



Centro de convenções SwissTech – Campus da Escola Politécnica Federal de Lausana – Suíça (Arquitetos: Richter e Dahl Rocha)

Luís Eduardo Reis Flórido de Melo

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA PASSIVO DE AQUECIMENTO INTEGRANDO VIDRO FOTOVOLTAICO

Dissertação de mestrado apresentada para obtenção do grau de Mestre em Energia na especialidade de Edifícios e Ambiente Urbano

Setembro, 2016



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Avaliação de desempenho de um sistema passivo de aquecimento integrando vidro fotovoltaico

Luís Eduardo Reis Flório de Melo

Dissertação de mestrado apresentada para obtenção do grau de Mestre em Energia na especialidade de Edifícios e Ambiente Urbano

Júri

Presidente: Prof. Doutor António Manuel Oliveira Gomes Martins

Orientador: Prof. Doutor Nuno Albino Vieira Simões

Vogal: Prof. Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar

Com a colaboração de:



Setembro, 2016

*“...Começar de novo,
E contar comigo,
Vai valer a pena,
Ter amanhecido,
Ter me rebelado,
Ter me debatido,
Ter me machucado,
Ter sobrevivido,
Ter virado a mesa,
Ter me conhecido,
Ter virado o barco,
Ter me socorrido...”*

[Ivan Lins e Vítor Martins, 1979]

Agradecimentos

Aproveito o caráter informal desta página para expor meu sincero reconhecimento às pessoas que, sem as quais, o trabalho apresentado a seguir não seria uma realidade.

Primeiramente agradeço a Deus, por me iluminar com a serenidade para iniciar esta trajetória em meados de 2014 tomando decisões acertadas, que durante os últimos meses contribuíram para que eu pudesse vencer minhas próprias limitações, minhas dúvidas e principalmente reconhecer a capacidade em alcançar lugares antes subestimados.

Aos meus pais, Fátima e Eduardo, à minha tia Rosa e minha avó Rosa que, desde a minha infância me ensinaram os caminhos da ética me mostrando o valor do trabalho para o alcance de qualquer objetivo, mesmo que à frente existissem obstáculos, pedras e caminhos sinuosos.

À minha querida cunhada Mariana, ao Ricardo, Luiz e prima-irmã Patrícia, que me incentivaram em todos os momentos desde que decidi dar uma pausa na minha vida pessoal, profissional e trilhar este caminho.

Agradeço ao meu orientador Professor Doutor Nuno Albino Vieira Simões pelo suporte, paciência, tempo investido em minha pesquisa e principalmente pelos ensinamentos. Sou muito grato pela confiança depositada no meu trabalho, pelas orientações sempre precisas e relevantes que foram a base para que eu pudesse desenvolver esta pesquisa.

Aos amigos Renato Carrilho, Guilherme Righetto, Nelson Gomes e Rachel Galiza que nunca deixaram de acreditar no que eu poderia conseguir, seja despertando em mim a determinação de enfrentar este desafio, saindo da inércia, ou insistindo para que eu realizasse meu projeto da forma mais racional possível, ainda que minha resistência tenha causado muita discussão. Muito obrigado!!

Ao Professor Adélio Gaspar em que tive o privilégio de ser aluno em algumas disciplinas do mestrado, sendo uma delas responsável pela base teórica para a realização das simulações energéticas da pesquisa.

Aos Professores João Paulo Cardielos, Luís Dias, Francisco Lamas e Gonçalo Brites que contribuíram de forma muito especial para a conclusão do curso, seja pelo resgate do meu senso crítico que estava adormecido há anos, até pela capacidade de

fazer com que um arquiteto passasse a gostar de Termodinâmica e admirar a ciência da Análise de Decisão.

Aos colegas do IteCons Joana Prata e Inês Simões pela ajuda nos momentos de dúvida, além de Tiago Jesus, Aurélio e Paula pelo apoio na construção e montagem do protótipo experimental, bem como na monitorização dos dados brutos do trabalho.

Ao IteCons, por viabilizar a realização da investigação no âmbito do Projeto *SlimFrame PV & Cork Skin* (POCI-01-0247-FEDER-003408) e pela disponibilização das instalações, equipamentos e protótipos para realização da componente experimental da investigação, em especial aos Professores Doutores António Tadeu e Nuno Simões.

À Petróleo Brasileiro S.A. que acreditou na minha capacidade para contribuir com o desenvolvimento sustentável da empresa, autorizando a licença de minhas atividades profissionais pelo período da pesquisa, além de viabilizar recursos para que eu pudesse realizar este trabalho acadêmico.

Por fim, dedico este trabalho ao meu irmão Marco Melo, à minha namorada Clarissa Cervo e meu sobrinho Bruno Melo.

O amor incondicional que sinto por eles me guiou desde o início, quando decidi abdicar do tempo com aqueles que amo, de acompanhar os primeiros passos do meu sobrinho, da parceria com meu amado irmão, das viagens de moto, das trilhas, dos shows de música e dos amigos, para me dedicar exclusivamente ao curso de mestrado buscando alcançar o melhor resultado possível neste momento.

A todos, muito obrigado!

Resumo

O ciclo de vida dos edifícios representa um impacto considerável no consumo energético, podendo atingir cerca de 40% do consumo de energia primária a nível global.

A busca pela conservação de energia, o estabelecimento de políticas de certificação ambiental e a importância do setor da Construção Civil na economia mundial, levam à necessidade, não somente do desenvolvimento de práticas de projeto mais racionais, como também ao fomento do desenvolvimento de novas tecnologias para geração de energias renováveis, assim como a promoção de sistemas passivos de climatização.

Os últimos dez anos foram marcados pelo fomento da integração de módulos fotovoltaicos com a envolvente do edifício devido ao carácter multifuncional que este elemento construtivo passa a assumir. Assim, a utilização das fachadas dos edifícios torna-se uma alternativa atrativa para a implementação de elementos que geram energia limpa e ao mesmo tempo viabilizam as estratégias passivas para a redução de consumos energéticos.

O presente estudo pretende analisar o desempenho energético de um sistema de aquecimento passivo solar integrado na fachada, incorporando vidro fotovoltaico como solução construtiva. Para cumprir o presente objetivo, realizou-se uma campanha experimental em célula teste e implementou-se um modelo de simulação energética dinâmica. Numa primeira fase, procedeu-se à comparação entre medições de temperatura e respectivos resultados obtidos no modelo de simulação.

Após a verificação da fiabilidade do modelo de simulação, desenvolveu-se um caso de estudo para diferentes cenários. Deste modo, foi possível analisar o comportamento do sistema de aquecimento passivo em três latitudes com diferentes perfis climáticos, em quatro soluções construtivas, e em três variáveis geométricas da fachada, adotando-se como indicador o consumo energético global no cenário de referência, onde o sistema não é contemplado.

No final do estudo, os resultados comprovaram que as estratégias passivas analisadas contribuíram para a redução do consumo energético até 21%. Porém, o desempenho deste sistema revelou-se muito dependente de parâmetros como latitude, clima, propriedades térmicas e a atuação ativa dos ocupantes no controle das aberturas. Com recurso a uma análise multicritério foi possível apontar as soluções com melhor desempenho para cada um dos cenários e concluir quais os parâmetros com maior influência no desempenho energético.

Palavras-chave: Aquecimento passivo solar, vidro semitransparente fotovoltaico, simulação energética de edifícios, transferência de calor, módulo fotovoltaico integrado em edifícios.

Abstract

The life cycle of buildings represents a significant impact on global energy consumption, reaching upwards 40% of primary energy consumption globally. The concerns to lower energy usage, the establishment of environmental certification policies and the role of Construction sector in the world economy, lead to improvement not only in the development of more rational design practices, as well as to foster the development of new technologies for renewable energy generation, and the promotion of passive systems of climatization.

The last decade was marked by promoting the integration of photovoltaic modules with building skin due to the multifunctional character that this element is to assume. Thus, the façade of buildings becomes an attractive alternative for implementation of elements that generate clean energy and at the same time enable passive strategies for the reduction of energy consumption.

This study attempts to analyze the energy performance of a passive solar heating system integrated into the façade, with photovoltaic glass incorporation. To achieve this goal, we performed an experimental campaign conducted in a cell test and a dynamic energy simulation model. In a first stage, the comparison was made between temperature measurements and results obtained in the simulation model.

Taking into account the reliability of the respective simulation model, it was possible to implement a case study for different scenarios. Therefore, the model allowed the analysis of the behavior of the passive solar heating system in three different weather conditions, and three façade geometries taking as an indicator the overall energy consumption in the reference scenario, where the system is not supported.

At the end of the study, the results proved that the passive strategies contributed to the reduction of energy consumption by up to 21%. However, the system performance depends significantly from other aspects such as - latitude, solar radiation and active participation of the occupants in control opening. Using a multicriteria analysis it was possible to identify the best solutions in terms of energy performance for each of the scenarios and conclude which parameters were more relevant on the energy performance.

Keywords: Passive solar heating, semitransparent photovoltaic glass, building energy simulation, heat transfer, BIPV.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XII
ÍNDICE DE EQUAÇÕES	XIV
ACRÔNIMOS	XIV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento e motivação	1
1.2. Objetivo geral da pesquisa	4
1.2.1. Objetivos específicos.....	5
1.3. Objeto de estudo	6
1.4. Estrutura da pesquisa.....	10
2. ESTADO DA ARTE	12
2.1. Tecnologias fotovoltaicas e sua aplicação em edifícios.....	12
2.2. Integração de sistemas fotovoltaicos em edifícios	15
2.2.1. Parâmetros de influência no desempenho global	16
2.2.2. Influência das propriedades térmicas e ópticas	17
2.2.3. Influência na eficiência de conversão	18
2.3. Sistemas de aquecimento passivo solar.....	19
2.3.1. Fachadas de dupla pele.....	19
2.3.2. Fachadas ventiladas.....	21
2.3.3. Dupla janela ventilada	22
2.3.4. Paredes de Trombe	23
2.4. Simulação energética dinâmica	25
2.4.1. Interoperabilidade.....	25
2.4.2. Estudos comparativos.....	27
2.4.3. Aplicações específicas.....	28
2.4.4. Discrepâncias no resultado.....	29
2.4.5. O Estado da arte das ferramentas de simulação	29
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1. Primeira fase.....	33
3.1.1. Sistematização do estado da arte	33
3.1.2. A escolha das ferramentas.....	34
3.2. Levantamento dos parâmetros físicos	37

3.2.1. Caracterização da célula teste	37
3.3. Segunda fase.....	43
3.3.1. Modelação e visualização da geometria.....	43
3.3.2. Modelação da cavidade	45
3.3.3. Distribuição solar	49
3.3.4. Algoritmos de convecção interna e externa	50
3.3.5. Modelo de geração fotovoltaica	52
3.3.6. Modelação das propriedades ópticas das células fotovoltaicas.....	54
3.3.7. Modelação dos envidraçados e condução térmica bidimensional.....	55
3.3.8. Harmonização dos dados climáticos	56
3.4. Terceira Fase	59
3.4.1. Validação experimental do modelo de simulação dinâmica	59
3.4.2. Período das campanhas	59
3.4.3. Configuração do sistema e montagem experimental.....	59
3.5. Quarta Fase.....	62
3.5.1. A modelação dos casos de estudo	63
4. RESULTADO DA COMPARAÇÃO ENTRE EXPERIMENTO E SIMULAÇÃO	69
4.1. Metodologia para mensuração de erros.....	69
4.2. Comparação de dados medidos e simulados: cavidades do sistema passivo ...	70
4.3. Comparação de dados medidos e simulados: zonas térmicas do modelo	73
5. DESEMPENHO DO SISTEMA PASSIVO INCORPORANDO FV PARA DIFERENTES CENÁRIOS	76
5.1. Consumo energético e geração fotovoltaica.....	76
5.2. Apoio Multicritério à Decisão para determinação da melhor solução construtiva	83
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
6.1. Limitações do estudo.....	90
6.2. Sugestão para futuros desenvolvimentos do trabalho	90
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
ANEXO A	100
ANEXO B	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Demanda total de energia primária [Mtep] [IEA - International Energy Agency (2015)].....	2
Figura 1.2: Estratégia de ganho indireto Parede de Trombe [adaptado de Pinto e Dias (2015)]	6
Figura 1.3: Imagens do sistema de aquecimento passivo: Solar XXI [Gonçalves & Cabrito (2005)]	7
Figura 1.4: Trocas de calor no sistema de aquecimento passivo [adaptado de (Molling, 2014)]	8
Figura 1.5: a) Transferência de calor em elemento opaco [adaptado de Dornelles & Roriz, (2007), e b) Decomposição da radiação solar no vidro [adaptado de Zófoli, (2011)]	9
Figura 2.1: a) Integração da tecnologia FV em fachadas (%); b) Integração da tecnologia FV em coberturas (%) [Frontini & Verbene <i>et al.</i> (2015)].....	13
Figura 3.1: Mapa conceitual da sistematização do estado da arte	34
Figura 3.2: Mapa de ferramentas de simulação selecionadas.....	35
Figura 3.3: (a) Imagem frontal da fachada sul da célula teste, (b) foto aérea do edifício do ITeCons e (c) indicação da localização aproximada da célula teste no conjunto do edifício	37
Figura 3.4: Dimensionamento da célula teste em planta baixa (esquerda) e em perspectiva	38
Figura 3.5: Corte esquemático do vidro fotovoltaico	39
Figura 3.6: Imagens do sistema integrado na fachada Sul da célula teste.....	39
Figura 3.7: Geometria da célula teste e elementos adjacentes	44
Figura 3.8: Geometria da cavidade de ar	47
Figura 3.9: Gráfico comparativo entre os algoritmos de cálculo de convecção	52
Figura 3.10: Harmonização das variáveis climáticas: Temperatura Exterior.....	58
Figura 3.11: Harmonização das variáveis climáticas: Humidade Relativa	58
Figura 3.12: Harmonização das variáveis climáticas: Radiação solar direta	59
Figura 3.13: Configuração de abertura das grelhas internas e externas	60
Figura 3.14: Pormenores da adaptação da célula teste	60

Figura 3.15: Corte esquemático indicando o posicionamento dos termopares	61
Figura 3.16: Volumetria dos modelos do estudo de caso	64
Figura 3.17: Geometria das fachadas Leste, Norte e Oeste dos modelos analisados	64
Figura 3.18: Geometria da fachada Sul dos modelos analisados	65
Figura 4.1: Verificação da simulação da temperatura média interior da cavidade inferior do sistema ST04 e erro relativo associado.....	70
Figura 4.2: Verificação da simulação da temperatura média interior da cavidade média do sistema ST04 e erro relativo associado.....	70
Figura 4.3: Verificação da simulação da temperatura média interior da cavidade superior(a) do sistema ST04 e erro relativo associado	71
Figura 4.4: Verificação da simulação da temperatura média interior da cavidade superior(b) do sistema ST04 e erro relativo associado.....	71
Figura 4.5: Verificação da simulação da temperatura média interior da cavidade inferior do sistema ST10 e erro relativo associado.....	71
Figura 4.6: Verificação da simulação da temperatura média interior da cavidade intermédia do sistema ST10 e erro relativo associado	72
Figura 4.7: Verificação da simulação da temperatura média interior da cavidade superior(a) do sistema ST10 e erro relativo associado	72
Figura 4.8: Verificação da simulação da temperatura média interior da cavidade superior(b) do sistema ST10 e erro relativo associado.....	72
Figura 4.9: Verificação da simulação da temperatura interior da zona 1 e erro relativo associado.....	73
Figura 4.10: Verificação da simulação da temperatura interior da zona 2 e erro relativo associado.....	74
Figura 5.1: Consumo energético com cargas de refrigeração e geração fotovoltaica: Munique.....	77
Figura 5.2: Balanço energético global: Munique	77
Figura 5.3: Consumo energético de refrigeração e geração fotovoltaica: Oslo.....	78
Figura 5.4: Balanço energético global: Oslo	78
Figura 5.5: Consumo energético de refrigeração e geração fotovoltaica: Lisboa	79
Figura 5.6: Balanço energético global: Lisboa.....	79
Figura 5.7: Temperatura interior dos quatro cenários: Oslo.....	80

Figura 5.8: Comparação entre a geração fotovoltaica do vidro ST10 e ST04 para PAE 50%.....	82
Figura 7.1: Estado da Arte das Tecnologias Fotovoltaicas [Chivelet & Solla (2010), Weller <i>et al.</i> (2010), Bagher <i>et al.</i> (2015), NREL (2016), Frontini & Verbene <i>et al.</i> (2015) e Zomer (2014)]	100
Figura 7.2: Imagens da fase de construção da célula teste	100
Figura 7.3: Folha de cálculo LNEC para ventilação	101
Figura 7.4: Coeficientes de temperatura disponíveis no banco de dados “ <i>Sandia Module Database</i> ”	102
Figura 7.5: Fator de transmissão espectral e fator de reflexão espectral da célula fotovoltaica	103
Figura 7.6: Catálogo técnico do fabricante schott solar	104
Figura 7.7: Imagens do equipamento de coleta instalado na célula teste	105
Figura 7.8: Imagem da estação meteorologica instalada	105
Figura 7.9: Algoritmo de convecção natural em planos verticais	106
Figura 7.10: Espectro da radiação eletromagnética	106
Figura 7.11: Condições climáticas nas cidades analisadas.....	107

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Aplicações básicas e capacidades das ferramentas de simulação energética global	30
Tabela 2.2: Funções gerais de modelação	32
Tabela 3.1: Parâmetros primordiais para a tomada de decisão.....	36
Tabela 3.2: Propriedades da parede fictícia entre as subzonas.....	38
Tabela 3.3: Caracterização dos elementos construtivos do pavimento	40
Tabela 3.4: Caracterização dos elementos construtivos da cobertura	41
Tabela 3.5: Caracterização dos elementos construtivos das paredes.....	41
Tabela 3.6: Caracterização dos elementos construtivos da envolvente interior da cavidade	41
Tabela 3.7: Caracterização dos elementos construtivos da envolvente exterior da cavidade	42
Tabela 3.8: Caracterização dos elementos construtivos dos envidraçados	42
Tabela 3.9: Tabela de referência dos coeficientes de descarga	49
Tabela 3.10: Tabela de referência dos coeficientes de fluxo de massa	49
Tabela 3.11: Período de realização da coleta experimental.....	59
Tabela 3.12: Equipamentos utilizados durante o experimento.....	62
Tabela 3.13: Descrição dos cenários e parâmetros analisados no estudo de caso.....	62
Tabela 3.14: Perfil de ocupação do edifício	65
Tabela 3.15: Propriedades ópticas dos elementos envidraçados	67
Tabela 3.16: Programação do controle de temperatura interior	67
Tabela 4.1: Médias de erro absoluto e erro relativo percentual, diferenças máximas e mínimas	74
Tabela 5.1: Tabela comparativa da redução de consumo energético entre as soluções construtivas e o cenário de referência.....	80
Tabela 5.2: Tabela de desempenho dos critérios avaliados: Oslo	84
Tabela 5.3: Matriz de prevalência dos critérios avaliados: Oslo - PAE 30%.....	85
Tabela 5.4: Matriz de prevalência dos critérios avaliados: Oslo - PAE 50%.....	85
Tabela 5.5: Matriz de prevalência dos critérios avaliados: Oslo - PAE 80%.....	85
Tabela 5.6: Tabela resultante da análise multicritério nas três cidades analisadas	86
Tabela 7.1: Tabela de desempenho dos critérios avaliados para Lisboa	107

Tabela 7.2: Matriz de prevalência dos critérios avaliados: Lisboa - PAE 30%	107
Tabela 7.3: Matriz de prevalência dos critérios avaliados: Lisboa - PAE 50%	108
Tabela 7.4: Matriz de prevalência dos critérios avaliados: Lisboa - PAE 80%	108
Tabela 7.5: Tabela de de desempenho dos critérios avaliados: Munique	108
Tabela 7.6: Matriz de prevalência dos critérios avaliados: Munique - PAE 30%.....	109
Tabela 7.7: Matriz de prevalência dos critérios avaliados: Munique - PAE 50%.....	109
Tabela 7.8: Matriz de prevalência dos critérios avaliados: Munique - PAE 80%.....	109

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 3.1: Componente de convecção natural relativa à inclinação da fachada.....	51
Equação 3.2: Modelo de cálculo de cargas de refrigeração [fonte (DOE, 2015)].....	68
Equação 3.3: Modelo de cálculo da temperatura do caudal de ar [fonte (DOE, 2015)].	68
Equação 4.1: Erro Relativo em grandezas físicas (fonte: N. A. Campos 1996).....	69
Equação 4.2: Média aritmética das amostras (fonte: N. A. Campos 1996).....	74
Equação 5.1: Índices de concordância e discordância.....	83

ACRÔNIMOS

FV	Fotovoltaico	kWh	Quilowatt-hora
STFV	Semitransparente fotovoltaico	W	Watt
PAE	Percentual de área envidraçada	NREL	National Renewable Energy Laboratory
PAF	Percentual de abertura da fachada	HIT	Hetero Junction with Intrinsic Thin Layer
GW	Gigawatts	CdTe	Telureto de Cádmio
nm	Nanômetro	CIS	Disseleneto de cobre e índio
IEA	International Energy Agency	CIGS	Disseleneto de cobre, índio e gálio
Metp	Milhões de toneladas de petróleo	CSSC	Célula solar sensibilizada por corante
ONU	Organização das Nações Unidas	IGDB	International Glazing Database
REN21	Renewable Energy Policy Network for the 21 st Century		

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento e motivação

Dados estatísticos da Organização das Nações Unidas (ONU) revelaram que a população urbana do mundo cresce abruptamente desde 1950 com projeção prevista de atingir 9.5 bilhões de habitantes até 2050, estando 68% deste total em áreas urbanas. (Nations, 2014)

Esta tendência, aliada ao forte crescimento econômico dos países em desenvolvimento notado principalmente após o movimento europeu da desindustrialização, são responsáveis pelo aumento da procura por recursos energéticos como o gás natural e o petróleo promovendo uma expectativa de elevação de preços a médio e longo prazo, conforme Mendes (2010) e Utama *et al.* (2014). Em complemento, Schaeffer (2015) atribui ao perfil do setor de transportes o principal fator para consumo de combustível fóssil.

Outra tendência que se mostra irrevogável por consequência do crescimento econômico e demográfico é a necessidade de acesso à eletricidade, principalmente nos países em desenvolvimento. Com isso, Mendes (2010) defende que o investimento no setor de energia elétrica representa uma oportunidade de desenvolvimento das tecnologias renováveis e energia nuclear. Schaeffer (2015) complementa que a eletrificação dos setores industriais e de transportes leva a potenciais benefícios para a demanda de energia primária.

Em estudos recentes, Utama *et al.* (2014), Schaeffer (2015), e IEA (2015) apresentam uma atualização da demanda mundial de energia primária que serve de lastro para o argumento de Mendes (2010). Analisando a Figura 1.1 concluímos que considerando o cenário político vigente, enquanto há a tendência para que os combustíveis fósseis mantenham seu peso significativo na demanda primária de energia para as próximas duas décadas, o acesso à eletricidade pode alavancar a componente renovável na matriz energética.

Neste contexto, destaca-se o potencial das tecnologias renováveis no cenário mundial para os próximos anos, nomeadamente eólica, geotérmica, biomassa e hidroelétrica, e a energia solar fotovoltaica que obteve o maior desenvolvimento entre

todas as fontes de energia. De acordo com REN21 (2015) e Solar Power Europe (2014), a capacidade solar fotovoltaica atual totaliza 177 Gigawatts (GW) instalados a nível global, dos quais 40 GW foram contabilizados apenas em 2014, período este de maior incremento (REN21, 2015).

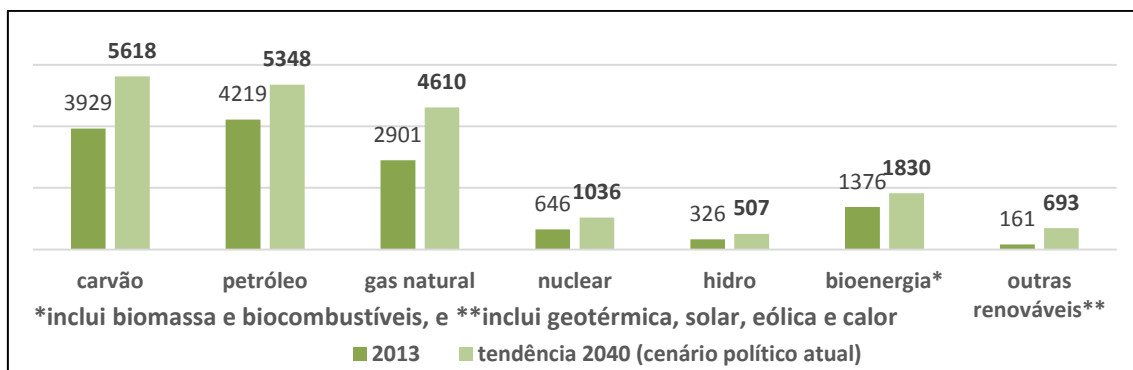


Figura 1.1: Demanda total de energia primária [Mtep] [IEA - International Energy Agency (2015)]

Na visão de diversos autores, como Utama *et al.* (2014) e Fernandes *et al.* (2012) para além dos fatores já citados, a crise do petróleo deflagrada em 1973 acarretou uma mudança paradigmática e no começo de uma cultura que valoriza os recursos naturais finitos. Este novo cenário de escassez, aliado a opinião unânime de políticos, cientistas e sociedade face às mudanças climáticas, conduz à necessidade de mudança no modelo energético, levantando questionamentos a respeito dos atuais modelos adotados.

Como consequência, podemos destacar o interesse por disciplinas que estudam o uso eficiente da energia e o surgimento de uma tendência global por questões sustentáveis a partir de 1990, onde a origem das metodologias de certificação ambiental de edifícios se desenvolve com maior evidência.

Este período também foi marcado pelo desenvolvimento de sistemas construtivos complexos, usados como solução para qualquer limitação técnica encontrada, caracterizando a origem do processo que estamos presenciando atualmente em relação às mudanças ocorridas no campo da ciência e tecnologia. “A proliferação de tecnologias sem critérios gerou edifícios controlados por essa mesma tecnologia, perdendo-se a relação com o lugar e com o clima deste.” (Fernandes *et al.*, 2012).

Em outras palavras, uma espécie de cartilha da sustentabilidade parece tomar conta do planejamento para a tomada de decisão, caracterizando a reprodução indiscriminada de soluções baseadas nestes critérios, que nem sempre são eficientes ou

aplicáveis para um determinado clima de modo a atender as necessidades plenas de uma sociedade.

Neste contexto, a busca pela conservação de energia, o estabelecimento de políticas de certificação ambiental e a importância do setor da Construção Civil na economia mundial, levam à necessidade do desenvolvimento de práticas de projeto mais racionais (Manzano-Agugliaro *et al.*, 2015).

A diretiva 2010/31/EU do Parlamento Europeu e do Conselho aprovou em 2010 novos critérios relativos ao desempenho energético de edifícios, estabelecendo que a partir de 2020 todos os edifícios novos devem ser projetados visando o consumo de energia quase nulo. No campo da Engenharia e Arquitetura a adoção de métodos construtivos no qual as condições climáticas são fundamentais para o partido arquitetônico se tornam uma alternativa potencial e diversas estratégias passivas solares podem ser utilizadas de modo a melhorar a eficiência energética do edifício, reduzindo o consumo de energia primária, e contribuindo para que a certificação ambiental passe a assumir o papel de ferramenta de referência, onde a imposição de diretrizes de projeto muitas vezes distantes das realidades locais se torna secundária.

O enquadramento exposto anteriormente elucida a motivação para a realização da pesquisa, uma vez que para se atingirem condições ideais a nível de redução de consumos de energia, o modelo mental do arquiteto, que quase sempre esteve condicionado no domínio do projeto arquitetônico em si e com pouca atuação na concepção dos sistemas energéticos para suprimento do edifício deve ser repensado (Probst *et al.*, 2012).

No contexto do cenário atual, o projeto arquitetônico deve ser concebido considerando total integração com os sistemas de geração de energia com grande ênfase nas renováveis onde os espaços são criados prevendo a instalação dos equipamentos de geração e armazenamento de energia. Com isso, o processo de trabalho do arquiteto se transforma de modo relevante, sendo determinante compartilhar a elaboração do projeto arquitetônico com uma equipe multidisciplinar.

Outro aspecto que reforça a relevância do projeto arquitetônico no contexto energético atual está diretamente relacionado com o atributo estético e composição formal do projeto. No caso de edifícios novos, os equipamentos de climatização, helipontos, reservatórios e antenas normalmente implantados na cobertura podem

inviabilizar a instalação de sistemas de micro geração de energia, tanto pela ausência de espaço físico quanto pelo fator de sombreamento, considerando o dimensionamento mínimo para se atingirem os requisitos de geração energética para edifícios de consumo quase-zero.

Para construções existentes, para além dos aspectos citados, a orientação e inclinação da cobertura podem não ser ideais, comprometendo a eficiência dos sistemas. Neste caso, a implementação de estruturas complementares ao edifício para compensação das perdas energéticas, buscando as condições de inclinação ideais podem causar impactos na composição formal do edifício, influenciando negativamente a aceitação do edifício para o público em geral e contrariando um dos princípios difundidos na vida acadêmica do arquiteto, a forma.

Neste sentido, a utilização das fachadas dos edifícios torna-se uma alternativa atrativa para a implementação das estratégias passivas que visam a redução de consumos, não só pelos fatores elencados, mas também sob outros pontos de vista.

Segundo Scognamiglio *et al.* (2011) a cultura contemporânea de conservação de energia influencia o campo da arquitetura e exige que os profissionais ampliem o seu leque de atuação. *“Pela primeira vez, arquitetos tem o desafio de projetar em conjunto, formas arquitetônicas, formas de energia e a forma das cidades.”*

Para isso, o domínio da integração das novas tecnologias para geração de energia renovável com a envolvente do edifício e a aplicação adequada de estratégias passivas mais eficientes são fundamentais para o debate e posicionamento crítico do arquiteto frente ao novo cenário de otimização dos recursos e resgate à concepção de projetos que valorizam as estratégias passivas.

1.2. Objetivo geral da pesquisa

Esta investigação teve como principal objetivo avaliar o desempenho energético de um sistema de aquecimento passivo solar na estação de aquecimento, com incorporação de painéis fotovoltaicos na fachada, tendo como base a seguinte questão de investigação: Qual o benefício do sistema na estação de aquecimento?

Para cumprir o objetivo principal, foram empregadas três etapas de trabalho que consistiram na montagem experimental do sistema em célula teste exposta a condições climáticas reais, na elaboração de um modelo de simulação computacional e respectiva

verificação, e pela implementação de um estudo de caso que buscou avaliar o conjunto em diferentes cenários.

1.2.1. Objetivos específicos

Como desdobramento do objetivo principal, descrevemos a seguir as tarefas específicas do trabalho:

- Montagem do sistema passivo na célula teste, o qual foi concebido para testar dois tipos de vidro fotovoltaico em simultâneo;
- Seleção e instalação dos equipamentos de medição e registro dos dados experimentais;
- Sistematização do estado da arte para identificação das ferramentas de simulação mais adequadas;
- Implementação do modelo de simulação dinâmica e comparação dos seus resultados com a medição experimental, considerando os valores da temperatura das cavidades, temperatura do ambiente interior e quantidade de energia gerada pelos painéis fotovoltaicos;
- Aplicação do modelo de simulação dinâmica validado a um caso de estudo, em que se:
 - Avaliou a influência do tipo de solução construtiva adotada, comparando quatro tipos de vidro, nomeadamente o vidro simples incolor, o vidro duplo incolor com caixa de ar e dois vidros semitransparentes fotovoltaicos com transmitâncias de 0.4% e 10%;
 - Analisou a influência das condições climáticas para o desempenho do sistema em três latitudes do continente europeu com climas de características distintas;
 - Avaliou a contribuição da geração de energia fotovoltaica para justificar a incorporação de células fotovoltaicas ao sistema de aquecimento passivo, sob a ótica da redução de consumos energéticos;
- Realização de uma análise multicritério para confirmação dos resultados apresentados e para apoio na identificação da solução construtiva mais eficiente em cada uma das cidades analisadas.

1.3. Objeto de estudo

Sistemas passivos constituem dispositivos construtivos integrados aos edifícios com objetivo de promover o seu aquecimento ou arrefecimento, sem uso de sistemas mecânicos. Durante a estação de aquecimento, os sistemas passivos devem possibilitar a captação da energia solar através de vãos envidraçados orientados de forma adequada, associando elementos opacos de absorção para armazenamento da energia solar, geralmente classificados pelo modo de captação da energia, sendo por ganho direto, ganho indireto e ganho isolado (H. Gonçalves & Graça, 2004).

Nos sistemas de ganho indireto a captação da energia solar ocorre por meio de um sistema coletor que armazena calor em massa térmica. A massa térmica absorve a energia solar nela incidente, sendo posteriormente transferida para o espaço de forma imediata ou gradual. A Figura 1.2 ilustra a estratégia de ganho indireto denominada Parede de Trombe, sendo este o dispositivo mais próximo do objeto estudo desta dissertação.

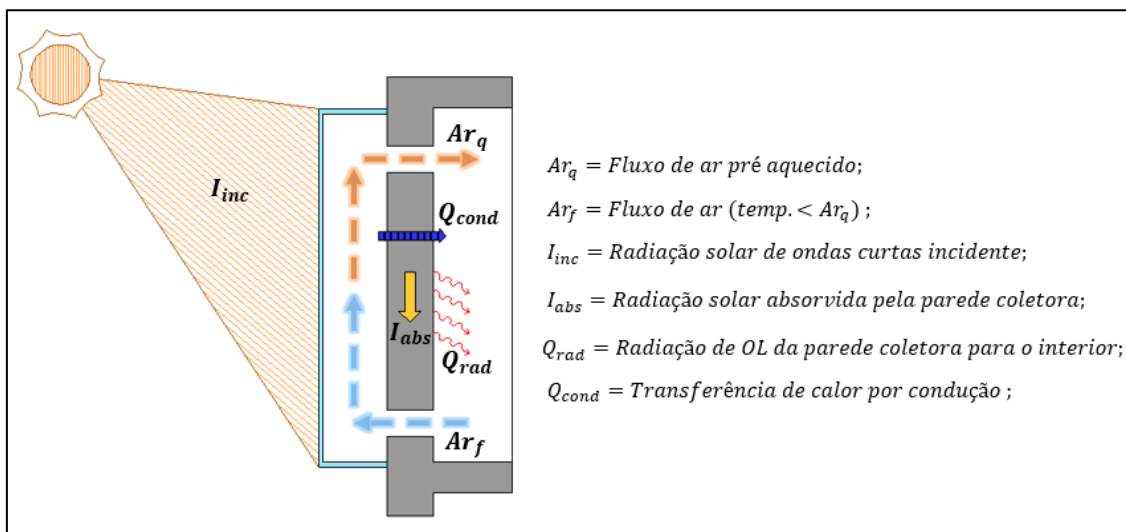


Figura 1.2: Estratégia de ganho indireto Parede de Trombe [adaptado de Pinto e Dias (2015)]

Neste sistema, há um desfaseamento entre o período de radiação solar e o processo de transferência de calor transmitido para o espaço adjacente. Isto provoca o prolongamento da oferta de energia para o espaço, reduzindo a necessidade de aquecimento artificial.

Uma variante dos sistemas de ganho indireto pode ser verificada no edifício Solar XXI em Lisboa (LNEC), em que módulos fotovoltaicos foram integrados à

fachada sul de forma que o calor dissipado pela parte posterior dos painéis fosse reaproveitado para climatização do espaço interior.

Conforme Figura 1.3, o calor produzido pelos painéis fotovoltaicos é aproveitado através de sistema de ventilação controlado pelo usuário em quatro diferentes modos de configuração das grelhas, consoante à estação do ano (H. Gonçalves & Cabrito, 2005).



Figura 1.3: Imagens do sistema de aquecimento passivo: Solar XXI [Gonçalves & Cabrito (2005)]

O objeto de estudo da presente dissertação caracteriza-se por um sistema de aquecimento passivo solar que incorpora em sua envolvente painéis fotovoltaicos semitransparentes. Assim como no dispositivo da Figura 1.3, a radiação solar que atravessa a componente envidraçada da fachada resulta no pré aquecimento do ar da cavidade, acionando sua circulação por convecção natural. Ao mesmo tempo, o fluxo de ar que ocorre na parte posterior do vidro promove a redução da temperatura de operação da célula fotovoltaica e por consequência, resulta em maior eficiência de conversão.

Considerando os princípios apresentados previamente, é possível dissecar os mecanismos de transferência de calor predominantes no sistema de aquecimento passivo em estudo representados esquematicamente pela Figura 1.4.

Ao contrário do que ocorre em fachadas de dupla pele, a opacidade da parede interior da cavidade não permite a transmissão direta de radiação solar, predominando as transferências de calor por meios indiretos.

Se compararmos o comportamento do sistema em estudo com paredes de Trombe, em termos de mecanismos de convecção natural, estes são similares. No entanto, a parede interna da cavidade possui menor massa térmica e foi isolada com aglomerado de cortiça para que a componente de convecção natural do sistema representasse maior influência no desempenho energético. Desta forma o princípio de

armazenamento de energia da parede interna ocorre com menor magnitude do que nos sistemas de paredes de Trombe, que normalmente possuem características de absorção maiores.

