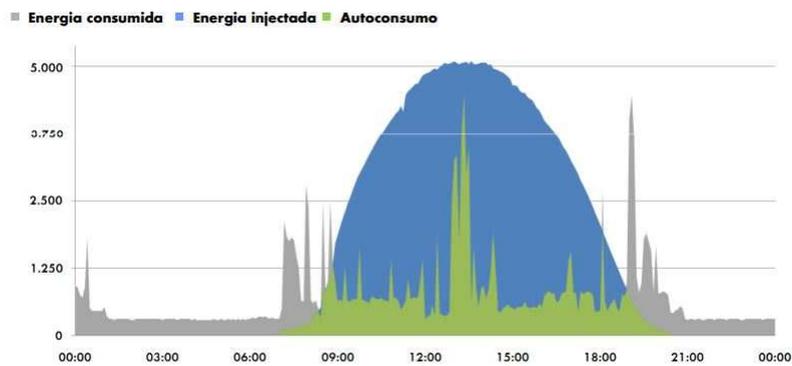


Figura 2.9: Autoconsumo sem acumulação [3]

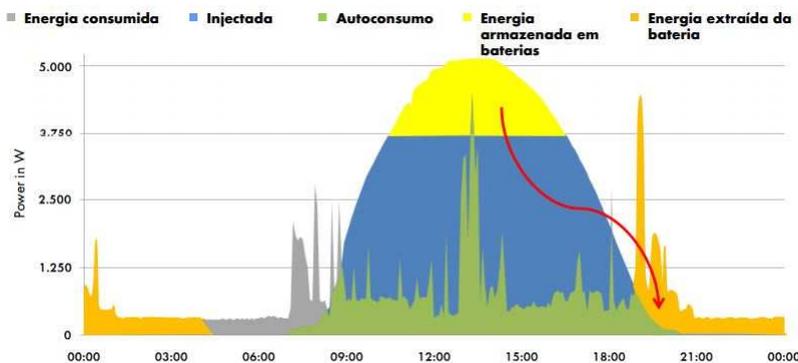


Figura 2.10: Autoconsumo com acumulação em baterias [3]

Em relação ao Net Metering, este é um tipo de autoconsumo que também utiliza a energia produzida que não é utilizada de forma instantânea nos consumos do edifício. Essa energia é "armazenada" na rede elétrica pública até existirem necessidades de a

utilizar. Neste caso, a energia é produzida e consumida no local, no entanto os excedentes de produção diurna são injetados na rede pública, podendo ser recolhidos mais tarde. Assim facilmente se percebe que a rede elétrica pública teria uma importância idêntica às baterias no caso do Autoconsumo com acumulação. As vantagens são que o investimento seria consideravelmente menor pois as baterias têm valores elevadíssimos. Este, é um conceito que já é utilizado em alguns países da Europa. Na globalidade, faz todo o sentido que se contemple o autoconsumo num edifício BIPV que faz automaticamente a derivação para um edifício de necessidades energéticas quase nulas, principalmente se for uma instalação de Autoconsumo com acumulação ou em regime de Net Metering. A nova legislação portuguesa prevê um esquema de Autoconsumo com venda à rede do excedente. Este regime difere ligeiramente do Net Metering pois a venda será feita a preço inferior ao de aquisição.

2.3.2 Regulamentação Energética

Em Portugal, os consumos energéticos associados aos edifícios começaram a ser uma preocupação decorria o ano de 1990 com a criação do primeiro RCCTE, aprovado pelo Decreto-Lei 40/90. Só passado oito anos a regulamentação conseguiu abordar a parte energética e de climatização através do RSECE pelo Decreto-Lei 119/98. Dada a importância do fator climatização nos consumos energéticos de um edifício, esta foi uma matéria que ganhou um suporte através da Diretiva 2002/91 de 16 de dezembro, EPBD - *Energy Performance of Buildings Directive*. Esta diretiva europeia estabeleceu um conjunto de medidas que serviram para fomentar melhorias no desempenho energético dos edifícios. Os reflexos desta nova regulamentação europeia apareceram em Portugal com a entrada em vigor de um novo pacote legislativo através dos novos regulamentos de 2006: SCE (Decreto-Lei 78/2006), RSECE (Decreto-Lei 79/2006) e RCCTE (Decreto-Lei 80/2006). Esta legislação baseada na EPBD europeia estabeleceu, também em Portugal, requisitos em matéria de:

- Metodologias de cálculo do desempenho energético integrado dos edifícios
- Aplicação de requisitos mínimos para o desempenho energético dos novos edifícios e edifícios sujeitos a grandes obras de renovação
- Inspeção regular de caldeiras e instalações de ar condicionado
- Certificação energética dos edifícios [2]

Esta evolução legislativa e regulamentar teve um impacto positivo em termos qualitativos, dadas as melhorias na envolvente e classe energética dos edifícios como pode ser observado nas Figuras 2.12.

Após a constatação de melhoria da eficiência energética dos edifícios, devido às medidas tomadas em 2006, tornou-se imperativo continuar a corresponder às exigências normativas e regulamentares europeias, concretamente aquelas lançadas em 2010, pois foi precisamente nesse ano que surgiu novo EPBD por intermédio da Diretiva 31/2010 a 19 de Maio, servindo de apoio à construção do novo Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios de Comércio e Serviços, o RECS, publicado em 2013. Este documento teve por objetivo traçar novos horizontes em termos de eficiência energética e produção descentralizada de energia em edifícios, pois implementou um conjunto de medidas a

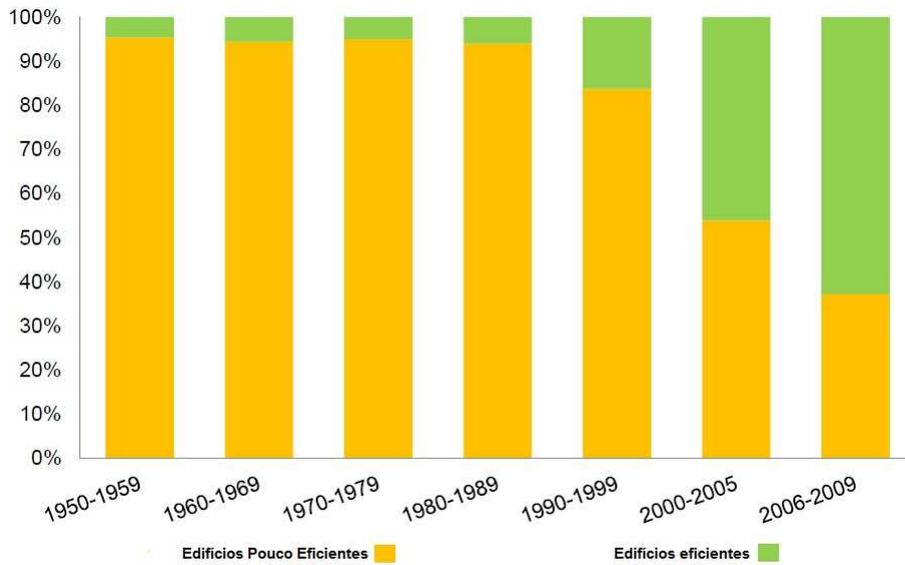


Figura 2.11: Impacto da EPBD de 2002 na classe energética dos edifícios [2]

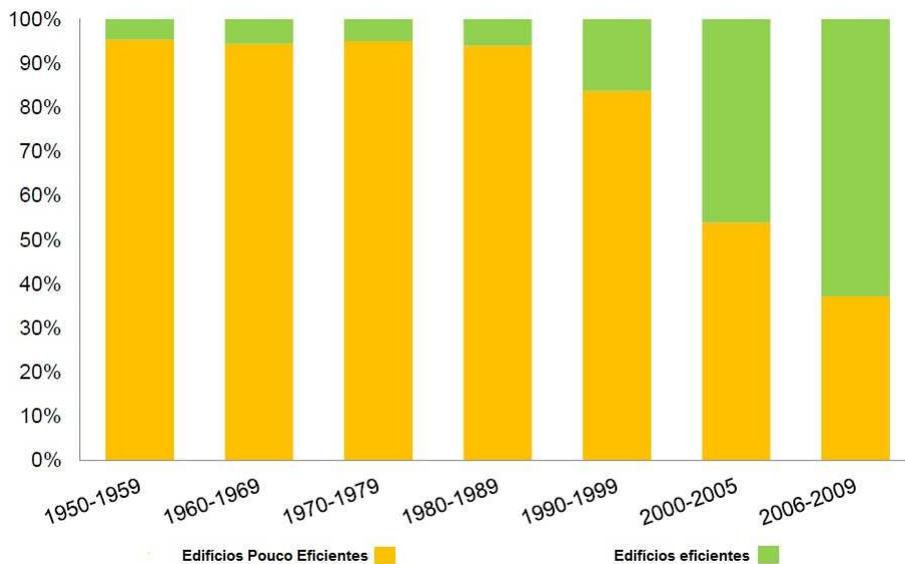


Figura 2.12: Impacto da EPBD de 2002 na classe energética dos edifícios [2]

realizar nos próximos anos com o intuito de corresponder a essas metas. Assim, são de salientar medidas a aplicar a edifícios novos e em reabilitação. No segundo caso, a melhoria objetiva do desempenho energético contempla medidas corretivas, visto que a intervenção pressupõe a melhoria dos materiais construtivos da envolvente. Esta obrigatoriedade de melhoria do desempenho energético do edifício poderá também ser alcançada através, da possível substituição de sistemas de AQS e AVAC por outros mais eficientes e se possível de base renovável. Relativamente a novos edifícios, a EPBD foi mais além, exigindo que a partir de 2018, no caso de edifícios públicos, e a partir de 2020 para todos os edifícios,

que estes fossem de necessidades de energia quase nulas, tecnicamente denominados por NZEBs. É ainda ponto assente neste documento que seja traçado um plano de incentivo à transformação de edifícios já existentes em NZEBs. Este propósito dá ainda uma maior relevância a este documento, dado que é incontornável que em muitas situações a opção passe por um BIPV, para torná-lo um edifício de necessidades de energia quase nulas [2]. Ainda assim, torna-se relevante clarificar algo em particular na legislação, nomeadamente definir o que significa quantitativamente um NZEB, dado que considerar um edifício tem um balanço energético próximo de zero pode ser muito subjetivo, para além de que considerar que um edifício de necessidades quase nulas tenha de produzir energia no local ou nas proximidades. Tudo isto ainda é um pouco vago e deixa algumas dúvidas em termos legislativos.

2.4 Síntese do Capítulo

Este capítulo deu a conhecer a energia solar caracterizando os principais movimentos e ângulos solares. Identificou também, um fator a levar em conta quando se pretende instalar um sistema fotovoltaico, como é o sombreamento, que retira muitas vezes a possibilidade de extrair maiores capacidades produtivas ao sistema.

Foi ainda, importante dar a conhecer a estrutura física de um módulo fotovoltaico e identificar a capacidade que estes podem ter como revestimento da envolvente de um edifício com diversas formas de instalação já identificadas.

Por fim, apresentou-se a regulamentação em vigor em Portugal, bem como as normas europeias pelas quais se regeu a nova legislação portuguesa do SCE.

Capítulo 3

Interação da instalação BIPV com a Climatização

O desenvolvimento da simulação dinâmica, como avaliação da componente térmica de um edifício, implica uma compreensão mais aprofundada dos princípios de transferência de calor, concretamente no espectro da análise comportamental dos edifícios em termos térmicos. A importância destes princípios alia-se também às condições exteriores a que estes estão expostos, sendo grande a influência das condições climatéricas nos ganhos térmicos do edifício.

3.1 Caracterização detalhada do problema nas suas diversas vertentes

O comportamento térmico de um edifício influencia significativamente os consumos energéticos do mesmo, tornando-se crucial caracterizar o seu balanço térmico, representado de acordo com a figura 3.1 e que tem em conta os seguintes fatores:

- Ganhos internos (Q_i) - energia gerada no interior através de atividade humana, equipamentos e toda a iluminação artificial [18]
- Trocas de calor por renovações de ar (Q_V) - sistemas de ventilação e infiltrações
- Ganhos solares (Q_S) - aquecimento do ar interior e da massa térmica do edifício pela radiação
- Trocas de calor por condução através da envolvente (Q_T) - perdas ou ganhos térmicos pelas paredes, cobertura, envidraçados, solo ou pontes térmicas [18].

Assim, considera-se que o balanço térmico é dado pela equação 3.1.

$$Q_i + Q_S \pm Q_T \pm Q_V = 0 \quad (3.1)$$

A integração do sistema fotovoltaico na fachada do edifício tem um impacto direto no balanço energético e térmico do mesmo. A questão levanta-se de duas formas distintas, e se por um lado é considerada uma mais valia a produção de energia para Autoconsumo,

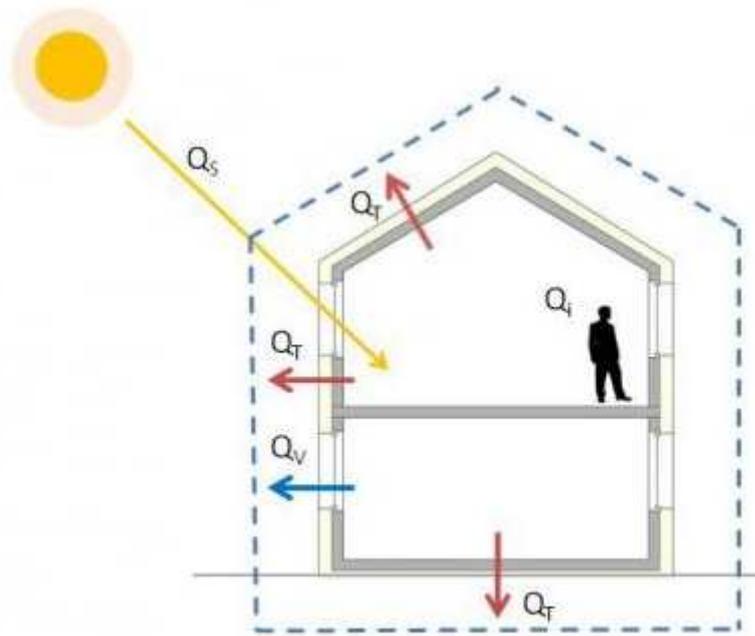


Figura 3.1: Caracterização do balanço térmico de um edifício [18].

por outro lado, é importante perceber qual é o impacto que o fotovoltaico terá na utilização do sistema de AVAC. É esta interação que irá ser explorada de forma a entender-se a viabilidade de uma instalação BIPV, dado que o benefício da produção de energia poderá não ser suficiente para compensar possíveis utilizações extra do sistema de climatização.

3.1.1 Mecanismos de transmissão de Calor através da Envolvente

A transmissão de calor pela envolvente de um edifício acontece através de mecanismos distintos, que podem estar ligados direta ou indiretamente à transmissão do fluxo de calor. Ao considerarem-se os três mecanismos de transmissão de calor, nem os mecanismos o fazem de forma direta.

Condução

A condução é o fenómeno de transferência de calor mais frequente na envolvente dos edifícios porque é uma transmissão feita através de corpos sólidos, sendo os materiais da envolvente, na sua maioria, materiais sólidos. Este é um mecanismo que depende da condutibilidade térmica (k) e da espessura dos materiais que compõe a envolvente. A condução é descrita através da Lei de Fourier, representada na equação 3.2:

$$Q_{cond} = k \times A_s \times \frac{dT}{dx} \quad (3.2)$$

Numa instalação BIPV de fachada vertical, este é o mecanismo de transferência de calor que mais influenciará as necessidades de climatização do edifício, isto porque as trocas de energia com o exterior dão-se maioritariamente por condução entre a superfície

exterior e a interior. Aqui, salienta-se o facto de o fotovoltaico atingir elevadas temperaturas, e sendo este o material de revestimento (superfície exterior), perspectiva-se que o fluxo de calor que chega à parede interior será consideravelmente superior, sendo o reflexo do possível aumento da temperatura nominal da fração, obrigando a uma intensa utilização do sistema de climatização e ventilação.

Convecção

Outro dos mecanismos de transmissão de calor pode ser a convecção, esta, ao contrário da condução, não transmite energia térmica através de corpos sólidos, mas sim através de um fluido, que poderá ser líquido ou gasoso, porém, habitualmente, este tipo de transferência de calor nos edifícios ocorre através de um fluido gasoso, muitas das vezes o ar. Sobre a convecção, é de mencionar que poderá ocorrer de forma natural ou forçada. Em relação à primeira, o movimento ocorre pela diferença de temperaturas e densidade do fluido, o de maior temperatura é menos denso e move-se no sentido ascendente, fazendo o fluido de menor temperatura o movimento contrário. A convecção forçada serve-se de uma força externa, normalmente um equipamento mecânico para fazer a movimentação do fluido. Pela utilização dessa força cinética, esta convecção é geralmente mais eficiente na movimentação do fluido e conseqüente transferência de calor. Isto significa que o coeficiente de transferência de calor (h_{conv}), sendo diretamente proporcional ao calor transferido como pode ser verificado na equação 3.3, é superior na convecção forçada.

$$Q_{conv} = h_{conv} \times A_s \times (T_s - T_\infty) \quad (3.3)$$

Radiação

Finalmente, a radiação é o mecanismo que utiliza muitas das vezes a condução para transmitir o calor através da superfície. Isto porque a sua propagação em forma de ondas eletromagnéticas, que aumentam a temperatura da superfície exterior, fará com que a transmissão de calor para o interior seja feita através da condução. No entanto, identifica-se também a radiação como um modo de transmissão de calor que não necessita de qualquer meio para se propagar. É de salientar, que no interior do edifício ocorre também o fenómeno de radiação, de forma mais relevante através dos sistemas de iluminação. A caracterização da troca de calor por radiação baseada na lei de Stefan-Boltzmann (equação 3.4) traduz o poder emissivo de um corpo [18]. Se a troca de calor ocorre entre dois corpos, então a equação 3.5 é aquela que se tem de utilizar.

$$Q_{rad} = \varepsilon \times \sigma \times A_s \times T^4 \quad (3.4)$$

$$Q_{rad} = \varepsilon \times \sigma \times A_S \times (T_2^4 - T_1^4) \quad (3.5)$$

No caso da radiação, e fazendo a analogia para a tecnologia BIPV, existem situações concretas, onde a fronteira entre BIPV e BAPV é muito ténue, nomeadamente em sistemas de sombreamento, dada a pequena área de contacto entre a pala e a fachada vertical. Assim, a transferência de calor por condução está minimizada, e a sua influência no desempenho térmico do edifício não ocorria pelo facto de o sistema fotovoltaico ser uma fonte de calor, mas sim, por existir um objeto de sombreamento que atuava de forma passiva, permitindo, considerar por isso, que a instalação era de tecnologia BAPV. No

entanto, o fenómeno de transmissão de calor, nessas situações, pode ocorrer por radiação, visto a temperatura da face inferior da pala (perpendicular a fachada vertical) ser elevada através de condução desde a face superior e emitir radiação para o interior do edifício. Nesta situação, o desempenho térmico do edifício era alterado também pelo fotovoltaico, que desempenhava ainda, a função de pala de sombreamento.

3.2 Simulação dinâmica e ferramenta a utilizar

3.2.1 Análise da ferramenta de simulação a utilizar

A caracterização do comportamento térmico dos edifícios foi um avanço tecnológico que permitiu identificar e, simultaneamente, prever falhas na sua conceção. Essa caracterização baseia-se numa análise cuidada a todos os fatores, que condicionam de forma preponderante esse comportamento térmico. Dessa forma, a intenção de escolha da ferramenta de simulação incidiu não apenas na componente de produção de energia elétrica, mas principalmente, numa perspetiva de influência no desempenho térmico do edifício originado pela integração do sistema fotovoltaico na envolvente.

A revisão bibliográfica demonstrou que o TRNSYS foi bastante utilizado na simulação dinâmica de edifícios integrando tecnologia BIPV. Na bibliografia foi também identificado um estudo, que analisou diversas ferramentas de simulação dinâmica, com a função de simular edifícios com a integração da tecnologia BIPV. Do referido estudo, destacaram-se três ferramentas computacionais, nomeadamente o Solar Shoebox, IES VE-Ware e o Design Builder. Esta última ferramenta mencionada, o Design Builder, foi aquela utilizada no desenvolvimento da dissertação por se destacar na revisão bibliográfica, mas também, por ser o recurso disponível. De referir, ainda, que a revisão bibliográfica apresentou também um estudo de tecnologia BIPV, no qual se utilizava o software Energy Plus para fazer a simulação dinâmica, apoiado pela modelação 3D do Google SketchUp. Este é um facto importante, dado o Energy Plus ser o motor de cálculo analítico do Design Builder.