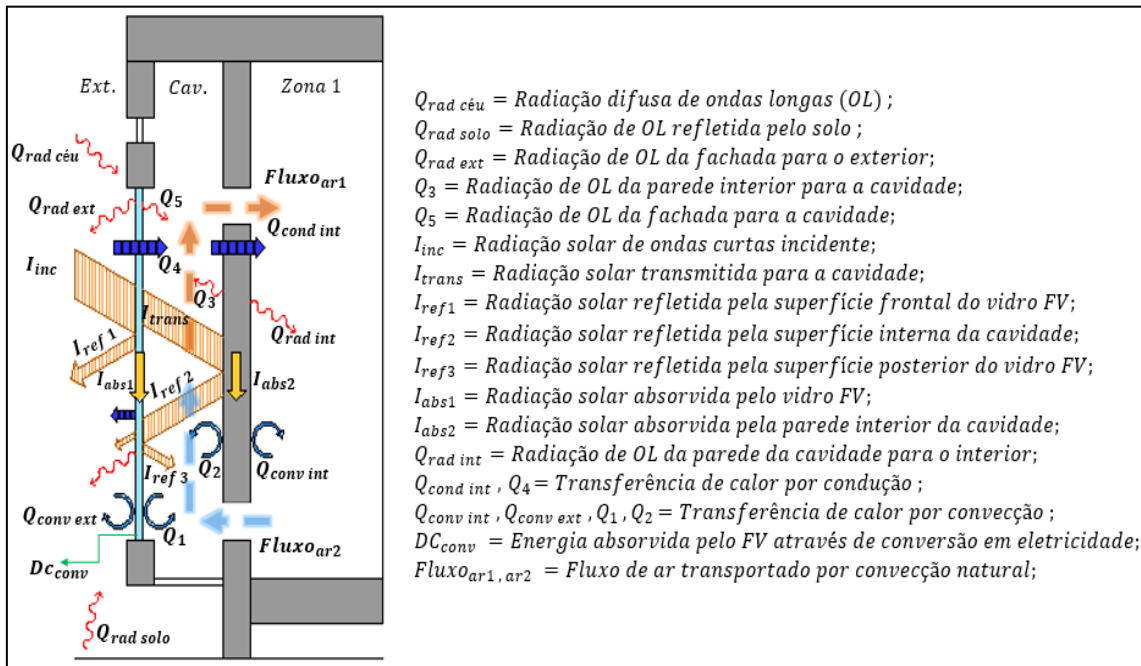


Figura 1.4: Trocas de calor no sistema de aquecimento passivo [adaptado de (Molling, 2014)]

Ao analisarmos os mecanismos e transferência de calor nos elementos da envolvente, é relevante evidenciar a influência da radiação solar incidente, que é o parâmetro de maior influência para as trocas térmicas.

A radiação pode ser classificada de acordo com o seu comprimento de onda e na escala de edifícios, as ondas curtas são caracterizadas pela radiação solar direta, difusa e refletida, enquanto a radiação de grande comprimento de onda é determinada pela emissividade dos elementos da envolvente, pela radiação térmica emitida pelo solo e abóbada celeste e de qualquer corpo no interior e no entorno do edifício (Lamberts, Dutra, & Pereira, 2014).

O espectro da radiação eletromagnética é dividido em partes que delimitam as faixas de comprimento de onda, conforme Figura 7.11 do ANEXO A.

Assim, por uma abordagem isolada, cabe evidenciar os mecanismos de trocas térmicas que ocorrem nos elementos opacos e a decomposição da radiação solar no envidraçado, representado pela Figura 1.5.

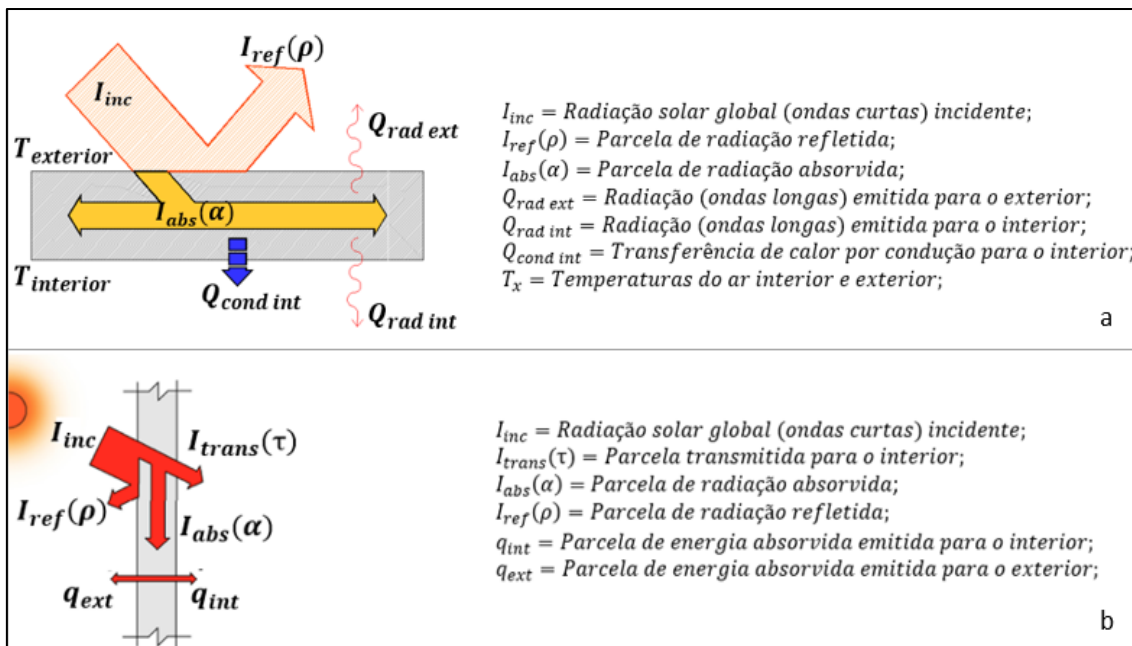


Figura 1.5: a) Transferência de calor em elemento opaco [adaptado de Dornelles & Roriz, (2007), e b) Decomposição da radiação solar no vidro [adaptado de Zófoli, (2011)]

Em elementos opacos, uma parte da energia radiante incidente é absorvida e transformada em calor conforme a absorptância (α) do material enquanto a outra parcela é refletida pela superfície exterior mediante sua propriedade de refletância (ρ). A soma destas parcelas é igual ao total incidente, sendo a cor e a rugosidade superficiais do material bastante influentes sobre estes parâmetros (Dornelles & Roriz, 2007).

O parâmetro que mensura a quantidade de energia solar que atravessa a superfície transparente é denominado fator solar (g) definido por Zófoli (2011 *apud* Givoni 1981) como a soma dos percentuais de energia solar transmitida, absorvida e irradiada pelo vidro para o interior.

O fator solar varia conforme a resposta espectral do envidraçado e o ângulo de incidência da radiação solar Zófoli (2011).

A Figura 1-5b demonstra as parcelas de energia decompostas pela interação da radiação solar com o vidro. As propriedades ópticas do vidro evidenciadas no esquema, basicamente a transmitância, refletância e absorptância são determinadas pelo resultado do quociente entre as três parcelas de transferência de energia com a radiação incidente.

A seguir descreve-se o pressuposto adotado para a presente dissertação, no que tange a configuração das aberturas. Em situação de inverno, as aberturas da fachada exterior devem permanecer vedadas para mitigar as perdas térmicas. Em relação à

parede interior da cavidade, durante o dia, as grelhas devem permitir a transferência de calor gerado na cavidade para o interior do espaço a ser climatizado e esta transferência ocorre por convecção e condução simultaneamente. Ao final da incidência de radiação solar na superfície de vidro, as aberturas internas devem ser vedadas de modo a evitar as perdas por inversão da circulação do ar que ocorrem no período noturno (Amado, Pinto, Alcafache, & Ramalhete, 2015).

1.4. Estrutura da pesquisa

A presente dissertação foi estruturada em sete capítulos, sendo o último dedicado apenas ao devido registro das referências bibliográficas.

O Capítulo atual pretendeu expor uma breve contextualização do cenário energético mundial, a definição dos objetivos de pesquisa, a motivação que levou a escolha do tema de pesquisa, assim como apresentar o objeto de estudo.

O Capítulo 2 compreendeu a revisão da literatura que foi pautada em três focos principais: (i) tendo sido apresentado o objeto de estudo no Capítulo anterior, o levantamento bibliográfico realizado buscou identificar sistemas de aquecimento solar passivo com comportamento similar, (ii) o estado da arte das ferramentas de simulação energética para balizar a escolha das ferramentas utilizadas e por fim, (iii) a integração da tecnologia fotovoltaica em fachadas.

O Capítulo 3 foi dividido em 4 partes, com objetivo de apresentar o problema, os materiais e métodos que foram aplicados na investigação, com a preocupação de apresentar de forma detalhada o método da pesquisa e justificar os pressupostos assumidos.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados da verificação dos dados simulados por comparação com valores coletados experimentalmente na célula teste adaptada para o estudo.

O Capítulo 5 foi dedicado ao estudo de caso, onde se propôs analisar o sistema de aquecimento passivo com incorporação de vidro fotovoltaico em diferentes latitudes, com quatro diferentes soluções construtivas e em três geometrias distintas da fachada. Nesta etapa, o modelo de simulação validado no Capítulo anterior pretendeu simular a operação de um edifício de serviços real, onde os resultados apresentados foram

confirmados através de uma análise multicritério para apoio na identificação da solução construtiva mais eficiente em cada cenário estudado.

Ao final do estudo, apresentamos no Capítulo 6 as considerações finais, bem como as limitações inerentes à investigação realizada e as sugestões para futuros desenvolvimentos do tema pesquisado.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Tecnologias fotovoltaicas e sua aplicação em edifícios

A extensa literatura que aborda a energia solar fotovoltaica classifica as diferentes tecnologias em 3 gerações, de acordo com o avanço nos estudos na busca por células mais delgadas e com melhor eficiência teórica¹, promovendo aumento da aderência e aplicabilidade da tecnologia (Zomer, 2014).

A primeira geração inclui células de silício cristalino, sendo a tecnologia fotovoltaica predominante comercialmente por ser uma solução já consolidada. A segunda geração é composta por películas finas do material de base o que possibilita redução de custos de fabricação e maior flexibilidade na aplicação da célula, principalmente na integração com edifícios e em sistemas de utilidades, como por exemplo em palas, brises e guarda corpo de varanda. Apresenta menor eficiência que outros tipos de células e requer maiores superfícies de captação (Bagher *et al.*, 2015). A terceira geração, usualmente designada por fotovoltaica emergente, inclui células nano partículas com semicondutores orgânicos, inorgânicos e híbridos. Algumas ainda não foram comercialmente aplicadas já que carecem de maiores investigações para melhoria do seu comportamento e propriedades, com foco na durabilidade e eficiência (Weller *et al.*, 2010) e (Bagher *et al.*, 2015).

A Figura 7.1 do ANEXO A representa uma compilação da revisão da literatura referente à classificação das tecnologias fotovoltaicas existentes atualmente (Chivelet & Solla, 2010), (Weller *et al.*, 2010), (NREL, 2016), (Frontini *et al.*, 2015) e (Zomer, 2014).

Em relatório técnico recente, Frontini & Verbene *et al.* (2015) divulgaram um robusto levantamento da integração de painéis fotovoltaicos sendo aplicados em coberturas, fachadas, clarabóias ou como acessórios do edifício através de palas, brises e vedação opaca. Tal estudo, com ênfase na comparação entre as tecnologias atuais está representado pela Figura 2.1 revelando que a tecnologia de filme fino está presente em 22% dos projetos em coberturas e 29% em fachadas, excluídas as aplicações em

¹ Eficiência alcançada em testes de laboratório sob condições controladas de 1.000 W/m^2 de radiação incidente e $25 \text{ }^\circ\text{C}$ de temperatura ambiente

clarabóias e acessórios. Segundo os autores do estudo, considerando que apenas 5% de todos os módulos disponíveis no mundo são filmes finos os valores acima compõem uma alta fatia do mercado, pelas razões estéticas, de baixa relação de custo e de boa aplicabilidade.

Para Mercaldo *et al.* (2009) embora 90% da produção FV utilize silício cristalino, questões relacionadas com a extração da matéria prima, aos elevados custos de produção e ao surgimento de linhas de produção de filmes finos levam à expansão massiva de investimentos para esta tecnologia. Além disso, os autores defendem que especificamente células amorfo (a-Si:H) e micro cristalinas (μ c-Si:H) constituem hoje a opção de material com maior potencial para aplicação de módulos FV.

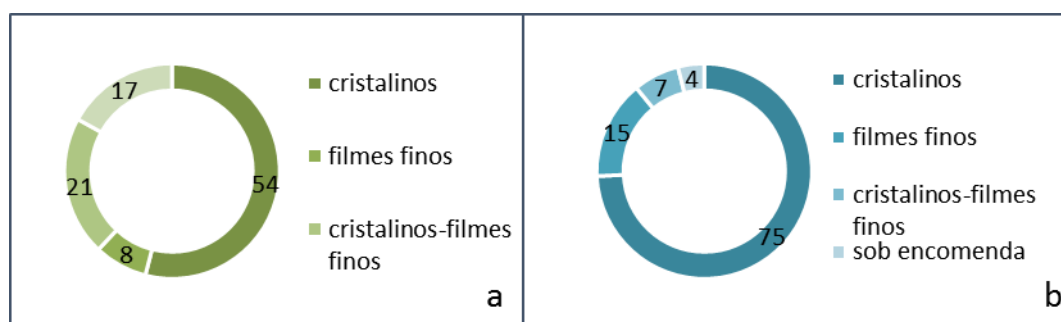


Figura 2.1: a) Integração da tecnologia FV em fachadas (%); b) Integração da tecnologia FV em coberturas (%) [Frontini & Verbene *et al.* (2015)]

Chae *et al.* (2014) investigaram janelas FV e concluíram que as células a-Si:H são adequadas para módulos semitransparentes fotovoltaicos (STFV) pela facilidade de produção em larga escala em camadas muito finas (entre 100 e 250 nm), bem como pela possibilidade de controlar a transparência do filme alterando a espessura da camada FV. Este argumento é reforçado por Mercaldo *et al.* (2009).

Skandalos & Karamanis (2015) fizeram uma revisão da literatura relativa à tecnologia para áreas envidraçadas, inclusive com aplicação de vidro fotovoltaico, mostrando que houve redução de cargas de arrefecimento devido à adoção de cavidade de ar na janela FV com painel duplo. Concluem que a maioria dos estudos mapeados são relacionados com as tecnologias mono cristalino (c-Si) e amorfo, contrapondo ligeiramente Frontini & Verbene *et al.* (2015) que consideram além destas, a tecnologia multicristalina (m-Si) como significativa para o mercado.

Miyazaki *et al.* (2005) demonstraram que janelas FV duplas com módulos a-Si podem reduzir em até 55% o consumo de energia elétrica, com adoção da configuração

considerada ótima pelo autor para a latitude estudada, de 40% de transmitância solar e 50% de relação área de janela / área de parede (WWR, *window/wall ratio*).

Liao & Xu (2015) realizaram experimentos reais combinados com simulação dinâmica em janelas STFV a-Si, tendo obtido resultados de desempenho energético superiores ao vidro duplo comum para climas predominantes de arrefecimento. Como conclusão do estudo, os autores revelam o grande potencial da célula amorfo substituindo o vidro convencional, no entanto, não são aplicáveis em fachadas com vãos de área muito reduzida.

Chae *et al.* (2014) compararam janelas STFV configuradas com 3 tipos de células amorfo a-Si, encontrando vantagens na redução de energia do modelo para todos os sistemas simulados em baixas latitudes.

Em revisão da literatura realizada por Skandalos & Karamanis (2015) o aumento do interesse em novas tecnologias para fabricação de módulos fotovoltaicos de baixo custo para substituição de janelas foi atribuído em grande parte às células solares sensibilizadas por corante (CSSC) e células orgânicas. Algumas de suas propriedades as tornam atrativas e candidatas ideais para a aplicação integrada em edifícios, como a baixa complexidade do processo de fabricação, baixo consumo de material e custo de transformação, sensibilidade para baixos níveis de luminosidade e boa escalabilidade que lhes possibilita serem aplicadas em grandes superfícies sem perda de propriedades.

Kang *et al* (2013) avaliaram a performance de janelas com módulos CSSC e concluíram que o desempenho térmico e óptico das janelas variou conforme a espessura do corante da célula utilizada. Além disso, para aplicação em janelas, células “*red-type*” foram mais adequadas para o fator iluminância, enquanto que as “*green-type*” reduziram ganhos solares. A visão do autor da presente dissertação em relação ao impacto estético provocado por este tipo de aplicação é condizente com os estudos de Probst *et al.* (2012) e Scognamiglio *et al.* (2011) onde deve haver coerência com a composição arquitetônica do edifício sendo esta uma importante barreira pra a aderência desta tecnologia.

Em referência às células fotovoltaicas orgânicas, Sdringola *et al.* (2014) seguem Skandalos & Karamanis (2015) e elencam vantagens para a aplicação da tecnologia OPV (“*Organic Photovoltaics*”) em janelas, tais como suas características de flexibilidade e transparência que permitem a sua integração em janelas. Além disso, há viabilidade em produzir em larga escala, o que se traduz em custos relativamente baixos

de investimento. No entanto, segundo os autores, novas investigações devem ser realizadas para melhor se conhecer o seu comportamento e propriedades. Esta lacuna nos estudos referentes à células orgânicas também foi evidenciada nos estudos de Weller *et al.* (2010) e Bagher *et al.* (2015).

Sánchez & Izard (2015) analisaram a performance de módulos amorfos de silício em fachadas e os compararam com a tecnologia convencional monocristalina, revelando que embora possuam menor eficiência, a larga aceitação em edifícios se deve às características especiais da célula a:Si, como coeficientes de temperatura mais favoráveis, fatores estéticos e sobretudo bom comportamento em baixas irradiâncias. Estes argumentos são reforçados pelo trabalho de Mercaldo *et al.* (2009) que valoriza o potencial promissor desta tecnologia.

2.2. Integração de sistemas fotovoltaicos em edifícios

Quando o projeto arquitetônico promove a integração dos sistemas fotovoltaicos de forma harmoniosa com a envolvente do edifício, estamos em presença do conceito BIPV (*“Building Integrated Photovoltaics”*) onde os módulos fotovoltaicos desempenham um duplo papel, o de geração de energia e de elemento construtivo formal do edifício.

Segundo Scognamiglio & Privato (2005) a opção por BIPV promove benefícios ao projeto como um todo, com destaque para a otimização da eficiência do sistema, a redução de custos associados à construção uma vez que os módulos podem substituir elementos de vedação do edifício, além de proporcionar melhor aceitação de clientes e do público à nova tecnologia quando o atributo estético atinge resultados satisfatórios. A partir de 2005, a tecnologia fotovoltaica ganhou novo status no contexto arquitetônico, sendo capaz de transformar edifícios comuns em símbolos da sustentabilidade. *“Arquitetos entenderam o poder deste símbolo quando usam a energia fotovoltaica como uma parte de seu acervo visual para criar imagens de sustentabilidade para edifícios”* (Scognamiglio & Privato, 2005).

A revisão da literatura revelou uma vasta quantidade de publicações que abordaram a integração de fotovoltaico em grandes projetos. Por outro lado, no âmbito de projetos de menor escala, verificou-se menor abrangência. Em sua revisão da

literatura, Peng *et al.* (2016) concluem que o potencial de economia de energia em janelas FV de edifícios reais raramente foram publicadas.

No âmbito geral das publicações que compuseram o estado da arte desta parte do estudo em um total de mais de duas dezenas de artigos, aproximadamente 40% das publicações analisaram o desempenho energético global do sistema, 20% aspectos técnicos voltados para desempenho térmico, 16% óptico, e o percentual restante abordou aspectos diversos como ciclo de vida, viabilidade econômica e redução de consumos.

2.2.1. Parâmetros de influência no desempenho global

Em estudo recente utilizando a ferramenta Energy Plus, Chae *et al.* (2014) analisaram os efeitos elétricos e termo-ópticos de uma célula FV sobre o desempenho geral de energia de um edifício e resumiram que o desempenho do sistema BIPV é determinado não por um único critério, mas por parâmetros abrangentes, tais como características termo-ópticas, localização do edifício e propriedade elétrica da célula solar.

Em relação à orientação, a contribuição do sistema FV para a produção de eletricidade total do objeto de estudo representa, em valores aproximados, 35% orientado a Sul, 8% a Norte e a soma da contribuição das orientações Oeste e Leste totaliza os 50%. Estes resultados justificam que a fachada Norte se mostra ineficiente para geração de eletricidade em janelas fotovoltaicas.

Kapsis & Athienitis (2015) afirmam que parâmetros como orientação da fachada, Percentual de Abertura de Fachada (PAF) e densidade de iluminação artificial causam impacto no consumo de energia do edifício. Além disso, as simulações realizadas pelos autores revelaram que a seleção das propriedades ópticas do módulo fotovoltaico promoveu influência no desempenho energético do edifício, associada ao nível de iluminação natural, ao controle de iluminação artificial e a tecnologia fotovoltaica utilizada na janela FV, dentro do range situado entre Leste-Sudeste e Oeste-Sudoeste no hemisfério norte.

Para Miyazaki *et al.* (2005), Liao & Xu (2015) e Ng *et al.* (2013) o PAF tem impacto na seleção das propriedades ópticas ideais do STPV. O estudo de Liao & Xu (2015) aponta para que em níveis baixos de PAF, os módulos FV apresentaram piores

desempenhos, inclusive se comparados com vidro convencional. Para Ng *et al* (2013) os resultados de seu estudo indicaram que o benefício energético pode ser muito diferente e dependente do PAF adotado.

Kapsis & Athienitis (2015) concluem que módulos STPV com transmitância visível ideal para prédios com necessidade de aquecimento dominante deve ser maior que 10% devido a necessidade de aumentar os ganhos solares passivos.

Para De Boer e Van Helden (2001), parâmetros do edifício como orientação, inclinação da superfície e intensidade de ganhos internos tem muito mais influência no desempenho energético do que as propriedades elétricas do painel FV.

2.2.2. Influência das propriedades térmicas e ópticas

A abrangente revisão bibliográfica realizada por Skandalos & Karamanis (2015) apresentou o estado da arte em tecnologias para vidros fotovoltaicos em que cita as conclusões encontradas pelos autores Ng *et al* (2013) em relação à influência das propriedades ópticas do vidro na temperatura e desempenho da geração elétrica do módulo fotovoltaico.

Com o mesmo argumento, Sanghoon Yoon *et al* (2011) comprovam que devido a sua transmitância, a alta eficiência do modulo FV nem sempre está ligada com a melhoria da eficiência energética em função de ganhos térmicos associados.

Pal *et al.* (2016) estudaram quatro tipos de janelas com diversas soluções construtivas para altas latitudes concluindo que as Janelas FV foram a pior solução para a perda energética, devido ao seu elevado coeficiente de transmissão térmica. No entanto, o vidro semitransparente fotovoltaico com 6% de eficiência reduziu cargas de aquecimento em 5.5 kWh/ano sendo irrelevante em termos de exportação de energia para a rede. Os autores concluem que em geral, para climas dominantes de inverno, o valor do coeficiente de transmissão térmica caracteriza-se como o parâmetro de maior influência no desempenho energético total.

De acordo com Lu & Law (2013), o desempenho térmico é o fator principal para economia de energia de todo o sistema, sendo o consumo de eletricidade para iluminação artificial um fator secundário.

Olivieri *et al.* (2014) avaliaram os mecanismos de transferência de calor em vidros semitransparentes, demonstrando que a perda de calor através dos módulos

STPV é aproximadamente 40 % maior do que a perda de calor através do vidro duplo incolor, considerado no estudo como cenário de referência. Os autores concluem que painéis com uma camada de vidro não são apropriados para isolamento adequado da envolvente, uma vez que a carga de aquecimento será alta para compensar as perdas térmicas, sobretudo resultantes do alto coeficiente de perdas durante noites de inverno.

Sob o aspecto das perdas térmicas no inverno, a pesquisa de Ng *et al.* (2013), avaliando diversas soluções construtivas de janelas, mostrou bons resultados para a solução de vidro fotovoltaico com dupla camada devido ao seu melhor isolamento térmico, mesmo considerando que esta solução apresentou menos eficiência de conversão.

2.2.3. Influência na eficiência de conversão

Para Olivieri *et al.* (2014), a média da eficiência de conversão diária dos módulos STPV sob condições reais de operação diminui com o aumento grau de transparência, embora para os autores este não é o fator mais determinante para o desempenho elétrico do módulo, não afetando os ganhos de eficiência dos módulos a-Si STPV mais do que outros fatores, tais como os níveis de qualidade da célula fotovoltaica alcançados durante a sua fabricação.

Outro aspecto relevante para a eficiência de conversão dos módulos está ligado à temperatura de operação da célula FV. Segundo Park *et al* (2010), para cada 1 °C de aumento da temperatura da célula, há um decréscimo de 0.5% da geração de energia FV.

No entanto, Peng *et al* (2013) estudaram o superaquecimento de fachadas ventiladas e encontraram resultados menos pessimistas, concluindo que se a temperatura aumentar 16 °C a eficiência cai de 4.4 a 4.7%.

Para Skandalos e Karamanis (2015) a otimização do sistema, ajustando parâmetros de projeto com a característica do clima, promove maior benefício do que propriamente a eficiência da célula FV.

Delisle (2008), afirma ser imperativo que o modulo FV seja a camada mais exterior do conjunto independente da orientação e configuração da fachada. Além disso, movendo o modulo FV para a camada intermédia de uma janela com vidro triplo, a redução da produção de energia atinge 22%.

Interessante conclusão sobre a relação entre a geração de energia e redução de consumos foi apresentada por Liao & Xu (2015) recentemente em estudo para células a:Si na China. Quando comparada com a redução de consumos para arrefecimento, a geração de energia não representa a contribuição mais marcante da tecnologia para o balanço total energético.

Motuzienė & Bielskus (2014) afirmam que a geração de eletricidade da janela FV ainda é baixa, porém o sistema funciona como eficiente dispositivo de sombreamento no verão e assim oferece potencial para redução de investimento em sistema de arrefecimento e economia de energia.

Finalmente, para Ng *et al* (2013) os módulos STFV possuem transmitância visível baixa, e ao substituir janelas convencionais por sistemas BIPV, a visão externa pode ser limitada ou desfocada, podendo impedir que alguns arquitetos adotem STFV no projeto. No entanto, o autor indicou no seu estudo o potencial de STFV substituindo fachadas envidraçadas.

2.3. Sistemas de aquecimento passivo solar

Esta secção irá desdobrar o estado da arte relativo a soluções de fachada especiais para melhorar o desempenho energético do edifício. Serão apresentados alguns casos de estudo de sistemas passivos de aquecimento ou arrefecimento do ar, tais como paredes de Trombe, janelas com sistemas de ventilação integrado e fachadas de dupla pele.

2.3.1. Fachadas de dupla pele

No que tange as diferentes abordagens na literatura para a simulação de fachadas de dupla pele, De Gracia *et al.* (2013) e Zhou & Chen (2010) distinguem seis possíveis abordagens especificando de forma detalhada as vantagens e limitações de cada uma.

Com estudos complementares, os autores revisaram métodos que não adotam ferramentas computacionais - Análítico e Análise não-dimensional, até os mais dependentes de simulações como o modelo de rede (“*air flow network*”), CFD (“*Computational Fluid Dynamics*”) além das abordagens pos zonas e por volume de controle.

Especificamente ao modelo de rede adotado na presente dissertação, este “*leva em conta o efeito do escoamento provocado pelo gradiente de temperatura ao longo da cavidade, além do efeito do vento criando diferenças de pressão entre o interior e o exterior*” (De Gracia *et al.*, 2013).

Hensen *et al.* (2002) reportou em sua pesquisa para Ashrae (*American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers*) que o modelo de rede trata todos os componentes do edifício como uma rede de nós representando as zonas térmicas, interligados pela representação do fluxo de ar que ocorre no sistema através de múltiplas entradas e saídas de ar, desde janelas, dutos, infiltrações e cavidades.

Para Faggembau *et al.* (2003), que estudaram o comportamento de fachadas ventiladas em climas mediterrâneos, situações de convecção natural, onde o fluxo de ar é acionado pela diferença de temperatura entre o ar e as paredes da cavidade, apresentaram bom compromisso com a precisão dos resultados se comparados com dados experimentais.

Diversas publicações que abordam o modelo de rede adotaram metodologias similares com pequenas variações entre os autores estudados: De Gracia *et al.* (2013) e Zhou & Chen (2010) destacam em suas publicações a aplicação do Energy Plus para simulação do desempenho de fachadas de dupla pele, onde a cavidade pode ser dividida em diversas zonas e cada uma delas associada com o modelo de rede.

Autores que adotaram esta abordagem para a cavidade, nomeadamente Yun *et al.* (2007), Kim & Park (2011), Mateus *et al.* (2014), Kalyanova & Heiselberg (2009), Leal *et al.* (2003), Molling (2014) e Hensen *et al.* (2002) também subdividiram a cavidade em zonas.

Leal *et al.* (2003) fez uma análise de sensibilidade para definir a quantidade de zonas na cavidade, encontrando uma substancial dependência do resultado da simulação face ao número de subzonas na qual a cavidade é dividida. Como influência secundária no resultado, o autor conclui que, para o algoritmo de transferência de calor adotado o número ótimo de zonas para o equilíbrio da simulação é quatro, já que ao se adotar um número maior de zonas, o comportamento das temperaturas do sistema fica comprometido. Este último argumento de Leal *et al.* (2003) pode ser fundamentado pelo trabalho de Hensen *et al.* (2002) que após adotarem oito zonas na modelação da cavidade elencam vantagens e desvantagens para o modelo de rede na modelação de

sistemas de ventilação natural, como por exemplo o fluxo do ar ocorrendo de forma não homogênea.

Outra recente publicação baseada na validação dos resultados de saída do Energy Plus através de dados experimentais justifica o número maior de subzonas. Mateus *et al.* (2014), ao realizarem uma análise de sensibilidade para determinar o número de zonas, verificaram que a abordagem com três zonas se aproximou mais dos valores medidos, comparando com o caso de uma única zona, o que justifica uma maior complexidade na modelação da cavidade. Os resultados encontrados pelos autores indicam uma tendência de que as temperaturas da cavidade em geral são maiores que a temperatura exterior, e que o gradiente de temperatura entre a zona inferior e superior da cavidade pode atingir 4 °C, convergindo para as conclusões encontradas por Dickson (2004) e Kim & Park (2011) em seus estudos.

Kim & Park (2011), investigaram os recursos do Energy Plus para este tipo de simulação, e propuseram alguns pressupostos que devem ser atendidos para mitigar as dificuldades e limitações da ferramenta. No que tange a escolha do algoritmo de convecção interna os autores assumiram a superfície da cavidade como muito lisa, justificando a aplicação do algoritmo escolhido. Da mesma forma, a divisão da cavidade em várias subzonas foi a representação do escoamento do ar por ventilação natural mais adequada.

2.3.2. Fachadas ventiladas

Em seu estudo, que avaliou o desempenho de fachadas ventiladas composta por elementos envidraçados translúcidos combinados com células fotovoltaicas opacas, Yun *et al.* (2007) destacam que os parâmetros de maior influência no desempenho foram a radiação solar, o tipo de vidro, as propriedades térmicas do vidro (“*U*”), o fator de forma do edifício, o perfil de iluminação e a eficiência da célula FV. Os autores concluíram que o percentual de abertura da fachada (PAF) deve estar no intervalo de 50% e 60%.

Outras conclusões relevantes foram: (i) o benefício derivado da fachada ventilada é muito dependente da condição climática; (ii) edifícios com maior profundidade foram menos eficientes do que aqueles menos profundos; (iii) o fluxo de ar na cavidade promoveu reduções na temperatura da célula de 1 °C no inverno e 5 °C no verão resultando na melhoria da eficiência de conversão entre 0.97% e 4.60%

respectivamente, o que para o autor representa um benefício muito pequeno para a geração anual de energia; (iiii) outra contribuição do estudo foi em relação à posição da grelha de saída do ar, sendo crucial para o sucesso da fachada fotovoltaica ventilada.

2.3.3. Dupla janela ventilada

Através de estudo empírico, Carlos *et al.* (2010) analisaram o desempenho térmico de um sistema que consiste em duas janelas instaladas formando um espaço de ar ventilado por meio de aberturas na parte inferior e superior do caixilho. Este sistema passivo tem como objetivo o pré aquecimento do ar durante a estação de inverno pela ação do efeito chaminé, tendo sido estudadas várias orientações da fachada.

Das conclusões encontradas no estudo, destacamos que a orientação da fachada não provocou diferenças relevantes no caudal do ar sugerindo que a ação dominante para a obtenção do caudal foi o “efeito chaminé” em detrimento da pressão do vento. Os ganhos térmicos na orientação Norte diferiram apenas 17% em relação à orientação Sul.

Em relação à redução de consumo, Carlos *et al.* (2010) comprovaram que o parâmetro mais influente está ligado às condições da envolvente e a escolha do sistema a adotar é dependente do perfil de utilização do edifício. Segundo os autores, pelo fato da janela interna ser translúcida, o sistema absorve parte das perdas energéticas noturnas e assim, contribui para que o sistema continue a operar mesmo durante a noite, e para edifícios residenciais este fenômeno é benéfico para redução de consumos de aquecimento. Por outro lado, o artigo ressalta os cuidados necessários para a prevenção do possível sobreaquecimento indesejado do sistema, em períodos do ano onde o modo de arrefecimento é dominante.

Em publicações complementares Carlos *et al.* (2010) e Carlos *et al.* (2012) apresentam resultados indicando que existe correlação entre a irradiância solar e o aumento da temperatura do ar na cavidade, no entanto, uma correlação muito fraca foi identificada entre a irradiância e o caudal de ar.

Outras conclusões importantes permearam a influência das propriedades físicas e ópticas dos materiais utilizados nas janelas, bem como a geometria do edifício, representando parâmetros relevantes para a correta especificação do sistema. No entanto, para os autores a “*função mais importante do sistema de dupla janela ventilada*”

foi sem dúvida a recuperação de calor na estação de aquecimento” (J. S. Carlos *et al.*, 2012).

Em pesquisa envolvendo a Universidade de Aalborg na Dinamarca e Universidade do Minho em Portugal (Heiselberg *et al.* 2013) um sistema de janela dupla para pré aquecimento do ar denominado “*Climawin*” foi analisado para diversas configurações das camadas de vidro e com cavidade ventilada e não ventilada. A melhor solução construtiva apontou para a combinação de vidro duplo com caixa de ar e película de baixa emissividade na parte mais exterior da janela, associado com cavidade ventilada e camada de vidro simple com baixa emissividade na parte mais interior. Os resultados demonstram que o potencial de redução de energia pode atingir 11% à 20% dependendo da latitude, clima e tipologia da janela.

Para além de janelas ventiladas por convecção natural, algumas publicações abordam sistemas por convecção forçada, como por exemplo o estudo de Gloriant *et al.* (2015) que levaram a cabo um sistema denominado janela “*Paziaud*” composta por três peles de vidro formando uma cavidade em formato “U”. O fluxo de ar induzido por um ventilador é aquecido pela radiação solar incidente e também pela recuperação das perdas de calor do interior para o exterior. O estudo indicou que a taxa de fluxo de ar foi o principal parâmetro de influência no desempenho do sistema, melhorando conforme o aumento do caudal forçado. Por outro lado, grandes panos de vidro com PAF elevados não são favoráveis ao desempenho e provocam a inviabilidade do sistema.

2.3.4. Paredes de Trombe

Para além de estratégias passivas de ganho solar direto vistas anteriormente, a arquitetura bioclimática adota sistemas solares passivos por ganho indireto, que atuam por meio da capacidade de armazenamento térmico e mecanismos de transferência de calor, tal como a parede de Trombe.

Em estudo realizado por Sá (2011) um método numérico de cálculo estático baseado na Norma ISO 13790-2008 foi desenvolvido para avaliar o desempenho térmico de paredes de Trombe ventiladas e seladas. Como conclusão do trabalho, destacamos um dos fatores citados pela autora, de que a libertação de calor para o interior foi cerca de três vezes mais lenta no sistema não ventilado.

Jie *et al.* (2007) incorporaram células fotovoltaicas na parede de Trombe sob a fundamentação teórica de que a absorvidade maior das células fotovoltaicas, se comparada com o vidro convencional, pode influenciar no desempenho do sistema. Os resultados obtidos, comprovaram que a diferença de temperatura entre as duas soluções atingiu um valor máximo de 10.6 °C, e como consequência, a instalação de células fotovoltaicas promoveu temperaturas do ambiente interior 7.7% maiores do que o edifício de referência, que adotou o vidro convencional.

Ferramentas computacionais vêm sendo adotadas para representação de paredes de Trombe, nomeadamente o Design Builder e o Energy Plus que utilizam os mesmos algoritmos. Para Cavalcanti (2013) “*embora o algoritmo de simulação do Energy Plus considere a transferência de calor de modo unidimensional, ainda é considerado como um dos melhores da atualidade para este tipo de simulação*”. Este argumento é reforçado pelo estudo de Zalewski *et al.* (2002) que adotaram o método numérico de diferenças finitas considerando o fluxo de calor unidirecional para validar o modelo de simulação.

No caso de paredes de Trombe não ventiladas, o Energy Plus dispõe de um objeto específico denominado “*TrombeWall*” que foi validado pela tese de doutoramento de Ellis (2003), comparando os resultados da simulação com dados experimentais. Para o autor, a validação dos resultados demonstrou que o modelo de Parede de Trombe não ventilada obteve bons resultados em comparação aos dados reais, sendo aplicável em simulações de edifícios solares passivos.

Em relação à parede de Trombe ventilada, Cavalcanti (2013) utilizou em seu estudo o modelo de rede do Energy Plus (“*airflownetwork*”) para simular o comportamento da ventilação natural com base na formação de nós representando as zonas térmicas, uma vez que o Energy Plus não possui algoritmo desenvolvido para calcular corretamente o coeficiente de convecção em paredes de Trombe ventiladas (DOE, 2015). Neste caso, a solução alternativa é adotar o algoritmo “*TARP*” para a convecção interna da cavidade, que leva em conta efeitos de convecção natural e está disponível nos programas de simulação dinâmica Energy Plus e Design Builder (em versões mais antigas este algoritmo denominava-se “*detailed*”). Esta abordagem pode ser verificada nos estudos de Dabaieh & Elbably (2015) e Simões *et al.* (2015) sendo descrita em detalhes nas documentações técnicas disponibilizadas pelo Design Builder e Energy Plus.

2.4. Simulação energética dinâmica

2.4.1. Interoperabilidade

A previsão do desempenho energético e ambiental de um edifício pode ser executada com a aplicação de ferramentas de simulação energética dinâmicas, não somente na fase inicial do projeto como referência para as decisões técnicas, mas também em fases posteriores para validação das decisões implementadas. O resultado das simulações energéticas nos permite compreender o comportamento físico de cada elemento construtivo de modo a otimizar sua aplicação consoante às condições climáticas e características funcionais do edifício. (Abdullah, Cross, & Will, 2014), (Bahar, Pere, Landrieu, & Nicolle, 2013) e [Lamberts *et al* 1997 *apud* (Santana, 2006)]

A “*International Building Performance Simulation Association*” (IBPSA, 2016) compila em seu banco de dados uma lista atualizada das ferramentas de simulação disponíveis no mercado, nomeada “*BEST Directory*”, onde as classifica por diversas categorias com destaque para análise energética global do edifício, simulação detalhada de componentes do edifício e simulação do desempenho visual e luminotécnico.

O conceito de análise energética global (“*WBEA - Whole Building Energy Analysis*”) consiste em avaliar a performance do edifício mensurando o quanto a integração entre forma, sistemas técnicos e envolvente do edifício atuam frente às condições ambientais de fronteira (Abdullah *et al.*, 2014). Para Crawley *et al.* (2008), as ferramentas centrais no campo da eficiência energética em edifícios são os programas de simulação energética que aplicam esta abordagem como cerne para a elaboração de modelos.

Um aspecto verificado atualmente, presente nas publicações de Gonçalves & Duarte (2006) e Abalos (2007) refere-se à adoção de recursos de simulação computacional, interferindo diretamente na elaboração do projeto, onde diversos profissionais atuam simultaneamente caracterizando uma equipe multidisciplinar.

Gonçalves & Duarte (2006) defendem que “*é evidente a inovação na concepção arquitetônica e na engenharia de sistemas, considerando não apenas o edifício em si, mas principalmente o processo de projeto, que ganhou complexidade com a maior interação entre os profissionais envolvidos e a inserção de ferramentas avançadas de modelação e simulação.*”

Face ao cenário atual, é natural que não exista nenhuma ferramenta de simulação capaz de atender, isoladamente, todas as necessidades de projeto de modo que a aplicação de várias ferramentas complementares é inevitável (Bahar *et al.*, 2013). Neste contexto, a transição de programas CAD (“*Computer Aided Design*”) para uma plataforma colaborativa de elaboração de modelos tridimensionais surge como alternativa para mitigar possíveis erros na manipulação dos dados de entrada e reduzir custos com a otimização de tempo Gupta *et al.* (2014).

Esta abordagem é nomeada Modelação de Informações da Construção, nesta dissertação referenciada como BIM (“*Building Information Modelling*”), que promove a interoperabilidade de diversas ferramentas de simulação durante todo o ciclo de vida do projeto.

Bahar *et al.* (2013) fizeram uma revisão comparativa entre diversas ferramentas comumente adotadas em análise energética, com base em critérios de avaliação de conforto térmico, parâmetros de entrada em motores de simulação e capacidade de interoperabilidade através da plataforma BIM. Outros estudos como os de Abdullah *et al.* (2014), Dubois & Horvat (2010), Gupta *et al.* (2014) e Horvat & Dubois (2012) enfatizam também a importância do conceito BIM em simulações energéticas com análise global revelam a consolidação deste método, tendo os dois últimos autores focado suas investigações em ferramentas para previsão do potencial de geração solar em sistemas fotovoltaicos.

Gupta *et al.* (2014) afirmam que o estado da arte dos programas de simulação revela a falta de interoperabilidade e a capacidade limitada de modelar sistemas fotovoltaicos, embora algumas ferramentas como TRNSYS (Solar Energy Laboratory, 2007) e Energy Plus (DOE, 2016a) têm desenvolvido esforços no sentido de minimizar esta lacuna. Elencam ainda uma série de programas específicos para cálculo fotovoltaico que atuam isoladamente, além das mais relevantes limitações encontradas durante a pesquisa.

Attia & Neuve (2010) com base em dois sólidos questionários aplicados em profissionais da construção civil, os quais detalham em seu estudo, identificaram os dez programas mais utilizados. A partir deste levantamento analisam as ferramentas através de cinco critérios, dentre os quais a interoperabilidade, concluindo que a relevância da pesquisa está associada a implementação de melhorias por parte dos desenvolvedores

dos programas, bem como na criação de uma ligação inovadora entre arquitetos e engenheiros no sentido de reduzir as lacunas interdisciplinares em vários níveis.

2.4.2. Estudos comparativos

Crawley *et al.* (2008) e Crawley *et al.* (2005) descrevem uma série de pesquisas realizadas com foco em programas de simulação, desde a década de 80. Nos últimos dez anos não encontraram trabalhos que comparassem as ferramentas, o que os motivou a elaborar estudos comparativos com as vinte maiores ferramentas de simulação categorizadas por 14 diferentes aspectos. Durante a extensiva análise, citam a dificuldade para avaliar de forma homogênea os programas, visto que o levantamento foi baseado em catálogos técnicos dos fabricantes, não sendo, portanto de informação uniforme. Deste modo, criaram uma escala com seis níveis para avaliar o grau de aderência de um determinado parâmetro, ou seja, o quanto cada ferramenta desenvolveu cada um dos parâmetros analisados.

A conclusão do estudo se concentra em que os usuários devem considerar a utilização das diversas ferramentas em conjunto, evitando uma abordagem isolada, como por exemplo aplicar uma ferramenta menos complexa na fase inicial do projeto orientando soluções a serem adotadas, com menor uso do tempo. Esta conclusão se caracteriza por uma visão diferente de Bahar *et al.* (2013), Abdullah *et al.* (2014), (Dubois & Horvat (2010), Gupta *et al.* (2014) e Horvat & Dubois (2012) que defendem a prevalência da plataforma BIM.

Dubois & Horvat (2010) apresentam uma sistemática pesquisa baseada nos 56 programas mais frequentes entre os arquitetos, categorizando-os por ferramentas CAD, de visualização e de simulação energética, com o objetivo de oferecer uma fonte de consulta robusta para a tomada de decisão nas fases de planejamento de projeto, tendo sido uma das bases para a definição das ferramentas adotadas nesta dissertação.

Outra pesquisa realizada com número reduzido de ferramentas, no entanto, com uma vasta quantidade de funções avaliadas foi publicada por Sousa (2012) obtendo como produto uma tabela compilada com 48 funções importantes no campo da simulação energética.

2.4.3. Aplicações específicas

Em publicação nomeada “*Tools and methods for solar design*”, Horvat & Dubois (2012) revelam a ausência métodos informatizados para cálculos solares na fase inicial de projeto. A pesquisa redireciona trabalho prévio Dubois e Horvat (2010) onde foi aplicado um questionário para uma população de engenheiros e arquitetos, onde o resultado serviu de base para a compreensão das necessidades destes profissionais em relação à ferramentas para cálculo solar.

Por outro lado, uma abrangente revisão da literatura apresentada por Zomer (2014) elenca as ferramentas de cálculo solar utilizadas atualmente, desde aquelas mais vulgares até programas de menor divulgação ou desenvolvidos por Universidades. O estudo agrupou os programas disponíveis em 6 categorias e revelou que existem muitas ferramentas disponíveis, com diferentes focos e formas de aquisição, no entanto, para a autora existe uma lacuna a ser solucionada no sentido da dificuldade dos usuários construírem o modelo em três dimensões no próprio programa e estimarem com maior precisão o efeito do sombreamento não controlado, por exemplo.

Em relação ao projeto para edifícios com necessidades de energia quase nulas, Athienitis *et al.* (2010) aplicaram um questionário para avaliar de que forma estes edifícios são projetados revelando que 60% dos profissionais arguidos criam o modelo energético já na fase conceitual do projeto. Além disso, identificaram uma limitação no processo de simulação pois as ferramentas mais simples têm capacidade reduzida de representar na realidade os componentes chave para edifícios solares passivos, como a iluminação e ventilação natural, bem como o arrefecimento passivo. Em contraponto, Garde *et al.* (2011) após avaliarem a relação entre edifícios de energia quase nula e métodos de simulação, com ensaios em vários programas, consideram o desenvolvimento recente do Energy Plus em torno da interface com alguns aplicativos para visualização e luminotécnica, como uma concreta inovação.

Loonen *et al.* (2016) investigaram os desafios e limitações de programas computacionais simularem o desempenho dos sistemas de fachadas adaptativas, avaliando 20 diferentes tecnologias, dentre elas dispositivos de sombreamento retráteis, materiais de mudança de fase e fachadas de dupla pele. Segundo os autores, a modelação de sistemas adaptativos deve representar fielmente a variação temporal de estado dos sistemas e das propriedades dos materiais, substituindo a estática

representação da envoltória baseada apenas em pressupostos. Neste sentido, apresentam metodologia mostrando os aspectos a serem considerados de forma simultânea para uma precisa previsão do desempenho.

2.4.4. Discrepâncias no resultado

Atualmente os programas de simulação energética com maiores capacidades, tais como Energy Plus, ESP-r, IDA ICE, IES [VE] e TRNSYS tem sido submetidos a rigorosos estudos para validação dos resultados obtidos uma vez que a precisão dos dados simulados é muito dependente dos parâmetros de entrada (Loonen *et al.*, 2016). Para Mateus *et al.* (2014) erros na simulação são inversamente proporcionais aos detalhes de medição, flexibilidade do modelo e complexidade do edifício.

Um estudo empírico para validação de programas de simulação energética foi aplicado por Loutzenhiser *et al.* (2009) nas janelas de uma célula teste. Nele, os autores utilizam algoritmos existentes nos programas Energy Plus, IDA ICE, e DOE-2.1E, base de dados de fabricantes de vidro e medições em laboratório para simular a radiação de onda curta que atravessa a janela. No entanto, para considerar o impacto global do sistema incluindo o efeito da transferência de calor pelo caixilho, o método requer maior nível de complexidade. Para simular o fluxo bidirecional e a ponte térmica linear, os autores utilizaram a ferramenta BISCO (Physibel, 2016) para aumentar a precisão dos resultados. Desta forma, comparando os 3 motores de simulação adotados, a diferença média absoluta entre os dados coletados e simulados foi de até 9.9%.

Para Abdullah *et al.* (2014), que concorda com Loonen (2016) em relação à existência de estudos recentes fomentando o tema da validação de dados, as discrepâncias entre os valores simulados e medidos experimentalmente podem variar entre 10% à 30% (Diamond *et al.* 2006, Scofield 2009, Stoppel and Leite 2013 *apud* Abdullah *et al.* 2014).

2.4.5. O Estado da arte das ferramentas de simulação

A Tabela 2.1 e a Tabela 2.2 retratam uma compilação de diversos estudos recentes, já citados anteriormente, tais como Crawley *et al.* (2008), Horvat & Dubois (2012), Sousa (2012), Baba *et al.* (2013) e Bahar *et al.* (2013) caracterizando o estado da arte dos programas de simulação energética em relação às suas aplicações e funções.

Utilizamos como critério de seleção dois aspectos: (i) descrição das funções mais relevantes para o escopo desta dissertação e (ii) elencamos os programas com maior adesão entre os profissionais, produto dos questionários contidos em Attia & Neuve (2010) e bibliometria resultante da revisão da literatura.

Ferramenta	Comportamento térmico	Geração de energia	Conforto visual	3D	BIM
	[1-5]	[1-3], [5]	[1-3], [5]	[1-3], [5]	[1-3], [5]
Ecotect	✓	✓*	✓	✓	✓
e-QUEST	✓	✓	✓	✓	✓**
Energy Plus	✓	✓	✓	✓***	✓
IES [VE]	✓	✗	✓	✓***	✓
Design Builder	✓	✗	✓	✓	✓
Green Building Studio	✓	✗	✓	✓	✓
ESP-r	✓	✓	✓	✓	✗
TRNSYS	✓	✓	✓	✓***	✗
IDA ICE	✓	✗	✓	✓	✓
DPV	✓	✗	✗	✓	✓
Legenda	<p>[1] (Crawley et al., 2008); [2] (Sousa, 2012); [3] (Bahar et al., 2013); [4] (Baba et al., 2013); [5] (Dubois & Horvat, 2010); * apenas análise do melhor local para instalação (Zomer, 2014); **gbXML via GreenBuilding Studio; ***via SketchUp; ✓ Capacidade identificada isoladamente ou complementada por outros aplicativos; ✗ Capacidade não identificada;</p>				

Tabela 2.1: Aplicações básicas e capacidades das ferramentas de simulação energética global

Funções gerais de modelação	Ecotect	e-QUEST	Energy Plus	IES [VE]	Design Builder	ESP-r	TRNSYS	IDA ICE
	[1], [3-5]	[1], [3-5]	[1-5]	[1-5]	[1-5]	[1-5]	[1-5]	[1-5]
Completa descrição geométrica de vãos	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Absorção e libertação de umidade pelos materiais	✓	✓	✓	✓	✓	✗[2]	✓	✓
Algoritmos de balanço térmico	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Temperatura das superfícies das zonas	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Fluxo de ar pelas janelas (ventilação cruzada)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗[2]
“Daylighting” e controle de iluminação	✓	✗[1]	✓	✓	✓	✓	✗[2]	✓[2]* ✗[1]
Infiltrações não controladas	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ventilação natural	✗[1] ✗[4]	✓	✓	✗[1] ✗[2] ✓[4]*	✓	✓	✓	✓
Controle de abertura de vãos para ventilação natural	✗[1] ✗[4]	✗[1] ✗[4]	✓	✗[2] ✓[4]*	✓	✓	✓	✗[1] ✓[2]* ✓[4]*
Sistemas passivos – Solar	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗[2]
Sistemas passivos – “Trombe Wall”	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Sistemas passivos – Painéis fotovoltaicos	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗[2]
Produção de energia pelas renováveis	✓	✓	✓	✗[2]	✓	✓	✓	✗[2]

continua

Funções gerais de modelação	Ecotect	e-QUEST	Energy Plus	IES [VE]	Design Builder	ESP-r	TRNSYS	IDA ICE
Geração de eletricidade	✓	✓	✓	✗[2]	✓	✗[2]	✓	✗[2]
Algoritmo de convecção exterior (BLAST/TARP)	✗[1]	✗[1]	✓	✗[1]	✓	✗[1]	✓	✗[1]
Algoritmo de convecção exterior (DOE-2)	✗[1]	✓	✓	✗[1]	✓	✗[1]	✓	✗[1]
Algoritmo de convecção exterior (MoWITT)	✗[1]	✗[1]	✓	✗[1]	✓	✓	✓	✗[1]
Algoritmo de convecção exterior (ASHRAE)	✗[1]	✗[1]	✓	✓	✓	✗[1]	✓	✗[1]
Algoritmo de convecção exterior (Ito, Kimura, Oka)	✗[1]	✗[1]	✗[1]	✗[1]	✗[1]	✓	✓	✓
Fluxo de ar multizonas	✗[1]	✗[1]	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Algoritmo de convecção interior dependente da temperatura	✗[1]	✗[1]]	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Algoritmo de convecção interior dependente da diferença de pressão	✗[1]	✗[1]	✓	✓	✓	✓	✓	✗[1]
Legenda	<p>[1] (Crawley et al., 2008); [2] (Sousa, 2012); [3] (Bahar et al., 2013); [4] (Baba et al., 2013); [5] (Dubois & Horvat, 2010);</p> <p>*Publicação mais recente identifica atualização do recurso da ferramenta;</p> <p>✓ Função disponível, ou parcialmente implementada, segundo referências [1-5]</p> <p>✗ Função indisponível, conforme referências [1 e 2]</p>							

Tabela 2.2: Funções gerais de modelação

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de avaliar o comportamento de um sistema de pré-aquecimento do ar interior com incorporação de painéis fotovoltaicos semitransparentes integrados à fachada, foi adotado o método descrito a seguir. Com a aplicação deste método pretende-se avaliar as temperaturas no interior da cavidade e no interior do espaço habitável. O modelo computacional foi verificado inicialmente com recurso a medições experimentais em célula teste localizada em Coimbra (40 °15' N, 8 ° 27' O).

O método foi dividido em quatro fases, sendo a primeira caracterizada pela sistematização do estado da arte e pelo levantamento dos parâmetros necessários para a elaboração do estudo, desde a escolha das ferramentas adequadas até a definição das características físicas dos elementos construtivos.

A segunda fase consistiu na modelação de todo o sistema para a realização de simulações computacionais.

Na terceira fase, de carácter experimental, pretendeu-se verificar o modelo através da comparação dos valores simulados com os medidos em célula teste.

A última fase, considerando os níveis de precisão e erro do modelo obtidos na fase de verificação, buscou-se comparar o desempenho do sistema em três latitudes do continente europeu e considerando uma série de cinco cenários distintos onde foi possível mensurar a influência da solução construtiva do elemento envidraçado no consumo total de eletricidade do modelo em estudo.

3.1. Primeira fase

3.1.1. Sistematização do estado da arte

Esta fase pretendeu categorizar o conhecimento sobre o tema produzido por outros autores até o momento de modo a identificar as melhores abordagens, as possíveis lacunas existentes e delinear o caminho a seguir.

A Figura 3.1 consiste em um gráfico que ilustra a sistematização do levantamento bibliográfico, em que a literatura analisada foi organizada pelos tópicos de investigação realizada e com relevância para o tema da presente dissertação.

Durante a primeira fase da pesquisa bibliográfica pretendeu-se avaliar a viabilidade técnica de utilização de vidro fotovoltaico em janelas residenciais. Concluiu-se que não seria viável, identificando-se assim novo objeto de estudo, caracterizado pelo uso de fotovoltaico integrado em um sistema passivo de aquecimento.

Outro objetivo fundamental alcançado durante a caracterização do estado da arte foi a definição das ferramentas de simulação existentes no mercado que pudessem atender de modo eficiente às necessidades do estudo. Além disso, a identificação e mapeamento das limitações das diversas ferramentas analisadas promoveu a otimização do tempo dedicado para a modelação do sistema, evitando a abordagem por tentativa e erro.

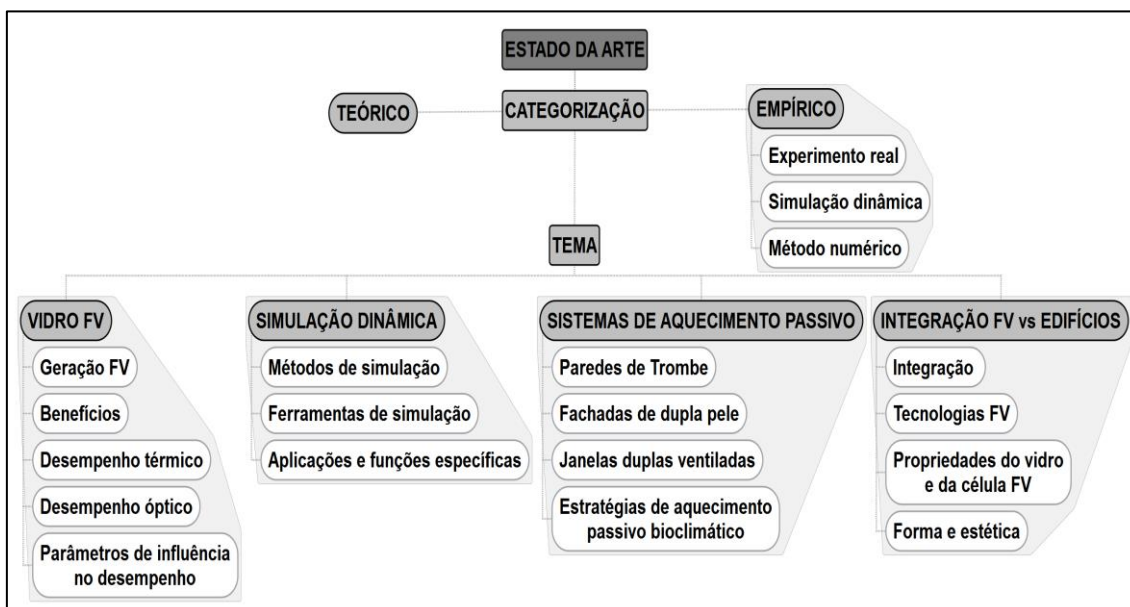


Figura 3.1: Mapa conceitual da sistematização do estado da arte

3.1.2. A escolha das ferramentas

Conforme abordado na secção 2.7, é natural que não exista nenhuma ferramenta de simulação capaz de atender, isoladamente, todas as necessidades de projeto de modo que a aplicação de várias ferramentas complementares é inevitável (Bahar *et al.*, 2013).

Desta forma, resumimos na Figura 3.2 a seleção de programas de simulação adotados no âmbito desta dissertação, os quais serão apresentados de forma mais detalhada durante a descrição da segunda fase do método.

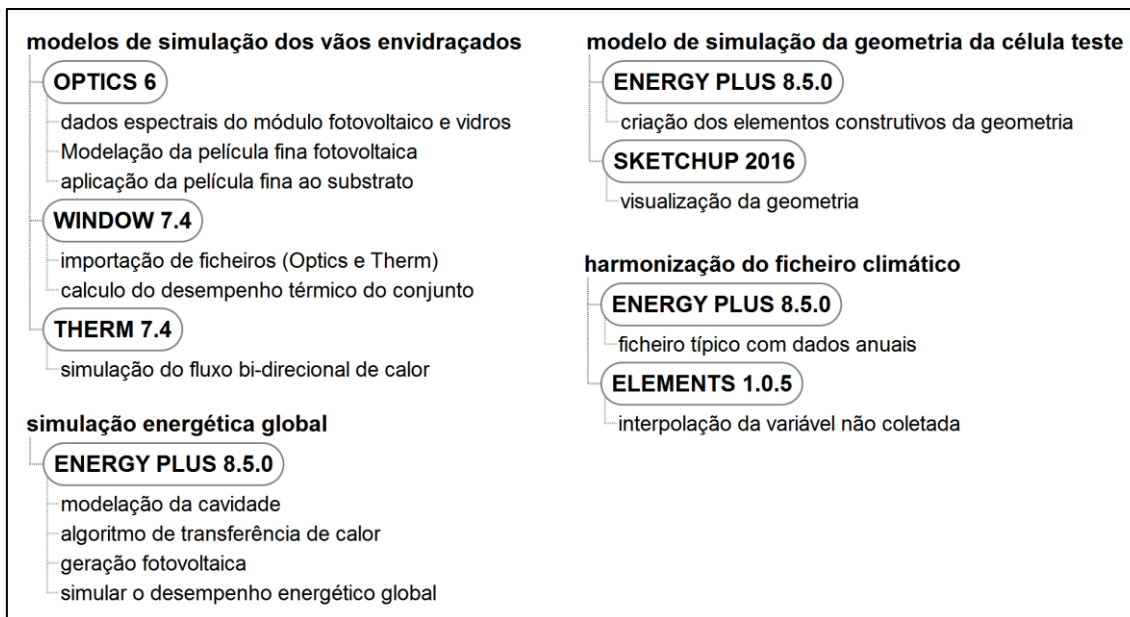


Figura 3.2: Mapa de ferramentas de simulação selecionadas

Olivieri *et al.* (2014) e Leite Didoné & Wagner (2013) concluíram em seus estudos que o comportamento global de módulos semitransparentes fotovoltaicos pode não ser corretamente representado por qualquer uma das ferramentas de simulação comerciais atuais, pois não há um modelo que represente suas características ópticas e térmicas sem a adoção de simplificações, pressupostos e/ou aplicação de ferramentas complementares.

Da mesma maneira, não foram encontrados na literatura vigente ferramentas de simulação que pudessem reproduzir fielmente as características físicas do sistema em estudo, bem como seu comportamento sob condições de pré-aquecimento do ar através de cavidade naturalmente ventilada.

Como exemplos desta limitação, o modelo de cavidades ventiladas existente no programa Energy Plus, nomeadamente “*exterior naturally vented cavity*” não é aplicável quando existem vãos envidraçados Peixeiro (2009). Em relação à modelação do efeito de chaminé térmica, Barbosa *et al.* (2013) verificaram limitações na interação entre o fluxo de ar que percorre a cavidade e o ambiente interno, levando a necessidade de aplicação de programas complementares, simplificações e utilização de dados experimentais.

A modelação de vãos envidraçados nos programas de simulação energética geralmente negligencia perdas térmicas através do caixilho e elementos acessórios das janelas, reduzindo a complexidade da análise quando o fenômeno de condução térmica

é modelado de forma unidimensional. Para Loutzenhiser *et al.* (2009), a avaliação completa do impacto dos vãos envidraçados no balanço térmico do edifício requer maiores níveis de complexidade através de simulações de transferência de calor por fluxo bidirecional.

Outro aspecto levado em conta para a escolha dos programas de simulação foi o efeito do ficheiro climático na precisão das previsões. Crawley (1998) recomenda que simulações devem evitar a aplicação do método “*Test Reference Year*” (TRY) uma vez que um ano de referência não representa o perfil climático típico a longo prazo. Além disso, métodos mais compreensivos como o “*Typical Meteorological Year 2*” (TMY2) e “*Weather Year for Energy Calculations 2*” (WYEC2) que representam de forma mais interativa as temperaturas, a radiação solar e outras variáveis, simulam com maior precisão as condições climáticas a longo prazo (DOE, 2016b).

Além do método mais adequado para previsão das condições meteorológicas, a preocupação com a interação das diversas variáveis também foi levada a cabo, uma vez que o estudo experimental desta dissertação apresentou a limitação de não captar a radiação solar global durante o período das campanhas. A limitação de ausência de dados foi compensada com a interpolação dos elementos climáticos, através de métodos de cálculo presentes no programa escolhido para a harmonização do ficheiro climático.

Quanto à escolha da ferramenta de simulação energética global, as Tabelas 2.1 e 2.2 apresentadas no capítulo anterior serviram de base à tomada de decisão, aplicando-se o critério de que os parâmetros fundamentais para a realização das simulações deveriam estar contemplados em ferramenta única ou, quando não aplicável, com o mínimo de recursos complementares possíveis. Na Tabela 3.1 destacamos os parâmetros mais relevantes que foram estabelecidos como primordiais para a aposta no programa de simulação mais adequado.

Parâmetros primordiais	
Quanto à aplicação do objeto	Quanto à função do objeto
Aproveitamento passivo de energia	Ventilação natural
	Controle de abertura de vãos para ventilação natural
	Energia renovável: solar
	Energia renovável: painéis fotovoltaicos
	Fluxo de ar através de multizonas
	Algoritmos de convecção exterior e interior

Tabela 3.1: Parâmetros primordiais para a tomada de decisão

Definidas as ferramentas para simulação computacional, a conclusão da primeira fase do método compreende o levantamento de todos os parâmetros de entrada necessários para a representação do modelo de forma mais próxima da realidade e conduzido por este conceito, a próxima secção irá descrever o nível de detalhamento pretendido com destaque para os pressupostos assumidos.

3.2. Levantamento dos parâmetros físicos

3.2.1. Caracterização da célula teste

O objeto de estudo consiste em uma célula teste implantada na sede do Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade – ITeCons, na Universidade de Coimbra, com latitude $40^{\circ} 15' N$, longitude $8^{\circ} 27' O$ e altitude de 60 metros, ilustrada pela Figura 3.3 estando a fachada onde o módulo fotovoltaico foi integrado orientada com 14° de variação da normal Sul, para o nascente.



Figura 3.3: (a) Imagem frontal da fachada sul da célula teste, (b) foto aérea do edifício do ITeCons e (c) indicação da localização aproximada da célula teste no conjunto do edifício

As dimensões internas da célula teste estão indicadas na representação esquemática da Figura 3.4, assim como as zonas interiores, vão envidraçado e as cavidades do sistema de pré-aquecimento do ar incorporando módulos fotovoltaicos.

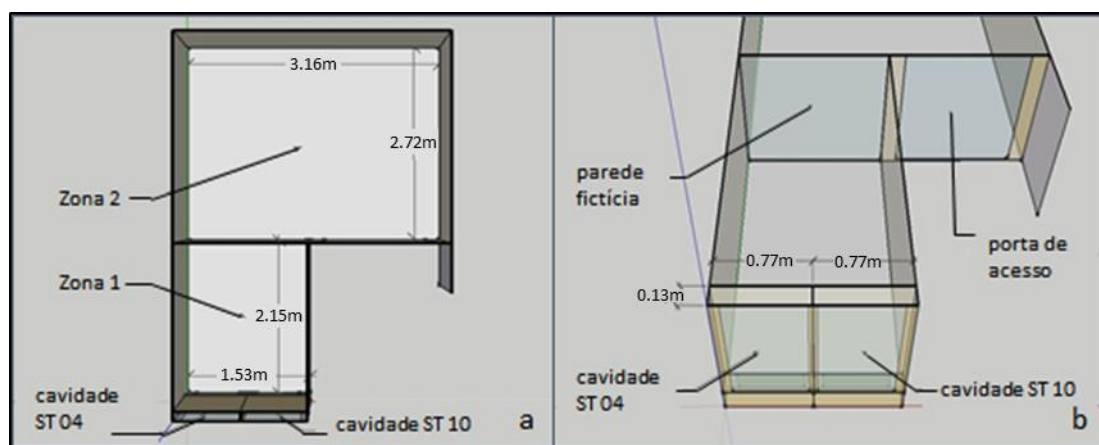


Figura 3.4: Dimensionamento da célula teste em planta baixa (esquerda) e em perspectiva

A zona 1 caracteriza-se pelo espaço mais próximo do sistema com área total de 3.29m^2 e pé-direito de 2.19m, delimitado por rebaixamento de gesso acartonado. Em função da instalação dos painéis fotovoltaicos na extremidade da fachada orientada a sul, a esquadria existente foi mantida totalmente aberta durante o período de medições e por este motivo negligenciada na elaboração da geometria.

A zona 2 possui 8.59m^2 , pé-direito de 2.19m e porta de acesso, sendo este elemento o único vão envidraçado translúcido de todo o conjunto.

Em função de uma restrição do programa Energy Plus para caracterização de zonas térmicas durante a modelação da geometria, a divisão interna entre as duas zonas foi representada por uma parede de vidro fictícia cujas propriedades foram extrapoladas para que houvesse pouca, ou nenhuma influência no balanço térmico do edifício (Tabela 3.2).

Conjunto (sub-superfície + vidro)	Espessura (m)	
Sub-superfície	Resistência térmica ($\text{m}^2\text{°C}/\text{W}$)	0.001
	Absortância térmica	0.001
	Absortância solar	0.001
	Coefficiente de transmissão térmica ($\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$)	7.00*
vidro	Coefficiente de ganhos solares pelo envidraçado	0.99
	Transmitância visível do envidraçado	0.99

*utilizado valor máximo permitido pelo programa de simulação

Tabela 3.2: Propriedades da parede fictícia entre as subzonas

Em relação ao sistema de aquecimento passivo, para que o comportamento dos módulos semitransparentes fosse analisado de forma independente, foram criadas duas cavidades separadas por um septo, com dimensões de 0.13 x 0.77m cada, sendo uma cavidade composta por vidro com 0.4% e outra por vidro de 10% de transmitância.

Cada cavidade foi subdividida verticalmente por cinco subzonas que atingem o pé-direito de 2.19m, as quais serão discutidas na descrição da segunda fase do método.

A envolvente exterior das cavidades é composta por duas grelhas metálicas de piso com abertura efetiva de 0.091m², duas grelhas externas com abertura efetiva de 0.067m², e por dois módulos fotovoltaicos de silício amorfo de película fina aplicados entre camada exterior de vidro “float” incolor 3.2mm e o substrato de PVB + vidro “float” incolor 3.2mm simples, conforme Figura 3.5.

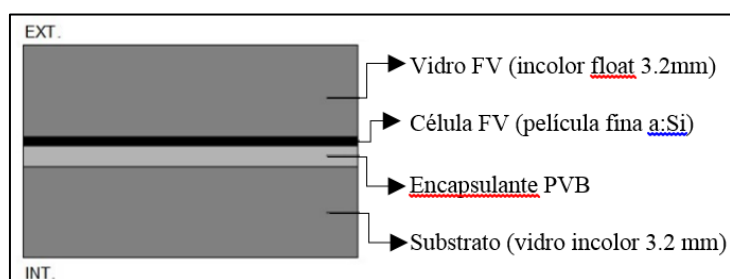


Figura 3.5: Corte esquemático do vidro fotovoltaico

Os módulos fotovoltaicos estão suportados por estrutura de madeira revestida pela face exterior por isolamento em aglomerado de cortiça expandida, tendo transmitância visível de 0.4% e de 10%, sendo nomeados a partir daqui como ST4 e ST10 respectivamente.

A envolvente interior das cavidades (Figura 3.6, imagens 3-6c e 3-6d) é composta por portas de madeira revestidas em uma das faces por isolamento de aglomerado de cortiça expandida, que suportam as quatro grelhas interiores em madeira de dimensões 0.60 m x 0.145 m.

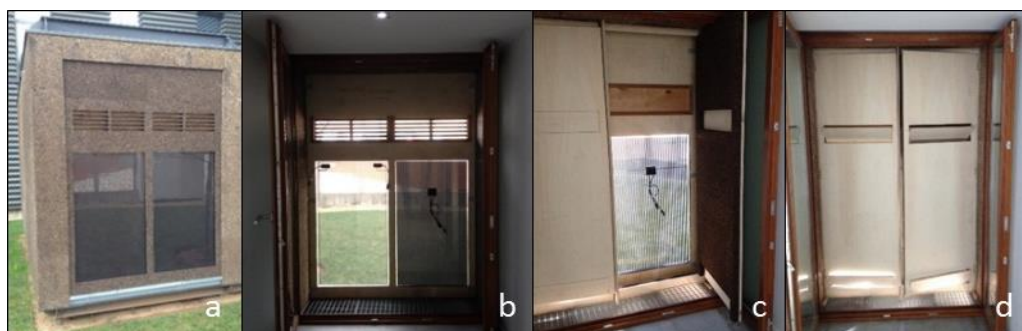


Figura 3.6: Imagens do sistema integrado na fachada Sul da célula teste

Será apresentada nas tabelas a seguir a caracterização dos elementos construtivos da célula teste que foram adotados para a modelação da geometria no programa Energy Plus. A Figura 7.2 do anexo A apresenta um conjunto de imagens recolhidas durante a construção do edifício o que permitiu confirmar os materiais de construção aplicados no modelo.

A partir desta decomposição, as propriedades de cada material foram retiradas de diversas fontes, desde catálogos técnicos do fabricante, da publicação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Santos & Matias 2006), do banco de dados do Energy Plus (DOE, 2016b) e principalmente de relatório técnico produzido pelo ITeCons no âmbito do projeto que originou a construção da célula teste.