O Design Builder é uma ferramenta que surge como interface do Energy Plus. O programa Energy Plus é atualmente a referência mundial no que respeita à simulação dinâmica de edifícios e foi desenvolvido pelo departamento de energia do governo dos Estados Unidos da América. Através do Design Builder, é possível realizar-se o pré-processamento de variáveis de entrada, tratar esses dados e ainda visualizar os resultados da simulação realizada pelo Energy Plus. Assim, a possibilidade de verificar os consumos energéticos com iluminação, ocupação do espaço e ainda climatização tornam-no numa ferramenta bastante completa. Para além disso, a edição vai ao pormenor e possibilita editar o espaço do edifício ao máximo, podendo diferenciar blocos, divisões e zonas térmicas do mesmo. Contudo, a sua maior dificuldade até ao momento, é na aplicação de energias renováveis. Porém, a possibilidade de editar o ficheiro no motor Energy Plus confere-lhe outra capacidade a esse nível, dado o Energy Plus possibilitar a integração do sistema fotovoltaico na envolvente do edifício.

De forma a cumprir o objetivo da dissertação, utilizou-se o Energy Plus (v8.0) como motor de cálculo analítico e o Design Builder (v3.4.0.041 BETA) para fazer toda a modelação gráfica e pré-processamento das variáveis de entrada, bem como, visualizar e tratar resultados da simulação. O Energy Plus fundamenta as suas simulações dinâmicas na aplicação de balanços térmicos e de massa para determinados volumes de controlo

pré-estabelecidos, designados por zonas. Associado a este modelo de cálculo está a introdução e edição dos parâmetros pretendidos em cada uma dessas zonas. O detalhe que o Energy Plus permite utilizar é uma mais valia para o ante-projeto de um edifício, e assim, verificar-se o seu comportamento em termos térmicos e energéticos, antecipando qualquer anomalia que possa ocorrer. De forma generalizada, os dados necessários para execução da simulação prendem-se com propriedades de materiais, geometria e caracterização das envolventes, orientação do edifício, dados climáticos através da localização, entre outros, como pode ser verificado na tabela 3.1. É ainda possível observar na mesma tabela (3.1) que o cálculo é função das condições interiores definidas pelo utilizador através dos parâmetros operativos.

Tabela 3.1: Parâmetros de entrada e de saída de uma simulação em Energy Plus [14]

Parâmetros de entrada	Parâmetros de saída
Localização	Temperaturas interiores para cada zona
Dados climáticos	Temperatura exterior
Geometria e orientação	Fluxos de Calor através da envolvente
Definição de Zonas	Necessidades energéticas para aquecimento
Definição das envolventes	Necessidades energéticas para arrefecimento
Ganhos internos	
Dados operativos (Set-points de temperatura)	
Sistemas de AVAC	
Métodos de cálculo	
Período de simulação (time steps)	

Relativamente ao método utilizado pelo Energy Plus para efetuar os cálculos, este baseia-se na equação 3.6, que calcula o fluxo de calor que atravessa um determinado elemento opaco.

$$q''_{ko}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{i,t-j\delta} \quad (3.6)$$

Da equação 3.6 é importante referenciar que esta varia com a radiação solar incidente na envolvente exterior, que se reflete nas temperaturas interiores (i) e exteriores(o). Também as propriedades mecânicas e térmicas do material são fatores condicionantes nesta equação (X e Y).

Resta referenciar a forma como o cálculo das temperaturas é obtido pelo Energy Plus. Esse mesmo cálculo é feito através da seguinte equação 3.7

$$T_z^t = \frac{\sum_{t=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i^t + \dot{m}_{sys} C_p T_{supply}^t + \left(C_z \frac{T_z}{\delta t} + \sum_{i=1}^{N_s} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{N_z} \dot{m}_i C_p T_{zi} + \dot{m}_{inf} C_p T_{\infty} \right)^{t-\delta t}}{\frac{C_z}{\delta t} + \left(\sum_{i=1}^{N_s} h_i A_i + \sum_{i=1}^{N_z} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sys} C_p \right)} \quad (3.7)$$

A interação entre o motor (Energy Plus) e a interface gráfica (Design Builder) é feita com base num ficheiro IDF, que é lido no Energy Plus, depois de ser criado no

Design Builder. Antes disso, a definição de todas as condições base e iniciais do edifício foram elaboradas no último software referenciado. É importante esclarecer que o Design Builder não permite, ainda, a integração de fotovoltaico na fachada do edifício, pelo que, a integração do sistema fotovoltaico na envolvente é feita no Energy Plus, através da edição do ficheiro IDF exportado do Design Builder. A representação de todo o processo que ocorre desde a introdução dos dados no Design Builder, passando pela edição do ficheiro IDF, que culmina com a simulação feita pelo Energy Plus está representada na figura 3.2.

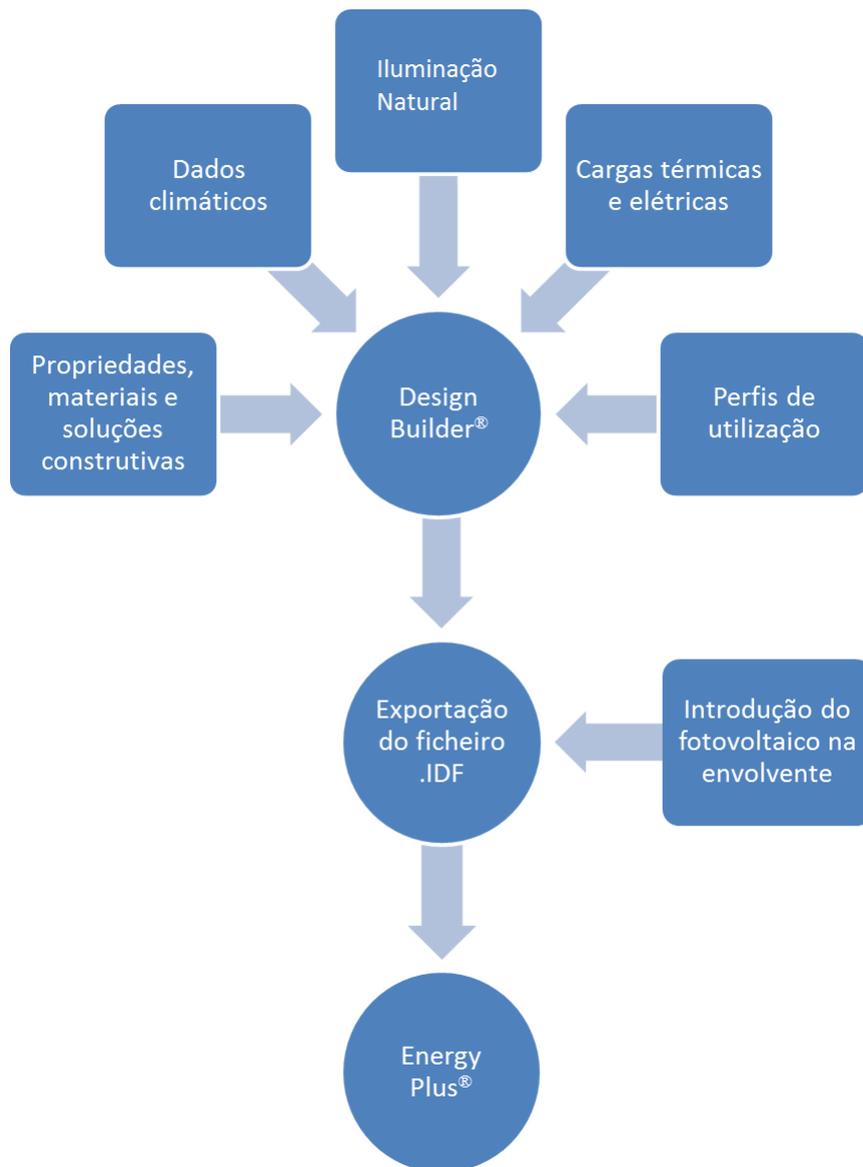


Figura 3.2: Diagrama representativo da simulação dinâmica

Concretamente, em relação à fase de edição do ficheiro IDF, é importante ter em conta qual o modelo de cálculo respeitante à produção de energia fotovoltaica a utilizar pelo Energy Plus. Uma vez que existe a possibilidade de utilização de três modelos distintos:

- *Simple Model*
- *Equivalent One-Diode Model*
- *Sandia Photovoltaic Performance Model*

A escolha influenciará o modelo matemático seguido pelo Energy Plus para o cálculo, bem como a introdução de dados iniciais no ficheiro IDF. É também importante esclarecer que, independentemente do modelo escolhido, este irá participar na iteração de cálculo do sistema de AVAC [4]. A produção elétrica por parte dos módulos fotovoltaicos, só ocorre quando a radiação solar incidente é superior a 0,3 Watts. A introdução dos painéis fotovoltaicos no modelo de simulação obriga a que a produção elétrica dos mesmos seja gerida no *Electric Load Center*, tal como todos os equipamentos geradores de energia elétrica.

A comparação entre os três modelos matemáticos é imposta para uma decisão em relação à simulação. Assim, em relação ao *Simple Model*, tal como o nome indica é o modelo mais simplificado, que opta por um cálculo de produção de energia elétrica em que é o utilizador que define a eficiência de conversão da radiação solar incidente em energia elétrica produzida. Para além disso, o cálculo de energia elétrica produzida é feito através da equação 3.8, que apenas utiliza um parâmetro calculado pelo *Energy Plus*, que é a radiação solar incidente sobre os painéis fotovoltaicos. Os restantes parâmetros de entrada são definidos pelo utilizador [23].

$$P = A_{surf} \times f_{activ} \times G_T \times \eta_{cell} \times \eta_{invert} \quad (3.8)$$

Relativamente ao modelo matemático *Equivalent One-Diode Model*, também conhecido por "TRNSYS PV Model", utiliza no cálculo da energia elétrica todas as características de corrente e tensão de um painel fotovoltaico. Para além disso, este modelo de cálculo também relaciona a produção de energia elétrica do sistema fotovoltaico com a temperatura a que se encontra a célula fotovoltaica, fator que se revela predominante na eficiência da mesma. Este conjunto de condicionalismos de cálculo aproximam bastante este modelo da realidade, não ficando dependente da avaliação do utilizador, uma vez que todos os dados fornecidos podem ser encontrados em qualquer folha de dados de um módulo fotovoltaico [23].

Por fim, o último método de cálculo baseia-se no trabalho de desenvolvimento do Laboratório Nacional Sandia, Albuquerque. Este princípio baseia-se no cálculo de cinco pontos da curva I-V do módulo fotovoltaico, através de relações empíricas com coeficientes extraídos de um teste real de um módulo fotovoltaico [23].

A existência de três modelos distintos, implica uma escolha criteriosa no modelo a utilizar para a simulação dinâmica. Assim a escolha será feita com base na simulação e através da comparação com o software *PVsyst*, considerado referência mundial na simulação para obtenção da produção de energia fotovoltaica estimada. Este estudo será realizado mais adiante, aquando da análise qualitativa da célula teste.

3.3 Síntese do capítulo

Este capítulo teve por base identificar os principais parâmetros que a integração fotovoltaica na envolvente influencia em termos de climatização. Dessa forma, descreveu-se como é que a radiação se transmite e como são alcançados os ganhos térmicos no edifício.

Após esta análise, fez-se uma abordagem mais aprofundada pela legislação do SCE para se perceber as formulas de cálculo que o regulamento utiliza em termos de necessidades térmicas. Para além disso, foi também importante identificar a forma como é concedida a classificação energética dos edifícios de serviços a partir desse mesmo regulamento.

Por fim, com base nas características de diferentes softwares de simulações, identificou-se o *Energy Plus* como aquele a utilizar na dissertação.

Capítulo 4

Análise quantitativa recorrendo a modelo computacional

A simulação dinâmica em modelo computacional pretende responder a diferentes requisitos, tais como: regulamentação e legislação, mas também validação do modelo computacional desenvolvido a que se deu o nome de célula teste virtual. Dessa forma, foi necessário criar um modelo computacional que correspondesse às normas e regulamentos em vigor na atual legislação. Após a criação do modelo, foi necessário realizar uma análise qualitativa à célula teste virtual na qual se verificou e validou a resposta que a mesma teve perante determinadas alterações na caracterização da mesma.

4.1 Modelo de Simulação da célula teste virtual

A construção do modelo de simulação da célula teste virtual tem em consideração vários fatores específicos da regulamentação portuguesa, nomeadamente o Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) [33]. Assim, tornou-se necessário, e sempre que possível, tomar opções presentes nessa mesma regulamentação e legislação vigente de forma a tornar o modelo mais realista. O modelo construído, tem a particularidade de considerar adiabática a envolvente correspondente ao pavimento e à cobertura. Esta consideração, permite identificar esta célula teste virtual como sendo a fração intermédia de um edifício com vários andares, conseguindo assim transportar este modelo para uma realidade mais urbana, que na realidade é o pretendido, pois a avaliação centra-se na requalificação urbana de um edifício existente. Finalmente, o modelo referência assume-se como sendo um edifício de escritórios.

4.1.1 Perfis de utilização de referência dos edifícios

Os perfis de utilização têm a sua importância na definição dos ganhos internos ao longo do dia. Este fator representa em períodos horários as percentagens de ocupação (Figura 4.1), de utilização de equipamentos (Figura 4.2) e iluminação (Figura 4.3) [5]. Estes foram valores expectáveis para escritórios, baseados no anterior Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE), isto porque na atual regulamentação estes são pressupostos a considerar no levantamento e caracterização do edifício [33]. De facto, estes acabam por ser perfis presumivelmente idênticos à realidade, dado que foram perfis obtidos a partir de medições reais a este setor de atividade.

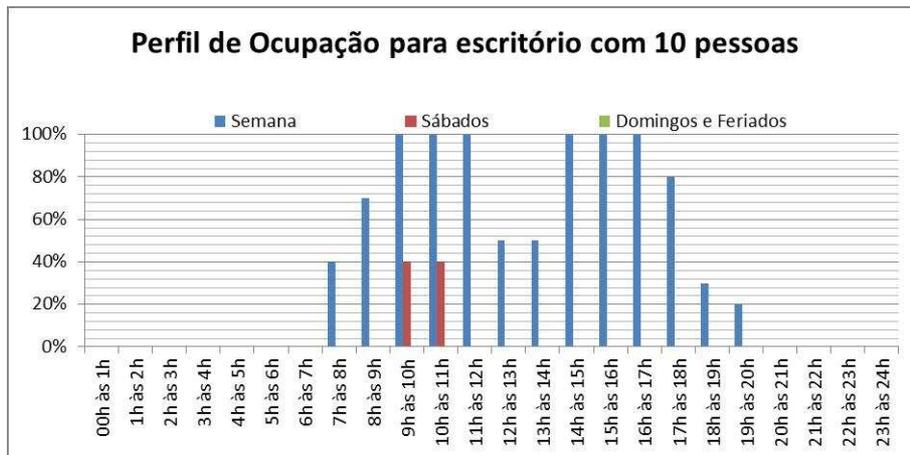


Figura 4.1: Perfil percentual de ocupação

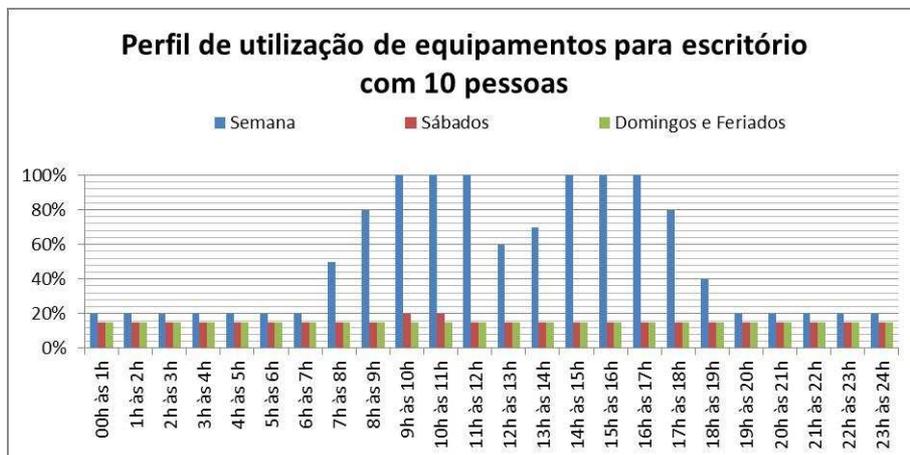


Figura 4.2: Perfil percentual de utilização de equipamentos

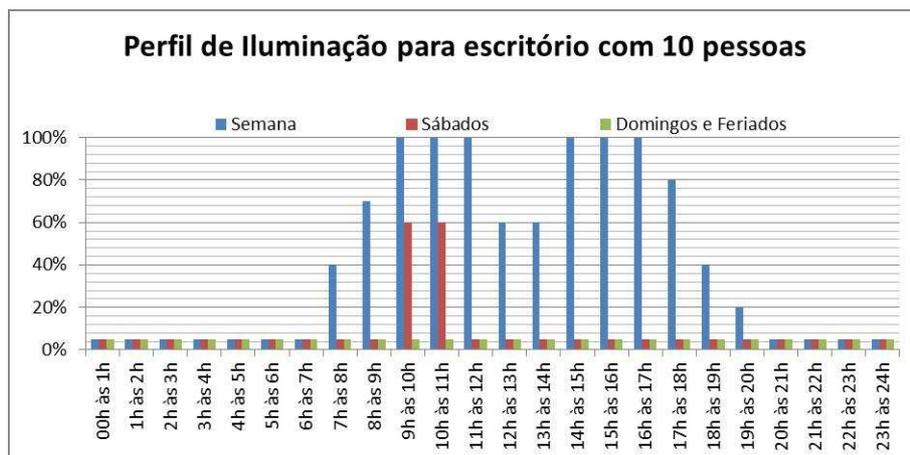


Figura 4.3: Perfil percentual de utilização da iluminação

4.1.2 Ganhos Internos

Para uma consolidação do balanço térmico e energético de um edifício é necessário ter em conta os ganhos internos do mesmo. Estes, variam com as densidades de ocupação, equipamentos e iluminação que se encontram ilustradas na tabela 4.1. Os valores considerados para as densidades de ocupação e equipamentos foram retirados do RSECE, dado que a atual regulamentação indica que devem ser pressupostos caracterizados aquando o levantamento das condições reais do edifício. Enquanto a densidade de iluminância tem de respeitar a Norma Europeia EN 12464 – 1, considerando na escolha de densidade que a área de tarefas pressupunha a utilização de computador [22].

Tabela 4.1: Ganhos internos considerados no modelo de simulação [5][22]

Densidades	
Ocupação	$10 \frac{m^2}{ocup}$
Equipamentos	$20 \frac{W}{m^2}$
Iluminância	500 lux

4.1.3 Renovações de ar interior

A ventilação dos edifícios de serviços novos em grande reabilitação pode ser alcançada por meio de ventilação natural, mecânica ou um combinado de ambas. Esta ventilação serve para garantir valores de caudal de ar novo mínimos de acordo com o Regulamento de Desempenho Energético de Edifícios de Comércio e Serviços. A ventilação natural, tal como o próprio nome indica, baseia o seu funcionamento no escoamento de ar através de ações naturais de vento e de diferenças de temperatura. Por outro lado, a ventilação mecânica serve-se de equipamentos mecânicos que promovem a renovação de ar interior. Essa renovação, pode ser executada através da extração de ar interior e insuflação de ar exterior ou de ar tratado numa mistura com ar novo vindo do exterior [34].