Caracterização dos elementos construtivos: PAVIMENTO						
elemento	constituição	Esp. (m)	Resistência (m²°C/W)	Conduct. (W/m°C)	Densidade (Kg/m³)	Calor específico (J/Kg.K)
+ exterior	Colmeia metálica	0.08	0.864	0.092 (7)	7000 (3)	390 (3)
	ar	0.08	0.110 (2)	-	-	-
	Placa de madeira média densidade	0.02	0.149	0.133 (7)	600 (2)	1700 (4)
	Isolamento térmico de cortiça	0.02	0.471 (7)	0.042 (7)	115 (7)	1900 (7)
	Isolamento de cortiça	0.0025	0.038	0.065 (7)	260 (7)	1900 (7)
+ interior	Pavimento flutuante	0.015	0.083	0.18 (5)	1200 (2)	1700 (3)

Tabela 3.3: Caracterização dos elementos construtivos do pavimento

Caracterização dos elementos construtivos: COBERTURA						
elemento	constituição	Esp. (m)	Resistência (m²°C/W)	Conduct. (W/m°C)	Densidade (Kg/m³)	Calor específico (J/Kg.K)
+ exterior	Substrato de vegetação	0.2	0.571	0.35 (5)	1100 (5)	1200 (5)
	Drenagem geocomposito	0.0025	0.050	0.5 (6)	50 (5)	100 (5)
	Geocomposito “ <i>Effisus Roofleece</i> ”	0.002	0.009	0.23 (6)	50 (5)	100 (5)
	Manta de impermeabilização	0.002	0.012	0.17 (6)	1000 (2)	920 (1)
	Isolamento térmico de	0.05	1.179	0.042 (7)	115 (7)	1900 (7)

+ interior	cortiça					
	Barreira de vapor	0.003	0.006	0.5 (6)	-	-
	Vedação “Delta Solid”	0.080	0.864	0.092 (7)	7000 (3)	390 (3)
	Espaço de ar não ventilado	0.03	0.18 (2)	-	-	-
	Forro de gesso acartonado	0.015	0.0569	0.264 (7)	875 (2)	1090 (1)

Tabela 3.4: Caracterização dos elementos construtivos da cobertura

Caracterização dos elementos construtivos: PAREDES						
elemento	constituição	Esp. (m)	Resistência ($m^2\text{°C}/W$)	Conduct. ($W/m\text{°C}$)	Densidade (Kg/m^3)	Calor específico ($J/Kg.K$)
+ exterior	Aglomerado de cortiça expandida	0.10	2.36	0.042 (7)	115 (7)	1560 (7)
	Vedação “Delta Solid”	0.080	0.864	0.092 (7)	7000 (3)	390 (3)
	Isolamento de cortiça	0.0025	0.038	0.065 (7)	260 (7)	1900 (7)
+ interior	Gesso acartonado	0.015	0.056	0.264 (7)	875 (2)	1090 (1)

Tabela 3.5: Caracterização dos elementos construtivos das paredes

Caracterização dos elementos construtivos: ENVOLVENTE INTERIOR DA CAVIDADE						
elemento	constituição	Esp. (m)	Resistência ($m^2\text{°C}/W$)	Conduct. ($W/m\text{°C}$)	Densidade (Kg/m^3)	Calor específico ($J/Kg.K$)
Superfície interna da cavidade	Aglomerado de cortiça expandida	0.04	0.942	0.042 (7)	115 (7)	1560 (7)
Superfície externa da cavidade	Placa de madeira média densidade	0.015	0.112	0.133 (7)	600 (2)	1700 (4)
Grelhas internas	Placa de madeira média densidade	0.015	0.112	0.133 (7)	600 (2)	1700 (4)

Tabela 3.6: Caracterização dos elementos construtivos da envolvente interior da cavidade

Caracterização dos elementos construtivos: ENVOLVENTE EXTERIOR DA CAVIDADE						
elemento	constituição	Esp. (m)	Resistência ($m^2\text{°C}/W$)	Condução ($W/m\text{°C}$)	Densidade (Kg/m^3)	Calor específico ($J/Kg.K$)
Superfície interna da cavidade	Placa de madeira média densidade	0.015	0.112	0.133 (7)	600 (2)	1700 (4)
Superfície externa da cavidade	Aglomerado de cortiça expandida	0.04	0.942	0.042 (7)	115 (7)	1560 (7)
Grelhas externas	Placa de madeira média densidade	0.006	0.045	0.133 (7)	600 (2)	1700 (4)

Tabela 3.7: Caracterização dos elementos construtivos da envolvente exterior da cavidade

[fonte: (1) www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d_154 / (2) ITE 50 (Santos & Matias 2006) / (3) Energy in Building and Communities Programmen (EBC 2016) / (4) www.finsa.es/paweb/img/fin/newsletter/2112011_fo-es / (5) valores por defeito Energy Plus (DOE 2016) / (6) catálogos técnicos do fabricante / (7) Relatório técnico ITeCons (Tadeu & Simões 2011)]

Caracterização dos elementos construtivos: ENVIDRAÇADOS				
elemento	Substrato dos módulos FV	Módulo FV opaco	Módulo STFV	Porta de acesso
constituição	Vidro “float” incolor	Ver Figura 3.5	Ver Figura 3.5	Vidro “low iron” incolor
Espessura (m)	0.004	0.0065	0.0065	0.008
Transmitância solar (T_{sol})	0.813	0.004	0.094	0.772
Transmitância visível (T_{vis})	0.890	0.004	0.108	0.878
Refletância solar frontal (R_{sol1})	0.074	0.600	0.139	0.069
Refletância solar posterior (R_{sol2})	0.075	0.148	0.522	0.068
Refletância visível frontal (R_{vis1})	0.083	0.061	0.083	0.078
Refletância visível posterior (R_{vis2})	0.084	0.076	0.529	0.078
Transmissividade infra-vermelha	0	0	0	0
Emissividade frontal infra-vermelha	0.840	0.840	0.840	0.84
Emissividade posterior infra-vermelha	0.840	0.840	0.840	0.84
Condutividade ($W/m.K$)	1.000	5.700	5.700	1

Tabela 3.8: Caracterização dos elementos construtivos dos envidraçados

[fonte: Módulos FV e substrato: catálogo técnico Onyx Solar / Porta de acesso: valores do banco de dados do WINDOW 7.4]

3.3. Segunda fase

Ao fim da primeira fase, todas as informações necessárias para modelação da célula teste estavam disponíveis. A partir de então, a segunda fase é iniciada com a elaboração do modelo para a realização de simulações computacionais.

3.3.1. Modelação e visualização da geometria

Consoante referido anteriormente, aplicou-se o Energy Plus versão 8.5.0 como motor de simulação por ser amplamente validado no meio científico para a realização das análises pretendidas. Energy Plus é um programa de simulação de avaliação energética e de cargas térmicas da edificação desenvolvido em 2001 por suporte do Departamento de Energia (DOE) em conjunto com equipe de investigação formada por Universidades, Forças Armadas e Laboratórios de Investigação em Energia dos Estados Unidos (Bahar *et al.*, 2013).

A ferramenta é capaz de prever os consumos de energia e cargas de refrigeração, calcular o balanço térmico de todos os componentes do edifício resultante dos efeitos de mecanismos de transferência de calor, controle de incidência solar entre outros recursos, contemplando também análise de ciclo de vida e custos [(Crawley *et al.*, 2005), (Crawley *et al.*, 2008) e (Barbosa *et al.*, 2013)]. Por ser de plataforma BIM, o Energy Plus 8.5.0 compartilha dados através de ficheiros *IFC*, *gbXML* e *dxg* de modo a ser compatível com diversas ferramentas *CAD*.

Assim, todo o modelo foi construído diretamente no Energy Plus com base em coordenadas absolutas e para a visualização da geometria como forma de garantir que não haviam incoerências na modelação, foi utilizado o programa SketchUP 2016 (Trimble Navigation Limited, 2016).

Para além dos objetos que compõem os requisitos mínimos para a criação do modelo, cabe citar os objetos que complementam e melhoram a precisão da simulação quando a intenção é replicar o comportamento real do sistema. Para reproduzir as alturas em que foram coletadas a temperatura e velocidade do vento na estação meteorológica, bem como definir o perfil de velocidade do vento, foram aplicados os objetos *Site:WeatherStation* e *Site:HeightVariation* com os valores dos coeficientes baseados em (ASHRAE *Fundamentals 2005 apud* DOE 2016) para edificações situadas em zonas afastadas da urbanização.

Embora descolado do solo, a influência da temperatura do solo não foi descartada, já que toda a estrutura é composta por material de alta condutibilidade. Neste caso, foram aplicados os objetos *Site:GroundTemperature* e *Site:GroundReflectance*, este último caracterizando o albedo do solo.

Não foram considerados ganhos internos relevantes, uma vez que a célula teste foi mantida sem acesso e com a iluminação desativada durante todo o tempo de campanha, levando-se em consideração apenas 2 W/m^2 referentes à dissipação gerada pelos equipamentos de gravação dos dados dos termopares.

Em relação às infiltrações não controladas eventuais em qualquer edifício, resultantes de seu nível de estanqueidade, o modelo de cálculo aplicado foi baseado no aplicativo desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC 2014) para ventilação no âmbito do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios Habitacionais de Portugal (Diário da República, 2013). Após inserção dos parâmetros da célula teste na planilha de cálculo, encontramos 0.4 renovações por hora (RPH) para o valor da infiltração nas duas zonas térmicas do modelo (ANEXO A, Figura 7.3).

Finalmente, concluindo a modelação da geometria, os objetos *ShadingBuilding:Detailed* e *Shading:Site:Detailed* reproduziram o sombreamento provocado por elementos exteriores em conjunto com a programação de horários gerada para simular o comportamento de árvores caducas (*Schedule: Compact*). A Figura 3.7 ilustra o panorama geral dos elementos que compuseram a geometria do sistema.

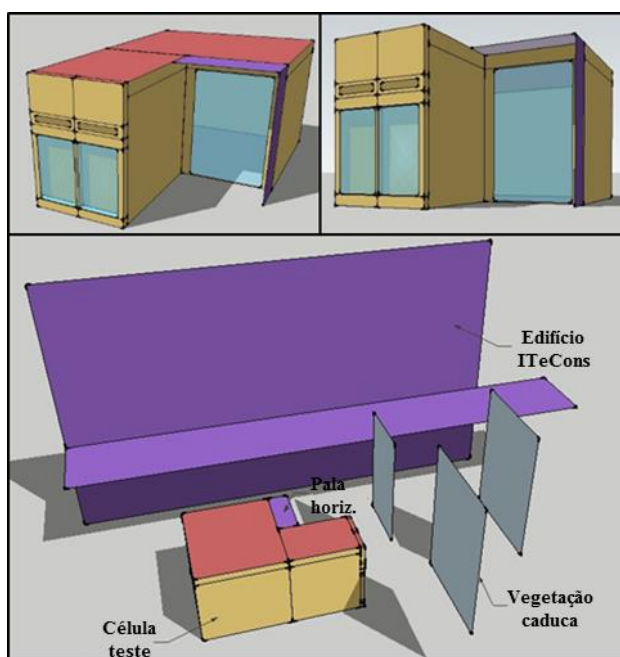


Figura 3.7: Geometria da célula teste e elementos adjacentes

3.3.2. Modelação da cavidade

Esta secção será dedicada ao detalhamento do método para modelação das cavidades do sistema de pré-aquecimento passivo do ar por meio da ventilação natural. A revisão da literatura nos permitiu mapear alguns aspectos importantes, tais como a abordagem e a ferramenta adotadas por outros autores, o número de subzonas adequado, bem como identificar as limitações do modelo e os pressupostos assumidos.

Por não haver ventilação mecânica impulsionando o funcionamento do sistema, o fluxo de ar é dependente do gradiente de densidade do fluido nas subzonas da cavidade (referenciado como escoamento), diferença de altura e dimensão das aberturas de entrada e saída do ar, movimentos convectivos e coeficiente de pressão e direção do vento (Pereira *et al.*, 2013).

O Energy Plus disponibiliza um método de ventilação natural validado por órgãos externos que “*permite incorporar a simulação da ventilação natural com a simulação térmica da edificação em função da geometria e condições climáticas*” (Pereira *et al.*, 2013).

Este método de cálculo simula o fluxo de ar provocado pela ventilação natural levando em conta as componentes térmica e convectiva e, embora projetado para aplicação em sistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado, é o método que mais se aproxima dos efeitos da ventilação natural já que o modelo de cavidades ventiladas existente no programa Energy Plus não é aplicável quando existe camada envidraçada (DOE, 2015).

O modelo de simulação do fluxo de ar no Energy Plus é nomeado de *AirFlowNetwork* e permite contemplar o nível de infiltração de ar através das frestas e janelas, que no presente estudo estão representados pelas aberturas de ventilação do sistema (Pereira *et al.*, 2013).

O modelo de rede de ventilação caracteriza o sistema pela determinação de nós que são criados automaticamente pelo Energy Plus no momento que as fronteiras do sistema são definidas. Cada nó representa o ambiente interior (zonas) e o exterior, interligados pelas superfícies das aberturas formando uma malha, sendo estas superfícies a interação entre as zonas, bem como a fronteira do sistema.

O modelo de rede é uma abordagem simplificada comparativamente ao CFD (*Computational Fluid Dynamics*), porém, permite a simulação dinâmica anual enquanto que o método CFD se limita a pequenos intervalos de tempo.

A seguir apresentam-se um conjunto de limitações e pressupostos assumidos para realização das simulações.

3.3.2.1. Limitações

- a) No modelo de rede de ventilação não é possível visualizar como ocorre a distribuição do fluxo de ar no ambiente (Versage, 2009);
- b) O modelo é incapaz de simular com precisão a estratificação do ar quando o modelo envolve grandes volumes de ar, como por exemplo um átrio (DOE, 2016b);
- c) Interação restrita entre o fluxo de ar que percorre a cavidade e o ambiente interno, levando a necessidade de aplicação de programas complementares, simplificações ou utilização de dados experimentais. Este aspecto é justificado pois o programa Energy Plus trata o efeito de escoamento de forma bidirecional somente quando o gradiente de densidade do ar é próximo de zero. Caso contrário, o fluxo bidirecional não ocorre (DOE, 2015);

3.3.2.2. Pressupostos

- a) O volume do fluxo de ar é constante ao longo da cavidade, desde a abertura inferior até a superior;
- b) O Energy Plus é capaz de calcular automaticamente os coeficientes de pressão do vento em geometrias retangulares. Como a abertura inferior da célula teste está localizada no plano do pavimento, e a estação meteorológica indicou a velocidade do vento quase nula durante a campanha, o efeito da pressão do vento na cavidade foi desprezado na modelação;
- c) O efeito de infiltrações na cavidade e nas grelhas em posição fechadas foi desprezado;

3.3.2.3. Modelação

Estudos de Leal *et al.* (2003), Hensen *et al.* (2002) e Mateus *et al.* (2014) contribuíram para a definição do número de subzonas do modelo, onde a análise de

sensibilidade do primeiro autor demonstrou que dividindo a cavidade em 8 subzonas, há um bom desempenho em termos de fluxo de ar, porém, as temperaturas do sistema ficam comprometidas.

Neste sentido, a cavidade de cada um dos sistemas (ST04 e ST10) foi dividida em cinco subzonas, separadas por aberturas horizontais fictícias mantidas constantemente abertas. Para se caracterizarem como uma zona térmica delimitadas por fronteiras do volume de controle, as subzonas foram compostas por 6 superfícies cada, representadas pela Figura 3.8 a seguir.

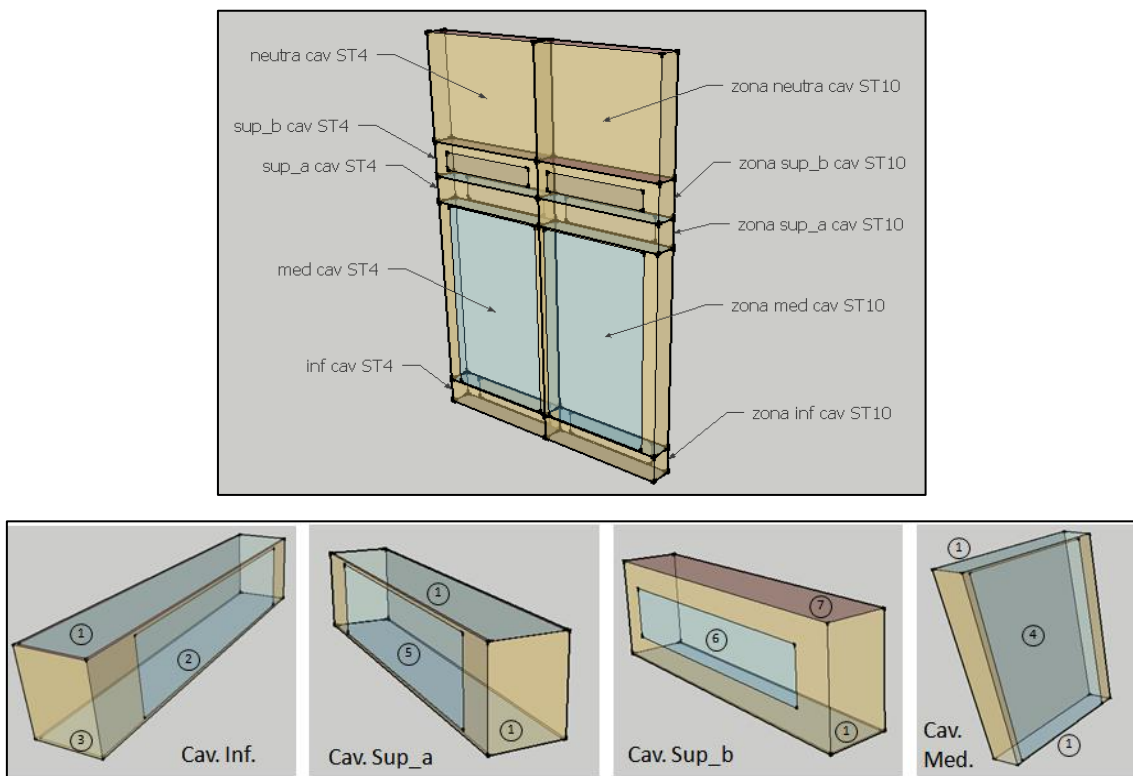


Figura 3.8: Geometria da cavidade de ar

Onde,

- 1) Aberturas horizontais fictícias modeladas como superfície de janela, caracterizadas pelo objeto *Material:NoMass*, com resistência térmica de $0.001 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ e absorvâncias de 0.00001 . Cada abertura possui uma sub superfície representada por pavimento quando inferior e cobertura quando superior;
- 2) Grelha inferior modelada como uma janela;
- 3) Grelha de piso modelada como uma porta;
- 4) Superfície envidraçada caracterizada pelo vidro fotovoltaico;
- 5) Grelha superior modelada como janela;

- 6) Grelha externa modelada como janela;
- 7) Vedação superior, modelada como cobertura;

Em relação às zonas neutras, todas as superfícies são opacas e formadas por elemento tipo parede, pavimento e cobertura. A seguir serão descritos os parâmetros adotados para a configuração do sistema de ventilação natural induzido pela diferença de densidade e temperatura das zonas térmicas adjacentes.

O objeto *AirFlowNetwork: SimulationControl* define basicamente o tipo de controle utilizado (quando não há ventilação mecânica aplica-se sem distribuição) e o tipo de cálculo para os coeficientes de pressão do vento, que em função de pressupostos, optou-se pelo cálculo automático executado pelo programa baseado em Swami e Chandra(1988 *apud* Versage 2009).

Em *AirFlowNetwork: MultiZone:Zone* foi possível definir todas as zonas e subzonas do modelo e a modalidade de controle do fluxo pelas aberturas, que neste caso foram definidas como constante já que independente das condições climáticas, todas as aberturas permanecem abertas exceto quando a programação das grelhas determinar o seu fechamento por meio do objeto *AirFlowNetwork:MultiZone:Surface*. Este objeto permite programar o fechamento e a abertura das grelhas, configuradas neste estudo em duas posições, totalmente abertas ou totalmente fechadas com o valor da infiltração de ar negligenciado.

A seguir descrevem-se os objetos que atuam no dimensionamento das aberturas e definição dos parâmetros associados com o coeficiente de descarga, massa de ar e o modo de abertura das grelhas. *AirFlowNetwork:MultiZone:Surface:EffectiveLeakageArea* foi aplicado para caracterização das grelhas de piso, grelhas internas e externas, enquanto *AirFlowNetwork:MultiZone:Surface:HorizontalOpening* determinou as propriedades das aberturas horizontais fictícias, que limitam as subzonas, sendo configuradas com o coeficiente de descarga máximo de 1 valor.

Os valores adotados neste estudo para os coeficientes de descarga e para os coeficientes e expoentes de fluxo de massa pelas grelhas foram baseados em valores médios indicados por diversos autores, compilados na Tabela 3.9 e na Tabela 3.10, adaptadas de Versage (2009) e Pereira *et al.* (2013).

Coefficiente de Descarga	Fonte
1.0	Energyplus por defeito
0.6	(Mateus <i>et al.</i> , 2014), (Aynsley 1999 <i>apud</i> Versage 2009)
0.65	(Santamouris 2002 <i>apud</i> Versage 2009)
0.60	Valor adotado para o presente estudo

Tabela 3.9: Tabela de referência dos coeficientes de descarga

Coefficiente de fluxo de massa (para aberturas fechadas)	Expoente de massa	Fonte
0.001	0.65	Energyplus por defeito
0.00054	0.57	(Liddament, 1986 <i>apud</i> Pereira <i>et al</i> 2013)
-	0.65	(Santamouris 2002 <i>apud</i> Versage 2009)
0.00054 grelhas / 0.00035 porta de acesso	0.65	Valor adotado para o presente estudo

Tabela 3.10: Tabela de referência dos coeficientes de fluxo de massa

3.3.2.4. Modelo de distribuição solar e transferência de calor

A seguir serão apresentados os modelos disponíveis na ferramenta Energyplus para calcular os parâmetros de distribuição solar e algoritmos de convecção.

3.3.3. Distribuição solar

Este parâmetro relaciona o tratamento da radiação solar que atinge as zonas térmicas do edifício por meio da incidência direta da radiação e da refletância das superfícies exteriores. Existem cinco modelos disponíveis, “*MinimalShadowing*”, “*FullExterior*”, “*FullInteriorAndExterior*”, “*FullExteriorWithReflections*” e “*FullInteriorAndExteriorWithReflections*” (DOE, 2016b). Para o modelo utilizado foi adotada a opção “*FullInteriorAndExterior*” que permite calcular a radiação absorvida em cada superfície do modelo e quantificar o quanto de energia é transmitida por reflexão para as zonas interiores adjacentes e para o exterior.

Além disso, o modelo também calcula quanto de radiação é absorvida pelas superfícies envidraçadas, o quanto é refletida para o exterior em função das propriedades do elemento, bem como quanto é refletido para o interior da zona térmica pela ação da refletância posterior (DOE, 2016b). Este fator justifica a escolha do modelo, assim como verificado nos estudos publicados de Kim & Park (2011) e Mateus *et al.* (2014).

É importante mencionar uma simplificação adotada para a correta aplicação deste modelo. Como citado na página 23, a divisão interna entre as zonas um e dois foi representada por uma parede de vidro fictícia, e isto foi motivado pela forma não

convexa da célula teste, onde a reflexão da radiação interior seria comprometida sem a adoção deste recurso.

3.3.4. Algoritmos de convecção interna e externa

A escolha dos algoritmos de cálculo dos coeficientes de convecção interna e externa (h_{in} e h_{out}) disponíveis no Energy Plus foi baseada no resultado da pesquisa bibliográfica, em que sistemas com o comportamento físico similar ao modelo da presente dissertação foram analisados.

Para Peixeiro (2009), que analisou fachadas de dupla pele ventiladas naturalmente, face às variações de temperatura e fluxo de ar que ocorrem ao longo do dia no interior da cavidade, o valor do coeficiente de convecção interna é transiente, o que nos leva a eliminar a opção menos complexa disponível no objeto “*SurfaceConvectionAlgorithm:Inside*”, o algoritmo “*simple*” que assume todos os mecanismos de transmissão de calor como sendo variáveis constantes, dependentes da orientação da fachada (DOE, 2016b).

Conforme DOE (2016b) e Mateus *et al.* (2014) o algoritmo “*TARP*” (“*Thermal Analysis Research program*”) realiza o cálculo de forma dinâmica, considerando os possíveis gradientes de temperatura que ocorrem para várias orientações do edifício, motivo pelo qual foi a opção adotada no presente estudo. Há ainda disponível no objeto “*Zone Inside Convection Algorithm*” um algoritmo que simula o fenômeno de convecção natural que acontece em cavidades enclausuradas em sistemas de paredes de trombe, denominado “*TrombeWall*”, no entanto, por levar em conta o método de cálculo para espaços de ar não ventilados não se aplica ao modelo de cavidade simulado com grelhas de ventilação permitindo o escoamento do ar por ventilação natural (DOE, 2016b).

Em referência ao coeficiente de convecção externa foi adotado o mesmo algoritmo utilizado para convecção interna, “*TARP*”, por levar em consideração a componente da convecção natural correlacionando a orientação da fachada com o gradiente de temperatura entre o ar e a superfície.

Tal método é baseado no algoritmo de Walton (1983 *apud* DOE 2015) que derivou da equação presente na tabela 5, página 3.12 de ASHRAE (2001) na qual

calcula a convecção natural em planos verticais de grandes dimensões com o deslocamento do ar ascendente quando aquecido (Figura 7.9 do ANEXO A).

Segundo Peixeiro (2009) e DOE (2015) o algoritmo “TARP” considera alterações nas equações para encontrar valores intermediários entre superfícies verticais e horizontais, incluindo no cálculo o fator da inclinação vertical da fachada através da equação 3.1:

$$h_n = 1.31 \left| \Delta T \right|^{\frac{1}{3}}$$

Equação 3.1: Componente de convecção natural relativa à inclinação da fachada

Onde,

h_n = componente de convecção natural [$W m^2K$];

ΔT = Diferença entre temperatura da superfície e temperatura do ar [K];

Outra alternativa disponível no Energy Plus para o cálculo da convecção externa, adotada no estudo de Kim & Park (2011) consiste no algoritmo “MoWiTT” (“*Mobile Window Thermal Test*“) baseado em estudos experimentais realizados pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory* para avaliar o comportamento térmico de envidraçados em diversas configurações, resultando em coeficientes de convecção para edifícios com baixa altura e com superfícies verticais de baixa rugosidade.

No entanto, a presença de painéis de cortiça aglomerada na fachada da célula teste, tornando a superfície relativamente rugosa, motivou a escolha do algoritmo “TARP” para a realização das simulações. O gráfico da Figura 3.9 demonstra a diferença obtida no resultado da simulação das temperaturas internas da zona um comparando-se os dois métodos de cálculo em determinado instante da campanha, verificando-se diferenças de até 0.5°C com o método “TARP” alcançando valores mais próximos das temperaturas dos termopares.

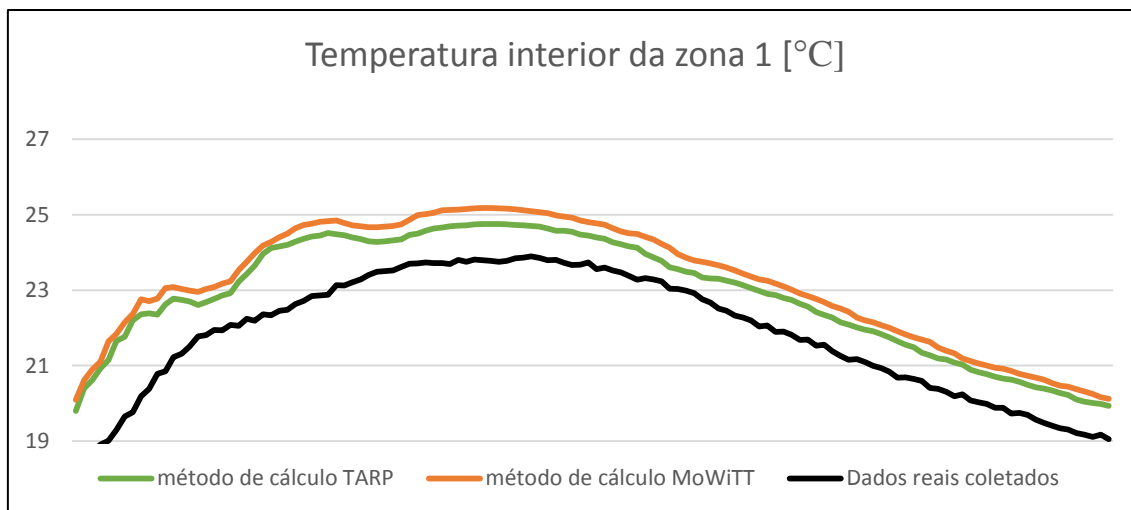


Figura 3.9: Gráfico comparativo entre os algoritmos de cálculo de convecção

3.3.5. Modelo de geração fotovoltaica

O extenso trabalho desenvolvido por Zomer (2014) revelou que existem muitas ferramentas de cálculo solar disponíveis. No entanto, a escolha da ferramenta Energy Plus para prever a geração de energia fotovoltaica foi suportada pelo fato de que uma única ferramenta é capaz de simular o desempenho térmico do conjunto considerando o balanço de energia consumida e produzida pelo sistema fotovoltaico integrado ao edifício.

Além disso, a revisão bibliográfica demonstrou a fiabilidade dos métodos de cálculo da previsão de geração fotovoltaica disponíveis no Energy Plus, com destaque para o estudo de Barker & Norton (2003) além dos mais recentes de Olivieri *et al.* (2014), Ng *et al.* (2013), Peng *et al.* (2016), Peng *et al.* (2015) e Kapsis & Athienitis (2015).

O programa disponibiliza três tipos de método para previsão da geração, nos modelos “Simple”, “Equivalen One Diode” e “Sandia” com o primeiro considerando a eficiência de conversão constante, exigindo poucos dados de entrada para realização do cálculo.

Os demais métodos exigem maior complexidade na modelação do sistema, pois incluem na equação fatores com grande influência na potência gerada como temperatura de operação da célula, ângulo de incidência e espectro solar, o que lhes concede maior precisão nos resultados.

Além destes fatores, outras duas características contribuíram para a escolha do método “*Sandia Array Performance Model*” (SAPM) como ferramenta de cálculo fotovoltaico. (i) este modelo tem base empírica, “*alcançando versatilidade e precisão para a maioria das tecnologias fotovoltaicas, em especial para células solares de películas finas*” (Peng, Curcija, *et al.*, 2015), que são objeto de estudo desta pesquisa;

(ii) incorpora em sua equação uma função (DOE 2015, capítulo 18, secção 18.3.3.1, páginas 1608-1612) que compensa as perdas ópticas em virtude do ângulo de incidência, que no caso de superfícies verticais podem alcançar 5% da energia anual (King, Boyson, & Kratochvil, 2004).

O reduzido grau de incerteza dos resultados se deve ao fato de que os 39 coeficientes necessários para modelar o sistema foram obtidos por meio de ensaios empíricos com o mesmo tipo de tecnologia fotovoltaica, resultado da investigação conduzida pelo Laboratório Nacional Sandia (King *et al.*, 2004) com a integração do modelo ao Energy Plus realizada por meio do estudo de Barker & Norton (2003) do “*National Renewable Energy Laboratory*” (NREL).

Dada a complexidade em se obter 39 coeficientes de temperatura sem a realização de ensaios com as células amorfo utilizadas na célula teste, a alternativa empregada foi recorrer ao banco de dados “*Sandia Module Database*” elaborado por Long, N. e disponível em <http://www.sandia.gov/pv> compilando parâmetros de desempenho de centenas de tipos de células incluindo informações como dimensões do módulo, corrente de curto-circuito (I_{sc}), tensão de circuito aberto (V_{oc}), tensão e corrente no pico máximo (V_{mpp} e I_{mpp}), além da quantidade total de células do arranjo (King *et al.*, 2004).

A

Figura 7.4: do ANEXO A detalha todos os coeficientes das células utilizadas para a simulação cabendo aqui realçar os pressupostos assumidos.

- a) Selecionou-se na biblioteca “*Sandia Module Database*”, as tecnologias com características similares às células reais, comparando seus principais valores com dados técnicos fornecidos no catálogo do fabricante;
- b) Os módulos operam em sua eficiência máxima (DOE, 2015);

Outro aspecto relevante refere-se ao balanço térmico do conjunto que é alterado pela absorção de parte da energia solar convertida em eletricidade pelo módulo FV. No objeto “*Generator:Photovoltaic*” é possível selecionar o modo de integração do balanço

térmico “*IntegratedSurfaceOutsideFace*” que permite a representação adequada da interação entre os desempenhos térmico e elétrico (Peng, Curcija, *et al.*, 2015).

A última etapa da modelação antes de concluir a simulação é associar os módulos fotovoltaicos criados com os demais componentes do conjunto, tais como inversores e os sistemas de geração e distribuição da energia, representados por “*ElectricLoadCenter: Inverter:Simple*”, “*ElectricLoadCenter:Generations*” e “*ElectricLoadCenter:Distribution*” respectivamente.

3.3.6. Modelação das propriedades ópticas das células fotovoltaicas

Segundo a Norma Europeia EN 410 (2000) para se caracterizar um envidraçado é mandatório se obter os parâmetros de transmissão luminosa e o fator de transmissão total da energia solar (fator solar).

No entanto, uma peculiaridade do presente estudo é a incorporação de módulos fotovoltaicos semitransparentes no sistema integrado à fachada, sendo a transparência do elemento uma componente importante a ser considerada no desenvolvimento do modelo.

Para avaliação do desempenho térmico de um sistema semitransparente fotovoltaico (STFV), as propriedades básicas requeridas são o fator de transmissão espectral e o fator de reflexão espectral no intervalo de comprimento de onda no intervalo de 300 a 2500 nm (Olivieri, Caamaño-Martín, *et al.*, 2014).

Com isso, surgem algumas limitações para desenvolvimento do modelo: (i) A ferramenta de simulação energética Energy Plus não é capaz de simular diretamente módulos STFV sem a interface com outras ferramentas (DOE, 2016b), (Leite Didoné & Wagner, 2013); (ii) A versão 46 da base de dados de vidros disponível nas ferramentas de modelação dos envidraçados, *International Glazing Database* (LBNL, 2016), não contempla nenhum tipo de módulo fotovoltaico; e (iii) De um modo geral, dados espectrais nos comprimentos de onda requeridos não são disponibilizados nos catálogos técnicos dos fabricantes de vidros fotovoltaicos, que divulgam apenas propriedades globais como fator solar (g), coeficiente de transmissão térmica (U) e características ópticas médias.

Para mitigar essas limitações, os módulos STFV foram modelados pela ferramenta Optics6 (Rubin, von Rottkay, & Powles, 1988) desenvolvida pelo *Lawrence*

Berkeley National Laboratory que permite modelar a célula fotovoltaica como uma película aplicada ao vidro “float” incolor, criando um laminado com suas características reais preservadas, tais como espessura, folha encapsulante de PVB e propriedades ópticas (refletância frontal, refletância posterior e transmitância) nos comprimentos de onda entre 300 e 2500 nm. Assim como Peng *et al.* (2015), Olivieri *et al.* (2014) e (Leite Didoné & Wagner (2013) os módulos laminados foram construídos no Optics6 e exportados para outras ferramentas que complementarão o cálculo energético de todo o conjunto.

Nesta etapa, cabe registrar um pressuposto assumido neste estudo que, em função de não obtermos os dados espectrais dos vidros utilizados na célula teste, adotamos os dados de outro fabricante com propriedades médias muito similares e que disponibilizavam as curvas espectrais requeridas, conforme Figura 7.5 e Figura 7.6 do ANEXO A.

3.3.7. Modelação dos envidraçados e condução térmica bidimensional

Considerando a influência dos sistemas envidraçados para o desempenho energético de edifícios, é fundamental que para uma avaliação mais precisa do seu comportamento, o mecanismo de transferência de calor que ocorre no conjunto da esquadria (centro do vidro, caixilho e espaçadores) deve ser modelado adequadamente (Winkelmann, 2001). Para isso, devemos adotar ferramentas complementares ao processo de modelação uma vez os algoritmos de balanço de calor em envidraçados inseridos no Energy Plus (Crawley *et al.*, 2001) são baseados na temperatura de superfície assumindo que o fluxo de calor é perpendicular ao vidro e ocorre de forma unidimensional (DOE, 2016b), (Crawley *et al.*, 2001). Neste caso, para aumentar a precisão da simulação e considerar o fluxo de calor incorporando a influência das pontes térmicas através do caixilho e dos espaçadores (efeito “edge”) o nível de complexidade deve ser maior, pois do contrário, a condutância total que ocorre no centro do vidro será superestimada pelos algoritmos do Energy Plus, quando comparada com dados coletados em célula teste (Loutzenhiser *et al.*, 2009).

As ferramentas THERM 7.4 e WINDOW 7.4 foram desenvolvidas pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBNL, 2016) e adotadas neste estudo para

calcular os índices de desempenho térmico em estado estacionário dos sistemas das esquadrias.

O primeiro passo foi modelar todos os sistemas envidraçados no WINDOW 7.4 importando o ficheiro criado pelo Optics6, que representa o vidro fotovoltaico laminado. Foram criados três sistemas, sendo dois semitransparentes com 0.4% e 10% de transmitância visível e outro representando a porta de entrada da célula teste, que por ter todos os seus componentes contemplados na database IGDB (LBNL, 2016) não necessitou da interface com o Optics6.

Tal como se referiu anteriormente, para simular o efeito de transferência de calor bidirecional nos componentes levando em conta as pontes térmicas lineares, o programa THERM 7.4 foi utilizado. Esta ferramenta é baseada no método do elemento finito e é capaz de modelar geometrias complexas importadas a partir de um ficheiro com extensão *.dxf*, no qual representamos todos os pormenores dos componentes do sistema (vidros, espaçadores, caixilho, isolamentos e acessórios). Por ser um módulo complementar do WINDOW 7.4, é possível performar os cálculos e exportar os resultados para o WINDOW 7.4 (Lawrence Berkeley National Laboratory, 1998).

Finalmente, concluímos a modelação dos sistemas envidraçados no WINDOW 7.4 incorporando a influência do caixilho e dos espaçadores através dos resultados obtidos no THERM de modo a determinar os coeficientes globais das janelas, como verificado no estudos recentes de Peng *et al.* (2015), Peng *et al.* (2016) e (Leite Didoné & Wagner (2013).

Ao final da simulação o desempenho térmico do conjunto é expresso pelos valores do coeficiente de transmissão térmica e fator solar totais, no centro do vidro e nos caixilhos, sendo o produto final desta etapa um ficheiro com extensão *.idf* com dados espectrais detalhados. Este ficheiro pode ser lido pelo Energy Plus para a simulação do desempenho global do edifício, o que neste caso de estudo, é a célula teste.

3.3.8. Harmonização dos dados climáticos

Em função da terceira etapa do estudo, que busca validar o modelo de simulação comparando seus resultados com dados coletados experimentalmente, para além da

representação adequada das propriedades dos materiais, a influência das condições climáticas é um aspecto fundamental para se reduzir o grau de incerteza dos resultados.

Neste sentido, foi instalada na cobertura da célula teste uma estação meteorológica (ANEXO A) coletando os seguintes dados: temperatura exterior de bulbo seco (°C), radiação solar direta normal (W/m^2), humidade relativa do ar (%), pressão atmosférica (Pa), velocidade do vento (m/s) e direção do vento (°). Uma vez que o ficheiro climático do Energyplus recorre a valores horários, a estação foi configurada para registrar valores médios horários.

Em geral, os ficheiros climáticos disponíveis nas ferramentas de simulação adotam como referência dados meteorológicos do tipo *Typical Meteorological Year* (TMY) (NCDC 1981 *apud* Crawley 1998), *Test Reference Year* (TRY) (NCDC 1976 *apud* Crawley 1998) e *Weather Year for Energy Calculations* (WYEC) (ASHRAE 1985 *apud* Crawley 1998) que resultam no perfil climático de um ano típico de referência relativo às condições do clima local.

Segundo Crawley (1998), ficheiros do tipo TRY não incluem dados solares no cálculo. Por outro lado, ficheiros WYEC utilizam como base o TRY incluindo a variável solar quando há radiação e interpolando valores quando o céu está encoberto por nuvens. Além disso, WYEC adota dias substitutos para corrigir qualquer evento climático atípico passível de ocorrência no período de 30 dias e “*em geral, nenhum arquivo WYEC precisa de mais de 3 dias substituídos para qualquer mês, para adaptar-se à média de trinta anos.*” (Crawley, 1998).