Caudal mínimo de ar novo

O dimensionamento do caudal mínimo de ar novo baseou-se no método de cálculo analítico da Portaria n.º 353-A/2013. Este traduz a aplicação da evolução temporal da concentração de dióxido de carbono (CO_2) previsível no espaço, em função do respetivo perfil de ocupação, perfil de ventilação e das características físicas dos ocupantes. A evolução temporal da concentração de CO_2 é definida pela seguinte equação e está representada no gráfico da Figura 4.4 obtido através da folha de cálculo citada na referida portaria [8].

$$C_{int}(t_i) = C_{ext} + \frac{G_{CO_2}}{Q_{AN}} + (C_{int}(t_{i-1}) - C_{ext} - \frac{G_{CO_2}}{Q_{AN}}) \times e^{-\frac{Q_{AN}}{V} \times (t_i - t_{i-1})} \quad (4.1)$$

em que:

- t - Instante genérico, ou instante final de cada incremento de tempo considerado no cálculo numérico, [h];

- $C_{int}(t_i)$ - Concentração de CO_2 no ar interior no instante t_i , $[mg/m^3]$ ou $[m^3/m^3]$;
- Q_{AN} - Valor do caudal de ar novo, $[m^3/h]$;
- C_{ext} - Valor médio típico da concentração do CO_2 no ar exterior para a zona onde se insere o edifício, $[mg/m^3]$ ou $[m^3/m^3]$;
- G_{CO_2} - Taxa total de geração de CO_2 no espaço, $[mg/h]$ ou $[m^3/h]$;
- V - Volume de ar no interior do espaço, $[m^3]$;
- $C_{int}(t_{i-1})$ - Valor da concentração de CO_2 no ar interior no instante inicial (t_{i-1}) de cada intervalo de tempo considerado no cálculo numérico, $[mg/m^3]$ ou $[m^3/m^3]$;

Para efetuar-se o cálculo acima referido terá de considerar-se que o valor de C_{ext} corresponde a $702mg/m^3$ que corresponde a 390ppm à pressão atmosférica normal e a $25^\circ C$ [34]. Assim, o caudal mínimo de ar novo exigido pela fração é de $200m^3/h$ visto ser o mínimo exigível para edifícios em grande reabilitação, pois, através da folha de cálculo para obter as renovações de ar por hora teve um resultado de $0,14h^{-1}$ que correspondia a $49m^3/h$ como pode ser observado na figura 4.5 [7], isto considerando um edifício localizado em Lisboa e com uma altura de fração de 14m, com 7m de área de envidraçado e considerando janelas de classe 2.

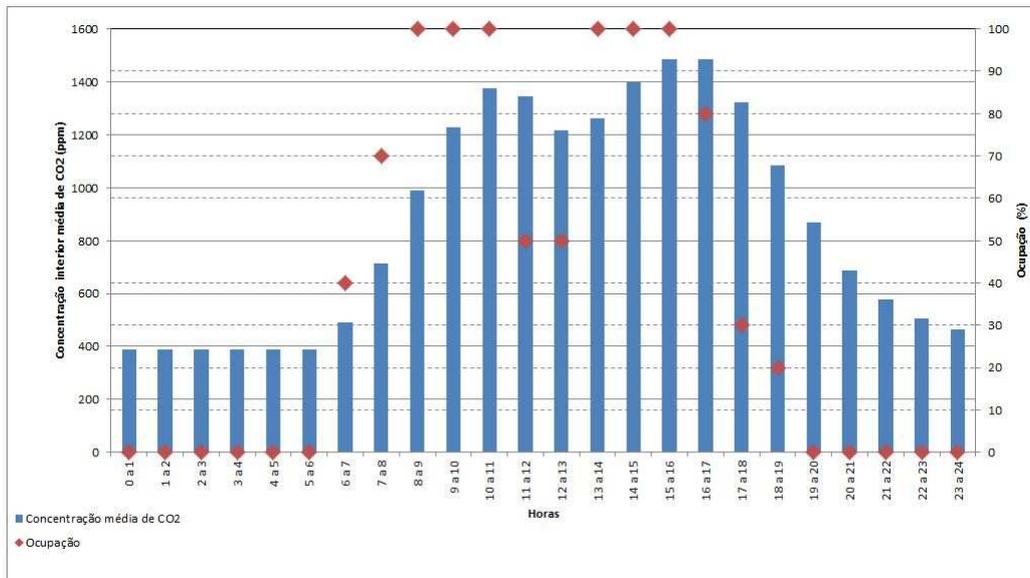


Figura 4.4: Concentração média de CO_2 baseada no perfil de ocupação do espaço. [8]

4.1.4 Sistema de climatização

O sistema de climatização também respeita a legislação portuguesa atual considerando-se já a eficiência mínima para 2015 que obrigatoriamente terá de ser da classe B. O sistema de climatização utilizado é uma bomba de calor com permuta exterior a ar, sendo que os valores mínimos e máximos admissíveis para EER e COP da mesma estão presentes na portaria 349-D de 2013 [33] e podem ser observados na tabela 4.2.

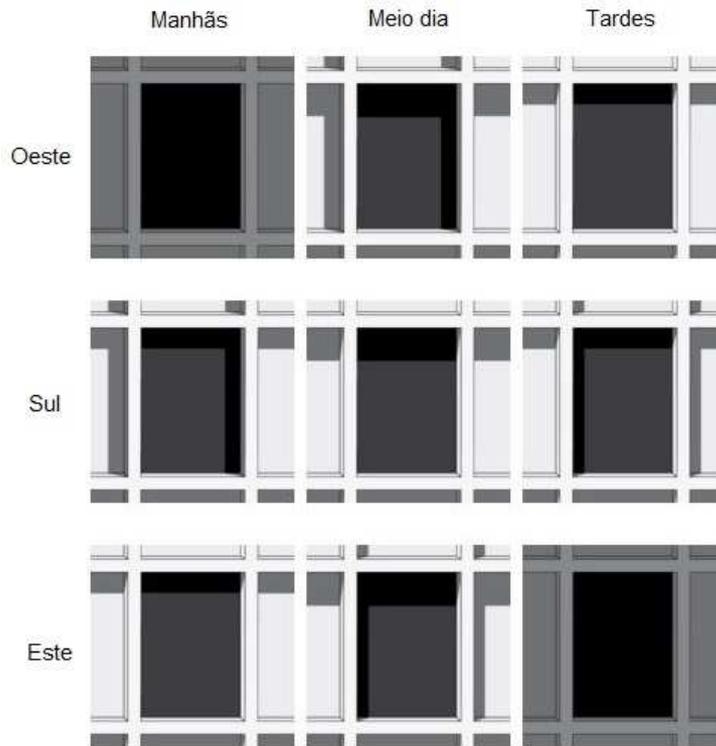


Figura 4.6: Exposição solar conforme a orientação e período do dia. [30]

(U_{opaco}) da mesma correspondia aos valores referência da legislação portuguesa (SCE): $0,5W/m^2K$. Também os vãos envidraçados foram definidos de forma a respeitar os valores de referência da mesma legislação, na qual o valor de referência é de $3,30W/m^2K$. No entanto, para o caso referência a escolha recaiu sobre um vidro duplo de 6mm de espessura e 6mm de ar com um coeficiente de transmissão térmica de $3,09W/m^2K$ e uma percentagem de 20% em qualquer das fachadas. O modelo referência pode ser observado na Figura 4.7, enquanto o modelo exemplificativo de BIPV pode ser observado na Figura 4.8. É ainda de salientar, que o isolamento térmico escolhido foi o EPS com uma condutividade térmica (k) de $0,04 W/m.K$, e por isso é de considerar que este será o isolamento de referência nesta dissertação.

Tabela 4.3: Solução construtiva da parede exterior da célula teste virtual

Parede Exterior			
Materiais	Espessura (mm)	U	$\frac{W}{m^2 \times K}$
Painel Fotovoltaico ⁽¹⁾	4		
Reboco	20		
EPS	62	0,5 e 0,535 ⁽¹⁾	
Betão	20		
Reboco	20		

Nota⁽¹⁾ - no caso de referência a camada de painel fotovoltaico não é tida em conta.

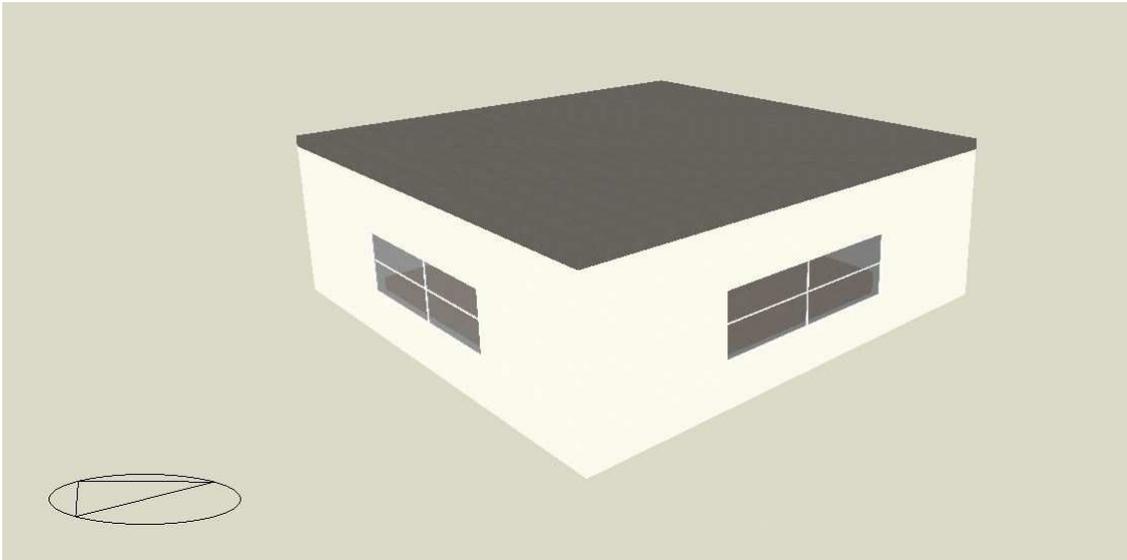


Figura 4.7: Representação da célula teste virtual

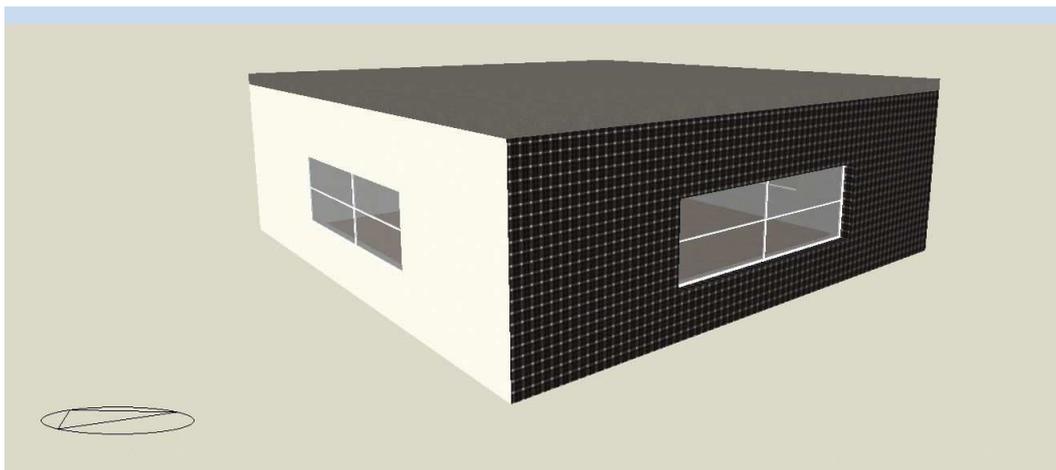


Figura 4.8: Representação da célula como instalação BIPV

4.1.6 Caracterização do Sistema Fotovoltaico

O sistema fotovoltaico tem o objetivo de produzir energia para utilizar no edifício. Para isso, deverá ser feito um dimensionamento do mesmo de forma coerente para os consumos em causa. Assim, as cargas que terão de ser suprimidas por este sistema são cargas de equipamentos elétricos, como computadores e outros equipamentos de escritório, mas também cargas com iluminação diurna e climatização. Desta forma, dado que ao considerar-se a cobertura como uma envolvente adiabática de forma a simular uma fração independente de um edifício de vários andares, apenas se irão instalar painéis na fachada vertical. Ao instalar-se apenas na fachada vertical permite perceber qual a viabilidade em termos de proveitos energéticos de uma instalação BIPV na fachada vertical de um edifício existente numa zona urbana, pois irá comparar dados de produção de energia elétrica com consumos desse mesmo tipo de energia com as cargas da fração.

Assim, considerando as cargas constantes de equipamentos e iluminação, iremos perceber qual a influência direta que a instalação do fotovoltaico terá nos consumos elétricos com a climatização. A área disponível para instalação de painéis fotovoltaicos será apenas a da fachada a sul, que corresponde a 28m^2 . Isto, pois não se contemplou a área de envidraçado da mesma. Na escolha do painel fotovoltaico, considerou-se como fator de decisão a obrigatoriedade de o fabricante dar a conhecer o coeficiente de transmissão térmica do mesmo para que se realizasse uma simulação dinâmica mais coerente. Esse fator dificultou a escolha, dado que a maioria das folhas de dados dos painéis fotovoltaicos apenas fornecerem informações de domínio elétrico. Assim, considerou-se para simulação os painéis fotovoltaicos presentes na bibliografia [10]. Os materiais e as suas propriedades físicas e térmicas estão presentes na tabela 4.4. As dimensões do painel fotovoltaico são $1041 \times 991 \times 35\text{mm}$, perfazendo um peso de $14,5\text{kg}/\text{módulo}$.

Tabela 4.4: Estratigrafia do Painel Fotovoltaico e propriedades.

Material	Densidade	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Condutibilidade Térmica	$\frac{\text{W}}{\text{mK}}$	Calor Específico	$\frac{\text{J}}{\text{kgK}}$	Espessura [mm]
Vidro	2500		1,16		840		4
EVA	960		0,25		2090		0,18
Silício	2336		149		700		0,27
EVA	960		0,25		2090		0,18
Tedlar	1780		0,20		1050		0,11
PET	1330		0,20		1047		0,15
Tedlar	1780		0,20		1050		0,11

Para a estimar a produção fotovoltaica também é necessário considerar as propriedades elétricas do painel em questão, apresentadas na tabela 4.5. Para além disso, a potência a instalar, está dependente de área disponível e da potência do painel. Assim, com 28m^2 de área disponível para instalação do sistema fotovoltaico, a potência instalada de painéis, também denominada de potência pico será de 3780W aproximadamente (4.3). Este é um valor razoável pois é superior à potência das cargas dos equipamentos elétricos, o que permite ter alguma folga para suprimir gastos com a climatização e iluminação, sempre que necessário e que exista condições meteorológicas adequadas a uma maior produção.

Tabela 4.5: Características elétricas do painel fotovoltaico [10]

Propriedades elétricas	Valor	Unidades
Potência (P_{max})	140	W
Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})	22,35	V
Tensão à máxima potência (V_{mpp})	17,84	V
Corrente de curto circuito (I_{sc})	8,20	A
Corrente à máxima potência (I_{mpp})	7,84	A
Eficiência (η)	13,60	%

$$P_{pico} = npainéis \times P_{pv} \Leftrightarrow P_{pico} = \frac{A_{disp}}{A_{pv}} \times P_{pv} \quad (4.2)$$

$$P_{pico} = \frac{28}{1,041 \times 0,991} \times 140 \simeq 27 \times 140 = 3870\text{W} \quad (4.3)$$

4.1.7 Dados Climáticos

O desenvolvimento da tecnologia BIPV em solo português pode ser uma boa alternativa à criação de NZEB's, independentemente da região do país. Assim, ao pretender-se avaliar o efeito da integração do fotovoltaico na climatização do edifício e ao mesmo tempo verificar qual o balanço energético do mesmo, tornou-se importante desenvolver estudos para diferentes regiões de Portugal, considerando diferentes zonamentos climáticos da legislação:

- Lisboa - zonas climáticas I1/V2
- Porto - zonas climáticas I2/V3
- Bragança - zonas climáticas I3/V2
- Faro - zonas climáticas I1/V3

O zonamento climático de Portugal pode ser observado na Figura 4.9[32]. A distribuição das diferentes classes de zonamento é feita de duas formas distintas. Enquanto a estação de aquecimento baseia o seu zonamento a partir do número de graus-dia (GD) na base 18°C, conforme a tabela 4.6, a determinação da zona para a estação de arrefecimento é feita por intermédio da temperatura média exterior correspondente à estação convencional de arrefecimento ($\theta_{ext,v}$) representada na tabela 4.7.

Tabela 4.6: Critérios para a determinação da zona climática de inverno [32].

Critério	$GD \leq 1300$	$1300 < GD \leq 1800$	$GD > 1800$
Zona	I1	I2	I3

Tabela 4.7: Critérios para a determinação da zona climática de verão [32].

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

4.1.8 Abordagem ao problema

A abordagem ao problema focou-se em avaliar qual o impacto da tecnologia BIPV no desempenho térmico de um edifício urbano em requalificação, mais concretamente um edifício de serviços. De forma a compreender a influência da integração do sistema fotovoltaico nesse edifício utilizaram-se duas abordagens. A primeira enveredou por uma base comparativa entre as necessidades de aquecimento e arrefecimento que o edifício reabilitado exigia sem o sistema fotovoltaico e com a tecnologia BIPV como elemento de revestimento da fachada. Para isso, a análise foi feita com base nos consumos energéticos do sistema de AVAC de ambas as situações. Esta abordagem permite compreender o efeito que os painéis fotovoltaicos tinham na transmissão de calor através da envolvente e conseqüentemente sobre os consumos energéticos da climatização e ventilação. A outra abordagem ao problema inseriu-se na perspetiva de balanço energético entre o sistema de AVAC e a produção alcançada pela tecnologia BIPV do edifício. Para isso, tomaram-se

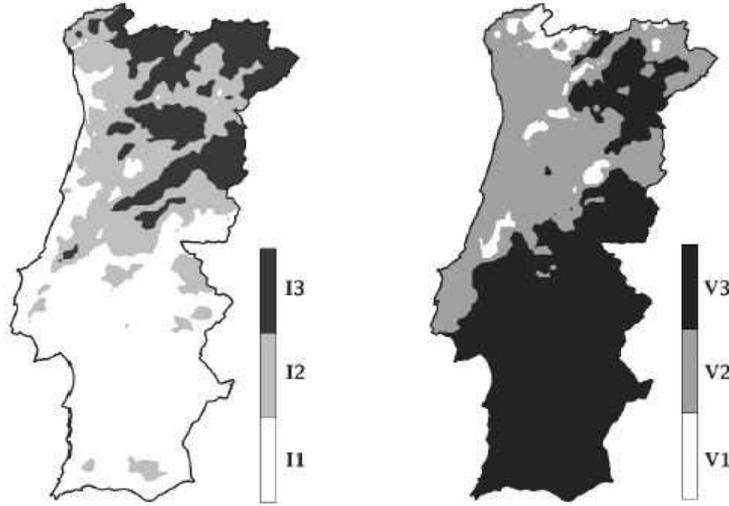


Figura 4.9: Representação do zonamento climático português. À esquerda é possível observar as zonas da estação de aquecimento e à direita aquelas que representam a estação de arrefecimento. [32]

como valores fixos os ganhos internos da fração e criou-se o indicador, I_{BIPV} , que compara o benefício que o sistema fotovoltaico tem em termos de produção de energia elétrica com a diferença de consumos entre a célula teste virtual, correspondente ao edifício reabilitado sem tecnologia BIPV, e também, a célula do edifício reabilitado com a tecnologia BIPV integrada na envolvente. Assim, o indicador pode ser calculado através da equação 4.4.

$$I_{BIPV} = \frac{\Delta Cons_{climatizao}}{Prod_{PV}} \Leftrightarrow I_{BIPV} = \frac{Cons_{CBIPV} - Cons_{CTeste}}{Prod_{PV}} \quad (4.4)$$

onde:

- I_{BIPV} - Representa o indicador de valorização da instalação BIPV em termos de balanço energético com o sistema de AVAC;
- $\Delta Cons_{climatizao}$ - Representa a diferença entre os consumos da instalação BIPV e da célula teste virtual, em kWh;
- $Prod_{PV}$ - Representa a produção fotovoltaica da instalação BIPV, em kWh;

Em termos de avaliação do indicador I_{BIPV} , essa faz-se da seguinte forma:

- $I_{BIPV} \geq 1$ - Não existe benefício para o balanço energético do edifício e por isso a instalação BIPV não deve ser considerada;
- $I_{BIPV} < 1$ - O balanço energético do edifício conhece uma melhoria com a instalação de um sistema BIPV e pode ser considerada a solução construtiva.

A posterior tomada de decisão, em relação à instalação do sistema fotovoltaico na fachada terá de ser feita baseada em termos económicos, baseada em custos de energia elétrica e tarifário, não sendo esse um dos objetivos desta dissertação.

4.2 Avaliação qualitativa da célula teste virtual

Este subcapítulo pretende verificar e validar o modelo computacional criado em termos comportamentais. Objetivamente, é pretendido nesta análise de sensibilidade verificar a qualidade e veracidade dos resultados a alcançar posteriormente com a integração do sistema fotovoltaico na fachada opaca vertical de um edifício de serviços em reabilitação. Para isso, serão feitas análises alterando definições referentes a perfis de utilização, iluminação, coeficiente de transmissão térmica e percentagem de vãos envidraçados. A avaliação da célula teste virtual é feita de forma quantitativa e com base nos resultados das alterações que forem feitas aos pressupostos definidos, não pressupondo a alteração de localização do modelo por uma questão de exequibilidade.

Perfil de utilização do edifício

A primeira simulação visou comparar os ganhos térmicos alcançados através da alteração da densidade e perfil de ocupação do edifício. Sendo assim, alterou-se a densidade de ocupação para $0,2 \text{ pessoas/m}^2$ e alterou-se o perfil de ocupação para 100% entre as 8h da manhã e as 19h da tarde durante o período semanal. Nas Figuras que se seguem são apresentados os ganhos internos diários ao longo do ano (Figura 4.10) e também estão representados os ganhos internos horários num dia tipicamente de inverno e num dia tipicamente de verão, Figuras 4.11 e 4.12 respetivamente. Com a alteração do perfil de ocupação do edifício é expectável influenciar os ganhos internos alcançados na fração. Assim, dado um aumento significativo do perfil de ocupação, espera-se que os ganhos internos aumentem também. Esse aumento, deve levar à diminuição das necessidades de aquecimento e ao aumento das necessidades de arrefecimento, o que se veio a verificar através da simulação.

Coefficiente de transmissão térmica da envolvente opaca

Perspetivando já a integração do fotovoltaico como elemento construtivo da envolvente, teve-se por objetivo compreender a influência do coeficiente de transmissão térmica no comportamento térmico do edifício. Para validar esta característica, retirou-se a camada de isolamento (EPS) que a célula teste virtual continha na composição de parede, algo que realisticamente não aconteceria mas que permite verificar e validar o modelo, bem como a importância que o isolamento tem como elemento construtivo. Essa alteração levou ao aumento do coeficiente de transmissão térmica da envolvente e espera-se, dessa forma, que as transferências de calor pela envolvente opaca ocorram com maior amplitude. Essas transferências de calor pela envolvente, deverão consumir um aumento do consumo de energia com o aquecimento e arrefecimento. De forma a perceber a influência do isolamento como elemento construtivo, alterando o coeficiente de transmissão térmica da fachada, observou-se qual a variação média da taxa de condução de calor através da envolvente da parede a sul. A análise obrigou também a uma análise nos consumos

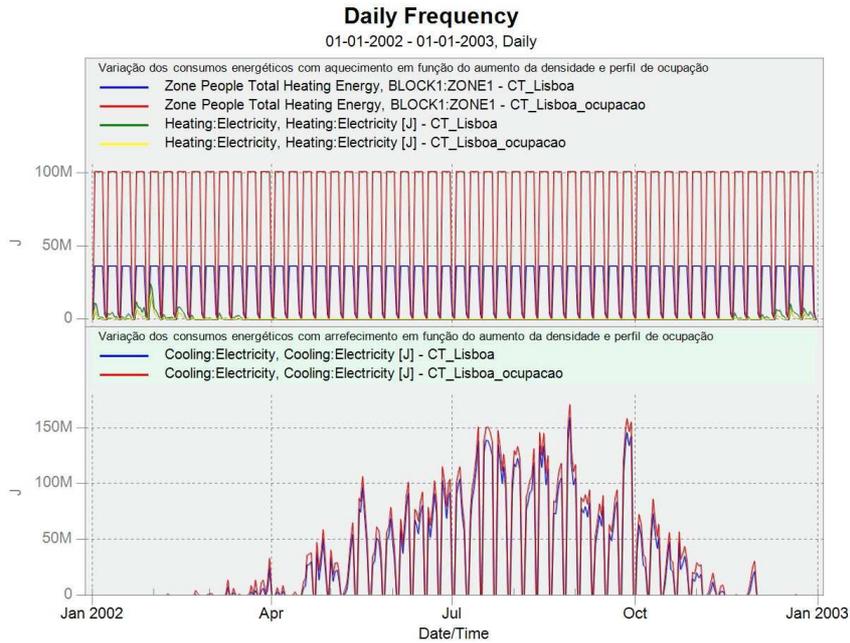


Figura 4.10: Validação do modelo teste. Quando ocorreu um aumento da densidade e perfil de ocupação, ocorreu uma alteração nas necessidades de consumo com o sistema de climatização.

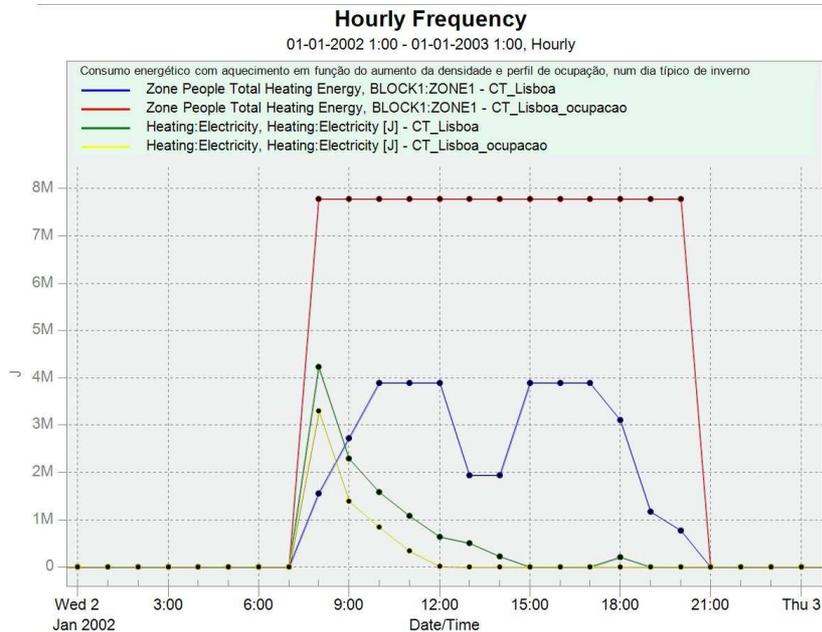


Figura 4.11: Consumo de energia elétrica com o sistema de aquecimento num dia tipicamente de inverno.

de energia com o sistema de AVAC. Os resultados alcançados através de simulação são apresentados na Figura 4.13.

Tal como previsto, os resultados de simulação mostram uma variação da taxa de

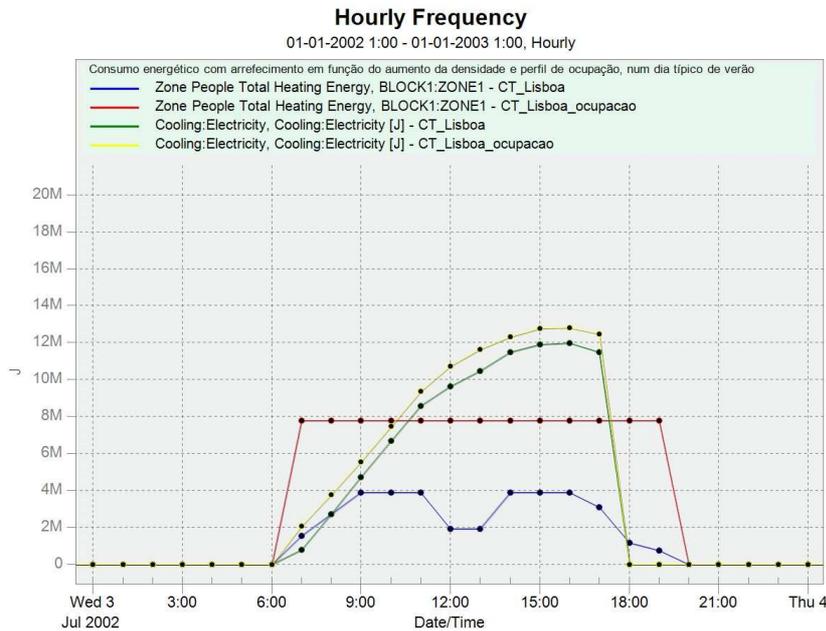


Figura 4.12: Consumo de energia elétrica com o sistema de arrefecimento num dia tipicamente de verão.

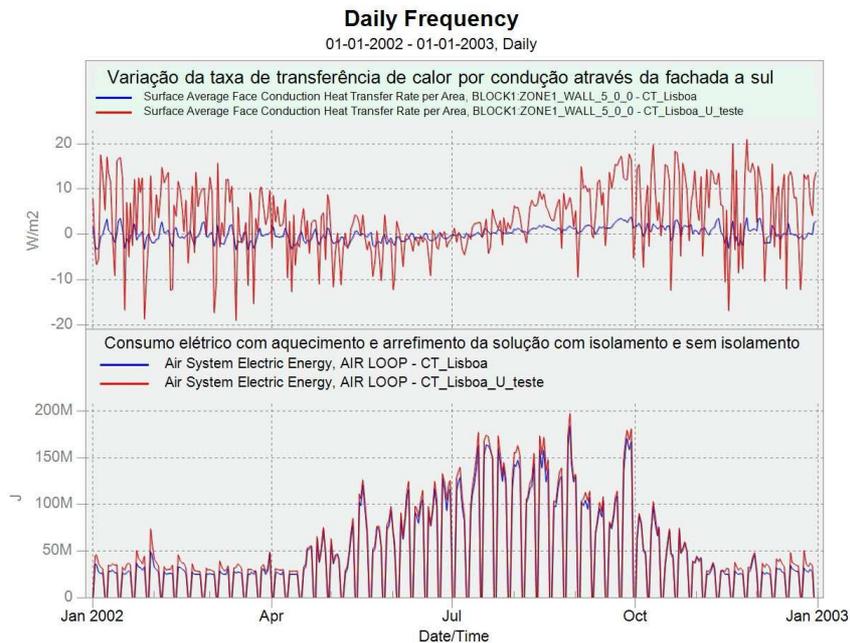


Figura 4.13: Variação da taxa de condução de calor através da fachada a sul e consumo de energia elétrica com o sistema de climatização.

condução de calor mais acentuada na envolvente sem o isolamento térmico (EPS), o que leva a mais perdas e por isso maior consumo energético para suprimir essas perdas de calor.

Vãos envidraçados

Outra das formas de validar qualitativamente o modelo, é através dos vãos envidraçados. Para isso, aumentou-se até 60% a fração envidraçada de cada parede. Em termos de resultados, é então esperado um aumento significativo dos ganhos solares por radiação no verão e inverno. Contudo, as necessidades de arrefecimento esperaram-se superiores, bem como as necessidades de aquecimento. Relativamente à primeira (necessidades de arrefecimento), os ganhos solares aumentam a temperatura interior e por consequência as necessidades de arrefecimento. Enquanto, as necessidades de aquecimento, embora com mais ganhos solares de inverno, sofrem também um aumento dado que o coeficiente de transmissão térmica da fração envidraçada é superior ao da envolvente opaca e por isso as perdas por condução para o exterior são maiores.

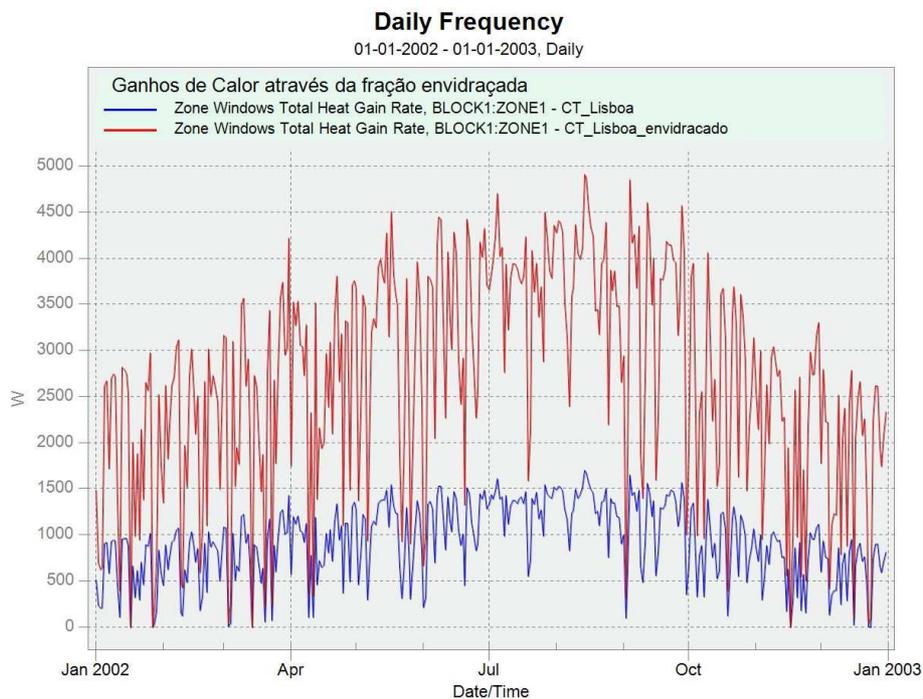


Figura 4.14: Variação da taxa de ganhos solares através da fração envidraçada.

Tal como referido, após análise da simulação dos dois modelos, verificou-se que os ganhos solares através da fração envidraçada aumentaram na solução em que a fração envidraçada correspondia a 60% (Figura 4.14). Por consequência, e como previsto, os consumos elétricos com o arrefecimento também aumentaram significativamente, contudo o aumento dos consumos com o aquecimento não foi tão acentuado, mas ainda assim foram verificados (Figura 4.15). Esta última conclusão aceita-se dado que as necessidades de aquecimento não eram tão relevantes como as de arrefecimento e por isso se explica uma menor variação nos consumos, que ainda assim foram superiores.

Produção de energia fotovoltaica

Por fim, para dissimular qualquer erro relativo à produção de energia fotovoltaica que possa estar a ocorrer na simulação optou-se por comparar os resultados da simulação

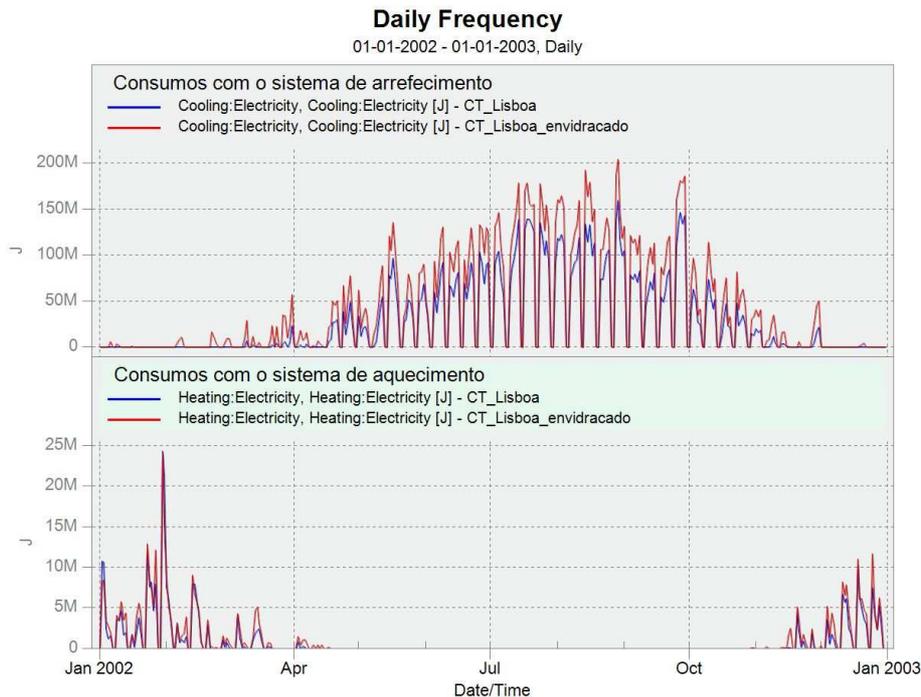


Figura 4.15: Variação dos consumos elétricos com os sistemas de arrefecimento e aquecimento.

em *Energy Plus* com uma simulação em *PVsyst* considerado um dos melhores softwares de simulação para a produção de energia fotovoltaica. Através desta comparação, é possível tomar a decisão sobre o melhor o método de simulação do *Energy Plus: Simple* ou *Equivalent-one-diode*. A escolha do método de simulação recaiu naquele que mais se aproximou dos resultados obtidos em *PVsyst*. A Figura 4.16 representa a comparação de valores entre os três métodos em estudo, e na qual é perceptível perceber que os resultados do método *Equivalent-one-diode* são dispares dos resultados alcançados pelo método *Simple* e pela simulação em *PVsyst*. Uma possível explicação para tal ocorrência deveu-se ao facto de o método *Equivalent-one-diode* ser ainda um método a sofrer diversos testes em laboratório. Dessa forma, a escolha pela simulação em *Energy Plus* recaiu no método *Simple*, sendo que na Figura 4.17 pode observar-se as diferenças que ocorrem na produção de energia fotovoltaica que podem ser explicadas pelo facto de os dados meteorológicos do *PVsyst* serem do *Meteonorm*, enquanto os dados meteorológicos do *Energy Plus* pertencerem ao INETI. Para além disso a simulação em *PVsyst* tem em conta várias perdas que possam ocorrer: cablagem, sujidade entre outras, enquanto no *Energy Plus* apenas é permitido definir-se uma eficiência para o gerador fotovoltaico, sendo essa de 96%.

A partir da Figura 4.18 é possível observar os desvios de produção de ambos os casos (*Energy Plus - Simple* e *PVsyst*) e é de referir que dado o desvio percentual alcançado, 6% pode considerar-se que a simulação estará a apresentar dados próximos da realidade.

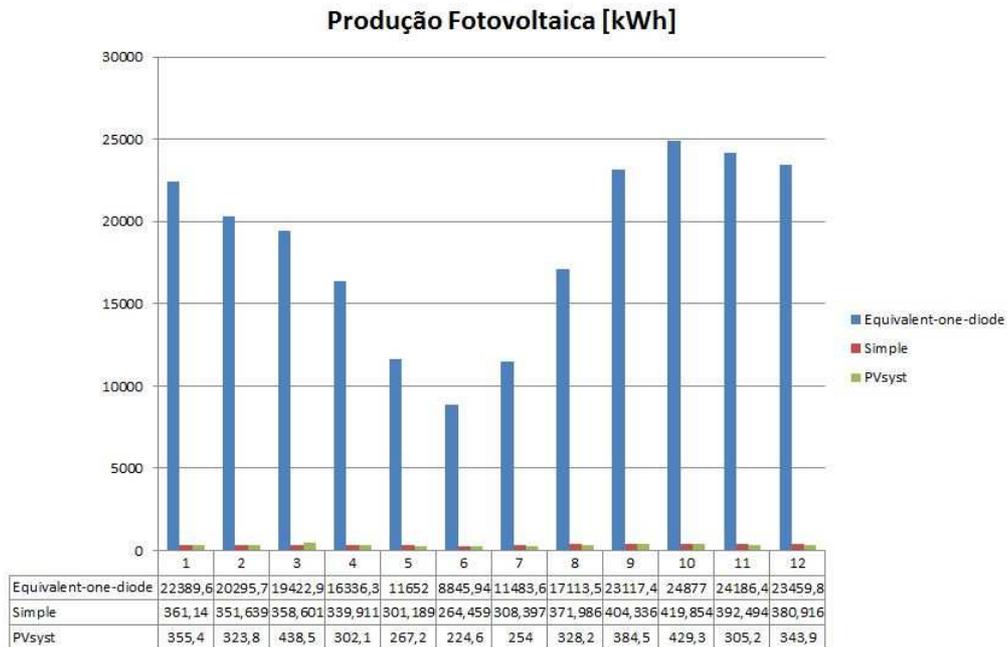


Figura 4.16: Comparação da produção de energia elétrica fotovoltaica a partir de dois métodos distintos em *Energy Plus* e simulação em *PVsyst*.