Face ao exposto, adotou-se no estudo a harmonização do ficheiro climático do banco de dados do Energy Plus *PRT_Coimbra.085490_WYEC* de modo a replicar os mesmos valores coletados na estação meteorológica no intervalo que cobriu três dias antes e três depois do período de campanha. Esta opção foi para mitigar a influência negativa dos dados por defeito do Energy Plus neste período.

O Energy Plus permite converter os dados climáticos da base de dados em um ficheiro no formato CSV (*comma separated values*) para a devida alteração dos dados. No entanto, como não havia um piranômetro registrando a radiação solar difusa, a harmonização desconsiderando todas as variáveis resultantes na radiação solar global não era adequada. Desta forma, foi utilizada a ferramenta Elements 3.0 (“*Rock Mountain Institute*”) de acesso livre que permite manipular os dados climáticos, transformá-los em um ficheiro de extensão *.epw* e exportá-los para o Energy Plus. A

partir da inserção dos dados coletados pela estação, a ferramenta permitiu a interpolação dos valores inseridos com os valores do azimute solar e ângulo horário do período, de modo a compensar a ausência da radiação difusa e calcular a radiação solar global.

A Figura 3.10, Figura 3.11 e Figura 3.12 demonstram a importância da harmonização dos dados climáticos para aumentar a precisão dos resultados, comparando as variáveis harmonizadas com dados reais e as variáveis por defeito no período da campanha, demonstrando o grau de discrepância que seria assumido caso não se tivessem harmonizados os dados.

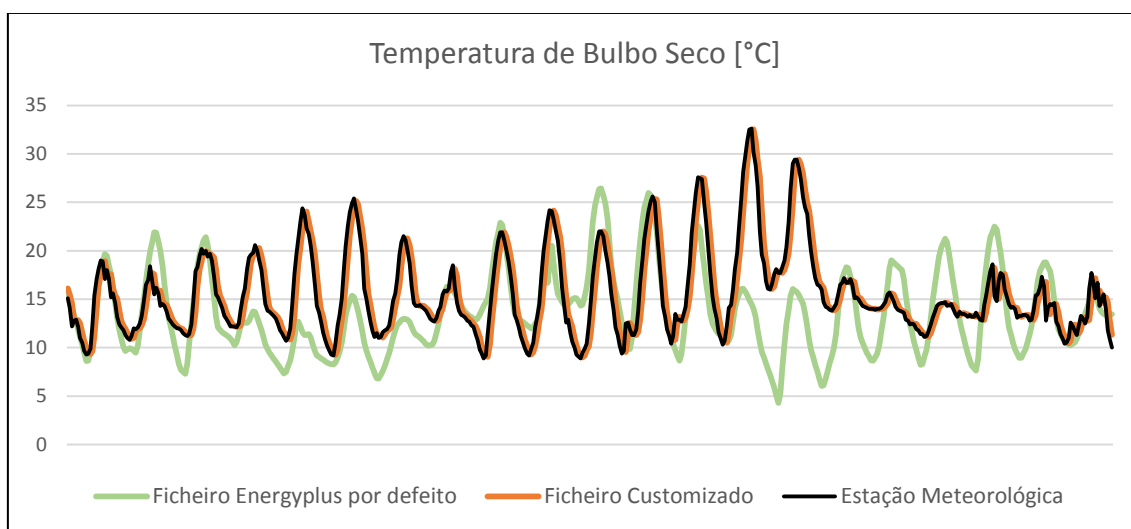


Figura 3.10: Harmonização das variáveis climáticas: Temperatura Exterior

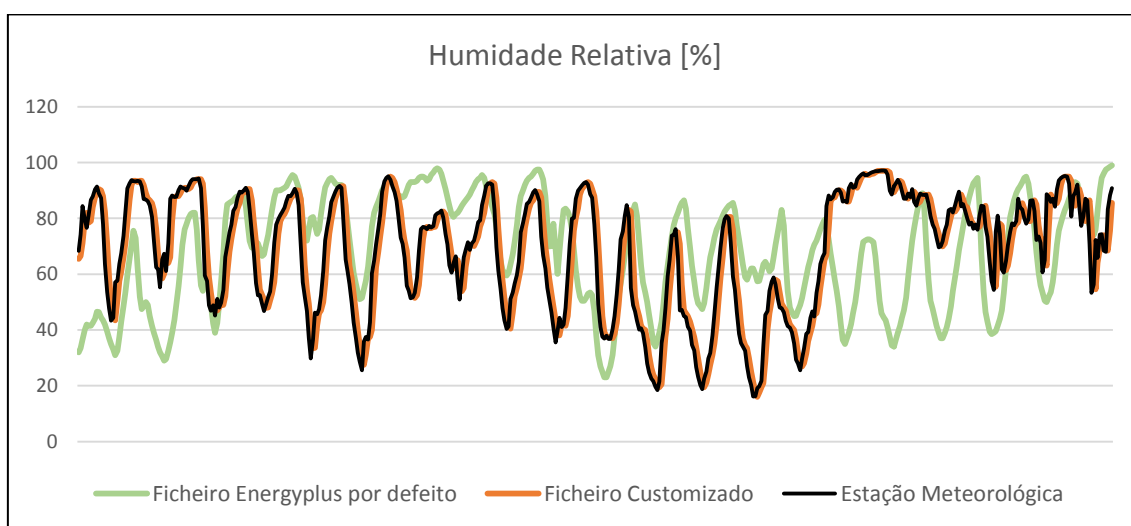


Figura 3.11: Harmonização das variáveis climáticas: Humidade Relativa

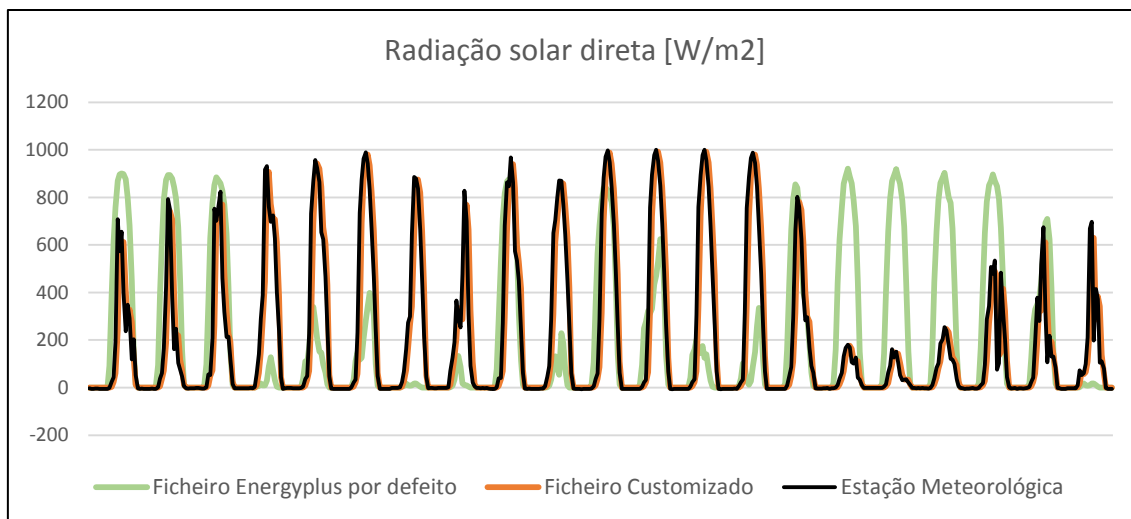


Figura 3.12: Harmonização das variáveis climáticas: Radiação solar direta

3.4. Terceira Fase

3.4.1. Validação experimental do modelo de simulação dinâmica

A terceira fase da investigação foi a validação do modelo através da comparação dos dados de saída do Energyplus com os valores coletados experimentalmente na célula teste. Os parâmetros analisados foram: (i) temperatura média do ar interior da cavidade e (ii) temperatura média do ar interior das zonas térmicas 1 e 2.

3.4.2. Período das campanhas

No mês de Abril de 2016 foram realizadas as coletas de dados empíricos utilizados como referência para a validação da simulação, conforme Tabela 3.11 a seguir.

Descrição	Data
Teste de funcionamento dos equipamentos, estação meteorológica e instalação dos termopares	17 a 19 de Abril de 2016
Campanha 1	20 a 26 de Abril de 2016

Tabela 3.11: Período de realização da coleta experimental

3.4.3. Configuração do sistema e montagem experimental

Durante todo o período de coletas de dados, a configuração do sistema manteve-se inalterada com as grelhas internas abertas (Figura 3.13) e as grelhas externas vedando totalmente a entrada de ar exterior.

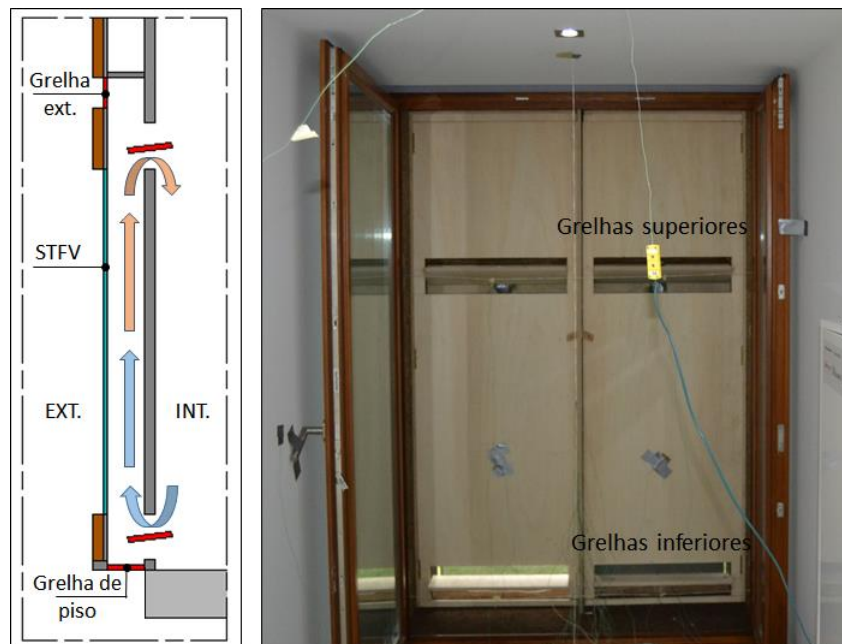


Figura 3.13: Configuração de abertura das grelhas internas e externas

A Figura 3.14 demonstra que a parede mais interior da cavidade (Fig. 3.14a) e as grelhas de piso voltadas para o exterior (Fig. 3.14b) foram isoladas com aglomerado de cortiça de 40 mm para reduzir a influência da transferência térmica no sistema. Além disso, para mitigar a infiltração não controlada de ar na cavidade, as frestas foram vedadas em todo o perímetro (Fig. 3.14c).



Figura 3.14: Pormenores da adaptação da célula teste

A componente experimental foi viabilizada pela instalação de sondas coletando valores de temperatura do ar interior e das superfícies internas e externas, bem como pela instalação de equipamento de registro da potência, corrente e tensão geradas pelos painéis fotovoltaicos. Ao todo foram utilizados 35 termopares do tipo “K” instalados no interior de cada cavidade para monitorar o comportamento do ar no centro de cada subzona, assim como nas superfícies opacas, translúcidas e na divisão virtual entre as subzonas.

A Figura 3.15 representa de forma esquemática o posicionamento de cada termopar, com pontos circulares representando sondas para o ar, pontos losangulares sondas de superfície e as cores identificando a duplicidade dos pontos, sendo azul para ponto único e vermelho pontos duplicados nas cavidades.

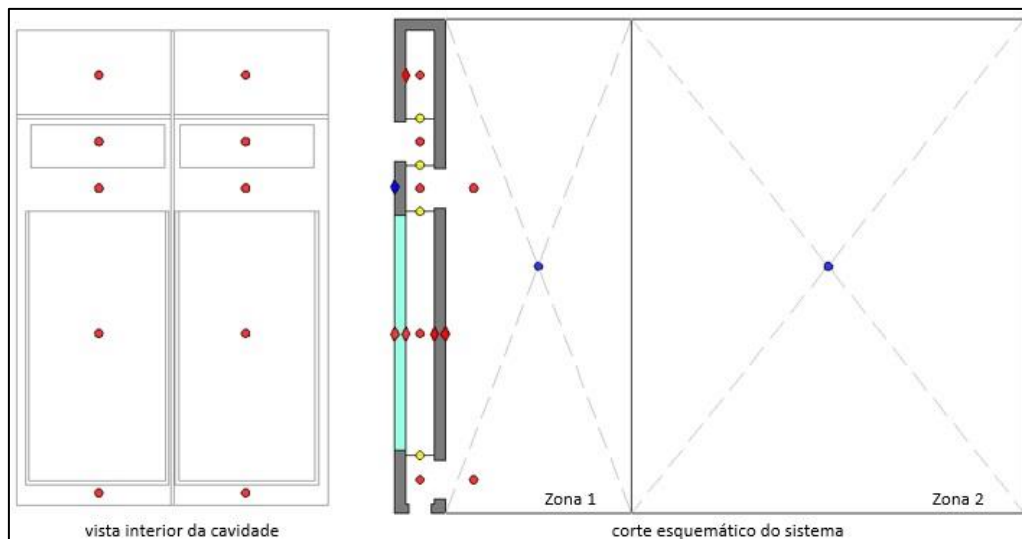


Figura 3.15: Corte esquemático indicando o posicionamento dos termopares

As sondas restantes foram responsáveis pela medição da temperatura da superfície exterior da fachada (3), superfície interior da camada interna da cavidade (2) e temperatura do ar interior (6) na saída das grelhas e representando temperatura média do ambiente das zonas com termopares fixos no centro das zonas 1 e 2. A Figura 7.7 do ANEXO A evidencia a instalação dos equipamentos de coleta.

Cabe esclarecer que os sensores utilizados para coletar a temperatura da divisão virtual entre as subzonas (amarelo na Figura 3.15) foram descartados do estudo, uma vez que pela proximidade dos outros termopares a variação de temperatura era desprezível.

Procedeu-se a uma verificação prévia dos termopares, antes de sua instalação, por comparação com uma sonda calibrada utilizando-se um recipiente com fluido a temperatura constante e controlada. As diferenças foram registradas e compensadas na elaboração da planilha final com os dados brutos.

Em relação ao monitoramento dos elementos climáticos, conforme citado na fase 2 do método, uma estação meteorológica foi instalada na cobertura da célula teste e captou valores no mesmo instante que os sensores de temperatura, conforme evidenciado pela Figura 7.8 do ANEXO A.

A seguir, compilamos na Tabela 3.12 todos os equipamentos utilizados na fase experimental desta dissertação, concluindo desta forma a fase 3.

Dispositivo	Especificação e fabricante	Aplicação
“Data-logger”	Mikromec MLM 824N	Temperatura de bulbo seco exterior, Umidade Relativa do ar, Velocidade e direção do vento, Radiação solar direta e Pressão atmosférica
Anemômetro	Meteo 4.3329.00.000	Velocidade e direção do vento
Termômetro	Rotronic HC2-S3C03	Temperatura e umidade relativa
Piranômetro	Kipp & Zonen CMP3	Radiação solar
Barômetro	Keller PA (A) 33/PA (A) 35	Pressão barométrica
Wattímetro	Yokogawa WT333	Potência, corrente e tensão FV
Termopares	Termopar tipo “K”, Omega	Temperaturas de superfície
“Data-logger”	Keyseight 34970 multiplexer	Registro de temperaturas

Tabela 3.12: Equipamentos utilizados durante o experimento

3.5. Quarta Fase

Na última fase pretendeu-se comparar o desempenho do sistema em três cidades situadas em características climáticas distintas. Lisboa (38° 43’N, 9° 7’O) em clima mediterrâneo, Munique (48° 08’N, 11° 34’O) em clima atlântico e Oslo (59° 56’N, 10° 54’E) com clima predominantemente continental úmido. Considerando a capacidade da ferramenta *Energy Plus* em simular o comportamento do sistema de pré-aquecimento, uma série de cinco cenários foram criados para mensurar a influência da solução construtiva no desempenho do sistema e por consequência, no consumo total de eletricidade de um edifício típico de serviços em operação.

A avaliação contempla o período de inverno entre os meses de Dezembro e Março, adotando-se diversos Percentuais de Área Envidraçada (PAE) e soluções construtivas aplicadas na fachada orientada a sul conforme Tabela 3.13 que descreve a configuração dos cenários.

Cenários	Solução construtiva	PAE	Parâmetros analisados
Referência (REF)	Ausência do sistema		
VS	Sistema com vidro simples 6mm incolor	30%, 50% e 80%	Redução global de consumo de eletricidade (kWh) e Redução global das cargas de aquecimento (kWh)
VD	Sistema vidro duplo 6mm incolor e caixa de ar (6+13+6)		
ST10	Módulo fotovoltaico semitransparente com 10% de translucidez		
ST04	Módulo fotovoltaico semitransparente com 4% de translucidez		

Tabela 3.13: Descrição dos cenários e parâmetros analisados no estudo de caso

Além disso, a configuração das grelhas manteve-se inalterada durante todo o período analisado, uma vez que não é possível alterar a sua combinação de abertura e fechamento de forma dinâmica ao correr da simulação (Pereira *et al.*, 2013).

Neste sentido, as grelhas externas e de piso permaneceram fechadas, enquanto que as internas permitiram a circulação natural do ar com base na criação de uma programação de horários para a abertura no período de ocupação plena do edifício (10:00 às 20:00) e fechamento após as 20:00 horas para mitigar a perda de energia que ocorre em função da inversão do fluxo de calor no período noturno de inverno.

3.5.1. A modelação dos casos de estudo

Na busca por representar o perfil de operação de um edifício de serviços bem como analisar o comportamento do sistema de pré-aquecimento em condições ótimas, algumas alterações na modelação foram necessárias.

Basicamente, tais alterações foram fundamentadas nos seguintes pressupostos:

- Implantar o edifício com o sistema orientado a sul e considerando a ausência de sombreamento por qualquer elemento exterior, de modo a mitigar as limitações verificadas no estudo base, onde as árvores e o edifício adjacente à célula teste prejudicaram a geração de energia pelos módulos fotovoltaicos e modificaram as interações da envolvente com o meio externo;
- Adotar como referência para o comportamento do clima, os ficheiros climáticos por defeito para Lisboa, Munique e Oslo, disponíveis no banco de dados do Energy Plus, desconsiderando a harmonização das variáveis executada na fase de verificação;
- Ampliar a área útil do edifício e da superfície envidraçada do sistema de modo a considerar os ganhos internos derivados da ocupação, utilização de equipamentos e iluminação replicando condições mais próximas de um edifício real;
- Replicar as características físicas dos materiais de construção empregados na célula teste, que foram modelados e simulados na fase de verificação do modelo, promovendo o mínimo de alterações.

A seguir, estão os pormenores das características físicas de todos os casos de estudo e os parâmetros de simulação que foram alterados em relação ao modelo-base da célula teste.

3.5.1.1. Geometria

Cinco modelos foram criados com geometria similar, com área interna de 20 m², compostos por cinco superfícies idênticas, com as seguintes dimensões:

- Pavimento e cobertura com 20 m² cada, conforme Figura 3.16;
- Fachadas Leste e Oeste com superfície de 15 m² cada (Figura 3.17);
- Fachada Norte com 12 m² de superfície (Figura 3.17).

Face à representação de um caso de estudo próximo do real, fez-se necessário incluir uma janela ao modelo de referência, tendo sido optado pela sua orientação à Norte pela baixa incidência solar no inverno no hemisfério norte.

Para que a análise entre os cenários fosse realizada de forma homogênea, todos os modelos contemplam a mesma superfície de vão envidraçado à Norte, sem proteção solar e com vidro de baixa emissividade na face exterior.

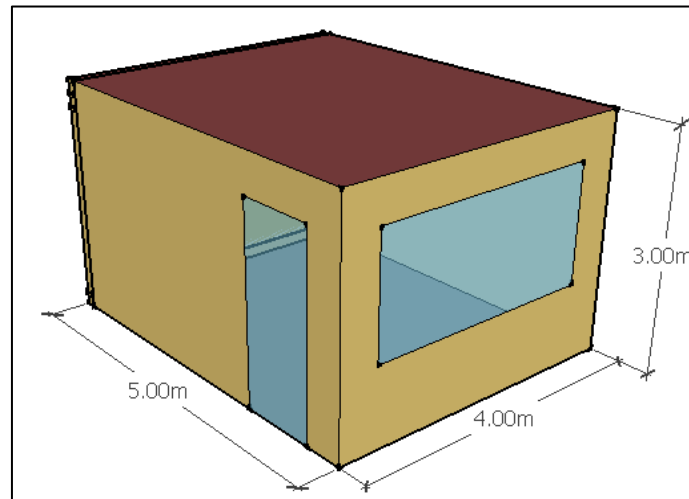


Figura 3.16: Volumetria dos modelos do estudo de caso

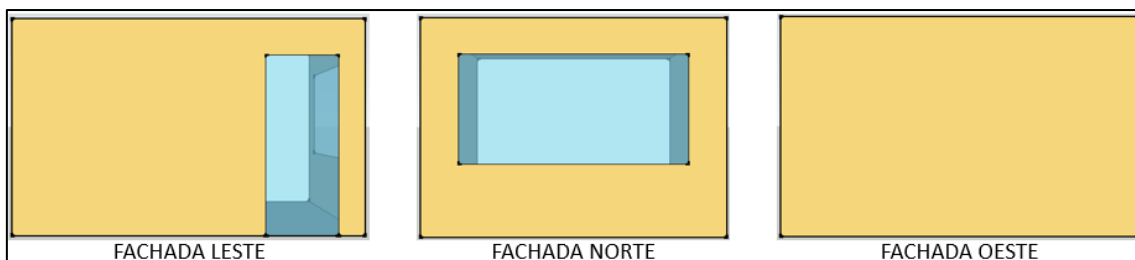


Figura 3.17: Geometria das fachadas Leste, Norte e Oeste dos modelos analisados

A fachada Sul possui 12 m² de superfície e por contemplar o objeto de estudo, difere em todos os cenários pelo percentual de abertura dos envidraçados e pela solução construtiva adotada, conforme Figura 3.18.

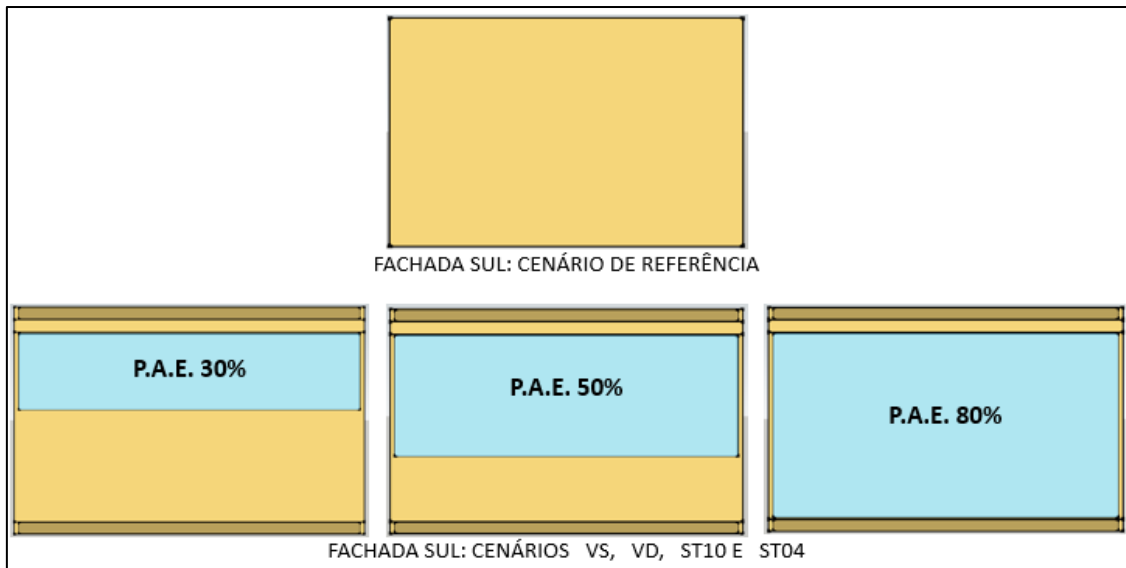


Figura 3.18: Geometria da fachada Sul dos modelos analisados

3.5.1.2. Ganhos internos

Reproduzindo a influência dos ganhos internos da operação de um edifício no seu balanço térmico, consideramos a ocupação de duas pessoas com atividade metabólica referente à trabalho administrativo de 100 W por pessoa e fração radiante de 40% (Fonseca, 2015). Em relação aos equipamentos adotou-se o valor de 77 W para cada computador e 30 W para cada monitor com fração radiante de 30% com base em valores tabelados em “*Ashrae 2009*” encontrados em Fonseca (2015).

Para o nível de iluminação do ambiente, foram considerados 300 W no total, representados por seis luminárias de 2x25 W cada, com fração radiante de 72% (DOE, 2016b).

O perfil de ocupação do edifício pode ser verificado na Tabela 3.14 devidamente configurado através do objeto “*schedule:compact*” do Energy Plus.

Horário	00:00 às 07:00	07:00 às 08:00	08:00 às 12:00	12:00 às 13:00	13:00 às 16:00	16:00 às 17:00	17:00 às 18:00	18:00 às 00:00	Finais de semana
Ocupação	0	0.5	1	0.5	1	0.5	0.1	0	0
Equipamentos	0	0.5	1	0.5	1	0.5	0.1	0	0
Horário	00:00 às 06:00	06:00 às 07:00	07:00 às 17:00	17:00 às 18:00	18:00 às 00:00	Finais de semana e demais dias			
Iluminação	0.05	0.2	1	0.5	0.05	0.05			

Tabela 3.14: Perfil de ocupação do edifício

3.5.1.3. Propriedades dos materiais de construção

Para representar o edifício de serviços, a modelação adota quase que na totalidade os mesmos materiais de construção da célula teste, com suas propriedades já descritas anteriormente.

Apenas foram alteradas as características das paredes da cavidade, já que para a adaptação da célula teste ao experimento uma caixa de madeira revestida em aglomerado foi construída, o que não seria aplicável em construções reais. Neste caso, as propriedades dos materiais das paredes da cavidade assumem as mesmas características das demais paredes exteriores da célula teste.

Em relação à modelação dos envidraçados, foi adotada uma simplificação nesta etapa, uma vez que foram incluídas no estudo outras soluções construtivas que não necessitaram de modelação em laminado, como no caso dos módulos com incorporação de células fotovoltaicas de filme fino aplicado.

Desta forma, foram modelados através da ferramenta WINDOW7.4 os cenários VS e VD cujas propriedades ópticas do vidro encontram-se presentes no banco de dados da “IGDB”, enquanto que para os cenários ST10 e ST04 foram utilizados os modelos de vidro já criados na fase de verificação.

Os resultados das simulações dos vãos envidraçados no WINDOW7.4 foram exportados para o Energy Plus através do modo “SpectralAverage” para que pudessem ser realizadas as simulações energéticas de todo o edifício. Apresentamos na Tabela 3.15 as propriedades dos elementos envidraçados de cada caso de estudo com os valores de saída retratando todo o conjunto de vidro, espaçador e caixilho.

Caracterização dos elementos construtivos: ENVIDRAÇADOS						
Cenário	VS	VD	ST 10	ST 04	REF e demais (Fachada Norte)	
Espessura (m)	0.0057	0.0057	0.0065	0.0065	0.005	0.006
Característica	incolor	incolor	STFV	STFV	Low iron	Low-e
Transmitância solar	0.769	0.769	0.094	0.002	0.889	0.600
Transmitância visível	0.880	0.880	0.108	0.002	0.910	0.84
Refletância solar front.	0.075	0.075	0.139	0.600	0.079	0.17
Refletância solar post.	0.075	0.075	0.522	0.148	0.079	0.22
Refletância visível front.	0.078	0.078	0.083	0.061	0.082	0.055
Refletância visível post.	0.078	0.078	0.529	0.076	0.082	0.078
Emissividade frontal	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84
Emissividade posterior	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.1

Fator Solar	0.813	0.694	0.324	0.117	0.634
Condutividade (W/m2.K)	5.811	2.684	5.973	5.973	1.917

Tabela 3.15: Propriedades ópticas dos elementos envidraçados

3.5.1.4. Abertura das grelhas

Outra alteração relevante em relação ao modelo da célula teste consiste no aumento da área de abertura das grelhas de passagem de ar de forma proporcional ao aumento da superfície da fachada sul. Para os quatro cenários contemplados com o sistema, foi adotada área de abertura de 0.553 m² e coeficiente de descarga de 0.70 para todas as grelhas.

3.5.1.5. Sistema de AVAC

Para mensurar o benefício do sistema de pré-aquecimento nos consumos de energia globais do edifício, foi concebido um sistema simplificado de AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado) através dos objetos “*HVACTemplate: ZoneIdealLoadsAirSystem*”, “*Zone Control: Thermostat*” e “*ThermostatSetPoint: DualSetPoint*”.

Tais objetos permitem calcular as necessidades de aquecimento e/ou arrefecimento para que a temperatura interior da zona térmica seja mantida dentro do range de temperaturas de conforto definido na modelação, resultando em valores para as cargas de refrigeração em kWh. A Tabela 3.16 exhibe os principais parâmetros adotados para definição das temperaturas de conforto do estudo.

Modo de operação	Programação da temperatura interior		
	00:00 às 07:00	07:00 às 17:00	17:00 às 00:00
Aquecimento	15°C	20°C	15°C
Arrefecimento	30°C	23°C	30°C

Tabela 3.16: Programação do controle de temperatura interior

3.5.1.6. Metodologia de calculo dos consumos de climatização

O objeto “*ZoneIdealLoadsAirSystem*” é modelado como uma unidade terminal VAV (volume de ar variável) em que o caudal de ar para alimentação varia entre zero e o máximo para satisfazer a zona térmica através de cargas de aquecimento ou arrefecimento, conforme citado na secção anterior (DOE, 2015).

O caudal de ar é obtido através do seguinte modelo:

$$\dot{m}_s = \frac{\dot{Q}_z}{\{c_{p,air}(T_s - T_z)\}}$$

Equação 3.2: Modelo de cálculo de cargas de refrigeração [fonte (DOE, 2015)]

$$T_s = \frac{T_z + \dot{Q}_z}{(c_{p,air} \cdot \dot{m}_s)}$$

Equação 3.3: Modelo de cálculo da temperatura do caudal de ar [fonte (DOE, 2015)]

Onde,

\dot{m}_s = fluxo de massa de ar [Kgs];

\dot{Q}_z = Carga de aquecimento ou arrefecimento [W];

$c_{p,air}$ = Calor específico do ar [J/Kg.k];

T_s = Temperatura do ar de insuflação [°C];

T_z = Temperatura da zona [°C].

3.5.1.7. Modelação da geração fotovoltaica

Considerando que o objetivo da quarta fase foi simular o desempenho do sistema em condições ótimas (orientado a Sul e ausência de sombreamento) optou-se por modificar o método de cálculo da geração fotovoltaica do método “*Sandia*” para o modelo “*Simple*”, uma vez que este último permite ao usuário estipular a eficiência de conversão constante (DOE, 2016b), que no caso de estudo foi assumida a eficiência máxima da tecnologia de silício amorfo que segundo Green *et al.* (2014) atualmente não ultrapassa 8% de conversão.

Com base no estudo de Didoné *et al.* (2014) foram estipuladas as eficiências de 4.5% para o módulo ST10 e 5.5% para a célula ST04.

Outro fator que contribuiu para a adoção de um método de cálculo mais simplificado foi o grande número de simulações realizadas para análise de todos os cenários com a variação de irradiância, diferentes tipos de vidro e PAE propostos. O modelo adotado possibilita o cálculo médio de geração de energia sem a necessidade de muitos dados de entrada como no modelo “*Sandia*”.

4. RESULTADO DA COMPARAÇÃO ENTRE EXPERIMENTO E SIMULAÇÃO

Este capítulo apresentará os resultados da verificação do modelo simulado através da comparação dos dados de saída do Energyplus com os valores coletados experimentalmente na célula teste.

A ênfase da análise foi dada para o sistema de aquecimento passivo do ar, através das temperaturas médias do ar interior da cavidade e do ar interior das zonas térmicas. Em função das limitações do entorno, abordadas na secção 3.5.1 associadas às variáveis climáticas do período de campanhas, os dados de conversão de energia resultante dos módulos fotovoltaicos foram desprezíveis, uma vez que os dados coletados através de medições na célula teste nunca ultrapassaram os 16 W de pico de potência.

4.1. Metodologia para mensuração de erros

Segundo Campos (1996) os erros em grandezas físicas podem ser expressos de diversas formas, entre elas, “*erro absoluto*” (δx) ou o “*erro relativo*”, sendo a primeira forma expressa pela diferença entre o resultado simulado (x_0) e o valor verdadeiro da grandeza (x). O “*erro relativo*” refere-se ao quociente entre o “*erro absoluto*” e o valor verdadeiro ou real da grandeza, expresso por:

$$\text{erro relativo} = \frac{x_0 - x}{x} = \frac{\delta x}{x}$$

Equação 4.1: Erro Relativo em grandezas físicas (fonte: N. A. Campos 1996)

Para a comparação entre dados simulados e reais foi calculado o percentual do módulo do erro relativo.

Neste caso, x_0 representa o valor simulado obtido pelos relatórios de saída do EnergyPlus, e x o valor coletado experimentalmente através dos termopares, ambos na unidade °C.

Os gráficos que se apresentam de seguida adotam um padrão de representação com dados reais identificados como “*REAL*”, dados meteorológicos como “*CLIM*”,

valores do erro relativo percentual como “Erro” e por fim os dados de saída simulados no Energyplus denominados de “DSIM”.

4.2. Comparação de dados medidos e simulados: cavidades do sistema passivo

Nos gráficos das Figuras 4.1 a 4.8 serão apresentados os resultados da comparação entre os dados medidos na etapa experimental e os simulados no modelo computacional, utilizando como referência os valores das temperaturas das cavidades.