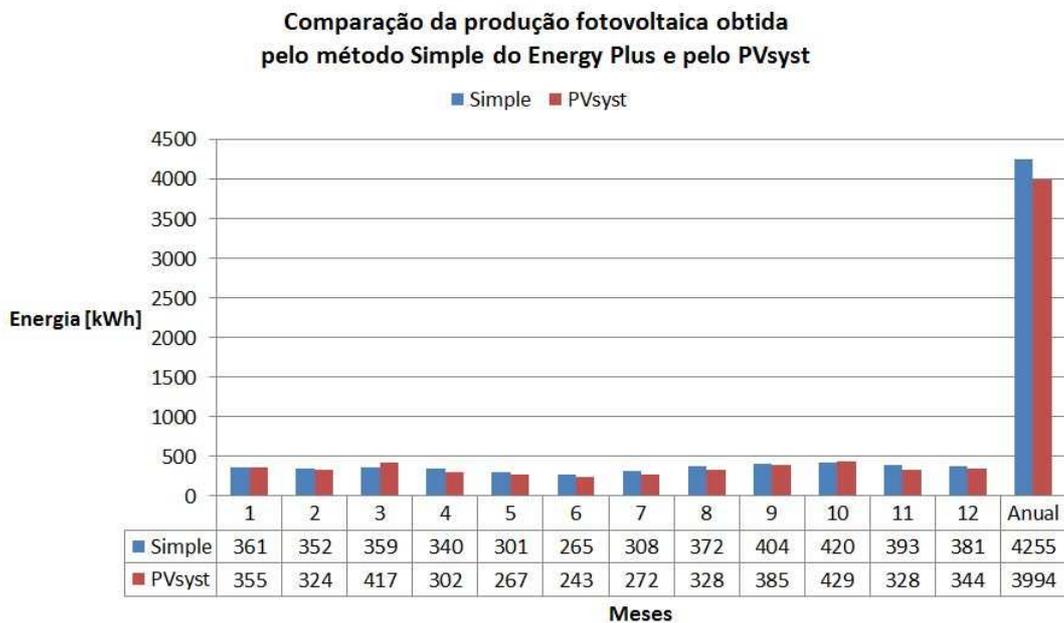


Figura 4.17: Comparação da produção de energia elétrica fotovoltaica a partir do método *Simple* em *Energy Plus* e a simulação em *PVsyst*.

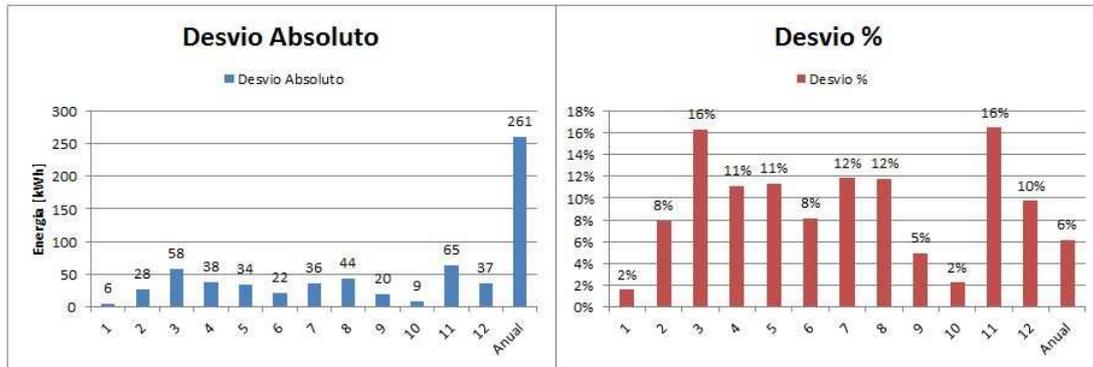


Figura 4.18: Desvio absoluto e percentual da produção de energia elétrica fotovoltaica a partir do método *Simple* em *Energy Plus* e a simulação em *PVsys*.

4.3 Síntese do capítulo

Este é um dos capítulos com mais importância nesta dissertação pois procedeu-se à caracterização do modelo computacional, através das exigências do RECS, considerando um edifício de serviços no contexto da reabilitação urbana.

Para além disso, estabeleceu-se neste capítulo a abordagem a ter e a forma de avaliação dos resultados alcançados, nomeadamente através do indicador I_{BIPV} que pressupõe avaliar o balanço energético entre a produção e os consumos do sistema de AVAC da instalação *BIPV*, face aos consumos do sistema de AVAC do edifício sem tecnologia *BIPV* instalada. Para realizar essa avaliação estabeleceu-se um valor a partir do qual deixa de ser interessante fazer a integração do sistema fotovoltaico na envolvente.

Por fim, foi realizada uma análise qualitativa ao modelo criado para avaliar e validar a qualidade de resultados apresentados, tudo isso através de uma análise de sensibilidade a parâmetros que necessários para a realização do estudo paramétrico do próximo capítulo.

Capítulo 5

Estudo paramétrico e análise de resultados

5.1 Sumário do Capítulo

Este capítulo pretendeu apresentar as diferenças ao nível de consumos com o sistema de AVAC do edifício de serviços em Portugal, no contexto da reabilitação urbana. Para tal, efetuaram-se simulações dinâmicas referentes ao caso em que o edifício não teria integração fotovoltaica na envolvente, representando assim, os consumos energéticos do sistema de AVAC antes da reabilitação ou fazendo uma reabilitação sem integrar a tecnologia fotovoltaica. Contudo, para averiguar qual seria o impacto que a integração da tecnologia BIPV teria nesses mesmos consumos após a reabilitação, efetuaram-se simulações dinâmicas para situações onde a reabilitação passasse por integrar na envolvente do edifício a tecnologia fotovoltaica como elemento construtivo da mesma, através do revestimento da fachada opaca vertical. Estas simulações aqui referenciadas, ocorreram com o intuito de avaliar a influência da localização do edifício a reabilitar, do perfil de utilização do mesmo e por fim, através da avaliação à influência do nível de isolamento térmico da instalação. Neste capítulo, foi também efetuada a análise da viabilidade da instalação de tecnologia BIPV através do indicador I_{BIPV} .

5.2 Estudo da influência da localização da instalação

A avaliação da influência da tecnologia fotovoltaica integrada na envolvente do edifício em reabilitação teve em conta os consumos energéticos com o aquecimento, arrefecimento e ventilação, assim como, a produção de energia fotovoltaica que a integração da tecnologia BIPV permitiu. Esta produção serviu para determinar qual o indicador I_{BIPV} em cada localização.

5.2.1 Lisboa

A instalação *BIPV* em Lisboa caracterizou-se pelas elevadas necessidades de arrefecimento e diminutas necessidades em aquecimento tal como a célula teste virtual (edifício existente), representada na Figura 5.1. Ainda há a destacar, o aumento que ocorreu ao nível do consumo do sistema de AVAC, principalmente, devido ao aumento do consumo

com o sistema de arrefecimento do edifício reabilitado integrando tecnologia BIPV face à célula teste virtual.

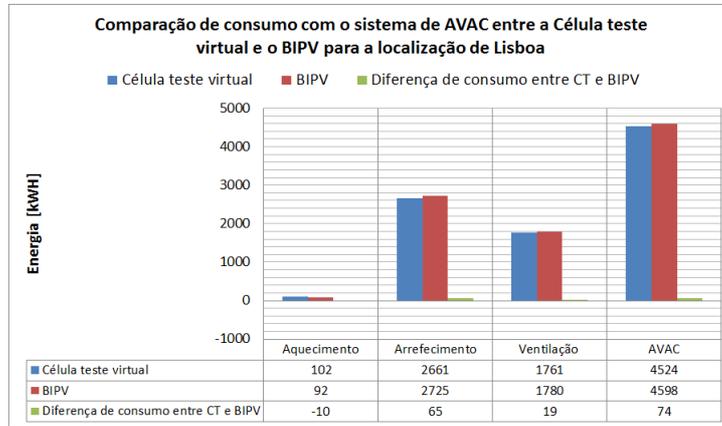


Figura 5.1: Comparação dos consumos energéticos com o sistema de AVAC para a instalação da Célula teste virtual e para o edifício com tecnologia BIPV em Lisboa.

Na Figura 5.2 é possível verificar mensalmente como ocorreu a variação de consumos do edifício com tecnologia BIPV integrada. De referenciar, que até ao mês de abril e a partir do mês de outubro, a produção de energia fotovoltaica conseguiu suprimir, em termos de balanço global, todos os consumos energéticos com o sistema de AVAC, possibilitando a utilização do remanescente para outros consumos da instalação, nomeadamente equipamentos e iluminação. Os picos de consumo energético com o sistema de AVAC e produção de energia fotovoltaica ocorreram nos meses de agosto e outubro, enquanto os mínimos de consumo e produção deram-se nos meses fevereiro e junho, respetivamente.

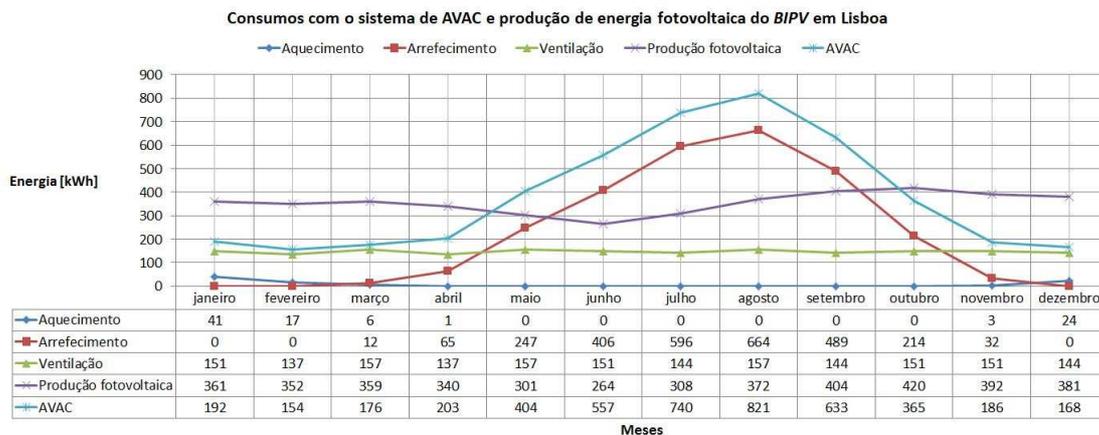


Figura 5.2: Consumos energéticos com o sistema de AVAC e produção fotovoltaica para a instalação BIPV em Lisboa com uma amostragem mensal.

5.2.2 Porto

O edifício urbano com tecnologia BIPV situado na cidade do Porto, apresentou, tal como em Lisboa, um aumento do consumo do sistema de AVAC em comparação com o edifício sem a integração deste sistema na sua envolvente vertical opaca. A Figura 5.3, mostrou que, embora se tenha verificado o aumento do consumo total do sistema de AVAC, esse não foi tão acentuado, pois, o aumento do consumo com o sistema de arrefecimento do edifício com tecnologia BIPV não foi tão elevado face à respetiva Célula teste virtual. Nesta localização, a tecnologia BIPV, proporcionou uma diminuição no consumo com o sistema de aquecimento, não sendo esta diminuição tão acentuada como foi o aumento do consumo no sistema de arrefecimento.

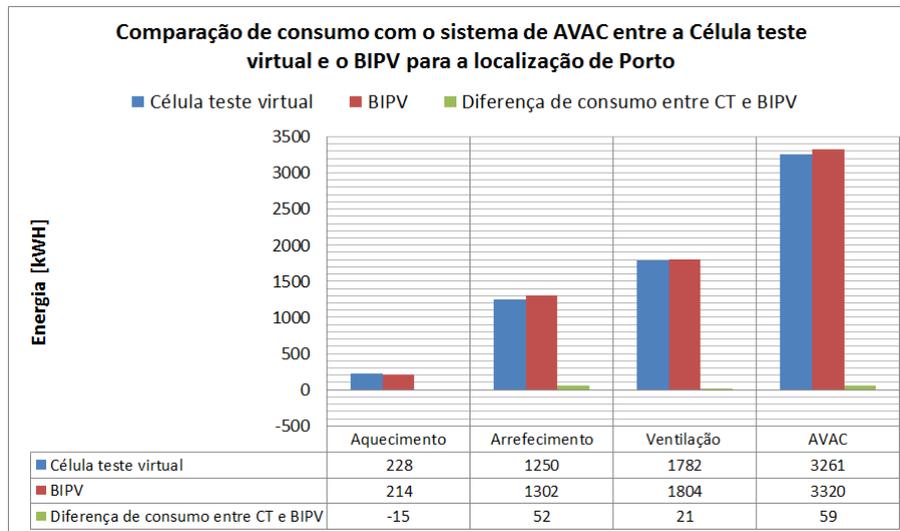


Figura 5.3: Comparação dos consumos energéticos com o sistema de AVAC para a instalação da Célula teste virtual e para o edifício com tecnologia *BIPV* no Porto.

O edifício equipado com a tecnologia BIPV na sua envolvente vertical opaca, localizado no Porto, apresentou um consumo com o sistema de AVAC superior à produção fotovoltaica sensivelmente entre final de maio até meio de setembro (Figura 5.4). Neste caso, os consumos máximos e mínimos com o sistema de AVAC ocorreram nos meses de agosto e fevereiro, respetivamente, tal como em Lisboa. A produção de energia fotovoltaica, foi máxima em março e mínima no mês de novembro.

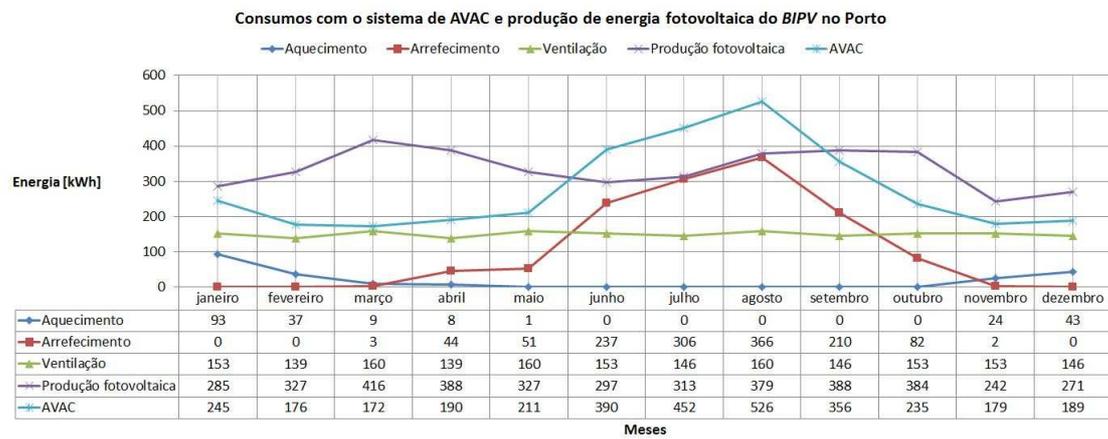


Figura 5.4: Consumos energéticos com o sistema de AVAC e produção fotovoltaica para a instalação BIPV no Porto com uma amostragem mensal.

5.2.3 Bragança

O edifício com integração da tecnologia BIPV em Bragança apresentou uma melhoria no consumo com o sistema de aquecimento, em comparação com a Célula teste virtual. Contudo, o consumo com o sistema de arrefecimento aumentou com a integração do sistema fotovoltaico na envolvente, embora tenha ocorrido de forma menos acentuada, quando comparado com os edifícios inseridos nas anteriores localizações. Na globalidade, e tal como nas anteriores localizações apresentadas, também o edifício com a integração do sistema fotovoltaico como revestimento apresentou um aumento no consumo total do sistema de AVAC, face ao consumo total desse mesmo sistema na Célula teste virtual.

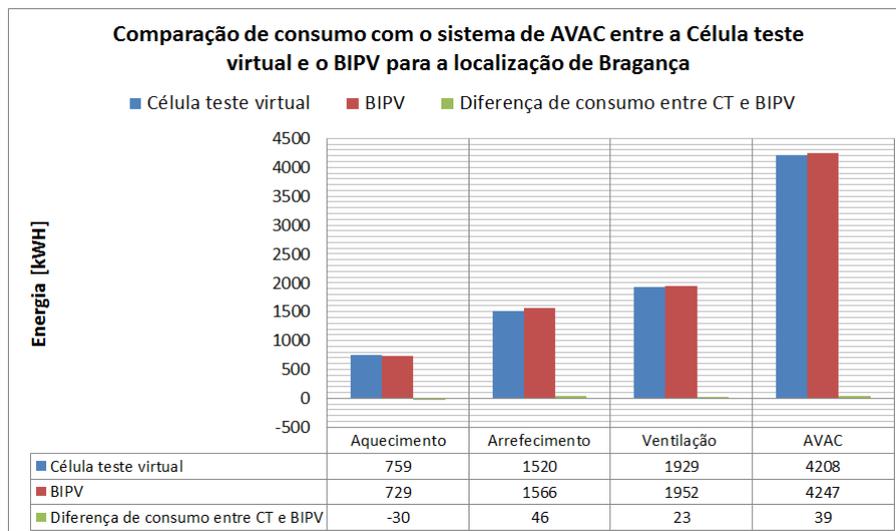


Figura 5.5: Comparação dos consumos energéticos com o sistema de AVAC para a instalação da Célula teste virtual e para o edifício com tecnologia *BIPV* em Bragança.

No caso de Bragança, o edifício BIPV, foi aquele que apresentou as maiores necessidades de aquecimento, em comparação com os edifícios localizados em Lisboa e Porto, exigindo a maior quantidade de energia durante os meses de inverno: novembro, dezembro, janeiro e fevereiro. Relativamente ao balanço energético entre o sistema de AVAC e a produção de energia fotovoltaica, foi em Bragança que se verificou um comportamento mais sazonal, como representado no gráfico da Figura 5.6. Isto, porque nas estações de inverno e verão, a produção de energia fotovoltaica não conseguiu suprimir o consumo de energia para sistema de AVAC, porém, durante a primavera e outono já o conseguiu fazer.

O mês que efetivou um maior consumo do sistema de AVAC foi também o mês de agosto tal como no Porto, sendo que o mês de março foi aquele que menos consumos energéticos com a climatização e ventilação obteve. A maior produção de energia fotovoltaica estimada foi no mês de setembro, sendo o mês de dezembro aquele que teve a menor produção de energia.

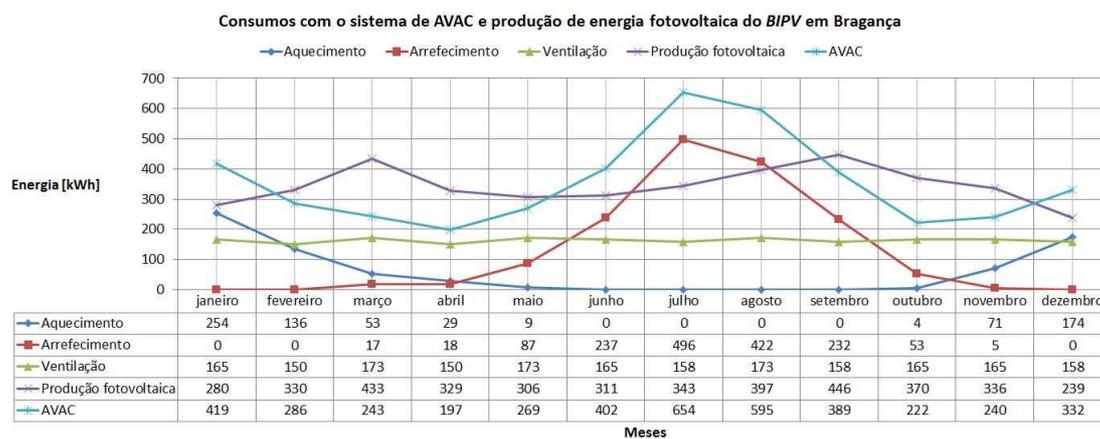


Figura 5.6: Consumos energéticos com o sistema de AVAC e produção fotovoltaica para a instalação BIPV em Bragança com uma amostragem mensal.

5.2.4 Faro

Finalmente, o caso de estudo de Faro, apresentou a maior diferença no consumo de energia com o sistema de AVAC, quando comparado o edifício com a integração da tecnologia BIPV e a célula teste virtual. Este facto, deveu-se ao aumento significativo do sistema de arrefecimento comparativamente com o aquecimento (Figura 5.7). Os edifícios localizados em Faro, apresentaram também as menores necessidades com o sistema de aquecimento.

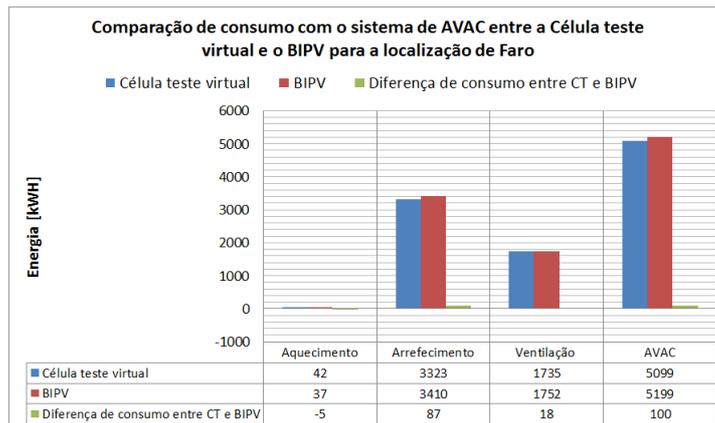


Figura 5.7: Comparação dos consumos energéticos com o sistema de AVAC para a instalação da Célula teste virtual e para o edifício com tecnologia BIPV em Faro.

Embora Faro tenha um maior número de horas de exposição solar em relação às outras três localizações, particularmente Porto e Bragança, o mesmo não se refletiu na produção de energia elétrica através do sistema fotovoltaico, dado que a inclinação era desfavorável, revelando-se ainda mais prejudicial no período de verão, tipicamente o mais produtivo por ter um maior número de horas de sol. Relativamente ao pico de consumo com o sistema de AVAC, esse ocorreu no mês de agosto e o mínimo no mês de dezembro. A produção de energia apresentou o seu máximo contributo no mês de março e o mínimo no mês de junho.

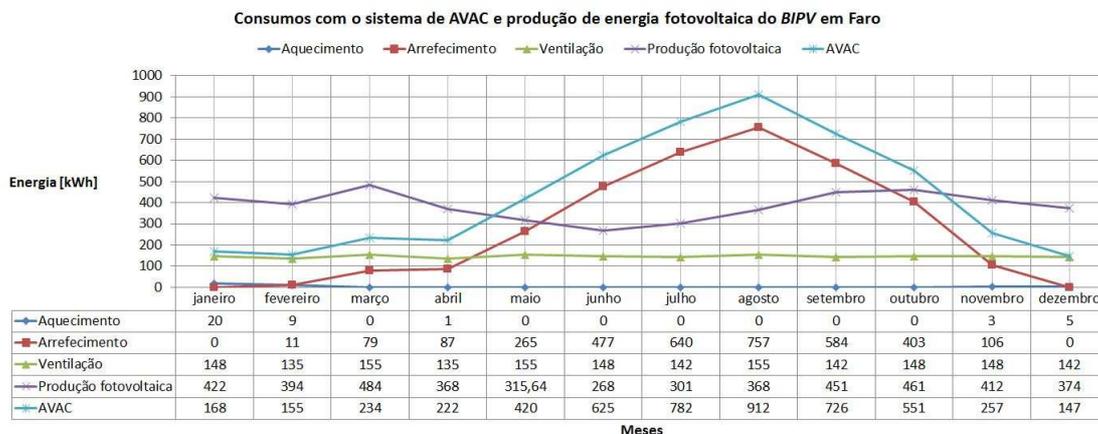


Figura 5.8: Consumos energéticos com o sistema de AVAC e produção fotovoltaica para a instalação BIPV em Faro com uma amostragem mensal.

Comparação de resultados e análise abrangente

Os resultados alcançados mostram que, embora se verifiquem aumentos dos consumos de energia elétrica com o sistema de AVAC, esses são amplamente compensados pela produção de energia fotovoltaica (Figura 5.9), mesmo, tendo em conta, o ângulo de inclinação bastante desfavorável. Clarificando de forma concreta a viabilidade técnica da instalação BIPV optou-se por encontrar um indicador que compare os consumos de AVAC com a produção fotovoltaica, já mencionado no capítulo anterior: I_{BIPV} . O cálculo desse indicador permitiu validar a opção pela tecnologia BIPV em detrimento de uma envolvente opaca sem revestimento do sistema fotovoltaico, como pode ser observado na Tabela 5.1 e na Figura 5.10.

Tabela 5.1: Resultado do cálculo do indicador I_{BIPV} , que validou o balanço energético entre os consumos do sistema de AVAC de uma instalação BIPV e a produção de energia elétrica alcançada.

	Lisboa	Porto	Bragança	Faro
Aumento percentual do consumo de AVAC do BIPV	1,61%	1,78%	0,91%	1,92%
Indicador BIPV	0,017	0,015	0,009	0,022

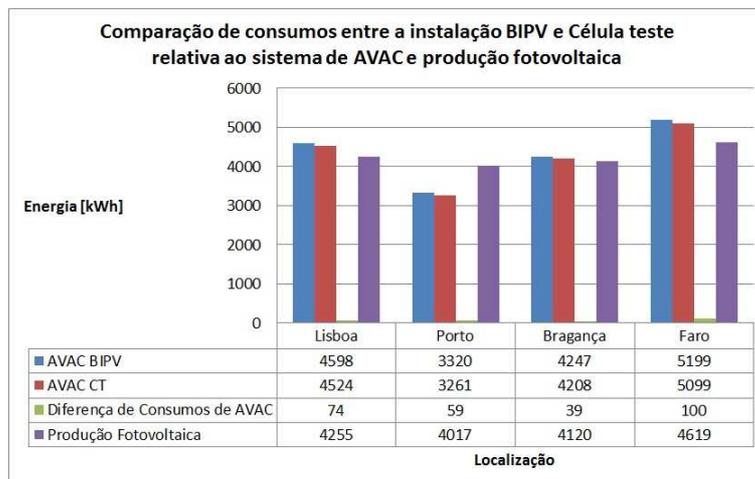


Figura 5.9: Comparação entre os consumos energéticos com o sistema de AVAC e a produção fotovoltaica para a instalação BIPV.

O indicador I_{BIPV} destacou que qualquer um dos edifícios beneficiou em termos de balanço energético da integração do sistema fotovoltaico na fachada.

A comparação entre os consumos do edifício integrando a solução fotovoltaica e o edifício referente à célula teste virtual, apresentou resultados que revelam o sistema de arrefecimento, como sendo aquele que mais contribuiu na globalidade do aumento de consumo que uma solução de tecnologia BIPV implementava no edifício, como pode ser observado na Figura 5.11. De referir, que o edifício de tecnologia BIPV localizado em Bragança foi aquele, no qual o aumento do consumo do sistema de AVAC foi menor, representando essa tecnologia um aumento inferior a 1%. Contrariamente, o edifício localizado em Faro foi aquele onde se verificou um maior aumento dos seus consumos

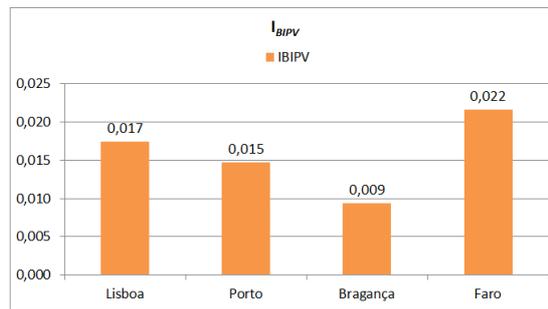


Figura 5.10: Indicador I_{BIPV} referente à avaliação da influência da localização.

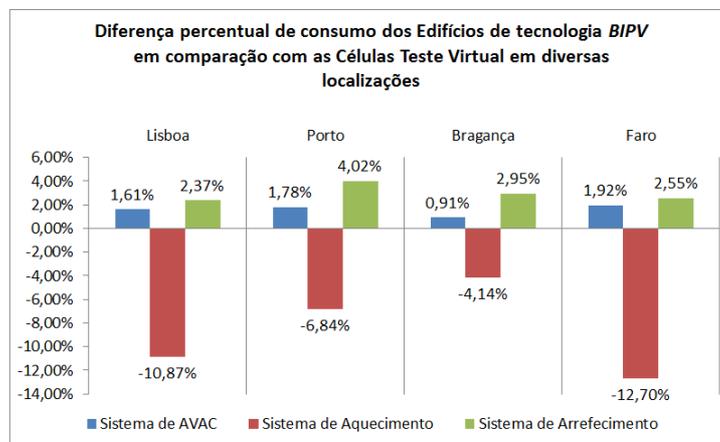


Figura 5.11: Comparação percentual referente ao consumo do sistema de AVAC consoante a localização do edifício.

energéticos com o sistema de AVAC, devido, particularmente, ao sistema de arrefecimento que se revelou aquele que mais contributo cedeu ao consumo total do sistema de AVAC em todas as localizações.

5.3 Estudo da influência do perfil de utilização do edifício

A análise qualitativa elaborada no capítulo anterior, 4.2, provou que o aumento do perfil de ocupação conduziu à diminuição das necessidades de aquecimento e a um aumento significativo das necessidades de arrefecimento edifício reabilitado e com a tecnologia BIPV integrada. Desta forma, neste subcapítulo, a abordagem foi feita aos edifícios localizados em Faro e em Bragança. A primeira localização foi escolhida pelo facto deste ser o local que apresentou maiores consumos de arrefecimento e também pelo facto de a reabilitação integrando a tecnologia BIPV no edifício ter apresentado a maior diferença de consumo do sistema de AVAC face à célula teste virtual. Já a opção pelo segundo, baseou-se no facto de esta ser a localização com maiores exigências de aquecimento, mas, ao mesmo tempo, com o melhor desempenho na reabilitação como edifício integrando a tecnologia BIPV, quando comparadas a diferença percentual no consumo do sistema de AVAC de todas as localizações entre os edifícios sem sistema fotovoltaico e os edifícios reabilitados integrando a tecnologia BIPV.

Para realizar este estudo, o perfil de ocupação de ambos os edifícios, célula teste virtual e edifício reabilitado com a tecnologia BIPV, foi aumentado através da alteração do perfil de utilização, mas também, pelo aumento da densidade de ocupação. Assim, a análise foi feita considerando aumentos da densidade de ocupação para $0,2\text{pessoas}/\text{m}^2$, $0,5\text{pessoas}/\text{m}^2$ e para um caso mais extremo de $0,8\text{pessoas}/\text{m}^2$. Acresceu a tudo isto uma alteração do perfil de ocupação para 100% entre as 8h da manhã e as 19h da tarde, como pode ser observado na tabela 5.2.

Tabela 5.2: Condições relativas à densidade ocupacional e perfil de utilização em estudo para os edifícios localizados em Faro e Bragança.

Densidade ocupacional	$0,2\text{pessoas}/\text{m}^2$	$0,5\text{pessoas}/\text{m}^2$	$0,8\text{pessoas}/\text{m}^2$
Perfil de Utilização	100% das 8h às 19h		

5.3.1 Análise ao perfil de utilização do edifício BIPV de Faro

O estudo paramétrico para Faro, função do perfil de ocupação revelou que à medida que a densidade e perfil de ocupação aumentam, a diferença de consumos com o sistema de AVAC, entre o edifício reabilitado com a tecnologia BIPV e a respetiva célula teste virtual (edifício existente sem o revestimento do sistema fotovoltaico), tende a diminuir, como pode ser observado na Figura 5.13.

Na Figura 5.12 apresentam-se as diferenças efetivas entre os consumos de ambas os edifícios, já referidos, consoante os diversos perfis de ocupação, sendo que existiu um aumento significativo do consumo energético do sistema de AVAC com o aumento da variável referida, tanto no edifício existente, como no edifício reabilitado com a integração da tecnologia fotovoltaica na fachada opaca vertical. O consumo energético praticamente duplicou quando comparados os perfis de ocupação inicial, de $0,1\text{pessoas}/\text{m}^2$ e o maior perfil de ocupação $0,8\text{pessoas}/\text{m}^2$.

O contributo do perfil de ocupação favoreceu a integração do sistema fotovoltaico na envolvente. Isto, pelo facto, do aumento do perfil e densidade de ocupação em ambos os edifícios (existente e reabilitado), se refletir numa diminuição percentual entre a diferença de consumos do sistema de AVAC das duas instalações, particularmente, pelas diminuição verificada na diferença das necessidades de arrefecimento entre o edifício de tecnologia BIPV e a célula teste virtual, como está representado na Figura 5.13.

5.3.2 Análise ao perfil de utilização do edifício BIPV de Bragança

Os resultados apresentados através da simulação aos modelos localizados em Bragança mostraram que, a diferença entre os consumos do edifício existente e o edifício com tecnologia BIPV integrada, apresentou um aumento com o aumento do perfil e densidade de ocupação com está representado de forma percentual na Figura 5.15. Estes resultados revelaram que o aumento do perfil de ocupação, levou à diminuição do consumo do sistema de aquecimento, sendo que, para a ocupação máxima, estes reduziram-se praticamente a zero tanto no edifício existente, célula teste virtual, como no edifício reabilitado integrando a tecnologia BIPV como está representado na Figura 5.14.

Todavia, com o aumento da densidade de ocupação e perfil de utilização, a diferença percentual de consumos do sistema de AVAC, entre ambos os edifícios (existente e rea-

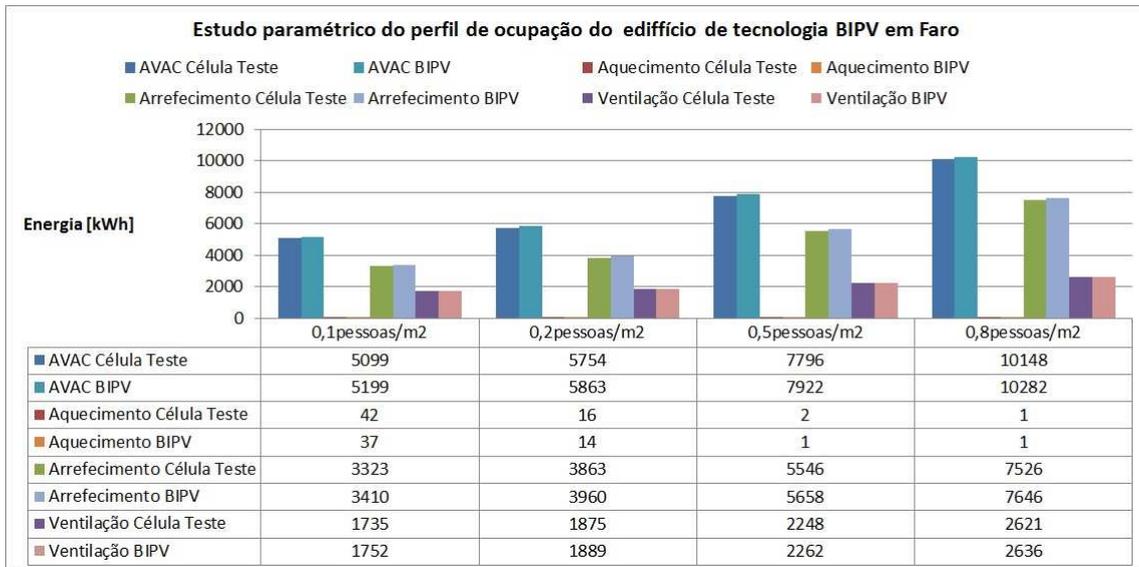


Figura 5.12: Comparação entre os consumos energéticos com o sistema de AVAC para os diferentes perfis de utilização do edifício *BIPV* localizado em Faro.

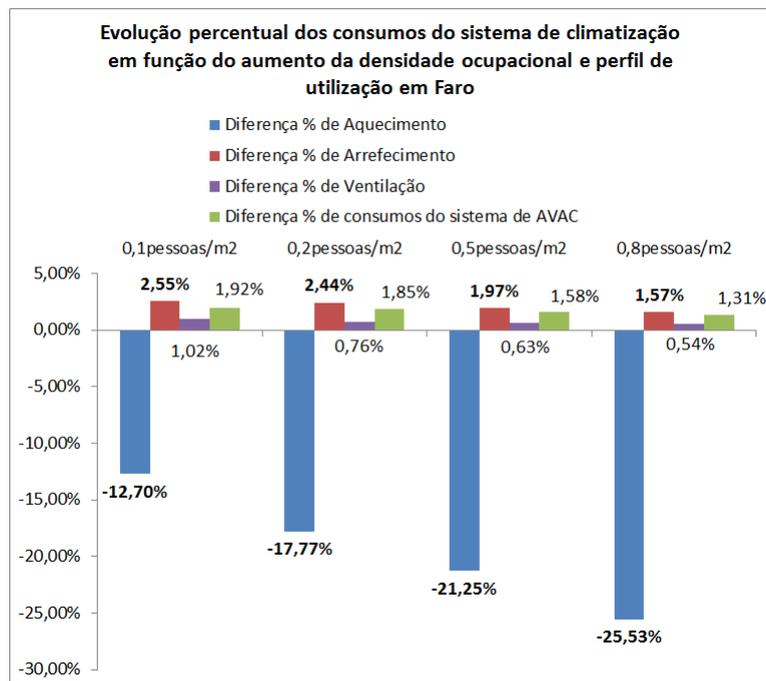


Figura 5.13: Comparação da diferença percentual sobre os consumos energéticos com o sistema de AVAC para os diferentes perfis de utilização dos edifícios *BIPV* e célula teste localizados em Faro.

bilitado), estagnou a partir da densidade de ocupação de $0,5\text{pessoas}/\text{m}^2$ como pode ser observado nas Figuras 5.15 e 5.16.

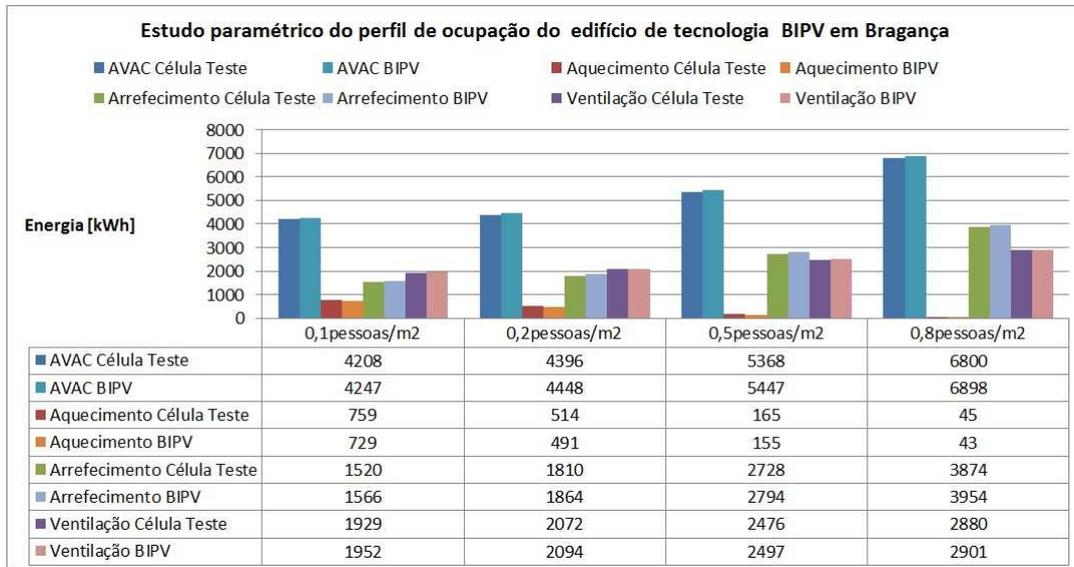


Figura 5.14: Comparação entre os consumos energéticos com o sistema de AVAC para os diferentes perfis de utilização do edifício *BIPV* localizado em Bragança.