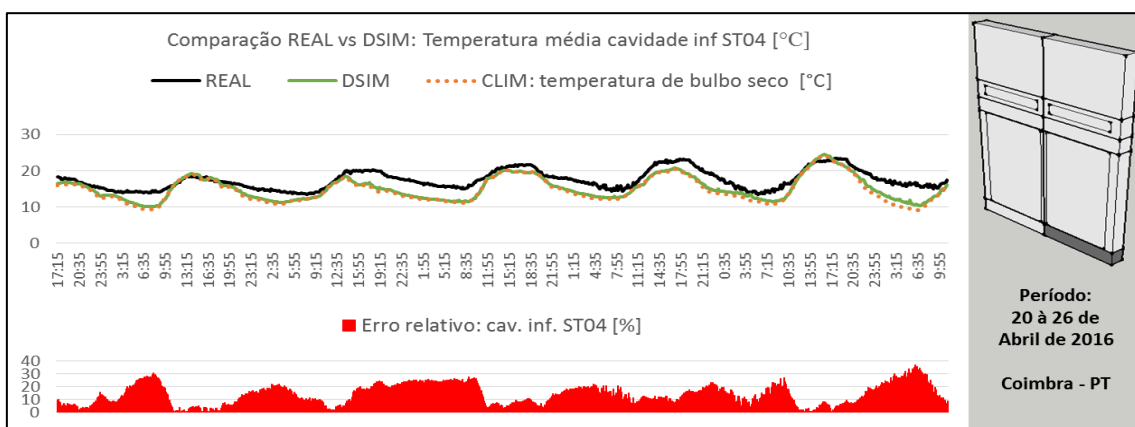


Figura 4.1: Verificação da simulação da temperatura média interior da cavidade inferior do sistema ST04 e erro relativo associado

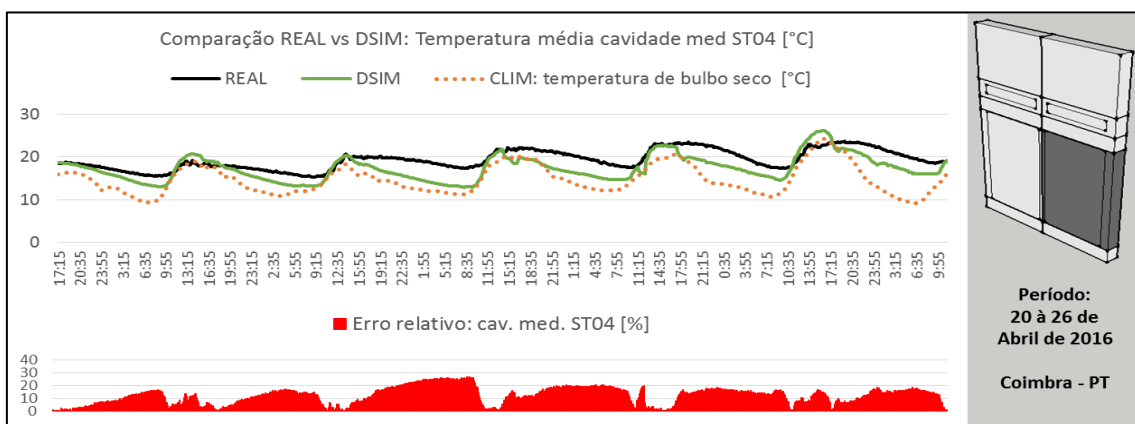


Figura 4.2: Verificação da simulação da temperatura média interior da cavidade média do sistema ST04 e erro relativo associado

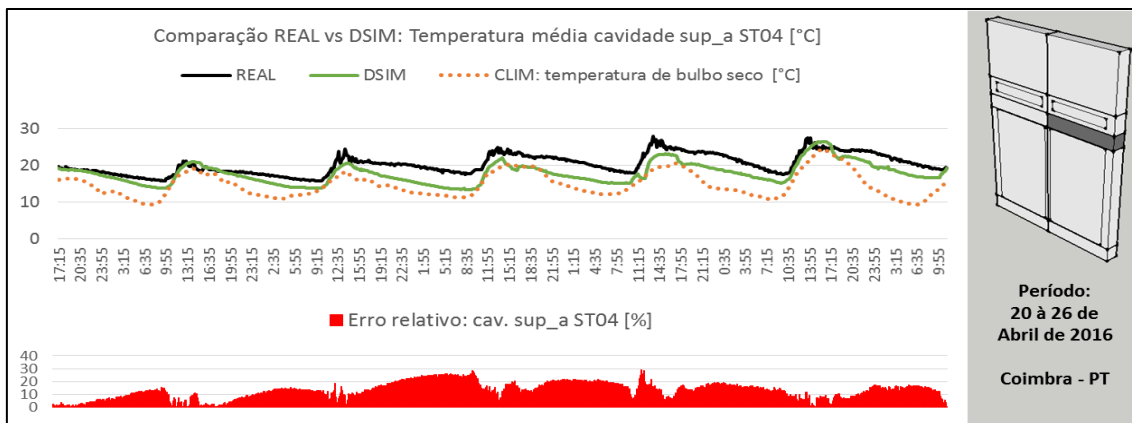


Figura 4.3: Verificação da simulação da temperatura média interior da cavidade superior(a) do sistema ST04 e erro relativo associado

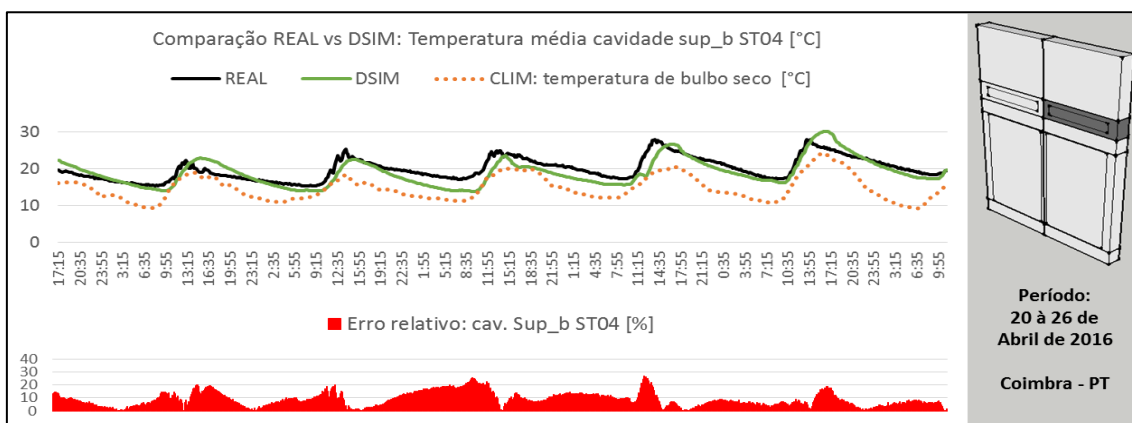


Figura 4.4: Verificação da simulação da temperatura média interior da cavidade superior(b) do sistema ST04 e erro relativo associado

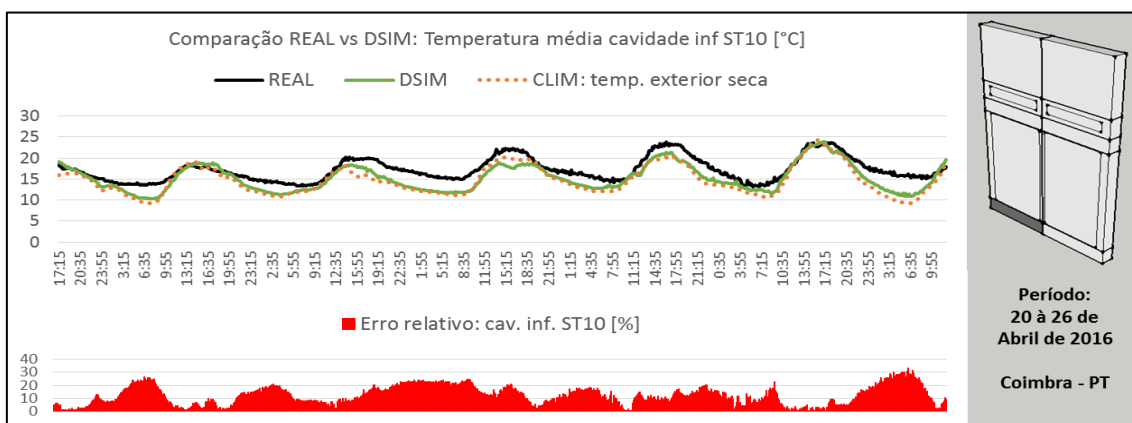


Figura 4.5: Verificação da simulação da temperatura média interior da cavidade inferior do sistema ST10 e erro relativo associado

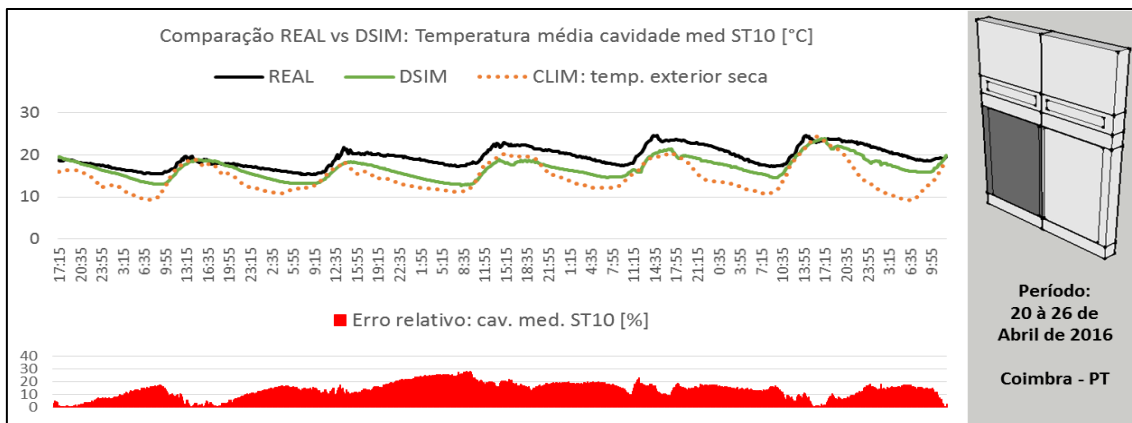


Figura 4.6: Verificação da simulação da temperatura média interior da cavidade intermédia do sistema ST10 e erro relativo associado

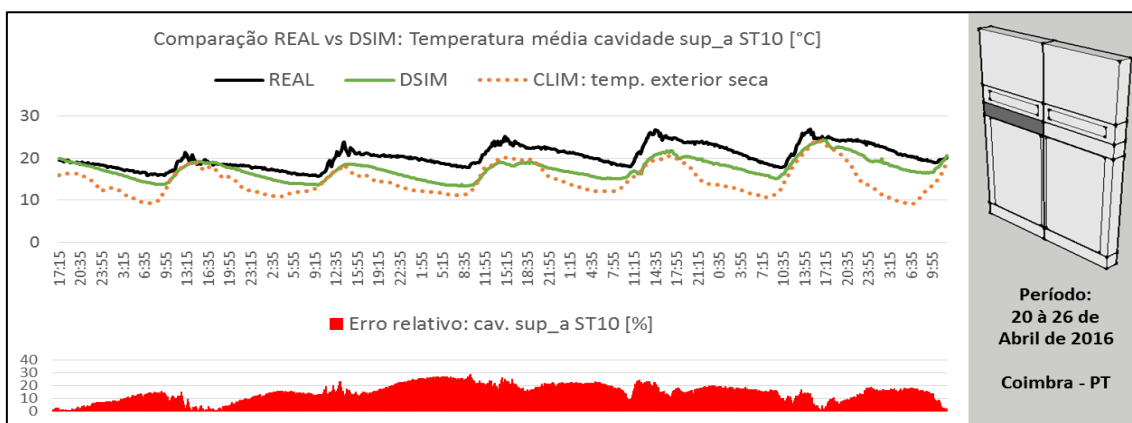


Figura 4.7: Verificação da simulação da temperatura média interior da cavidade superior(a) do sistema ST10 e erro relativo associado

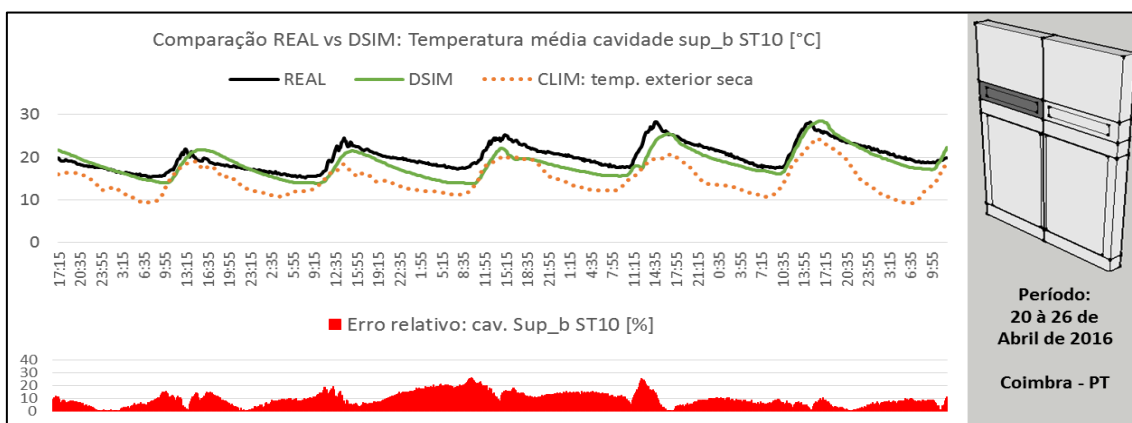


Figura 4.8: Verificação da simulação da temperatura média interior da cavidade superior(b) do sistema ST10 e erro relativo associado

Analisando os gráficos das figuras 4.1 a 4.8 concluímos que de modo geral, a verificação dos dados apresentou uma tendência:

- Os períodos diurnos em que o sistema de pré-aquecimento esteve ativo representaram as menores diferenças entre as curvas REAL e DSIM;
- Praticamente todos os resultados simulados foram subestimados se comparados com os coletados, principalmente no período noturno;
- As perdas térmicas que ocorrem durante a noite na estação de inverno representaram as maiores discrepâncias na simulação, já que as curvas DSIM nos gráficos demonstram quedas de temperatura em maior magnitude do que nas curvas REAL.

4.3. Comparação de dados medidos e simulados: zonas térmicas do modelo

Em relação às temperaturas do ambiente interior, nomeadamente zonas 1 e 2, também foram verificadas através da comparação de dados simulados com os reais. A Figura 4.9 e a Figura 4.10 representam a verificação das temperaturas médias de cada zona térmica comparando a temperatura dos nós gerados automaticamente pelo objeto “AirFlowNetwork” do Energy Plus com os registros dos termopares instalados na célula teste no centro de cada ambiente e na metade da altura do “*pé direito*”.

A comparação demonstrou que, em média, as diferenças absolutas de temperatura real e simulada nas zonas 1 e 2 estiveram entre os 1.2 e 1.3 °C em todo o período de campanha. No entanto, principalmente no período noturno, estas diferenças foram maiores chegando a atingir o máximo de diferença absoluta de 4.9 °C.

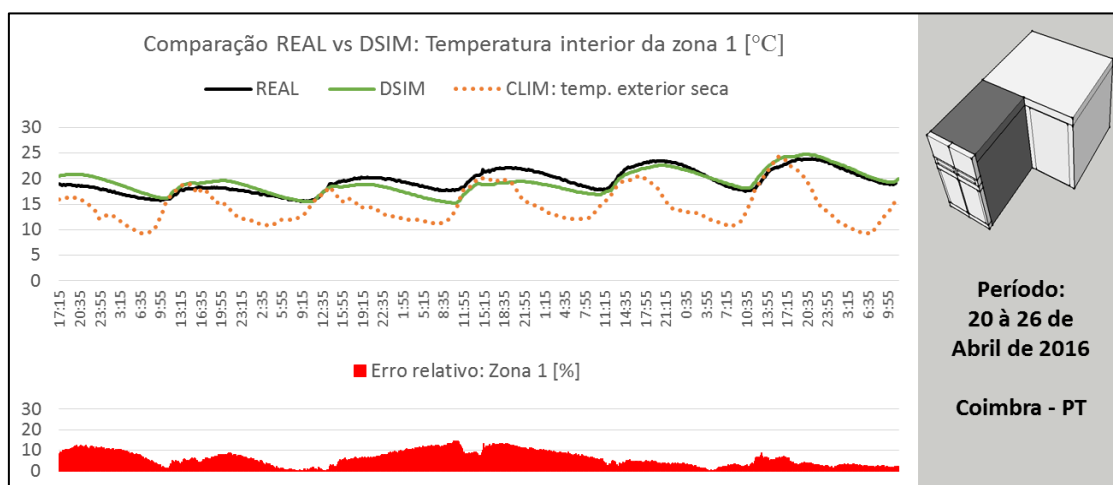


Figura 4.9: Verificação da simulação da temperatura interior da zona 1 e erro relativo associado

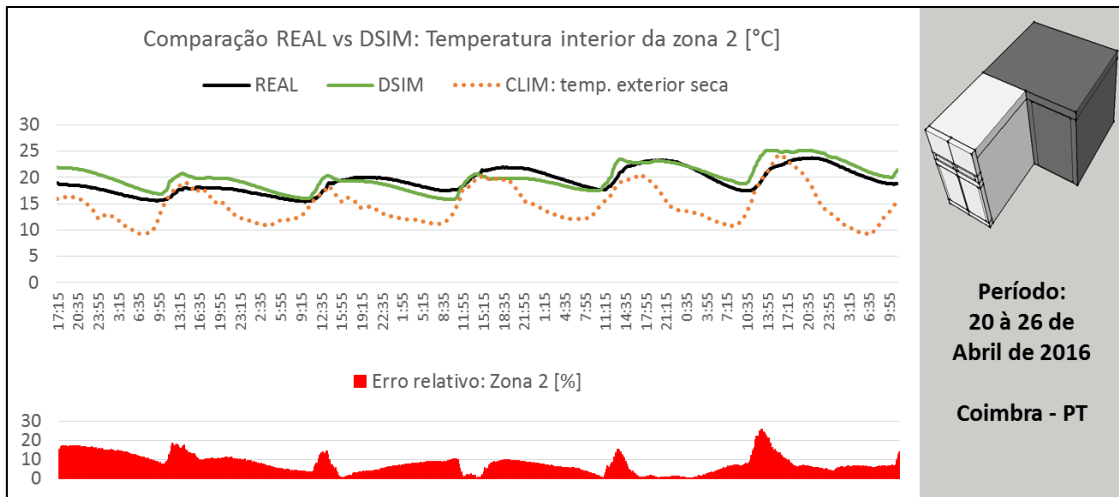


Figura 4.10: Verificação da simulação da temperatura interior da zona 2 e erro relativo associado

Para além do erro relativo percentual, foram contabilizadas as médias das amostras, levando em conta o gradiente de temperaturas passível de ocorrer ao longo do dia, baseado em (Campos, 1996) e expresso por:

$$\text{média da amostra} = \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

Equação 4.2: Média aritmética das amostras (fonte: N. A. Campos 1996)

Onde, N é a quantidade de medições e x_i o resultado de cada ponto da amostra, que no presente estudo será representado pelos valores de erro absoluto e erro relativo percentual.

	Localização da amostra	Média erro absoluto [°C]	Média erro relativo perc. [%]	Diferença Máxima [°C]	Diferença Mínima [°C]
Cavidade ST04	Inferior	2.4	14	6	1.9
	Média	2.3	12	4.7	3.7
	Sup_a	2.6	13	6.8	2.1
	Sup_b	1.8	9	6.7	4.8
Cavidade ST10	Inferior	2	12	5.4	1.8
	Média	2.6	13	5.1	0.9
	Sup_a	3	14	6.5	0.7
	Sup_b	1.9	9	6	2.8
Ambientes	Zona 1	1.2	6	2.3	2.1
	Zona 2	1.3	7	4.9	2.9

Tabela 4.1: Médias de erro absoluto e erro relativo percentual, diferenças máximas e mínimas

Analisando os resultados da Tabela 4.1 nota-se que em média de erro relativo, que considera em sua equação a temperatura real da amostra, o percentual de erro esteve entre os 6 e os 14% com maiores desvios atribuídos às temperaturas da cavidade. Quando analisamos as cavidades ST10 e ST04 separadamente, fica evidenciado uma tendência muito similar entre as duas, sem discrepâncias significativas.

Em relação às zonas térmicas, onde há ocupação, o erro relativo médio não ultrapassou os 7%, demonstrando que apesar das interferências atribuídas à geometria da célula teste, posição da estação meteorológica em relação à fachada sul e condições climáticas, a simulação pode contribuir como referência em outras análises.

5. DESEMPENHO DO SISTEMA PASSIVO INCORPORANDO FV PARA DIFERENTES CENÁRIOS

5.1. Consumo energético e geração fotovoltaica

A seguir destacamos o resultado das comparações entre o desempenho dos quatro cenários construtivos do sistema com o cenário de referência. Foram consideradas latitudes distintas, quatro tipos de vidro e diferentes percentagens de área envidraçada, conforme descrito no capítulo 3.5.

Optou-se por fazer a análise de desempenho com base em consumos energéticos, contabilizando apenas a energia necessária para aquecimento e/ou arrefecimento uma vez que os consumos com iluminação e equipamentos foram idênticos para todos os cenários, pelo fato de que os perfis de ocupação e controle de iluminação não se alteraram durante a simulação. Além disso, em todos os sistemas estudados, a superfície interior é opaca não permitindo assim a entrada de radiação solar diretamente no interior da zona térmica, independente do tipo de vidro do sistema.

No caso dos cenários ST10 e ST04, determinou-se ainda a geração de energia elétrica convertida pela atuação dos vidros fotovoltaicos com o objetivo de se analisar a tecnologia com maior potencial de geração para os casos de estudo.

A Figura 5.1 revela os resultados em kWh da cidade de Munique, verificando-se que:

- Como era esperado, os consumos de aquecimento tiveram influência substancial no desempenho da solução construtiva;
- Percentuais de superfície envidraçada menores possibilitaram melhores resultados, praticamente em todas as soluções construtivas e nas três cidades analisadas, com exceção de Lisboa com o sistema ST04;
- PAE de 80% apresentou consumos muito próximos do cenário de referência, onde os cenários VS e ST04 este último sem considerar a geração FV extrapolam os valores dos consumos de referência;

A Figura 5.2 apresenta o balanço energético global em kWh/m² incorporando o benefício da geração FV no valor final, demonstrando que a geração registrada no cenário ST04 permitiu reduzir o consumo para valores abaixo do cenário de referência. No entanto, por não considerar as perdas referentes ao sombreamento e mudanças bruscas nas condições climáticas, a vantagem da solução ST04 se mostrou muito tênue perante o cenário de referência.

Ao final da análise, para Munique no período de inverno, e com a configuração das grelhas inalteradas a aplicação de vidro simples com PAE de 80% foi a pior solução.

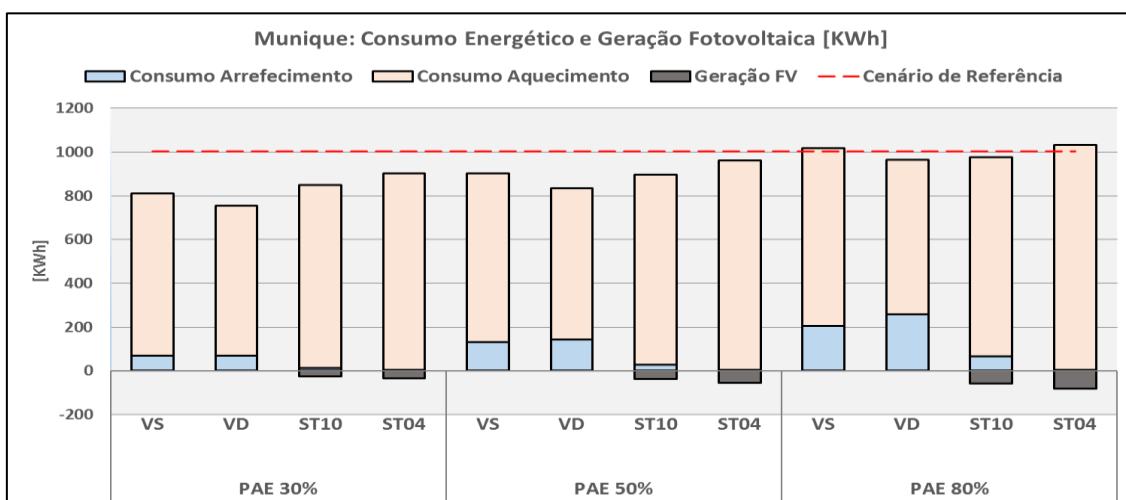


Figura 5.1: Consumo energético com cargas de refrigeração e geração fotovoltaica: Munique

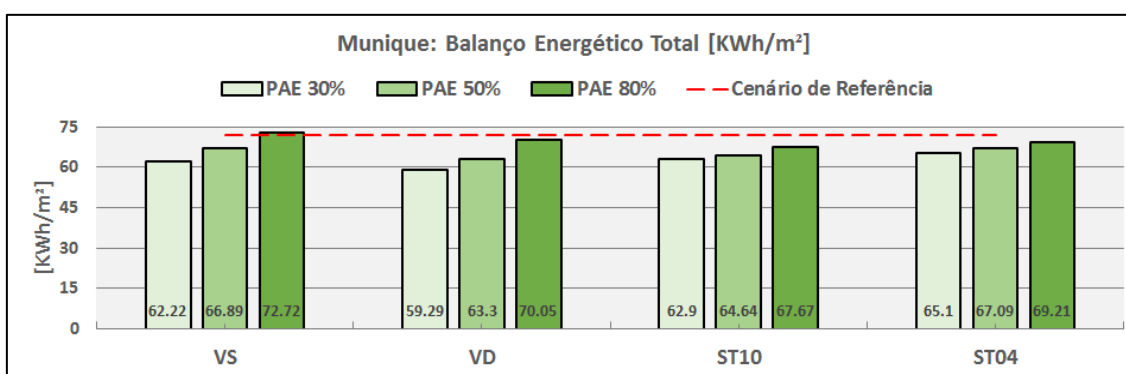


Figura 5.2: Balanço energético global: Munique

As tendências identificadas em Munique foram similares para a cidade de Oslo, no entanto, conforme evidenciado na Figura 7.11 do ANEXO B, nota-se uma menor radiação solar em Oslo o que contribuiu para a redução drástica nos consumos de

arrefecimento, em proporção mais relevante do que o aumento do consumo de aquecimento verificado no mesmo período.

Este fator resultou com que todos os cenários estivessem abaixo dos consumos de referência, mesmo considerando a menor geração fotovoltaica registrada em Oslo, de acordo com a Figura 5.3. Ao final da análise (Figura 5.4), o vidro duplo foi a melhor solução enquanto que vidro fotovoltaico ST04 a pior, para todos os percentuais de abertura do envidraçado, o que será analisado de forma mais detalhada ao final deste subcapítulo.

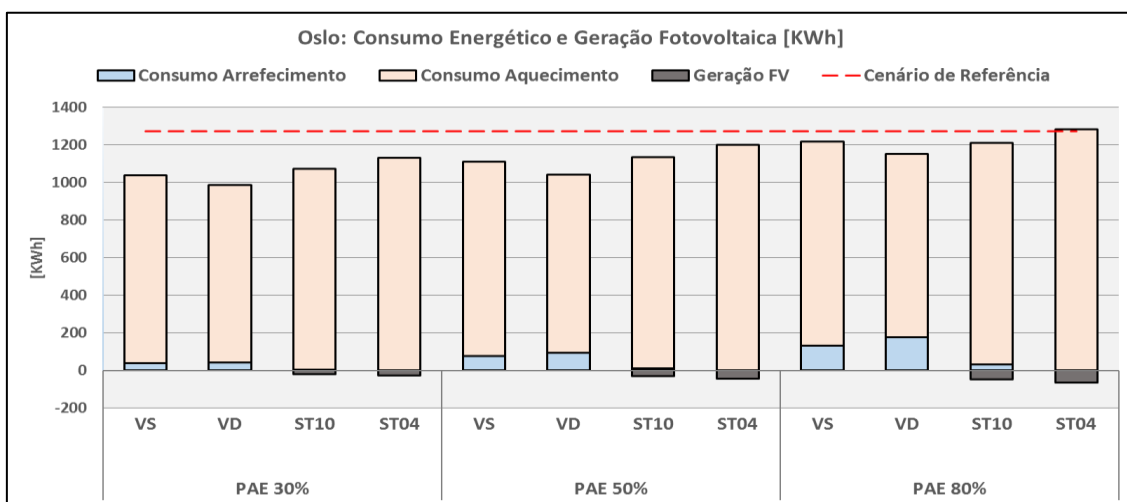


Figura 5.3: Consumo energético de refrigeração e geração fotovoltaica: Oslo

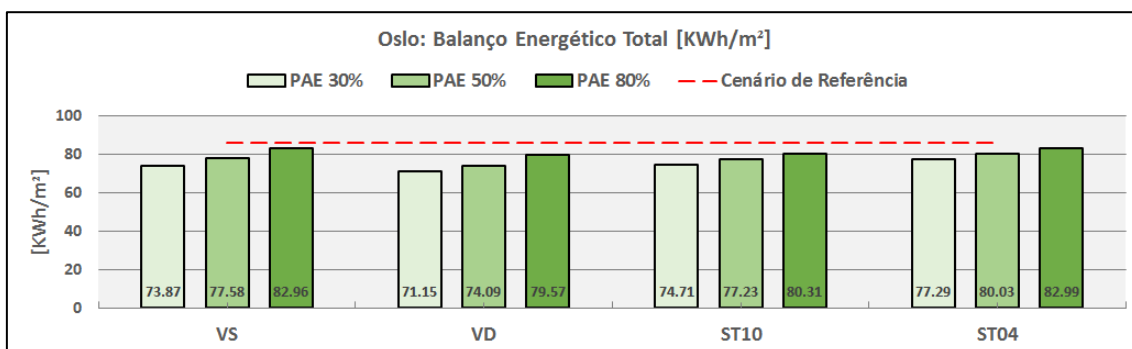


Figura 5.4: Balanço energético global: Oslo

Quando analisamos o desempenho do sistema em Lisboa (Figura 5.5 e Figura 5.6) devemos destacar as características do conjunto. Assim como nos demais estudos de caso, a configuração de abertura e oclusão das grelhas permitiu a circulação do ar aquecido por convecção natural, e mesmo para a estação de inverno, a contribuição do sistema para o conforto interior foi negativa, aumentando as necessidades de

arrefecimento e fazendo com que todas as soluções se mostrassem inviáveis para estas condições em Lisboa.

Neste caso, ressaltamos a seguinte tendência:

- Percentuais de superfície envidraçada maiores promovem um aumento dos ganhos internos resultando em piores desempenhos;
- As propriedades do vidro FV com fator solar reduzido possibilitaram um melhor desempenho destes sistemas quando comparados com as soluções VS e VD;

A incorporação da geração FV ao balanço energético global proporcionou que o cenário ST04 obtivesse o melhor desempenho em todas as análises, e assim como em Munique, a redução de consumo não foi significativa a ponto de garantir que esta solução prevaleça sobre as demais, em função de possíveis variações na quantidade de energia convertida.

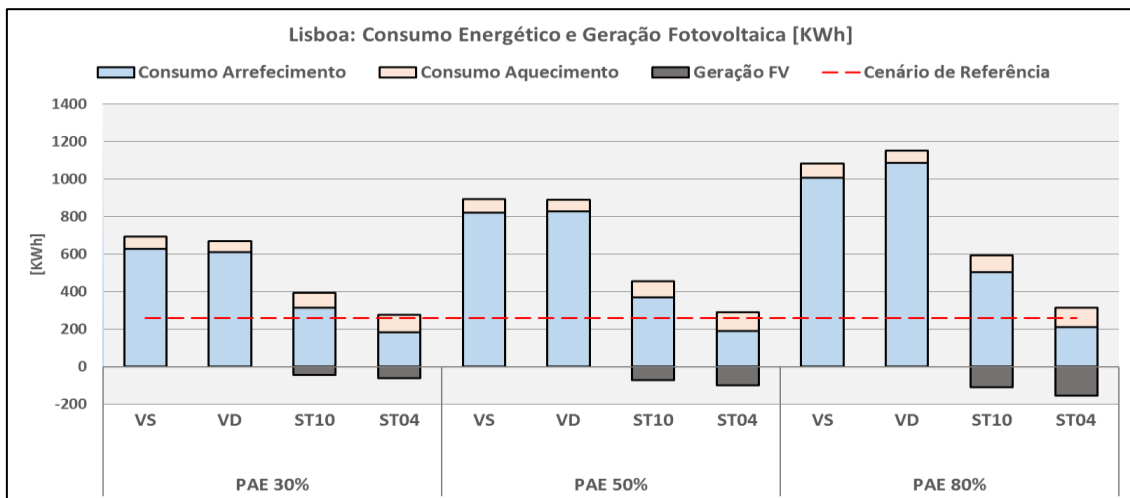


Figura 5.5: Consumo energético de refrigeração e geração fotovoltaica: Lisboa

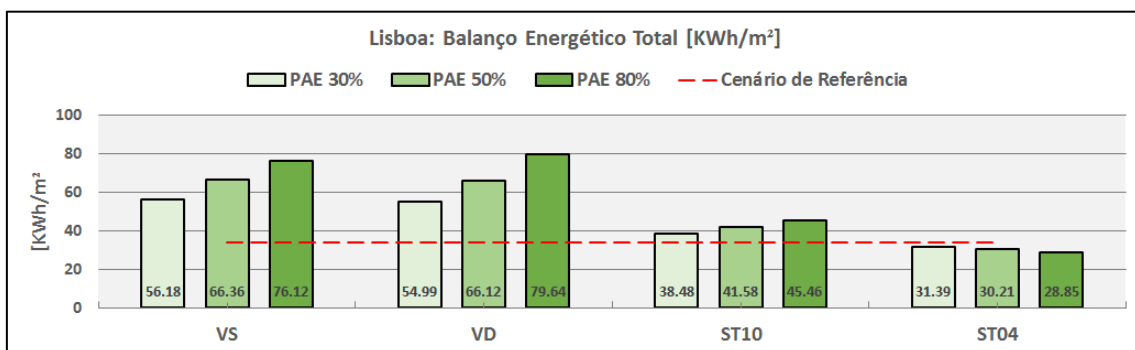


Figura 5.6: Balanço energético global: Lisboa

No gráfico da Figura 5.7 apresenta-se a temperatura interior do edifício em cada cenário na cidade de Oslo, onde a propriedade térmica do vidro influenciou de forma considerável no resultado, justificando grande parte do comportamento dos sistemas.

Para aquelas soluções com maiores fatores solares (g), no caso VS e VD, as perdas durante o período noturno foram menores, garantindo temperaturas médias superiores nas cavidades e por consequência temperaturas interiores mais próximas do intervalo de conforto, entre 20 e 23 °C. Este fenômeno provocou maiores consumos de aquecimento nas soluções ST10 e ST04 já que as curvas do gráfico em análise estiveram mais afastadas da zona de conforto térmico.

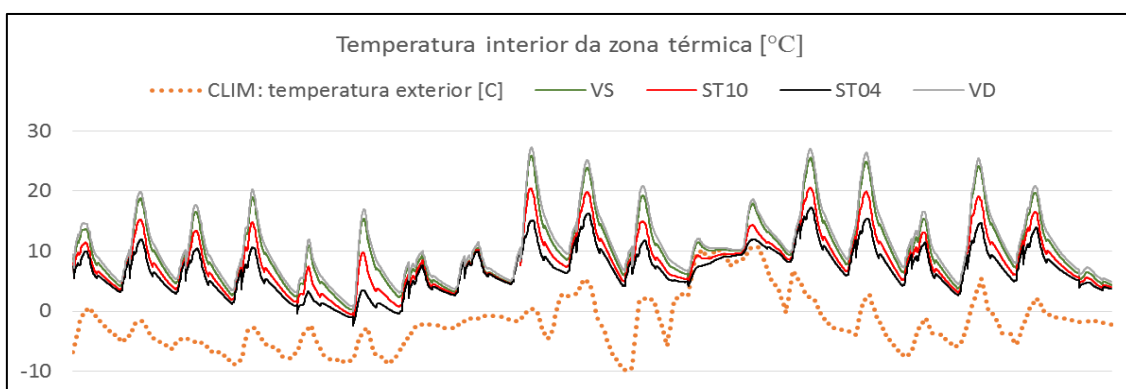


Figura 5.7: Temperatura interior dos quatro cenários: Oslo

Finalmente, quando comparamos a redução de consumos para os quatro cenários em relação ao cenário de referência, podemos apurar que o percentual de desvio em cada solução construtiva, para as três cidades avaliadas e diferentes aberturas do envidraçado, tal como apresentado na Tabela 5.1.

Valores positivos referem-se à redução de consumo em percentual comparado com o valor de referência, enquanto que valores negativos caracterizam situações em que os consumos foram extrapolados, revelando que Oslo atingiu desempenhos ligeiramente melhores que Munique.

LISBOA	PAE			MUNIQUE	PAE			OSLO	PAE		
	30%	50%	80%		30%	50%	80%		30%	50%	80%
VS	-39.71%	-48.96%	-55.50%	VS	15.65%	7.58%	-1.05%	VS	16.14%	10.58%	3.41%
VD	-38.41%	-48.77%	-57.47%	VD	21.37%	13.68%	2.73%	VD	20.58%	15.79%	7.82%
ST10	-11.98%	-18.54%	-25.49%	ST10	14.40%	11.32%	6.34%	ST10	14.83%	11.08%	6.82%
ST04	7.90%	12.12%	17.40%	ST04	10.54%	7.26%	3.97%	ST04	11.00%	7.20%	3.37%

Tabela 5.1: Tabela comparativa da redução de consumo energético entre as soluções construtivas e o cenário de referência

Para analisarmos o potencial de geração fotovoltaica dos cenários ST10 e ST04, a quantidade de energia convertida foi registrada para cada solução.

A Figura 5.8 demonstra o comparativo entre a geração fotovoltaica do vidro fotovoltaico para as soluções construtivas ST10 e ST04 revelando que em todas as cidades analisadas houve a tendência de uma maior geração de energia para o vidro com menor transparência.

A geração mensal de energia por unidade de área com maior magnitude foi registrada em Lisboa com 6.15 e 4.32 kWh/m²/mês, para os cenários ST04 e ST10 respectivamente, enquanto que em Oslo, a geração mensal no mesmo período foi aproximadamente três vezes menor, com valores de 2.29 kWh/m²/mês no cenário ST04 e 1.61 kWh/m²/mês para o vidro semitransparente com 10% de transmitância.

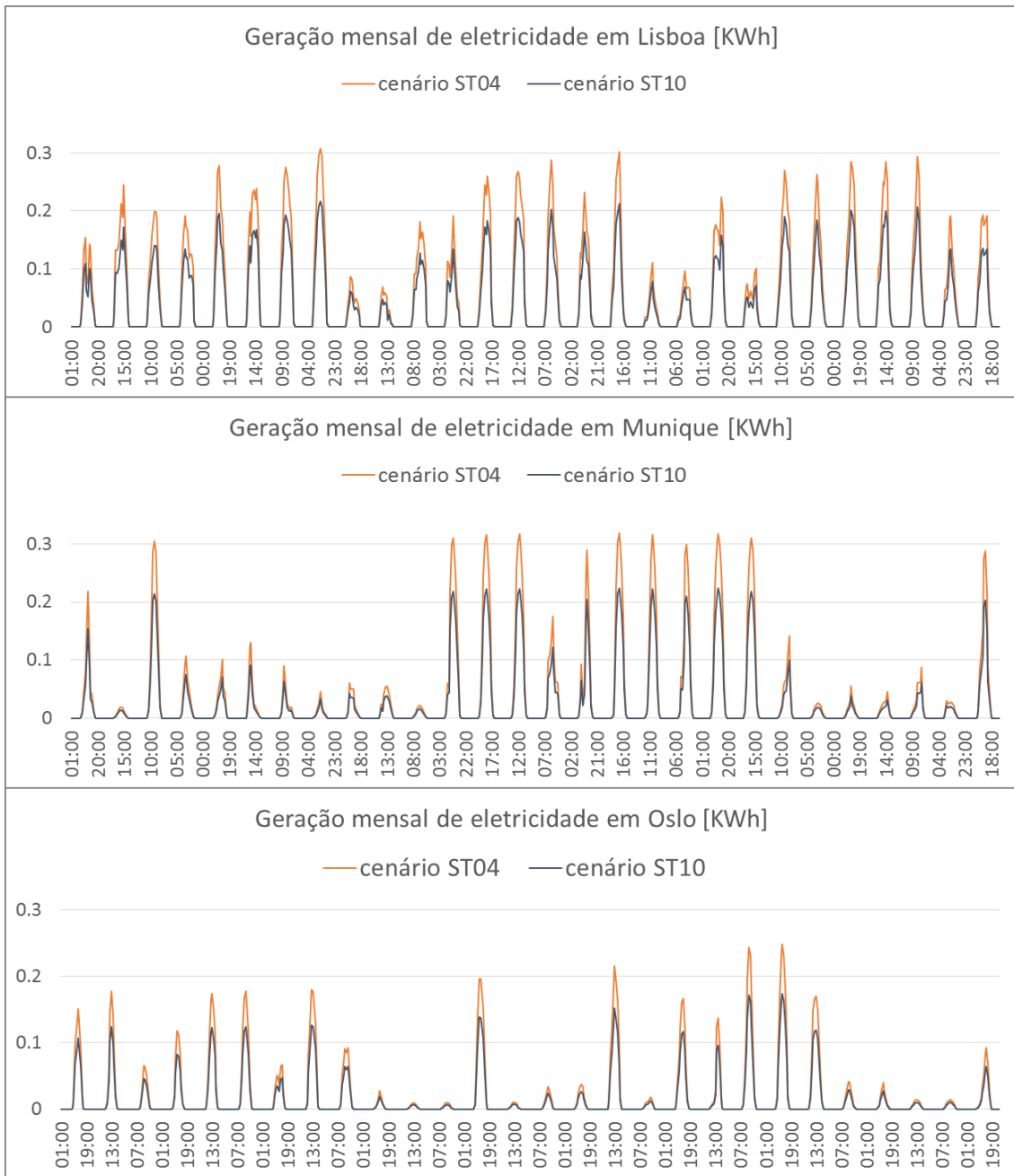


Figura 5.8: Comparação entre a geração fotovoltaica do vidro ST10 e ST04 para PAE 50%

5.2. Apoio Multicritério à Decisão para determinação da melhor solução construtiva

Para além da análise dos resultados apresentados anteriormente, esta secção visa implementar uma metodologia de Apoio Multicritério à Decisão para a escolha dos melhores cenários em cada uma das cidades estudadas.