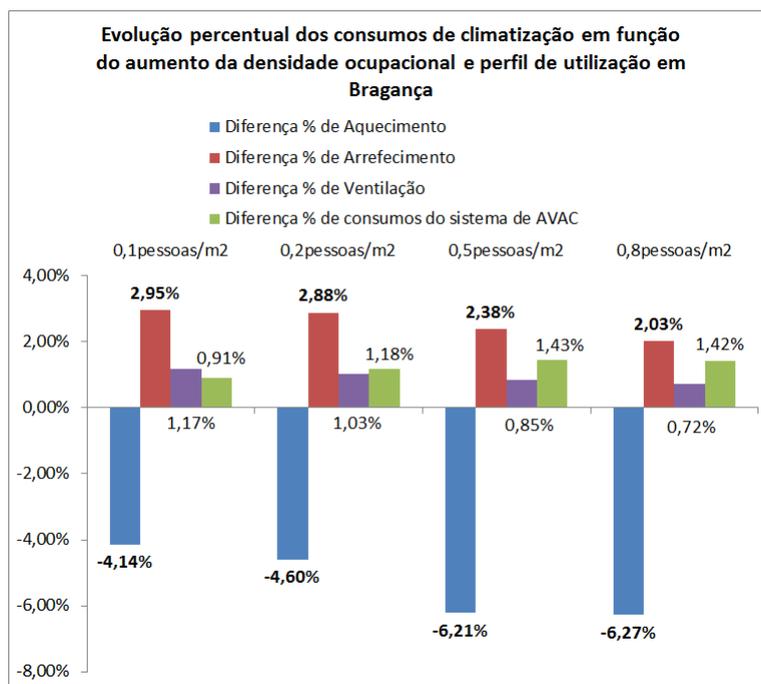


Figura 5.15: Comparação da diferença percentual sobre os consumos energéticos com o sistema de AVAC para os diferentes perfis de utilização dos edifícios *BIPV* e célula teste localizados em Bragança.

Comparação de resultados e análise abrangente

Em suma, os resultados apresentados mostraram que, com o aumento do perfil de utilização e densidade de ocupação, verificou-se um aumento na diferença entre consumos do

sistema de climatização e ventilação para os edifícios localizados em Bragança. Por outro lado, os edifícios localizados em Faro, apresentaram uma diferença percentual nos consumos do sistema de AVAC entre si, que beneficiou o edifício reabilitado com a integração da tecnologia fotovoltaica na envolvente, como elemento de revestimento, avaliação esta, que pode ser observada, através da diferença percentual de consumos entre edifício com tecnologia fotovoltaica integrada na fachada vertical opaca e a célula teste virtual (Figura 5.16).

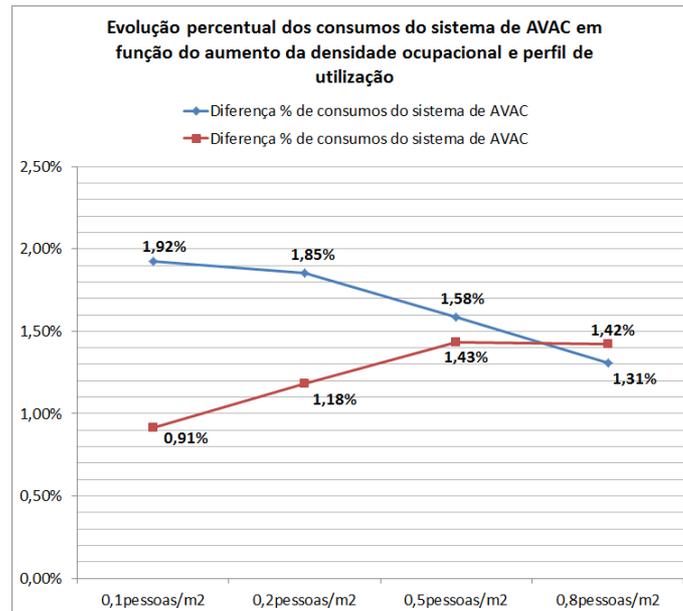


Figura 5.16: Comparação da diferença percentual sobre os consumos energéticos com o sistema de AVAC para os diferentes perfis de utilização dos edifícios *BIPV* e célula teste localizados em Bragança e Faro.

5.4 Estudo da influência do nível de isolamento da envolvente

O nível de isolamento do edifício pretende melhorar o desempenho térmico do mesmo, que, por sua vez, se reflete nos consumos de climatização. Anteriormente, já o foi possível constatar, aquando da análise abrangente feita no subcapítulo 4.2, referente ao estudo da influência do U da envolvente. Sabendo-se que a integração do sistema fotovoltaico na envolvente tem influência no coeficiente de transmissão térmica, planeou-se, através desta avaliação, verificar as melhorias expectáveis que possam vir a ser alcançadas, em termos energéticos, com o aumento da espessura de isolamento, isto, quando se compara um edifício existente, com um nível de isolamento definido e um edifício a reabilitar e com possibilidade de melhorar o seu nível de isolamento da fachada, na qual vai ser integrado o sistema fotovoltaico. Esta avaliação teve o objetivo de compreender se o aumento da espessura do isolamento térmico na fachada sul do edifício reabilitado, pode influenciar os consumos do mesmo de forma profícua em benefício da tecnologia *BIPV*, afetando a diferença entre os consumos com o sistema de AVAC do edifício existente, no

qual se mantem o nível de isolamento, e os consumos do sistema de AVAC do edifício a reabilitar. Esta avaliação, recaiu mais uma vez, sobre os edifícios com os maiores consumos de aquecimento e de arrefecimento: Bragança e Faro, respetivamente. Nas simulações executadas aumentou-se a espessura de isolamento para 80mm e 100mm. Este aumento ocorreu apenas na fachada opaca vertical a sul na qual se integrou o sistema fotovoltaico. É ainda relevante mencionar, que para este caso, o isolamento utilizado foi o EPS com condutibilidade térmica (k) de $0,04 \text{ W/m.K}$, e por isso é de considerar que este será o isolamento de referência nesta dissertação.

5.4.1 Análise ao isolamento térmico do edifício BIPV de Faro

Com esta análise verificou-se que o edifício de tecnologia BIPV de Faro tem ligeiras melhorias em termos térmicos com o aumento da espessura de isolamento, comprovado pela diferença entre os seus consumos do sistema de AVAC e os consumos da célula teste virtual, como pode ser verificado na Figura 5.17.

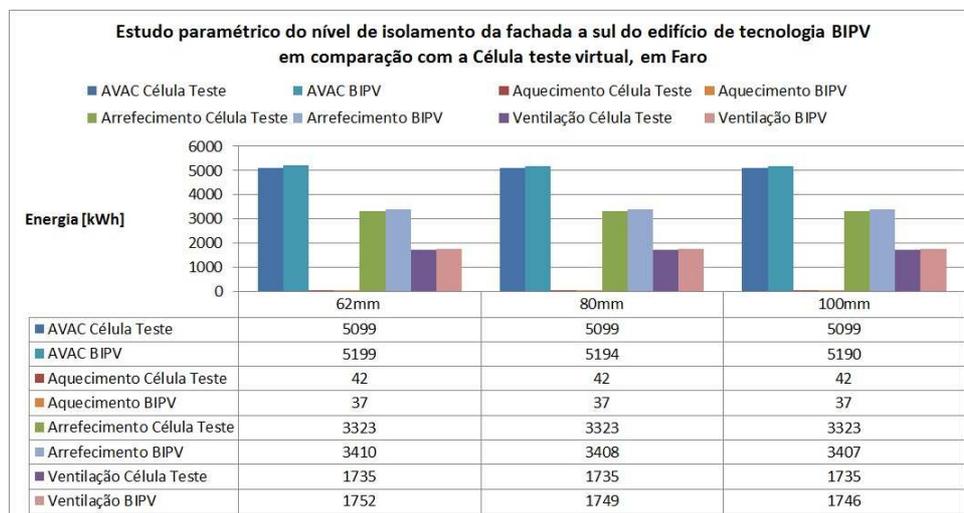


Figura 5.17: Comparação entre os consumos energéticos com o sistema de AVAC para as diferentes espessuras de isolamento da fachada sul do edifício de tecnologia BIPV, face aos consumos do sistema de AVAC da célula teste virtual, localizados em Faro.

Ainda assim, o comportamento de ambas as soluções refletiu-se na diferença dos consumos do sistema de AVAC entre ambas, acabando por existir uma diminuição percentual na diferença de consumos entre as instalações em benefício da tecnologia BIPV, isto, quando existiu um aumento da espessura de isolamento térmico, Figura 5.18.

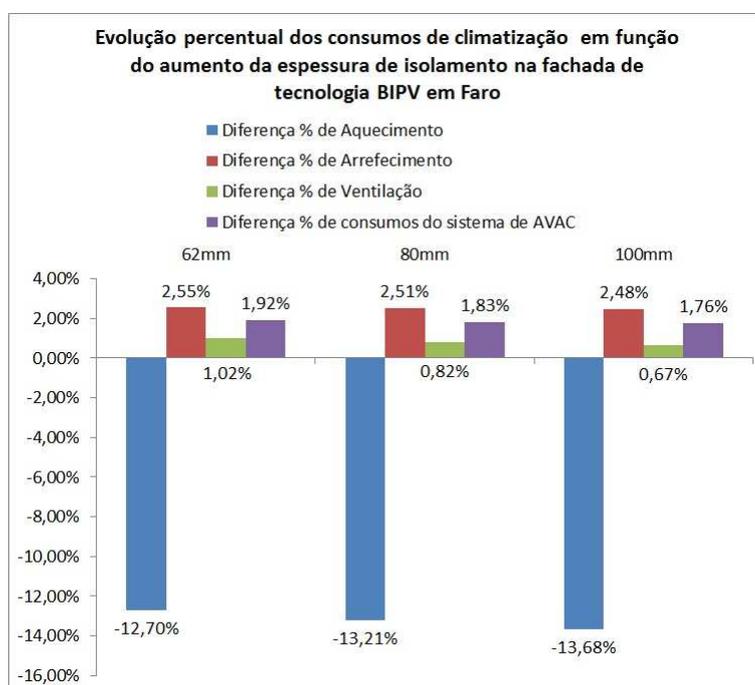


Figura 5.18: Comparação percentual da diferença entre os consumos energéticos com o sistema de AVAC para os diferentes níveis de isolamento dos edifícios, de tecnologia BIPV e célula teste virtual, localizados em Faro.

5.4.2 Análise ao isolamento térmico do edifício *BIPV* de Bragança

O edifício de tecnologia *BIPV* de Bragança, ao ser-lhe aumentada a espessura de isolamento da fachada revestida pelo sistema fotovoltaico revelou, em termos gerais, uma diminuição na diferença entre os consumos energéticos com o sistema de AVAC perante os mesmos consumos do edifício existente, como mostra a Figura 5.19.

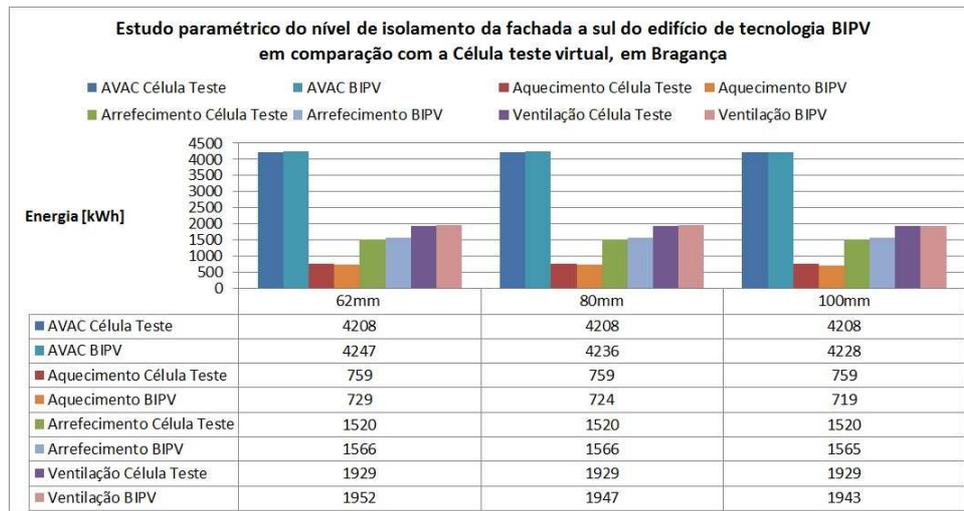


Figura 5.19: Comparação entre os consumos energéticos com o sistema de AVAC para as diferentes espessuras de isolamento do edifício *BIPV* localizado em Bragança.

Dada a conjuntura de resultados que ocorreu neste caso, a diferença percentual de consumos diminuiu com o aumento do isolamento na fachada revestida pelo sistema fotovoltaico no edifício de tecnologia *BIPV*, como mostra a Figuras 5.20.

Comparação de resultados e análise abrangente

Os resultados alcançados neste subcapítulo, permitiram perceber que a integração do sistema fotovoltaico na fachada a sul de um edifício, em reabilitação, é benéfica para o balanço energético entre os consumos do sistema de climatização do edifício e a produção de energia fotovoltaica, como se pode observar através do indicador I_{BIPV} da Figura 5.21. Contudo, é um facto, que o aumento da espessura do isolamento térmico da fachada a sul no edifício reabilitado não revelou melhorias significativas, tendo a tendência a estagnar para uma espessura de isolamento de 80mm, particularmente em Faro, como se pode verificar na figura 5.22. No entanto, essa diminuição da diferença nos consumos de climatização entre edifícios, não sendo significativa, remeteu a escolha do nível de isolamento para uma avaliação económica, algo que não faz parte do objetivo do trabalho.

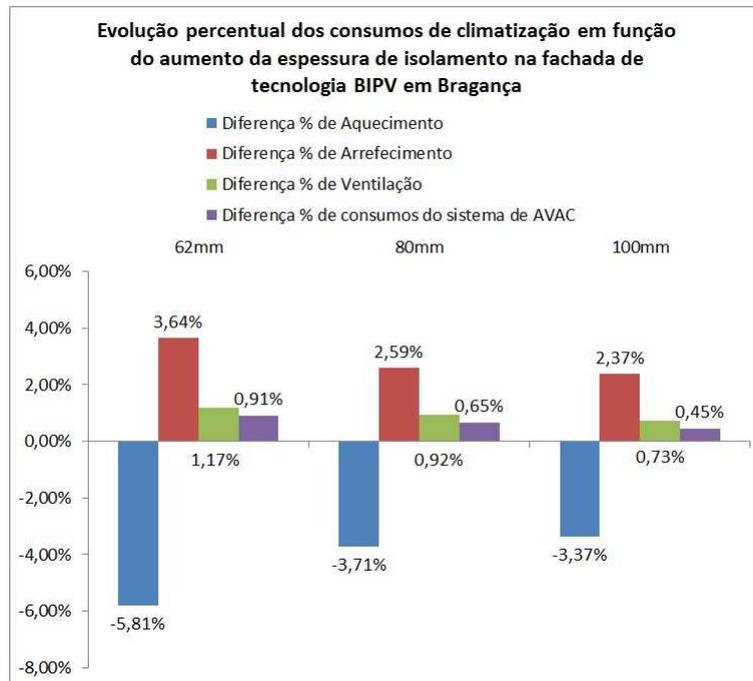


Figura 5.20: Comparação percentual da diferença entre os consumos energéticos com o sistema de AVAC para os diferentes níveis de isolamento dos edifícios, de tecnologia BIPV e célula teste virtual, localizados em Bragança.

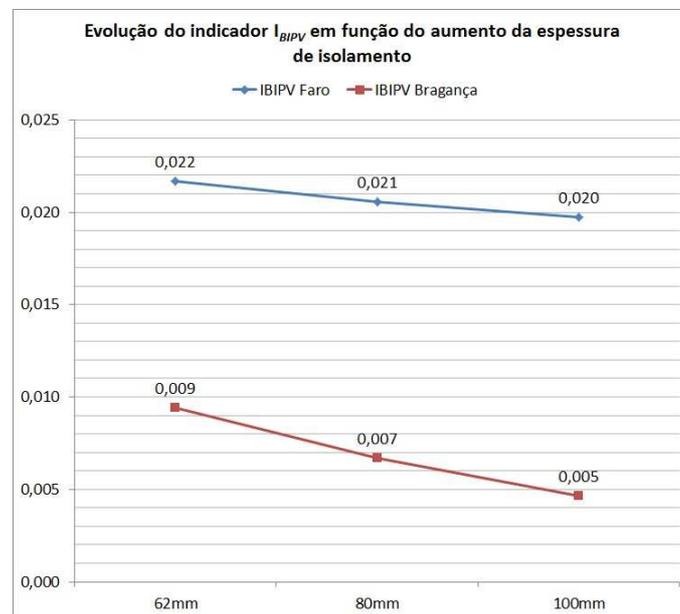


Figura 5.21: Evolução do indicador I_{BIPV} com o aumento das espessuras de isolamento da fachada revestida com o sistema fotovoltaico dos edifícios de tecnologia BIPV e célula teste localizados em Bragança e Faro.

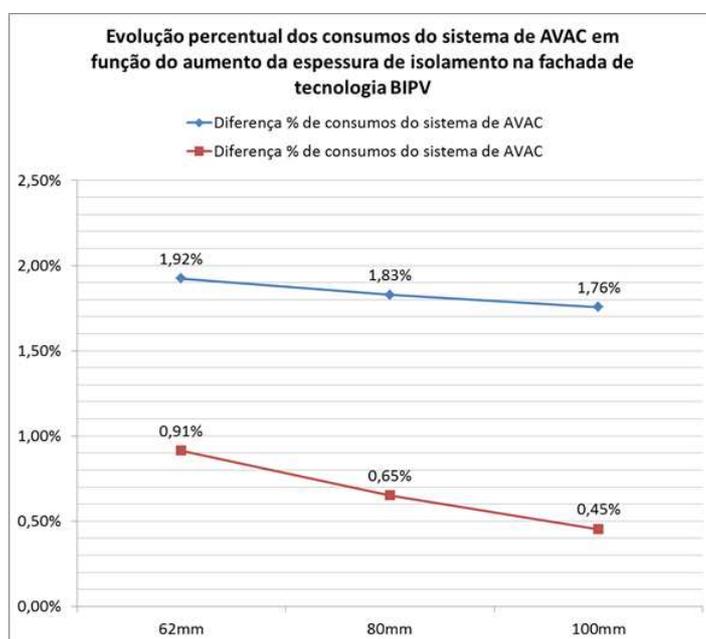


Figura 5.22: Comparação percentual da diferença entre os consumos energéticos com o sistema de AVAC para os diferentes níveis de isolamento dos edifícios, de tecnologia BIPV e célula teste virtual, localizados em Bragança e Faro.

5.5 Síntese do Capítulo

Neste capítulo foram realizadas avaliações específicas para compreender a influência de diferentes parâmetros preponderantes no desempenho térmico do edifício. Verificou-se também, qual o balanço energético entre a produção fotovoltaica na fachada opaca vertical e a alteração de consumo no sistema de AVAC que essa integração implicou. Assim, a análise realizada incidiu sobre a influência da localização da instalação, do qual se selecionaram os locais onde as exigências com arrefecimento e aquecimento eram mais relevantes. A avaliação foi comparativa e incidiu nos consumos energéticos dos edifícios, mas também ao nível do indicador I_{BIPV} . Através desta análise, foram efetuadas avaliações para verificar qual a influência do perfil de utilização do edifício e o nível de isolamento da envolvente, na qual foi integrado o sistema fotovoltaico no edifício reabilitado. Os resultados foram analisados comparando os consumos com o sistema de AVAC entre o edifício existente e o edifício com tecnologia BIPV.

Capítulo 6

Conclusão

A realização do presente trabalho foi concluída com sucesso, podendo-se afirmar que os principais objetivos e contributos desta dissertação foram alcançados. Assim, após a realização de toda a dissertação e analisados os resultados, serve este capítulo para retirar conclusões sobre os mesmos e sugerir desenvolvimentos de trabalho futuro sobre o tema.

Esta dissertação teve como principal objetivo integrar um sistema fotovoltaico na fachada opaca vertical de um edifício de serviços em Portugal e avaliar o impacto dessa integração nos consumos do sistema de AVAC desse edifício, recorrendo a ferramentas de simulação dinâmica. Para além deste objetivo, e após a revisão bibliográfica efetuada, foi identificado, que no panorama português, um conceito no qual a integração da tecnologia fotovoltaica numa fachada opaca vertical pode ser feita com sucesso, é, o conceito de reabilitação urbana, dados os incentivos financeiros nesse âmbito. Identificado este contributo que o presente trabalho pretendeu alcançar, efetuaram-se avaliações, através de simulação dinâmica, que verificassem qual o impacto que integração da tecnologia BIPV numa fachada opaca vertical, tinha no desempenho térmico de um edifício em reabilitação. A simulação dinâmica foi realizada através do Energy Plus e Design Builder e os seus resultados pretenderam avaliar os benefícios, que a produção de energia fotovoltaica proporcionou ao edifício em causa, através da comparação com a diferença de consumos do edifício existente, denominado por célula teste virtual, e o edifício no qual se integrou a tecnologia BIPV. É importante referir, que a tecnologia BIPV, implica a integração do sistema fotovoltaico como elemento construtivo do edifício, evitando custos de aquisição com outros materiais de revestimento, mas também, influencia o desempenho térmico desse edifício. Este conceito, pode encaixar-se perfeitamente no conceito de reabilitação urbana, pois verificou-se que beneficia o tecido e ambiente urbano, através da produção de energia para autoconsumo, permitindo ainda aumentar o número de NZEB's em Portugal.

Na realização do trabalho tomaram-se considerações, relativas ao pavimento e à cobertura, pois ambos foram considerados adiabáticos, de forma a simular um edifício de vários andares e por consequência com várias frações autónomas. A avaliação a fazer, pretendeu verificar a viabilidade em termos de balanço energético entre o consumo com a climatização e a produção de energia fotovoltaica, e por isso, efetuaram-se análises para várias localizações, mediante as suas características próprias. Após a verificação dos consumos do sistema de AVAC e produção de energia fotovoltaica, selecionaram-se as localizações que refletiram mais consumos tanto com arrefecimento quanto com aque-

cimento. Outra razão, que pesou na escolha dessas localizações, foi o facto de ambas apresentarem as maiores e menores diferenças percentuais no consumo do sistema de AVAC entre a célula teste virtual, edifício existente, e o edifício a reabilitar integrando a tecnologia BIPV. As localizações, aqui referenciadas, foram as cidades de Faro e Bragança, respetivamente, nas quais se avaliou a influência do perfil de utilização, bem como, do nível de isolamento da envolvente na qual foi instalado o sistema fotovoltaico, mais concretamente a fachada opaca vertical a sul.

Relativamente à localização, onde se avaliaram as cidades de Lisboa, Porto, Bragança e Faro, as duas últimas exibiram consumos superiores com aquecimento e arrefecimento, respetivamente. Todavia, em todos estes locais verificou-se que a instalação do sistema fotovoltaico na envolvente opaca seria proveitosa em termos de balanço energético entre o sistema de AVAC e a produção fotovoltaica. No sentido de validar esta conclusão, foi criado um indicador I_{BIPV} , que confrontava a produção de energia e a diferença de consumos com o sistema de AVAC entre a instalação de tecnologia BIPV (edifício a reabilitar) e o edifício urbano existente, denominado de célula teste virtual. Caso o indicador fosse inferior a um, a instalação do sistema fotovoltaico conseguia suprimir a diferença de consumo com a climatização e ventilação entre ambos os edifícios.

No que concerne à alteração do perfil de utilização do edifício, alcançaram-se conclusões profícuas para o edifício integrando tecnologia fotovoltaica em Faro, pois a diferença de consumos de climatização entre edifícios diminuiu com o aumento do perfil e densidade de ocupação. Contudo, em Bragança, embora se tenha verificado uma diminuição nas necessidades de aquecimento, ocorreu um aumento na globalidade dos consumos com a climatização, dado que a diferença de consumos, entre edifícios, com o aquecimento aumentou, neste caso em prejuízo do edifício com tecnologia BIPV.

Em relação à influência da espessura de isolamento térmico, esta revelou benefícios no desempenho energético do edifício com tecnologia BIPV em ambos os casos, verificando-se uma diminuição de consumos tanto em Faro como em Bragança. Contudo, essa diminuição, não foi significativa e tende a estagnar à medida que se verifica o aumento da espessura de isolamento na fachada revestida pelo sistema fotovoltaico, tornando a decisão de escolha meramente económica.

É ainda pertinente abordar duas questões: a criação do indicador I_{BIPV} e a utilização do *Design Builder* e *Energy Plus* como ferramentas de simulação dinâmica para edifícios BIPV. No primeiro caso, entende-se que esse indicador consegue fazer uma rápida avaliação de balanço energético entre a diferença de consumos do sistema de AVAC, do edifício existente e do novo edifício com integração do sistema fotovoltaico, e produção de energia fotovoltaica, revelando-se útil para a avaliação, particularmente, na avaliação em termos de localização. Em relação às ferramentas de simulação estas figuraram-se poderosas em termos de resultados, sendo que a edição do ficheiro IDF se tornou um pouco morosa. Ainda assim, em termos quantitativos e qualitativos revelaram-se duas ferramentas muito aliciantes dada a pormenorização alcançada quer em termos de fornecimento de informação do edifício, quer em relação à quantidade de resultados que permite avaliar.

Relativamente ao sistema fotovoltaico, é de salientar que a inclinação vertical é bastante desfavorável à produção de energia fotovoltaica em termos globais, particularmente, no verão. Dada a altitude solar nos meses de verão, uma inclinação com 90° torna-se altamente desfavorável, ao contrário do que acontece no inverno. Assim, pode concluir-se que, ao tratar-se de uma instalação com a referida inclinação pode ser mais proveitoso

utilizar uma tecnologia fotovoltaica com um melhor desempenho perante a radiação difusa.

Por fim, concluiu-se que a integração da tecnologia BIPV em fachadas opacas verticais, no contexto de reabilitação urbana em Portugal, pode revelar-se um sucesso, pois beneficiou o desempenho energético global do edifício, e permite que Portugal mantenha a ambição de aumentar o número de NZEB's mencionado nas diretivas europeias.

6.1 Sugestão para desenvolvimento futuro

Durante a realização do presente trabalho identificaram-se algumas áreas que podem e devem ser exploradas no futuro, em relação ao conceito BIPV em Portugal.

Futuramente, é bastante importante desenvolver investigação sobre a integração de tecnologia *BIPV*, particularmente no conceito de reabilitação urbana, em que a integração do sistema fotovoltaico seja feita ao nível da envolvente envidraçada, analisando não só a influência que o fotovoltaico tem no sistema de AVAC, mas também em termos de iluminação natural. É igualmente relevante no futuro, estudar o efeito da integração em fachadas ventiladas, utilizando, por exemplo, Paredes de Trombe.

Ainda no âmbito da reabilitação urbana, é importante examinar o efeito de sombreamento de obstáculos adjacentes ao edifício no desempenho produtivo do sistema fotovoltaico e avaliar se, dessa forma, ainda é benéfica a sua integração na envolvente, através de um balanço energético com o sistema de AVAC.

Sugere-se, por fim, avaliar o real comportamento térmico de um painel fotovoltaico e fazer a simulação a partir de dados reais medidos num painel fotovoltaico. Para além disso, será também favorável, analisar a utilização de outra tecnologia fotovoltaica com um melhor desempenho perante a radiação difusa, e com melhores características de adaptabilidade.

Bibliografia

- [1] *Curso Técnico Instalador de Energia Solar Fotovoltaica*. Engebook - Conteudos de Engenharia e Gestão, 2011.
- [2] *EPBD Recast - Implicações para Portugal*, 2012.
- [3] *Autoconsumo SMA*, 2013.
- [4] The encyclopedic reference to EnergyPlus input and output. 27 Maio 2014.
- [5] *RSECE - Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios*, Decreto-Lei 80/2006 de 4 de abril.
- [6] Candanedo José A. and Athienitis Andreas K. Simulation of the performance of a bipv/t system coupled to a heat pump in a residencial heating application.
- [7] Pinto A. *Aplicação LNEC para Ventilação no âmbito do REH e RECS*, 2013.
- [8] Pinto A. *Aplicação para determinar caudal mínimo de ar novo, RECS*, 2013.
- [9] Renato Braz Ana Lanham, Pedro Gama. *Arquitectura bioclimatica - perspectivas de inovação e futuro*. Master's thesis, Instituto Superior Técnico, 2004.
- [10] Natale Arcuri, Francesco Reda, and Marilena De Simone. Energy and thermo-fluid-dynamics evaluations of photovoltaic panels cooled by water and air. *Solar Energy*, 105(0):147 – 156, 2014.
- [11] Niccolò Aste, Claudio Del Pero, and Fabrizio Leonforte. Optimization of solar thermal fraction in {PVT} systems. *Energy Procedia*, 30(0):8 – 18, 2012.
- [12] Shady G. Attia. State of the art of existing early design simulation tools for net zero energy buildings: A comparison of ten tools. Technical report, Université catholique de Louvain, 2011.
- [13] C. M. Carvalhal. *Simulação do comportamento térmico de edifícios com fachadas ventiladas*. Master's thesis, Universidade de Aveiro, 2008.
- [14] Isabel Cerón, E. Caamano-Martin, and F. Javier Neila. State-of-the-art of building integrated photovoltaic products. *Renewable Energy*, 58(0):127 – 133, 2013.
- [15] Charles D. Corbin and Zhiqiang John Zhai. Experimental and numerical investigation on thermal and electrical performance of a building integrated photovoltaic?thermal collector system. *Energy and Buildings*, 42(1):76 – 82, 2010.

- [16] Guilherme Carrilho da Graça, André Augusto, and Maria M. Lerer. Solar powered net zero energy houses for southern europe: Feasibility study. *Solar Energy*, 86(1):634 – 646, 2012.
- [17] Vijay Devabhaktuni, Mansoor Alam, Soma Shekara Sreenadh Reddy Depuru, Robert C. Green II, Douglas Nims, and Craig Near. Solar energy: Trends and enabling technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19(0):555 – 564, 2013.
- [18] Miguel Carvalho dos Santos Garcia. Simulação dinâmica de edifícios com componentes integrando pcm. Master’s thesis, Universidade de Aveiro, 2013.
- [19] EPIA. Global market outlook for photovoltaics, until 2016, 2012.
- [20] União Europeia. Key figures, 2011.
- [21] Comissão Europeia. A estratégia climática e de energia 2020, 2014.
- [22] Marinela Fernandes. Norma europeia - en12464-1. *O candela*, 2007.
- [23] The Reference for EnergyPlus Calculations. EnergyPlus engineering reference. 1 Junho 2014.
- [24] Björn Petter Jelle and Christer Breivik. State-of-the-art building integrated photovoltaics. *Energy Procedia*, 20(0):68 – 77, 2012.
- [25] Jin-Hee Kim and Jun-Tae Kim. A simulation study of air-type building-integrated photovoltaic-thermal system. *Energy Procedia*, 30(0):1016 – 1024, 2012.
- [26] B. Kofler W. Bresciani L. Maturi, W. Sparber. Analysis and monitoring results of a bipv system in northern italy.
- [27] Laboratório Nacional de Energia e Geologia LNEG. Em direção à energia zero. Technical report, Laboratório Nacional de Energia e Geologia, 2010.
- [28] Mathias Aarre M. Recent development in building integrated photovoltaics (bipv), 2012.
- [29] Nirmal-Kumar C. Nair and Lei Jing. Power quality analysis for building integrated pv and micro wind turbine in new zealand. *Energy and Buildings*, 58(0):302 – 309, 2013.
- [30] Dr. Hein van der Zeeuw Odersun AG. *Manual for BiPV Projects*, 2011.
- [31] Ministério do Ambiente Ordenamento do Território e Energia. *Regime de Produção Distribuída, Decreto-Lei nº153/2014 de 20 de outubro*, 2014.
- [32] Ministério do Ambiente Ordenamento do Território e Energia. *Despacho nº15793-F/2013 referente ao Decreto-Lei nº 118/2013 de 20 de agosto - Zonas Climáticas, Despacho nº15793-F/2013 de 3 de dezembro*.
- [33] Ministério do Ambiente Ordenamento do Território e Energia. *Regulamento de desempenho energético dos edifícios de comércio e serviços (RECS) - Requisitos de Conceção para edifícios novos e intervenções*, Portaria 349-D/2013 de 2 de dezembro.

-
- [34] Ministério do Ambiente Ordenamento do Território e Energia. *Regulamento de desempenho energético dos edifícios de comércio e serviços (RECS) - Requisitos de Ventilação e Qualidade do Ar Interior*, Portaria 353-A/2013 de 4 de dezembro.
- [35] S. Pantic, L. Candanedo, and A.K. Athienitis. Modeling of energy performance of a house with three configurations of building-integrated photovoltaic/thermal systems. *Energy and Buildings*, 42(10):1779 – 1789, 2010.
- [36] Jinqing Peng, Lin Lu, and Hongxing Yang. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19(0):255 – 274, 2013.
- [37] Jinqing Peng, Lin Lu, Hongxing Yang, and Jun Han. Investigation on the annual thermal performance of a photovoltaic wall mounted on a multi-layer facade. *Applied Energy*, (0):–, 2013.
- [38] Electronica PT. Energia solar, 2014.
- [39] Carlos J. Sarasa-Maestro, Rodolfo Dufo-Lopez, and Jose L. Bernal-Agustin. Photovoltaic remuneration policies in the european union. *Energy Policy*, 55(0):317 – 328, 2013. Special section: Long Run Transitions to Sustainable Economic Structures in the European Union and Beyond.
- [40] He Quanhui Ng Poh Khai Setphen K Wittkopf, Ashwin Kambadkone. Development of a solar radiation and bipv design tool as energyplus plugin for google sketchup.
- [41] Akhil Sivanandan. Bipv hotspots in the eu. *Renewable Energy Focus*, 10(2):54 – 55, 2009.
- [42] Sapa Solar. Cobertura bipv.
- [43] Solarfassade. Módulo fotovoltaico, 2009.
- [44] Jong-Hwa Song, Young-Sub An, Soek-Ge Kim, Sung-Jin Lee, Jong-Ho Yoon, and Youn-Kyoo Choung. Power output analysis of transparent thin-film module in building integrated photovoltaic system (bipv). *Energy and Buildings*, 40(11):2067 – 2075, 2008.
- [45] Liangliang Sun, Lin Lu, and Hongxing Yang. Optimum design of shading-type building-integrated photovoltaic claddings with different surface azimuth angles. *Applied Energy*, 90(1):233 – 240, 2012.
- [46] Ana Filipa Nunes Tavares. Reabilitação urbana - o caso dos pequenos centros históricos. Master's thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2008.
- [47] Yiping Wang, Wei Tian, Jianbo Ren, Li Zhu, and Qingzhao Wang. Influence of a buildings integrated-photovoltaics on heating and cooling loads. *Applied Energy*, 83(9):989 – 1003, 2006.
- [48] H.M. Yin, D.J. Yang, G. Kelly, and J. Garant. Design and performance of a novel building integrated pv/thermal system for energy efficiency of buildings. *Solar Energy*, 87(0):184 – 195, 2013.

Apêndice A

Anexos

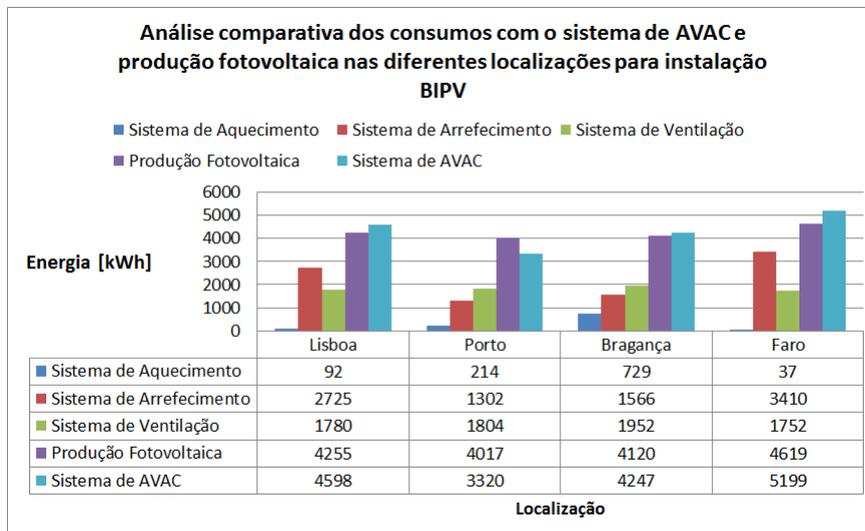


Figura A.1: Análise comparativa dos consumos com o sistema de AVAC e produção fotovoltaica nas diferentes localizações para instalação BIPV

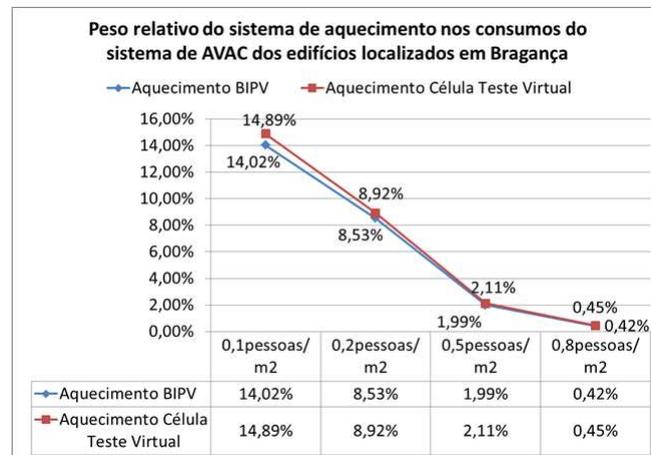


Figura A.2: Peso relativo do sistema de aquecimento nos consumos do sistema de AVAC em Bragança com o aumento do perfil de utilização e de ocupação dos edifícios.

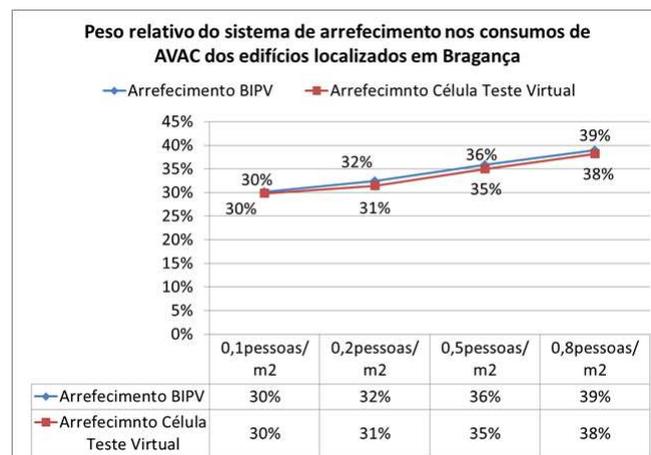


Figura A.3: Peso relativo do sistema de arrefecimento nos consumos do sistema de AVAC em Bragança com o aumento do perfil de utilização e de ocupação dos edifícios.

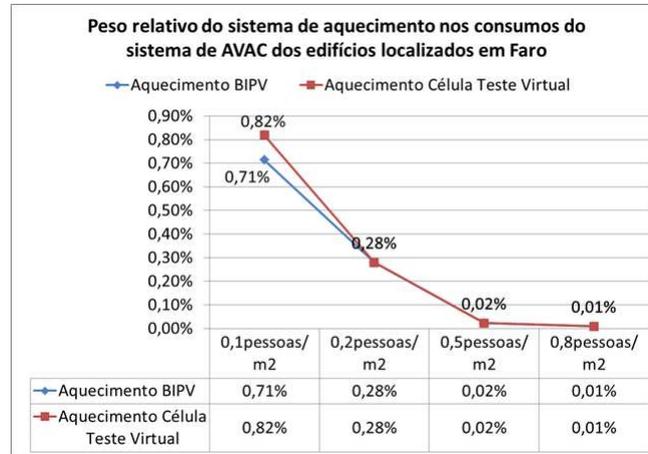


Figura A.4: Peso relativo do sistema de aquecimento nos consumos do sistema de AVAC em Faro com o aumento do perfil de utilização e de ocupação dos edifícios.

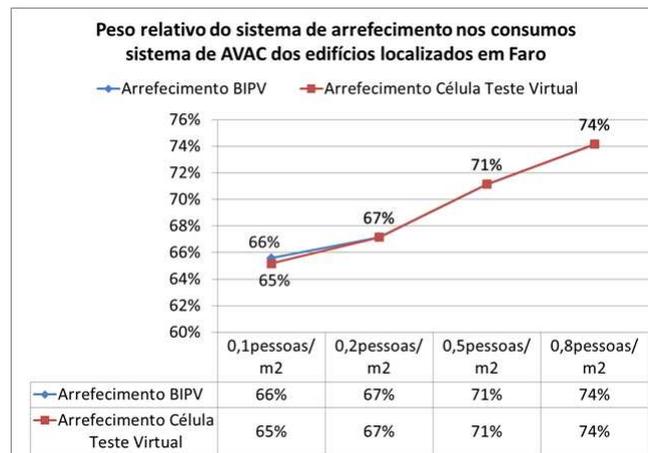


Figura A.5: Peso relativo do sistema de arrefecimento nos consumos do sistema de AVAC em Faro com o aumento do perfil de utilização e de ocupação dos edifícios.