Existem diversos métodos que propiciam a análise das alternativas sob abordagens distintas ao problema com objetivo de incorporar valor ao julgamento do decisor. Para este estudo foi adotada a abordagem de sobreclassificação através do método ELECTRE I (*ELimination Et Choix Traduisant la Réalité*) o qual se baseia na comparação parida das alternativas para a determinação da relação de prevalência entre elas, dedicando o resultado final para a escolha da melhor alternativa (Dias, 2000).

Diante da confrontação de pares de alternativas (a_x, a_y) identifica-se a relação de prevalência de a_x sobre a_y representado por, $a_x \mathbf{S} a_y$ e que segundo Dias (2000) pode resultar em quatro situações distintas: (i) a_x é preferível à a_y representado por $a_x \mathbf{P} a_y$; (ii) a_y é preferível à a_x representado por $a_y \mathbf{P} a_x$; (iii) ambas alternativas são indiferentes (\mathbf{I}); ou (iiii) ambas alternativas são incomparáveis (\mathbf{R}).

Para se encontrar a relação de dominância entre as alternativas, são utilizados dois índices, o de concordância ($\mathbf{C}_{(a,b)}$) e do de discordância ($\mathbf{D}_{(a,b)}$) expressos por:

$$C_{(a,b)} = \frac{\sum_{j:\Delta_j(a,b)\geq 0} K_j}{\sum_{j=1}^n K_j} \geq C$$

$$D_{(a,b)} = -\Delta_j(a,b) \leq V_j$$

Equação 5.1: Índices de concordância e discordância

Onde,

- $\Delta_j(a,b)$ é a vantagem de a sobre b no critério g_j ;
- K_j é o peso do critério g_j , sendo o somatório dos pesos igual a um;
- $C_{(a,b)}$ é o índice de concordância;
- V_j é o limiar de veto de g_j ;

A relação de prevalência é determinada pelo limiar de concordância (expresso por λ) onde a alternativa a_x é preferível à a_y se o índice de concordância for maior ou igual ao limiar, ou seja, se $C \geq \lambda$ (Siqueira & Filho, 2011).

Para o presente estudo foram analisados, para cada cidade, os quatro cenários com as diferentes soluções construtivas (VS, VD, ST10 e ST04) aplicadas nos três percentuais de abertura do envidraçado, com base em quatro critérios definidos pelo autor.

O consumo global de cada cenário recebeu um peso maior (0.5) por incorporar a componente de geração fotovoltaica no balanço energético, sendo mais relevante para a análise de forma holística, nomeado de critério G1. Por outro lado, o consumo de arrefecimento (G2) por representar menor importância durante a estação de inverno, foi atribuído com o peso reduzido (0.15).

Por fim, para o consumo de aquecimento (G3) atribuímos um peso de 0.2 e para a temperatura média da cavidade (G4) 0.15 sendo este último o único dos critérios a ser maximizado, ou seja, a alternativa é melhor quando possui valores maiores. Em relação ao limiar de concordância, assumimos que para uma solução construtiva ser melhor que outra, deve prevalecer em dois critérios no mínimo, sendo assim atribuído para λ o valor de 0.65 o que propicia maior robustez na determinação de prevalência.

O limiar de discordância consiste nos valores dos consumos do cenário de referência, onde há o veto se o consumo de uma alternativa ultrapassa o consumo de referência. No entanto, para que houvesse a comparação entre as soluções construtivas de uma forma homogênea, não consideramos nenhum valor para o veto.

Apresentamos a seguir os resultados da aplicação do método ELECTRE 1 para a cidade de Oslo, estando os resultados para Lisboa e Munique inseridos no ANEXO B deste estudo. A Tabela 5.2 caracteriza-se pela tabela de desempenho de cada critério.

OSLO	TABELA DE DESEMPENHO DOS CRITÉRIOS			
	G1 ↓	G2 ↓	G3 ↓	G4 ↑
	Consumo Global [KWh/m ²]	Consumo Arrefecimento [KWh]	Consumo Aquecimento [KWh]	Temp. média da cavidade superior [°C]
PAE 30%				
VS	73,87	39	1000	13,90
VD	71,15	43	944	14,95
ST10	74,71	4	1071	13,00
ST04	77,29	0	1133	12,60
<i>peso (Kj)</i>	0,5	0,15	0,2	0,15
PAE 50%				
VS	77,58	77	1035	12,80
VD	74,09	93	951	14,30
ST10	77,23	12	1123	11,90
ST04	80,03	0	1202	11,40
<i>peso (Kj)</i>	0,5	0,15	0,2	0,15
PAE 80%				
VS	82,96	133	1084	10,70
VD	79,57	177	974	13,40
ST10	80,31	33	1178	10,90
ST04	82,99	0	1282	10,30
<i>peso (Kj)</i>	0,5	0,15	0,2	0,15

Tabela 5.2: Tabela de desempenho dos critérios avaliados: Oslo

As Tabelas 5.3, 5.4 e 5.5 demonstram as relações de prevalência resultantes do confronto entre todos os cenários respondendo à questão se o cenário a_x S a_y (é pelo menos tão bom quanto) concluindo a primeira etapa do método.

RELAÇÕES DE PREVALÊNCIA ENTRE OS CENÁRIOS: OSLO - PAE 30%				
[limiar de concordância = $\lambda = 0,65$]				
cenários	VS	VD	ST10	ST04
VS	-	VS S VD? sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO	VS S ST10? sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM	VS S ST04? sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM
VD	VD S VS? sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM	-	VD S ST10? sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM	VD S ST04? sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM
ST10	ST10 S VS? sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO	ST10 S VD? sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO	-	ST10 S ST04? sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM
ST04	ST04 S VS? sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO	ST04 S VD? sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO	ST04 S ST10? sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO	-

Tabela 5.3: Matriz de prevalência dos critérios avaliados: Oslo - PAE 30%

RELAÇÕES DE PREVALÊNCIA ENTRE OS CENÁRIOS: OSLO - PAE 50%				
[limiar de concordância = $\lambda = 0,65$]				
cenários	VS	VD	ST10	ST04
VS	-	VS S VD? sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO	VS S ST10? sim no(s) critério(s): G3 e G4 concordância = C = 0,2+0,15 Se C < λ NÃO	VS S ST04? sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM
VD	VD S VS? sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM	-	VD S ST10? sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM	VD S ST04? sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM
ST10	ST10 S VS? sim no(s) critério(s): G1 e G2 concordância = C = 0,5+0,15 Se C \geq λ SIM	ST10 S VD? sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO	-	ST10 S ST04? sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM
ST04	ST04 S VS? sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO	ST04 S VD? sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO	ST04 S ST10? sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO	-

Tabela 5.4: Matriz de prevalência dos critérios avaliados: Oslo - PAE 50%

RELAÇÕES DE PREVALÊNCIA ENTRE OS CENÁRIOS: OSLO - PAE 80%				
[limiar de concordância = $\lambda = 0,65$]				
cenários	VS	VD	ST10	ST04
VS	-	VS S VD? sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO	VS S ST10? sim no(s) critério(s): G3 concordância = C = 0,2 Se C < λ NÃO	VS S ST04? sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM
VD	VD S VS? sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM	-	VD S ST10? sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM	VD S ST04? sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM
ST10	ST10 S VS? sim no(s) critério(s): G1, G2 e G4 concordância = C = 0,5+0,15+0,15 Se C \geq λ SIM	ST10 S VD? sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO	-	ST10 S ST04? sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM
ST04	ST04 S VS? sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO	ST04 S VD? sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO	ST04 S ST10? sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO	-

Tabela 5.5: Matriz de prevalência dos critérios avaliados: Oslo - PAE 80%

A segunda etapa do processo foi explorar a relação de prevalência com o objetivo de restringir ao mínimo o conjunto de soluções construtivas para que a escolha da melhor fosse facilitada. A Tabela 5.6 apresenta a comparação entre os cenários, demonstrando a robustez dos resultados quando há convergência para a mesma conclusão encontrada no subcapítulo 5.1. Para latitudes distintas e diferentes níveis de PAE, a solução mais atraente variou do vidro duplo convencional com caixa de ar (na maioria dos casos), até as soluções que incorporam vidro STFV com transmitância visível de 10% e 0.4%.

Tabela comparativa das soluções construtivas: OSLO				
PAE	Relação de prevalência		Melhor solução	Pior solução
30%	VS	ST10 e ST04	<u>Vidro Duplo</u>	Fotovoltaico ST04
	VD	VS, ST10 e ST04		
	ST10	ST04		
	ST04	Nenhum		
50%	VS	ST04	<u>Vidro Duplo</u>	Fotovoltaico ST04
	VD	VS, ST10 e ST04		
	ST10	ST04		
	ST04	Nenhum		
80%	VS	ST04	<u>Vidro Duplo</u>	Fotovoltaico ST04
	VD	VS, ST10 e ST04		
	ST10	ST04		
	ST04	Nenhum		
Tabela comparativa das soluções construtivas: LISBOA				
PAE	Relação de prevalência		Melhor solução	Pior solução
30%	VS	Nenhum	<u>Fotovoltaico ST04</u>	Vidro Simples
	VD	VS		
	ST10	VS e VD		
	ST04	VS, VD e ST10		
50%	VS	Nenhum	<u>Fotovoltaico ST04</u>	Vidro Simples
	VD	VS		
	ST10	VS e VD		
	ST04	VS, VD e ST10		
80%	VS	VD	<u>Fotovoltaico ST04</u>	Vidro Duplo
	VD	Nenhum		
	ST10	VS e VD		
	ST04	VS, VD e ST10		
Tabela comparativa das soluções construtivas: MUNIQUE				
PAE	Relação de prevalência		Melhor solução	Pior solução
30%	VS	ST10 e ST04	<u>Vidro Duplo</u>	Fotovoltaico ST04
	VD	VS, ST10 e ST04		
	ST10	ST04		
	ST04	Nenhum		
50%	VS	ST04	<u>Vidro Duplo</u>	Fotovoltaico ST04
	VD	VS, ST10 e ST04		
	ST10	VS, ST04		
	ST04	Nenhum		
80%	VS	Nenhum	<u>Fotovoltaico ST10</u>	Vidro Simples
	VD	VS		
	ST10	VS, VD e ST04		
	ST04	VS e VD		

Tabela 5.6: Tabela resultante da análise multicritério nas três cidades analisadas

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em relação ao modelo de simulação energética elaborado pelo Energy Plus com suporte de outras ferramentas, de modo a analisar o comportamento do sistema de aquecimento passivo solar, a campanha experimental nos permitiu verificar que o erro relativo médio foi de 7% em relação à temperatura das zonas térmicas um e dois, e de 14% para as temperaturas da cavidade.

Para todos os volumes de controle simulados, o erro relativo máximo nos modelos foi de aproximadamente 30% registrados nos períodos noturnos onde as perdas térmicas ocorridas no inverno foram sobrestimadas na simulação.

Considerando a média das diferenças de temperatura (erro absoluto) entre os dados coletados e simulados, estas estiveram à volta de 3 °C no interior das cavidades e de 1.3 °C no interior das zonas habitáveis.

Neste sentido, o modelo de simulação se encontra no intervalo de precisão observado na revisão bibliográfica e ratificado por outros autores o que viabiliza a utilização em outras análises similares.

Em referência ao estudo de caso abordado no capítulo 5, concluiu-se que:

Em geral, praticamente todos os sistemas reduziram as cargas de aquecimento e aumentaram o arrefecimento e a influência de parâmetros como as condições climáticas foi a mais significativa.

Em médias e altas latitudes o reduzido fator solar da solução construtiva ST04 contribuiu para que o consumo com cargas de arrefecimento fosse similar ao cenário de referência. Da mesma forma, este aspecto resultou numa redução de consumo de aquecimento menos representativa do que em outras soluções, e como consequência, o benefício do cenário ST04 não foi muito relevante, se comparado ao cenário de referência.

Em baixas latitudes, embora tenha havido redução de consumo de aquecimento, a maior radiação solar registrada em Lisboa conduz a um aumento do consumo de arrefecimento para todos os sistemas, inviabilizando qualquer benefício, uma vez que a posição de abertura das grelhas permaneceu inalterada, o que prejudicou o desempenho do sistema.

Cabe ressaltar que o menor fator solar dos cenários ST10 e ST04 tornaram estas soluções mais favoráveis que VS e VD. Ainda assim, somente a solução ST04 esteve abaixo dos consumos de referência em função da geração de energia elétrica.

Analisando os resultados, verifica-se uma tendência marcante para todas as latitudes estudadas. O desempenho dos sistemas de aquecimento passivo piora conforme se aumenta o percentual de abertura do envidraçado.

Quando analisamos de forma isolada as duas soluções construtivas que adotaram módulos fotovoltaicos semitransparentes, concluímos que as propriedades ópticas influenciaram o desempenho de forma mais significativa do que outros parâmetros, até mesmo a geração de energia.

Em médias e altas latitudes, o vidro semitransparente com transmitância de 10% (ST10) obteve melhores resultados do que o vidro quase opaco (ST04), em todos os PAE estudados.

Por outro lado, em baixa latitude e para todos os PAE, a característica de maior proteção solar da solução ST04 prevaleceu sobre todos os sistemas, inclusive ST10.

Neste sentido, concluímos que a transmitância visível ideal de módulos STFV em sistemas configurados para a estação de aquecimento dominante, instalados entre médias e altas latitudes não deve ser menor que 10% devido à necessidade de aumentar os ganhos solares passivos. Ao contrário, os resultados apresentados no capítulo 5 evidenciam que, para sistemas em baixas latitudes e sem alteração da configuração das grelhas (ex.: Lisboa), se a transmitância visível do módulo FV for maior que 5% não há benefício em termos de redução de consumos.

A seguir apresentamos algumas conclusões mais relevantes resultantes da investigação implementada por meio desta dissertação:

- Para médias e altas latitudes, o benefício do sistema foi capaz de atingir reduções percentuais de 11 à 21%, 7 à 16% e 3 à 7% com fachadas compostas por PAE de 30%, 50% e 80% respectivamente;
- Para baixas latitudes, considerando as soluções construtivas estudadas, o benefício do sistema está diretamente associado ao modo de operação das grelhas, e pela atuação ativa dos ocupantes no ajuste do sistema.

- A contribuição da geração de energia fotovoltaica foi fundamental para resultados melhores que o cenário de referência em alguns dos casos de estudo (sobretudo para ST04), no entanto, não representou o benefício mais marcante do sistema uma vez que a magnitude deste benefício foi muito tênue se comparada com os valores de referência nas três cidades analisadas. Portanto, os resultados não foram capazes de justificar a incorporação de células fotovoltaicas ao sistema de aquecimento passivo, sem que uma análise de viabilidade econômica seja agregada na avaliação global;

- O parâmetro de maior influência na redução de consumos foi o desempenho térmico e óptico do sistema, comprovando que devido à suas propriedades térmicas (" U " e " g "), bem como ópticas (T_{sol} e T_{vis}), o desempenho do módulo FV nem sempre está ligado com a eficiência energética em função de ganhos térmicos associados;

- Para climas dominantes de inverno, o valor do coeficiente de transmissão térmica caracteriza-se como o parâmetro de maior influência no desempenho energético total, face às elevadas perdas térmicas registradas nas soluções construtivas com uma única camada de vidro. Isto nos leva a concluir que módulos com camada única de vidro não oferecem o isolamento necessário para o ideal balanço térmico do sistema, provocando maiores consumos de aquecimento para compensar as perdas térmicas.

- Os módulos STFV apresentaram menor contribuição para o sistema passivo em função do seu reduzido fator solar, se comparado aos cenários VS e VD.

6.1. Limitações do estudo

A seguir são descritas as limitações encontradas para realização deste estudo:

- O estudo não implementou análise de viabilidade econômica para incorporação do vidro fotovoltaico semitransparente à envolvente;
- Ausência de dados espectrais reais das células fotovoltaicas e similaridade assumida para os valores dos coeficientes de temperatura das células, exigidas no modelo de simulação fotovoltaica Sandia;
- Ausência de piranômetro de radiação difusa na estação meteorológica para registrar a componente difusa da radiação, exigindo interpolações.

6.2. Sugestão para futuros desenvolvimentos do trabalho

Como sugestão para trabalhos futuros envolvendo o comportamento de sistemas de aquecimento passivo solar, destacamos:

- Incorporar a componente da viabilidade econômica da tecnologia fotovoltaica na análise de desempenho global do sistema;
- Ampliar a abrangência do estudo de caso para a estação de arrefecimento, e neste caso, considerando a influência da variação da orientação da fachada em que o sistema foi instalado;
- Avaliar o sistema considerando a solução construtiva de vidro duplo com a célula fotovoltaica instalada como a camada mais exterior da envolvente.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abalos, I. (2007). *Bartleby, el arquitecto*.
- Abdullah, A., Cross, B., & Will, P. (2014). *Whole Building Energy Analysis: A Comparative Study of Different Simulation Tools and Applications in Architectural Design*, 1–12.
- Amado, M. P., Pinto, A. R., Alcaface, A. M., & Ramalheite, I. (2015). *Construção Sustentável, Conceito e Prática*. (Caleidoscópio - Edição e Artes Gráficas, Ed.).
- ASHRAE. (2001). *ASHRAE Fundamentals Handbook* (Vol. 1).
- Athienitis, A., Torcellini, P., & Hirsch, A. (2010). *Design, optimization, and modelling issues of net-zero energy solar buildings*.
- Attia, S., & Neuve, L. La. (2010). *Building Performance Simulation Tools: Selection Criteria and User Survey*.
- Baba, A., Mahdjoubi, L., Olomolaiye, P., & Booth, C. (2013). *State-of-the-art on buildings performance energy simulations tools for architects to deliver low impact building (LIB) in the UK*, 2(3), 1867–1884.
- Bagher, A. M., Mahmoud, M., Vahid, A., & Mohsen, M. (2015). *Types of Solar Cells and Application Types of Solar Cells and Application*. <http://doi.org/10.11648/j.ajop.20150305.17>
- Bahar, Y. N., Pere, C., Landrieu, J., & Nicolle, C. (2013). *A Thermal Simulation Tool for Building and Its Interoperability through the Building Information Modelling (BIM) Platform*, 380–398. <http://doi.org/10.3390/buildings3020380>
- Barbosa, S. A., Tiburcio, T. M. de S., Carlo, J. C., & Guimarães, I. B. B. (2013). *Método de utilização do programa Energyplus para verificação de desempenho térmico de ambientes com fachadas duplas*. *Ambiente Construído*, 13(4), 121–134.
- Barker, G., & Norton, P. (2003). *Predicting long-term performance of photovoltaic arrays using short-term test data and an annual simulation tool*. *Proceedings of the American Solar Energy Society Conference*, (November), 407–416. Retrieved from <http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/33601.pdf>
- Campos, N. A. (1996). *Introdução à Análise de Dados*.
- Carlos, J., Corvacho, H., Silva, P. D., & Castro-Gomes, J. P. (2010). *Real climate experimental study of two double window systems with preheating of ventilation air*. *Energy and Buildings*, 42(6), 928–934.

<http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.01.003>

- Carlos, J. S., Castro-gomes, P. D. S. J. P., & Corvacho, H. (2010). *Pré-aquecimento do ar de ventilação : Recomendações para estratégias bioclimáticas*, 45–56.
- Carlos, J. S., Corvacho, H., Silva, P. D., & Castro-Gomes, J. P. (2012). *Heat recovery versus solar collection in a ventilated double window*. *Applied Thermal Engineering*, 37, 258–266. <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.11.027>
- Cavalcanti, F. A. de M. S. (2013). *Paredes trombe no brasil: análise do potencial de utilização para aquecimento e refrigeração*.
- Chae, Y. T., Kim, J., Park, H., & Shin, B. (2014). *Building energy performance evaluation of building integrated photovoltaic (BIPV) window with semi-transparent solar cells*. *Applied Energy*, 129, 217–227. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.106>
- Chivelet, N. M., & Solla, I. F. (2010). *Técnicas de vedação fotovoltaica na arquitetura*. (A. Salvaterra, Ed.), Porto Alegre.
- Crawley, D. B. (1998). *Which weather data should you use for energy simulations of commercial buildings?* *ASHRAE Transactions*, 104(JUNE 1998), 498–515. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0032317890&partnerID=40&md5=5b3018ffa4ca2c180aa1764433f9c6b7>
- Crawley, D. B., Hand, J. W., & Griffith, B. T. (2008). *Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs*. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.027>
- Crawley, D. B., Hand, J. W., Kummert, M., & Griffith, B. T. (2005). *Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs*.
- Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W. F., Huang, Y. J., Pedersen, C. O., Glazer, J. (2001). *EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program*. *Energy and Buildings*, 33(4), 319–331. [http://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00114-6](http://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6)
- Dabaieh, M., & Elbably, A. (2015). *Ventilated Trombe wall as a passive solar heating and cooling retrofitting approach; a low-tech design for off-grid settlements in semi-arid climates*. *Solar Energy*, 122, 820–833. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2015.10.005>
- De Gracia, A., Castell, A., Navarro, L., Oró, E., & Cabeza, L. F. (2013). *Numerical modelling of ventilated facades: A review*. *Renewable and Sustainable Energy*

- Reviews, 22, 539–549. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.029>.
- Delisle, V. (2008). *Modelling and Performance Study of a Building Integrated Photovoltaic Façade in Northern Canadian Climate*. Em: Eurosun, Lisboa, Portugal.
- Diário da República, (2013). Decreto-Lei nº 118/2013 de 20 de agosto, *Sistema de Certificação Energética dos Edifícios*, Nº 159 - 20 de agosto de 2013.
- Dias, L. M. C. (2000). *A informação imprecisa e os modelos multicritério de apoio à decisão*.
- Dickson, A. (2004). *Modelling Double-Skin Facades*.
- Didoné, E. L. e Wagner, A. (2013). *Semitransparent PV windows: A study for office buildings in Brazil*. Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Building Science Group, Alemanha.
- Didoné, E. L., Wagner, A., & Pereira, F. O. R. (2014). *Estratégias para edifícios de escritórios energia zero no Brasil com ênfase em BIPV*. *Ambiente Construído*, 14(3), 27–42. <http://doi.org/10.1590/S1678-86212014000300003>
- DOE. (2015). *Energyplus version 8.5 Documentation: Engineering Reference*. Bigladder Software.
- DOE. (2016a). *EnergyPlus 8.5.0. U.S. Department of Energy, Washington DC, USA*.
- DOE. (2016b). *Input Output Reference> The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output*.
- Dornelles, K. A., & Roriz, M. (2007). *Métodos alternativos para identificar a absorvância solar de superfícies opacas*. *Ambiente Construído*, 7(3), 109–127.
- Dubois, M.-C., & Horvat, M. (2010). *State-of-the-Art of Digital Tools Used by Architects for Solar Design*.
- Ellis, P. G. (2003). *Development and Validation of the Unvented Trombe Wall Model in Energyplus*. Retrieved from <http://infohouse.p2ric.org/ref/36/35809.pdf>
- EN 410 (2000). *Vidro na Construção: Determinação de características luminosas e solares dos envidraçados*.
- Faggembauu, D., Costa, M., Soria, M., & Oliva, A. (2003). *Numerical analysis of the thermal behaviour of glazed ventilated facades in Mediterranean climates. Part II: Applications and analysis of results*. *Solar Energy*, 75(3), 229–239. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2003.07.014>
- Fernandes, J., Mateus, R., & Bragança, L. (2012). *Princípios De Sustentabilidade Na*

- Arquitetura Vernacular Em Portugal*. Congresso de Construcao 2012, 1–12.
- Fonseca, P. G. (2015). *Avaliação do potencial solar e análise de medidas de eficiência energética num edifício universitário*.
- Frontini, F., Verbene, G., Bonomo, P., Chatzipanagi, A., Van den Donker, M., Sinapis, K., & Folkerts, W. (2015). *BIPV Product Overview for Solar Façades and Roofs*.
- Garde, F., Lenoir, a, David, M., & Ottenwelter, E. (2011). *Towards Net Zero Energy Buildings in Hot Climates : Part 1 , New Tools and Methods*. ASHRAE Winter Conference Las Vegas, 117, 1–8.
- Gil, A. C. (2002). *Como elaborar Projetos de pesquisa*. (E. Atlas, Ed.).
- Gloriant, F., Tittlein, P., Joulin, A., & Lassue, S. (2015). *Study of the Performances of A Supply-Air Window for Air Renewal Pre-Heating*. Energy Procedia, 78, 525–530. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.727>
- Gonçalves, H., & Cabrito, P. (2005). *Edifício Solar XXI: : Um edifício energeticamente eficiente em Portugal*.
- Gonçalves, H., & Graça, J. M. (2004). *Conceitos bioclimáticos para os edifícios em Portugal*. <http://doi.org/10.1590/S0034-71672006000500016>
- Gonçalves, J. C. S., & Duarte, D. H. S. (2006). *Arquitetura sustentável: uma integração entre ambiente, projeto e tecnologia em experiências de pesquisa, prática e ensino*.
- Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., & Dunlop, D. (2014). *Solar Cells efficiency tables (version 43)*. Prog. Photovolt: Res. Appl., 15(version 43), 659–676. <http://doi.org/10.1002/pip>
- Gupta, A., Cemesova, A., Hopfe, C. J., Rezgui, Y., & Sweet, T. (2014). *A conceptual framework to support solar PV simulation using an open-BIM data exchange standard*. Automation in Construction, 37, 166–181. <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.005>
- Heiselberg, P., Kalyanova, O., Mingzhen, L., Zhang, C., Mendez, J., Cabral, J., & Brito, N. (2013). *Climawin - Technical Summary Report*.
- Hensen, J., Bartak, M., & Drkal, F. (2002). *Modelling and Simulation of a Double-Skin Façade System*.
- Horvat, M., & Dubois, M. (2012). *Tools and methods for solar design – an overview of IEA SHC Task 41 , Subtask B, 30, 1120–1130*. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.125>
- IBPSA. (2016). *Building Energy Software Tools Directory*. Retrieved March 22, 2016,

- from <http://www.buildingenergysoftwaretools.com/about-us>
- IEA. (2015). *Energy and climate change*. World Energy Outlook Special Report, 1–200. <http://doi.org/10.1038/479267b>
- Jie, J., Hua, Y., Gang, P., & Jianping, L. (2007). *Study of PV-Trombe Wall Installed in a Fenestrated Room with Heat Storage*. Applied Thermal Engineering, 27 Pp 1507-1515.
- Kalyanova, O., & Heiselberg, P. (2009). *Empirical Validation of Building Simulation Software : Modelling of Double Facades Final Report*.
- Kang, J-G, Kim, J-H. (2013). *Performance evaluation of DSC windows for buildings*. Int J Photoenergy
- Kapsis, K., & Athienitis, A. K. (2015). *A study of the potential benefits of semi-transparent photovoltaics in commercial buildings*. Solar Energy, 115, 120–132. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2015.02.016>
- Kim, D. W., & Park, C. S. (2011). *Difficulties and limitations in performance simulation of a double skin façade with EnergyPlus*. Energy and Buildings, 43(12), 3635–3645. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.038>
- King, D. L., Boyson, W. E., & Kratochvil, J. A. (2004). *Photovoltaic Array Performance Model*. Sandia Report No. 2004-3535, 8, 1–19. <http://doi.org/10.2172/919131>
- Lamberts, R., Dutra, L., & Pereira, F. O. R. (2014). *Eficiência Energética na Arquitetura*.
- Lawrence Berkeley National Laboratory. (1998). *THERM 2.0: for analyzing Two-Dimensional Heat Transfer Through Buildings Products*.
- LBNL. (2016). *International Glazing Database - IGDB*.
- Leal, V. M. S., Maldonado, E., Erell, E., & Etzion, Y. (2003). *Modelling a reversible ventilated window for simulation within Esp-r. The solvent case*.
- Liao, W., & Xu, S. (2015). *Energy performance comparison among see-through amorphous-silicon PV (photovoltaic) glazings and traditional glazings under different architectural conditions in China*. Energy, 83, 267–275. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.023>
- Loonen, R. C. G. M., Favoino, F., Hensen, J. L. M., Overend, M., Loonen, R. C. G. M., Favoino, F., Overend, M. (2016). *Review of current status , requirements and opportunities for building performance simulation of adaptive facades*,

- 1493(March). <http://doi.org/10.1080/19401493.2016.1152303>
- Loutzenhiser, P. G., Manz, H., Moosberger, S., & Maxwell, G. M. (2009). *An empirical validation of window solar gain models and the associated interactions*. *International Journal of Thermal Sciences*, 48(1), 85–95. <http://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2008.01.011>
- Lu, L., & Law, K. M. (2013). *Overall energy performance of semi-transparent single-glazed photovoltaic (PV) window for a typical office in Hong Kong*. *Renewable Energy*, 49, 250–254. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.021>
- Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F. G., Sabio-Ortega, A., & García-Cruz, A. (2015). *Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 736–755. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.095>
- Mateus, N. M., Pinto, A., & Da Graça, G. C. (2014). *Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell*. *Energy and Buildings*, 75, 511–522. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.043>
- Mendes, J. N. (2010). *A política energética no contexto das dinâmicas globais*. *Relatórios Internacionais*, (28), 133–138.
- Mercaldo, L. V., Addonizio, M. L., Noce, M. Della, Veneri, P. D., Scognamiglio, A., & Privato, C. (2009). *Thin film silicon photovoltaics: Architectural perspectives and technological issues*. *Applied Energy*, 86(10), 1836–1844. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.11.034>
- Miyazaki, T., Akisawa, A., & Kashiwagi, T. (2005). *Energy savings of office buildings by the use of semi-transparent solar cells for windows*. *Renewable Energy*, 30(3), 281–304. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2004.05.010>
- Molling, L. (2014). *Modelling dynamic building envelope*. *Bachelor Thesis submitted at Leopold-Franzens-Universität – Innsbruck Faculty of Engineering Science*.
- Motuzienė, V., & Bielskus, J. (2014). *Assessment of Overall Performance of Building Integrated Photovoltaics*. The 9th International Conference “ENVIRONMENTAL ENGINEERING”, 22-23 May 2014, Vilnius, Lithuania., 275(May), 9. <http://doi.org/10.3846/enviro.2014.275>
- Nations, U. (2014). *World Urbanization Prospects, the 2014 Revision*. <http://doi.org/10.4054/DemRes.2005.12.9>
- Ng, P. K., Mithraratne, N., & Kua, H. W. (2013). *Energy analysis of semi-transparent*

- BIPV in Singapore buildings*. *Energy and Buildings*, 66, 274–281.
<http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.029>
- NREL. (2016). *Best Research-Cell Efficiencies*. Retrieved March 10, 2016, from
http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg
- Olivieri, L., Caamaño-Martín, E., Moralejo-Vázquez, F. J., Martín-Chivelet, N., Olivieri, F., & Neila-Gonzalez, F. J. (2014). *Energy saving potential of semi-transparent photovoltaic elements for building integration*. *Energy*, 76, 572–583.
<http://doi.org/10.1016/j.energy.2014.08.054>
- Olivieri, L., Caamaño-Martín, E., Olivieri, F., & Neila, J. (2014). *Integral energy performance characterization of semi-transparent photovoltaic elements for building integration under real operation conditions*. *Energy and Buildings*, 68(PARTA), 280–291. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.035>
- Pal, S. K., Alanne, K., Jokisalo, J., & Siren, K. (2016). *Energy performance and economic viability of advanced window technologies for a new Finnish townhouse concept*. *Applied Energy*, 162, 11–20.
<http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.056>
- Peixeiro, P. M. D. (2009). *Simulação Térmica de uma Fachada de Dupla Pele com Ventilação Natural*. ISEL, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Peng, J., Curcija, D. C., Lu, L., Selkowitz, S. E., Yang, H., & Mitchell, R. (2015). *Developing a method and simulation model for evaluating the overall energy performance of a ventilated semi-transparent photovoltaic double-skin facade*. <http://doi.org/10.1002/pip>
- Peng, J., Curcija, D. C., Lu, L., Selkowitz, S. E., Yang, H., & Zhang, W. (2016). *Numerical investigation of the energy saving potential of a semi-transparent photovoltaic double-skin facade in a cool-summer Mediterranean climate*. *Applied Energy*, 165, 345–356. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.074>
- Peng, J., Lu, L., Yang, H., & Ma, T. (2015). *Comparative study of the thermal and power performances of a semi-transparent photovoltaic facade under different ventilation modes*. *Applied Energy*, 138, 572–583.
<http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.003>
- Pereira, H. A. da C., Melo, A. P., Sorgato, M., Versage, R., Matos, M., & Lamberts, R. (2013). *Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa EnergyPlus*.

- Physibel. (2016). *BISTRA: 2D transient heat transfer*. Retrieved July 15, 2016, from <http://www.physibel.be/bistra.htm>
- Probst, M. C. M., Roecker, C., Scognamiglio, A., Frontini, F., Farkas, K., Maturi, L., & Zanetti, I. (2012). *Solar energy systems in architecture: integration criteria and guidelines*.
- REN21. (2015). *Key Findings. Global Status Report*, 1–33. <http://doi.org/SAIREC>, South Africa International Renewable Energy Conference
- Rubin, M., von Rottkay, K., & Powles, R. (1988). *Window optics*. *Science*, 62(3), 149–161.
- Sá, A. C. B. (2011). *Parede de Trombe: Análise experimental e simulação de desempenho térmico*, (January), 178.
- Sánchez, E., & Izard, J. (2015). *Performance of photovoltaics in non-optimal orientations: An experimental study*. *Energy and Buildings*, 87, 211–219. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.035>
- Santana, M. V. (2006). *Influência de parâmetros construtivos no consumo de energia de edifícios de escritório localizados em Florianópolis - SC*.
- Santos, C. A. P., & Matias, L. (2006). *Coefficientes de transmissão termica de elementos da envolvente dos edifícios*.
- Schaeffer, G. J. (2015). *Energy sector in transformation, trends and prospects*. *Procedia Computer Science*, 52(1), 866–875. <http://doi.org/10.1016/j.procs.2015.05.144>
- Scognamiglio, A., Bordone, S., Grima, J., & Palumbo, M. L. (2011). “Forms of energy”: the way architects envision solar energy. 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, (September), 4527–4530.
- Scognamiglio, A., & Privato, C. (2005). *Starting points for a new cultural vision of BIPV*. 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, (September), 1–5.
- Sdringola, P., Proietti, S., Desideri, U., & Giombini, G. (2014). *Thermo-fluid dynamic modelling and simulation of a bioclimatic solar greenhouse with self-cleaning and photovoltaic glasses*. *Energy and Buildings*, <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.011>
- Simões, N., Simões, I., & Manaia, M. (2015). *Study of solar and Trombe walls in a mediterranean climate , installed in residential buildings*.
- Siqueira, G., & Filho, A. (2011). *Aplicação do Método Electre I para Seleção de Ideias de Inovação*.
- Skandalos, N., & Karamanis, D. (2015). *PV glazing technologies*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 306–322.

- <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.145>
- Solar Energy Laboratory. (2007). *TRNSYS 16: A TRaNsient SYstem Simulation program*, University of Wisconsin, Madison, USA.
- SolarPower Europe. (2014). *Global Market Outlook for Solar Power 2015-2019*.
- Sousa, J. (2012). *Energy Simulation Software for Buildings : Review and Comparison* (No. Information Technology for Energy Applications 2012).
- Trimble Navigation Limited. (2016). *SketchUP 2016*. Retrieved April 4, 2016, from <http://www.sketchup.com/>
- Utama, N. A., Fathoni, A. M., Kristianto, M. A., & McLellan, B. C. (2014). *The End of Fossil Fuel Era: Supply-demand Measures through Energy Efficiency*. *Procedia Environmental Sciences*, 20, 40–45. <http://doi.org/10.1016/j.proenv.2014.03.007>
- Versage, R. (2009). *Ventilação natural e desempenho térmico de edifícios verticais multifamiliares em Campo Grande, MS*. Dissertação de Mestrado.
- Weller, B., Hemmerle, C., Sven, J., & Stefan, U. (2010). *Photovoltaics: Technology, Architecture, Installation*. (L. Steffi, Ed.) (Detail Boo). Munique.
- Winkelmann, F. C. (2001). *Modelling Windows in EnergyPlus*. *Proceedings of Building Simulation 2001*
- Yoon, S., Tak S., Kim, J., Jun, Y., Kang, K., Park, J., (2011). *Application of transparent dye-sensitized solar cells to building integrated photovoltaic systems*. *Build Environ*, 46:1899-904.
- Yun, G. Y., McEvoy, M., & Steemers, K. (2007). *Design and overall energy performance of a ventilated photovoltaic facade*. *Solar Energy*, 81(3), 383–394. <http://doi.org/10.1016/j.solener.2006.06.016>
- Zalewski, L., Lassue, S., Duthoit, B. & Butez, M. (2002). *Study os Solar Walls - validating a Simulation Model*. *Building and Environment* 37 pp 109-121
- Zhou, J., & Chen, Y. (2010). *A review on applying ventilated double-skin facade to buildings in hot-summer and cold-winter zone in China*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(4), 1321–1328. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.017>
- Zófoli, G. R. (2011). *Contribuição termo-energética dos fechamentos transparentes em edifícios comerciais climatizados artificialmente em Santa Maria-RS*.
- Zomer, C. D. (2014). *Método de estimativa da influência do sombreamento parcial na geração energética de sistemas solares fotovoltaicos integrados em edificações*. Tese de Doutorado: Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina.

ANEXO A

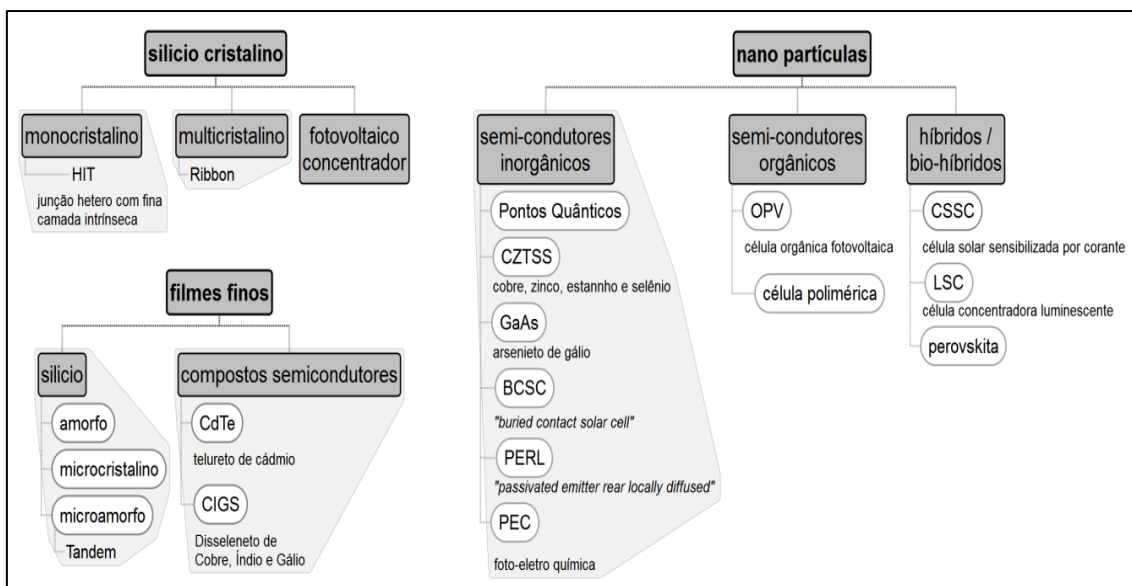


Figura 7.1: Estado da Arte das Tecnologias Fotovoltaicas [Chivelet & Solla (2010), Weller *et al.* (2010), Bagher *et al.* (2015), NREL (2016), Frontini & Verbene *et al.* (2015) e Zomer (2014)]

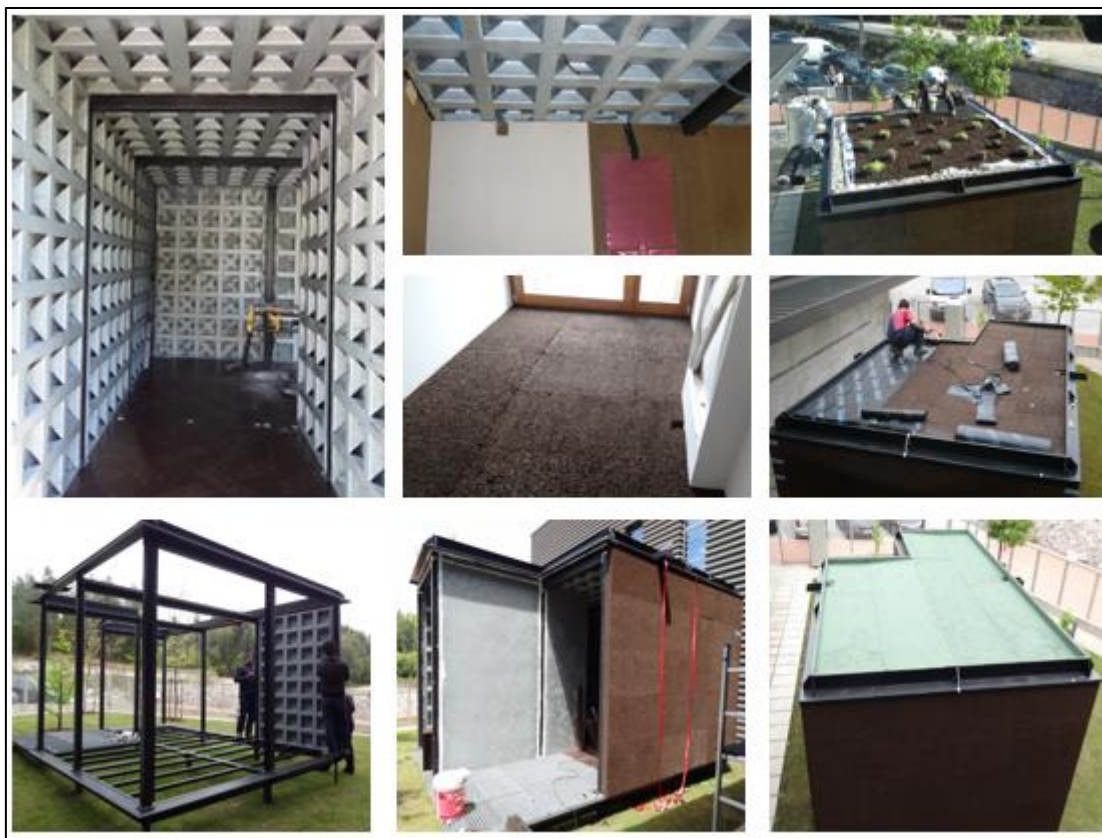


Figura 7.2: Imagens da fase de construção da célula teste


 LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL		Aplicação LNEC Ventilação REH e RECS		Aplicação desenvolvida por: Armando Pinto, apinto@lneec.pt	
				Ferramenta de cálculo citada no n.º3, do ponto 12.1, do despacho n.º 15793-K/2013.	
Pinto, A. - Aplicação LNEC para Ventilação no âmbito do REH e RECS. Lisboa, LNEC, 2014. v2.0a, 2014-02-12					
1. Enquadramento do edifício					
Tipo de edifício		Habitação existente		Área útil (m ²): 12.0	
Local (município)		COIMBRA		Pd (m): 2.10	
Região		A		N.º de pisos da fração: 1	
Rugosidade		III		Velocidade vento: Defeito REH	
Altitude do local (m)		60		Vento (u10REH: 5.5) (m/s)	
Número de fachadas expostas ao exterior (Nfach)		2 ou mais		Vol (m ³): 25	
Existem edifícios/obstáculos à frente das fachadas?		Sim		T exterior (°C): 9.7	
Altura do edifício (H _{edif}) em m		2.4		Zref (m): 67	
Altura da fração (H _{fra}) em m		2.4		Aem/Au: 0%	
Altura do obstáculo situado em frente (H _{obs}) em m		9		Proteção do edifício: Protegido	
Distância ao obstáculo situado em frente (D _{obs}) em m		6		Zona da fachada: Inferior	
2. Permeabilidade ao ar da envolvente					
Foi medido valor n50		Não			
Para cada Vão (janela/porta) ou grupo de vãos:					
Área dos vãos (m ²)					
Classe de permeabilidade ao ar caix (janelas/portas)					
Permeabilidade ao ar das caixas de estore					
3. Aberturas de admissão de ar na envolvente					
Tem aberturas de admissão de ar na envolvente		Sim			
Tipo de abertura		Fixa ou regulável manualmente		Auto-regulável a 2 Pa Auto-regulável a 10 Pa Auto-regulável a 20 Pa	
Área livre das aberturas fixas (cm ²) / Caudal Nominal aberturas auto-reguláveis (m ³ /h)		0.091		0 0 0	
4. Condutas de ventilação natural, condutas com exaustores/ventax que não obturam o escoamento de ar pela conduta					
Condutas de ventilação natural sem obstruções significativas (por exemplo, consideram-se obstruções significativas exaustores com filtros que anulam escoamento de ar natural para a conduta)		Não		Não Não Não	
Escoamento de ar					
Perda de carga					
Altura da conduta (m)					
Cobertura					
Número de condutas semelhantes					
5. Exaustão ou insuflação por meios mecânicos de funcionamento prolongado					
Existem meios mecânicos (excluindo exaustores ou ventax)		Não			
Escoamento de ar					
Caudal nominal (m ³ /h)					
Conhece Pressão total do ventilador e rendimento					
Pressão total (Pa)					
Rendimento total do ventilador (%)					
Tem sistema de recuperação de calor					
Rendimento da recuperação de calor (%)					
6. Exaustão ou insuflação por meios híbridos de baixa pressão (< 20 Pa)					
Existem meios híbridos		Não			
Escoamento de ar					
Caudal nominal (m ³ /h)					
Conhece Pressão total do ventilador e rendimento					
Pressão total (Pa)					
Rendimento total do ventilador (%)					
7. Verão - Recuperador de calor					
Existe by-pass ao recuperador de calor no verão					
8. Resultados					
8.1 - Balanço de Energia - Edifício					
R _{ph} (h-1) - Aquecimento		0.40		ok	
R _{ph,v} (h-1) - Arrefecimento		0.60			
W _m (kWh)		0.0			
8.2 - Balanço de Energia - Edifício de Referência					
R _{ph,REF} (h-1)		0.40			
8.3 - Caudal mínimo de ventilação					
R _{ph} estimada em condições nominais (h-1)		0.00			
Requisito mínimo de ventilação Edif. Novos (h-1)		0.40			
Critério R _{ph} mínimo		Considerar medidas de			
<small>Nota: No Cálculo de R_{ph} min em edifícios novos e grandes reabilitações não é considerado o efeito de janelas sem classificação, da classe 1 e 2 e a existência de caixas de estore.</small>					
				Técnico: _____	
				Data: _____	

Figura 7.3: Folha de cálculo LNEC para ventilação

```

! module, with two sheets of low-iron annealed float glass
! laminated with EVA encapsulant. Electrical connection via
! 12-gauge pigtails from sealed boot. Bypass diode located
! inside sealed boot. Series fuse rating is 2 A.
! Vintage:1998
! Material:2-a-Si

PhotovoltaicPerformance:Sandia,
EPV-40,      !- Name
0.791,      !- Active Area {m2}
38,         !- Number of Cells in Series {dimensionless}
1,          !- Number of Cells in Parallel {dimensionless}
1.1628,     !- Short Circuit Current {A}
60.959,     !- Open Circuit Voltage {V}
0.9,        !- Current at Maximum Power Point {A}
44.8,       !- Voltage at Maximum Power Point {V}
0.000594,   !- Sandia Database Parameter alsc {1/K}
0.00108,    !- Sandia Database Parameter almp {1/K}
1.0415,     !- Sandia Database Parameter c0 {dimensionless}
-0.0415,    !- Sandia Database Parameter c1 {dimensionless}
-0.1957,    !- Sandia Database Parameter BVoc0 {V/K}
0,          !- Sandia Database Parameter mBVoc {V/K}
-0.149,     !- Sandia Database Parameter BVmp0 {V/K}
0,          !- Sandia Database Parameter mBVmp {V/K}
3.048,      !- Diode Factor {dimensionless}
-0.075505,  !- Sandia Database Parameter c2 {dimensionless}
-3.94736,   !- Sandia Database Parameter c3 {dimensionless}
0.9675,     !- Sandia Database Parameter a0 {dimensionless}
0.063099,   !- Sandia Database Parameter a1 {dimensionless}
-0.033681,  !- Sandia Database Parameter a2 {dimensionless}
0.0031405,  !- Sandia Database Parameter a3 {dimensionless}
-0.00009211, !- Sandia Database Parameter a4 {dimensionless}
1,          !- Sandia Database Parameter b0 {dimensionless}
-0.002438,  !- Sandia Database Parameter b1 {dimensionless}
0.0003103,  !- Sandia Database Parameter b2 {dimensionless}
-0.00001246, !- Sandia Database Parameter b3 {dimensionless}
2.112E-07,  !- Sandia Database Parameter b4 {dimensionless}
-1.359E-09, !- Sandia Database Parameter b5 {dimensionless}
3,          !- Sandia Database Parameter Delta(Tc) {deltaC}
1,          !- Sandia Database Parameter fd {dimensionless}
-3.47,      !- Sandia Database Parameter a {dimensionless}
-0.0594,    !- Sandia Database Parameter b {dimensionless}
1.0233,     !- Sandia Database Parameter c4 {dimensionless}
-0.0233,    !- Sandia Database Parameter c5 {dimensionless}
1.055,      !- Sandia Database Parameter Ix0
0.63,       !- Sandia Database Parameter Ixx0
1.0956,     !- Sandia Database Parameter c6
-0.0956;    !- Sandia Database Parameter c7

```

Figura 7.4: Coeficientes de temperatura disponíveis no banco de dados “Sandia Module Database”

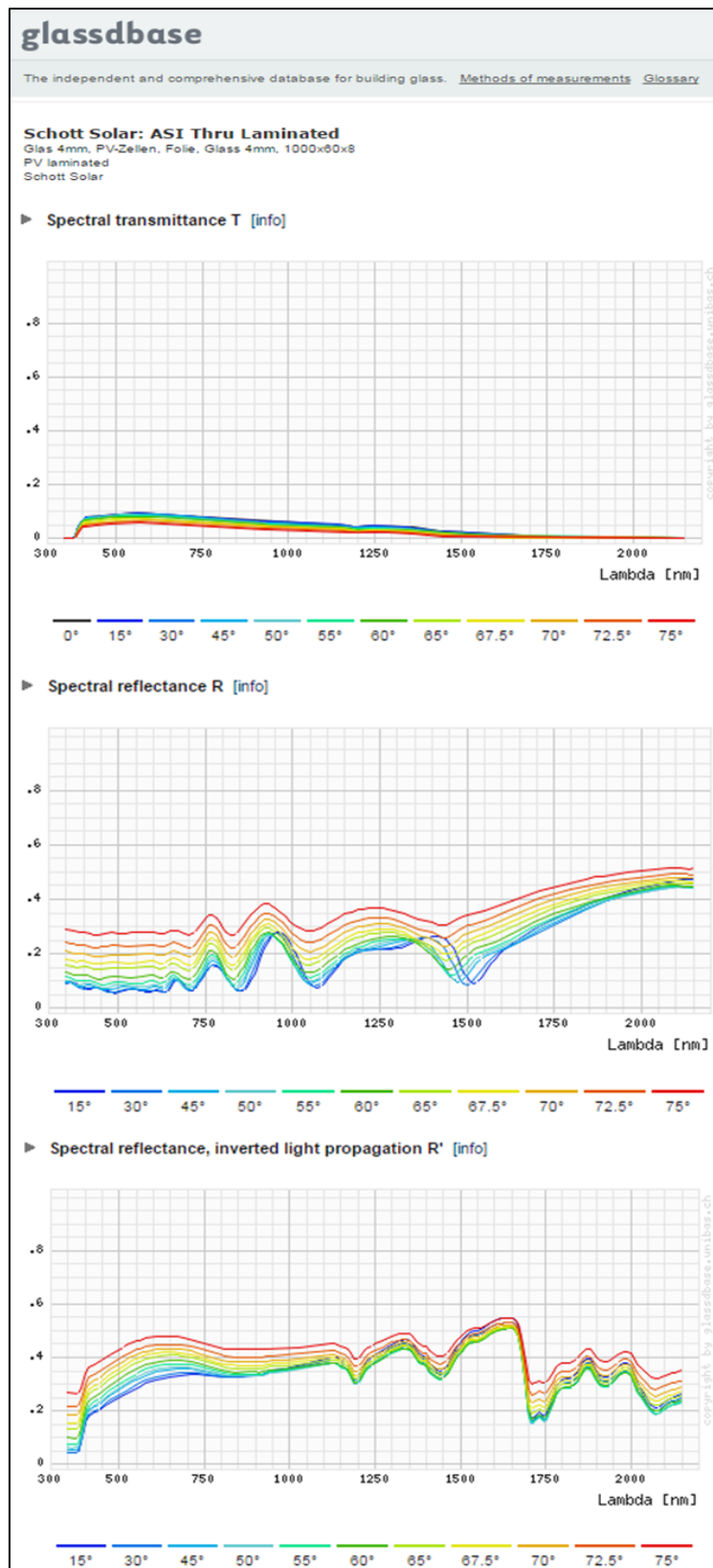


Figura 7.5: Fator de transmissão espectral e fator de reflexão espectral da célula fotovoltaica

Fonte disponível em <http://www.glassdbase.ch/specsheet.php?language=en&spec=127>

ASI® Glass with 2 sub-modules
Technical Data Sheet

	ASI® THRU-2-L (Laminate)	ASI® THRU-2-IO (Insulating glass)	ASI® OPAK-2-L (Laminate)
Mechanical design			
Front glass (low-iron glass)	0.24 in (6 mm) annealed glass	0.24 in (6 mm) annealed glass	0.24 in (6 mm) annealed glass
Composite film	0.04 in (1.1 mm) PVB film	0.03 in (0.8 mm) PVB film	0.04 in (1.1 mm) PVB film
ASI® glass (2x)	ASI® THRU	ASI® THRU	ASI® OPAK
Composite film	0.04 in (1.1 mm) PVB	–	0.04 in (1.1 mm) PVB
Space between panes / ASI	–	0.71 in / 0.79 in (18 mm / 20 mm)	–
Backling glass	0.24 in (6 mm) annealed glass	0.31 in (8 mm) laminated safety glass	0.24 in (6 mm) laminated safety glass
Cable outlet	on the back	on the side	on the back / on the side
Cable type/cross section (+ or -)	double insulated, black / 0.006 in ² (4.0 mm ²)	double insulated, black / 0.006 in ² (4.0 mm ²)	double insulated, black / 0.006 in ² (4.0 mm ²)
Diameter / Cable length	Ø 0.24 / 39.37 in (6.0 mm / 1 m)	Ø 0.24 / 39.37 in (6.0 mm / 1 m)	Ø 0.24 / 39.37 in (6.0 mm / 1 m)
Socket / plug	Multi-Contact PV-KBT3 / PV-KST3	Multi-Contact PV-KBT3 / PV-KST3	Multi-Contact PV-KBT3 / PV-KST3
Dimensions, weight*			
Glass size	44.2 in x 52.4 in / 16 ft ² (1,122 mm x 1,332 mm / 1.49 m ²)	44.2 in. x 52.6 in / 16.14 ft ² (1,122 mm x 1,337 mm / 1.50 m ²)	44.2 in x 52.4 in / 16 ft ² (1,122 mm x 1,332 mm / 1.49 m ²)
Active area	42.2 in x 50.4 in (1071.0 mm x 1280.2 mm)	42.2 in x 50.4 in (1071.0 mm x 1280.2 mm)	42.2 in x 50.4 in (1071.0 mm x 1280.2 mm)
Total glass thickness	– 5/8 in (16 mm)	– 1 1/8 in / 1-11/12 in (32 mm / 30 mm)	– 5/8 in (16 mm)
Weight	127.9 lbs (58 kg)	143.3 lbs (65 kg)	127.9 lbs (58 kg)
Building physics data ***:			
U _g -value (DIN EN 673)	–5 W/m ² K	1.1 W/m ² K	–5 W/m ² K
SHGC (of the active area)	27%	10%	25%
Light transmission	10%	10%	–3%
Electrical data			
Initial nominal power P _{mpp}	95 Wp	95 Wp	106 Wp
Nominal power P _{mppt} **	78 Wp	78 Wp	87 Wp
Current at nominal power I _{mppt} **	0.94 A	0.94 A	1.04 A
Short-circuit current I _{sc} **	1.11 A	1.11 A	1.23 A
Voltage at nominal power U _{mppt} **	83 V	83 V	83 V
Open-circuit voltage U _{oc} **	111 V	111 V	111 V
Maximum system voltage	600 V	600 V	600 V

* The outside dimensions tolerances are ± 0.12 in (± 3 mm), and ± 0.06 in (± 1.5 mm) for the glass thickness.

Figura 7.6: Catálogo técnico do fabricante schott solar



Figura 7.7: Imagens do equipamento de coleta instalado na célula teste



Figura 7.8: Imagem da estação meteorológica instalada

Table 5 Natural Convection Heat Transfer Coefficients

I. General relationships	$Nu = c(Gr Pr)^n$	(1)
	$h = c \frac{k}{L} \left(\frac{L^3 \rho^2 \beta g \Delta T}{\mu^2} \right)^n \left(\frac{\mu_c}{k} \right)^n$	(2)
Characteristic length L		
Vertical plates or pipes	$L = \text{height}$	
Horizontal plates	$L = \text{length}$	
Horizontal pipes	$L = \text{diameter}$	
Spheres	$L = 0.5 \times \text{diameter}$	
Rectangular block, with horizontal length L_h and vertical length L_v	$1/L = (1/L_h) + (1/L_v)$	
II. Planes and pipes		
Horizontal or vertical planes, pipes, rectangular blocks, and spheres (excluding horizontal plates facing downward for heating and upward for cooling)		
(a) Laminar range, when $Gr Pr$ is between 10^4 and 10^8	$Nu = 0.56(Gr Pr)^{0.25}$	(3)
(b) Turbulent range, when $Gr Pr$ is between 10^8 and 10^{12}	$Nu = 0.13(Gr Pr)^{0.33}$	(4)
III. Wires		
For horizontal or vertical wires, use $L = \text{diameter}$, for $Gr Pr$ between 10^7 and 1	$Nu = (Gr Pr)^{0.1}$	(5)
IV. With air		
$Gr Pr = 1.6 \times 10^6 L^3 \Delta T$ (at 21°C, L in m, ΔT in K)		
(a) Horizontal cylinders		
Small cylinder, laminar range	$h = 1.32(\Delta T/L)^{0.25}$	(6)
Large cylinder, turbulent range	$h = 1.24(\Delta T)^{0.33}$	(7)
(b) Vertical plates		
Small plates, laminar range	$h = 1.42(\Delta T/L)^{0.25}$	(8)
Large plates, turbulent range	$h = 1.31(\Delta T)^{0.33}$	(9)
(c) Horizontal plates, facing upward when heated or downward when cooled		
Small plates, laminar range	$h = 1.32(\Delta T/L)^{0.25}$	(10)
Large plates, turbulent range	$h = 1.24(\Delta T)^{0.33}$	(11)

Figura 7.9: Algoritmo de convecção natural em planos verticais

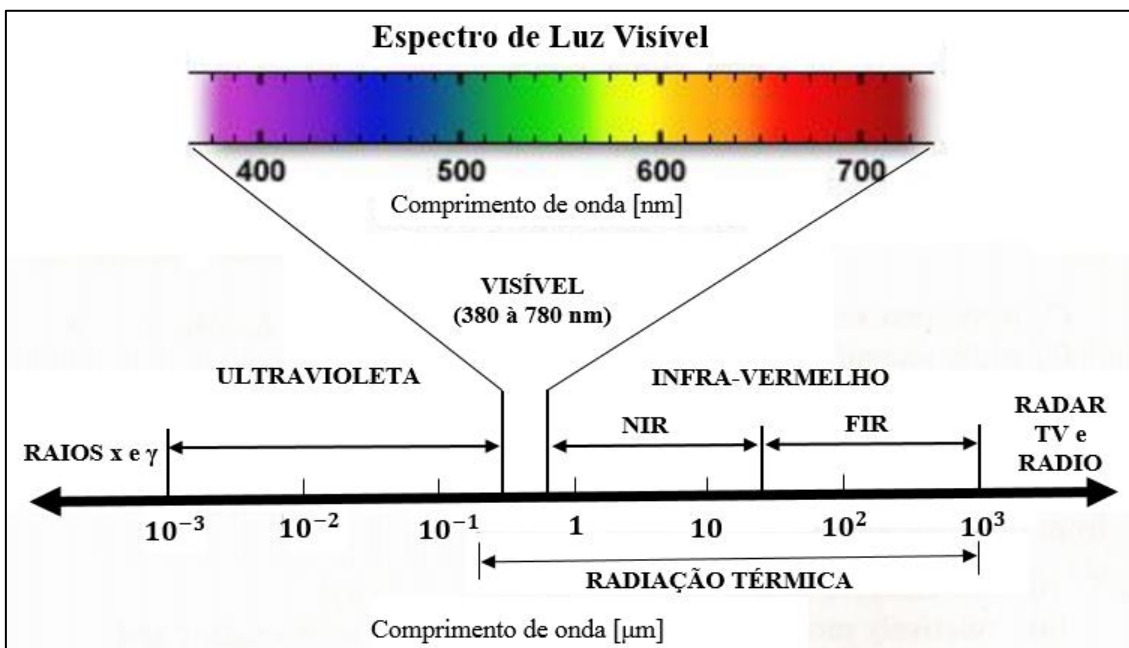


Figura 7.10: Espectro da radiação eletromagnética

ANEXO B

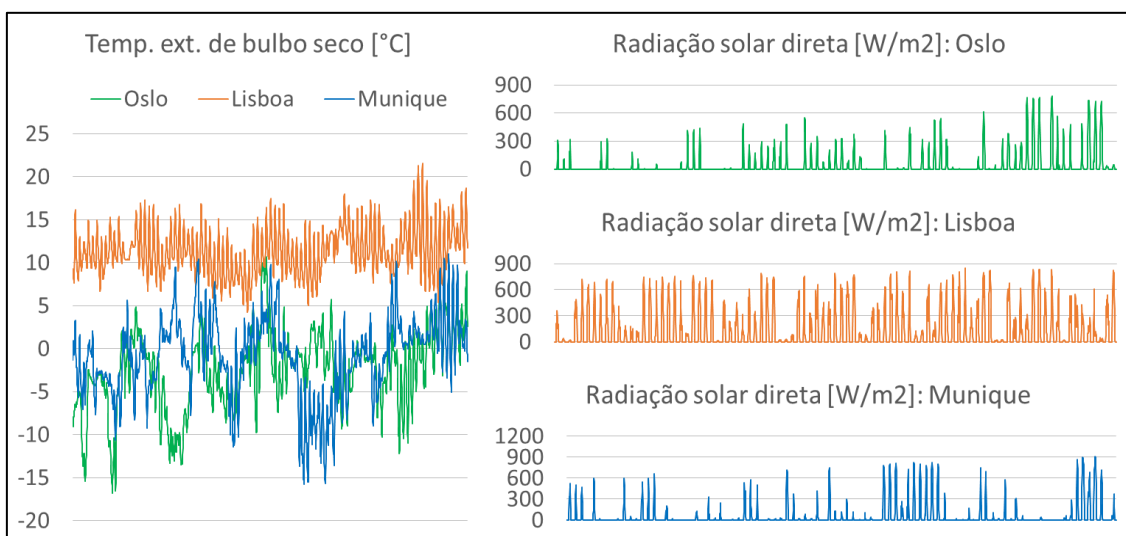


Figura 7.11: Condições climáticas nas cidades analisadas

LISBOA	TABELA DE DESEMPENHO DOS CRITÉRIOS			
	G1 ↓	G2 ↓	G3 ↓	G4 ↑
	Consumo Global [KWh/m²]	Consumo Arrefecimento [KWh]	Consumo Aquecimento [KWh]	Temp. média da cavidade superior [°C]
PAE 30%				
VS	56,18	629	66	21,40
VD	54,99	610	61	22,30
ST10	38,48	315	79	19,60
ST04	31,39	185	90	18,45
peso (Kj)	0,5	0,15	0,2	0,15
PAE 50%				
VS	66,36	823	71	20,90
VD	66,12	827	62	22,20
ST10	41,58	370	85	18,95
ST04	30,21	192	98	17,60
peso (Kj)	0,5	0,15	0,2	0,15
PAE 80%				
VS	76,12	1008	75	20,30
VD	79,64	1087	65	21,80
ST10	45,46	503	91	18,40
ST04	28,85	210	106	16,90
peso (Kj)	0,5	0,15	0,2	0,15

Tabela 7.1: Tabela de de desempenho dos critérios avaliados para Lisboa

RELAÇÕES DE PREVALÊNCIA ENTRE OS CENÁRIOS: LISBOA - PAE 30%				
[limiar de concordância = $\lambda = 0,65$]				
cenários	VS	VD	ST10	ST04
VS	-	VS S VD? sim no(s) critério(s): nenhum concordância = C = 0,0 Se C < λ NÃO	VS S ST10? sim no(s) critério(s): G3 e G4 concordância = C = 0,2+0,15 Se C < λ NÃO	VS S ST04? sim no(s) critério(s): G3 e G4 concordância = C = 0,2+0,15 Se C < λ NÃO
VD	VD S VS? sim no(s) critério(s): G1, G2, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,15+0,2+0,15 Se C $\geq \lambda$ SIM	-	VD S ST10? sim no(s) critério(s): G3 e G4 concordância = C = 0,2+0,15 Se C < λ NÃO	VD S ST04? sim no(s) critério(s): G3 e G4 concordância = C = 0,2+0,15 Se C < λ NÃO
ST10	ST10 S VS? sim no(s) critério(s): G1 e G2 concordância = C = 0,50+0,15 Se C $\geq \lambda$ SIM	ST10 S VD? sim no(s) critério(s): G1 e G2 concordância = C = 0,50+0,15 Se C $\geq \lambda$ SIM	-	ST10 S ST04? sim no(s) critério(s): G3 e G4 concordância = C = 0,2+0,15 Se C < λ NÃO
ST04	ST04 S VS? sim no(s) critério(s): G1 e G2 concordância = C = 0,50+0,15 Se C $\geq \lambda$ SIM	ST04 S VD? sim no(s) critério(s): G1 e G2 concordância = C = 0,50+0,15 Se C $\geq \lambda$ SIM	ST04 S ST10? sim no(s) critério(s): G1 e G2 concordância = C = 0,50+0,15 Se C $\geq \lambda$ SIM	-

Tabela 7.2: Matriz de prevalência dos critérios avaliados: Lisboa - PAE 30%

RELAÇÕES DE PREVALÊNCIA ENTRE OS CENÁRIOS: LISBOA - PAE 50%				
[limiar de concordância = $\lambda = 0,65$]				
cenários	VS	VD	ST10	ST04
VS		VS S VD?	VS S ST10?	VS S ST04?
		sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO	sim no(s) critério(s): G3 e G4 concordância = C = 0,2+0,15 Se C < λ NÃO	sim no(s) critério(s): G3 e G4 concordância = C = 0,2+0,15 Se C < λ NÃO
VD	VD S VS?		VD S ST10?	VD S ST04?
	sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM		sim no(s) critério(s): G3 e G4 concordância = C = 0,2+0,15 Se C < λ NÃO	sim no(s) critério(s): G3 e G4 concordância = C = 0,2+0,15 Se C < λ NÃO
ST10	ST10 S VS?	ST10 S VD?		ST10 S ST04?
	sim no(s) critério(s): G1 e G2 concordância = C = 0,50+0,15 Se C \geq λ SIM	sim no(s) critério(s): G1 e G2 concordância = C = 0,50+0,15 Se C \geq λ SIM		sim no(s) critério(s): G3 e G4 concordância = C = 0,2+0,15 Se C < λ NÃO
ST04	ST04 S VS?	ST04 S VD?	ST04 S ST10?	
	sim no(s) critério(s): G1 e G2 concordância = C = 0,50+0,15 Se C \geq λ SIM	sim no(s) critério(s): G1 e G2 concordância = C = 0,50+0,15 Se C \geq λ SIM	sim no(s) critério(s): G1 e G2 concordância = C = 0,50+0,15 Se C \geq λ SIM	

Tabela 7.3: Matriz de prevalência dos critérios avaliados: Lisboa - PAE 50%

RELAÇÕES DE PREVALÊNCIA ENTRE OS CENÁRIOS: LISBOA - PAE 80%				
[limiar de concordância = $\lambda = 0,65$]				
cenários	VS	VD	ST10	ST04
VS		VS S VD?	VS S ST10?	VS S ST04?
		sim no(s) critério(s): G1 e G2 concordância = C = 0,50+0,15 Se C \geq λ SIM	sim no(s) critério(s): G3 e G4 concordância = C = 0,2+0,15 Se C < λ NÃO	sim no(s) critério(s): G3 e G4 concordância = C = 0,2+0,15 Se C < λ NÃO
VD	VD S VS?		VD S ST10?	VD S ST04?
	sim no(s) critério(s): G3 e G4 concordância = C = 0,2+0,15 Se C < λ NÃO		sim no(s) critério(s): G3 e G4 concordância = C = 0,2+0,15 Se C < λ NÃO	sim no(s) critério(s): G3 e G4 concordância = C = 0,2+0,15 Se C < λ NÃO
ST10	ST10 S VS?	ST10 S VD?		ST10 S ST04?
	sim no(s) critério(s): G1 e G2 concordância = C = 0,50+0,15 Se C \geq λ SIM	sim no(s) critério(s): G1 e G2 concordância = C = 0,50+0,15 Se C \geq λ SIM		sim no(s) critério(s): G3 e G4 concordância = C = 0,2+0,15 Se C < λ NÃO
ST04	ST04 S VS?	ST04 S VD?	ST04 S ST10?	
	sim no(s) critério(s): G1 e G2 concordância = C = 0,50+0,15 Se C \geq λ SIM	sim no(s) critério(s): G1 e G2 concordância = C = 0,50+0,15 Se C \geq λ SIM	sim no(s) critério(s): G1 e G2 concordância = C = 0,50+0,15 Se C \geq λ SIM	

Tabela 7.4: Matriz de prevalência dos critérios avaliados: Lisboa - PAE 80%

MUNIQUE	TABELA DE DESEMPENHO DOS CRITÉRIOS			
	G1 ↓	G2 ↓	G3 ↓	G4 ↑
	Consumo Global [KWh/m ²]	Consumo Arrefecimento [KWh]	Consumo Aquecimento [KWh]	Temp. média da cavidade superior [°C]
PAE 30%				
VS	62,22	68	744	14,60
VD	59,29	70	686	15,80
ST10	62,90	14	836	13,50
ST04	65,10	3	899	12,90
peso (Kj)	0,5	0,15	0,2	0,15
PAE 50%				
VS	66,89	132	771	13,60
VD	63,30	144	689	15,10
ST10	64,64	29	868	12,50
ST04	67,09	4	958	11,85
peso (Kj)	0,5	0,15	0,2	0,15
PAE 80%				
VS	72,72	205	813	12,60
VD	70,05	257	708	14,25
ST10	67,67	66	911	11,55
ST04	69,21	5	1026	10,80
peso (Kj)	0,5	0,15	0,2	0,15

Tabela 7.5: Tabela de de desempenho dos critérios avaliados: Munique

RELAÇÕES DE PREVALÊNCIA ENTRE OS CENÁRIOS: MUNIQUE - PAE 30%				
[limiar de concordância = $\lambda = 0,65$]				
cenários	VS	VD	ST10	ST04
VS		VS S VD?	VS S ST10?	VS S ST04?
		sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO	sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM	sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM
VD	VD S VS? sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM		VD S ST10?	VD S ST04?
			sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM	sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM
ST10	ST10 S VS? sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO	ST10 S VD? sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO		ST10 S ST04?
				sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM
ST04	ST04 S VS? sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO	ST04 S VD? sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO	ST04 S ST10? sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO	

Tabela 7.6: Matriz de prevalência dos critérios avaliados: Munique - PAE 30%

RELAÇÕES DE PREVALÊNCIA ENTRE OS CENÁRIOS: MUNIQUE - PAE 50%				
[limiar de concordância = $\lambda = 0,65$]				
cenários	VS	VD	ST10	ST04
VS		VS S VD?	VS S ST10?	VS S ST04?
		sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO	sim no(s) critério(s): G3 e G4 concordância = C = 0,2+0,15 Se C < λ NÃO	sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM
VD	VD S VS? sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM		VD S ST10?	VD S ST04?
			sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM	sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM
ST10	ST10 S VS? sim no(s) critério(s): G1 e G2 concordância = C = 0,50+0,15 Se C \geq λ SIM	ST10 S VD? sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO		ST10 S ST04?
				sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM
ST04	ST04 S VS? sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO	ST04 S VD? sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO	ST04 S ST10? sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO	

Tabela 7.7: Matriz de prevalência dos critérios avaliados: Munique - PAE 50%

RELAÇÕES DE PREVALÊNCIA ENTRE OS CENÁRIOS: MUNIQUE - PAE 80%				
[limiar de concordância = $\lambda = 0,65$]				
cenários	VS	VD	ST10	ST04
VS		VS S VD?	VS S ST10?	VS S ST04?
		sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO	sim no(s) critério(s): G3 e G4 concordância = C = 0,2+0,15 Se C < λ NÃO	sim no(s) critério(s): G3 e G4 concordância = C = 0,2+0,15 Se C < λ NÃO
VD	VD S VS? sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM		VD S ST10?	VD S ST04?
			sim no(s) critério(s): G3 e G4 concordância = C = 0,2+0,15 Se C < λ NÃO	sim no(s) critério(s): G3 e G4 concordância = C = 0,2+0,15 Se C < λ NÃO
ST10	ST10 S VS? sim no(s) critério(s): G1 e G2 concordância = C = 0,50+0,15 Se C \geq λ SIM	ST10 S VD? sim no(s) critério(s): G1 e G2 concordância = C = 0,50+0,15 Se C \geq λ SIM		ST10 S ST04?
				sim no(s) critério(s): G1, G3 e G4 concordância = C = 0,5+0,2+0,15 Se C \geq λ SIM
ST04	ST04 S VS? sim no(s) critério(s): G1 e G2 concordância = C = 0,50+0,15 Se C \geq λ SIM	ST04 S VD? sim no(s) critério(s): G1 e G2 concordância = C = 0,50+0,15 Se C \geq λ SIM	ST04 S ST10? sim no(s) critério(s): G2 concordância = C = 0,15 Se C < λ NÃO	

Tabela 7.8: Matriz de prevalência dos critérios avaliados: Munique - PAE 80%