



**Alberto Gomes
Parente Madureira
Rebelo**

**Optimização e dimensionamento de vãos
envidraçados**



**Alberto Gomes
Parente Madureira
Rebelo**

**Optimização e dimensionamento de vãos
envidraçados**

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

Dedico este trabalho aos meus Pais.

o Júri

Presidente

Prof. Dr. Robertt Angelo Fontes Valente

Professor auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

Arguente

Prof. Dr. Romeu da Silva Vicente

Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro

Orientador

Prof. Dr. Nelson Amadeu Dias Martins

Professor auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Apesar deste trabalho ser de carácter individual, este trabalho só foi possível graças aos diversos apoios e incentivos que me foram proporcionados por professores, família, namorada e amigos pelo que não posso deixar de lhes expressar os meus mais sinceros agradecimentos. Assim começaria por agradecer ao Professor Nelson Martins por toda a orientação, constante optimismo, dedicação e disponibilidade que me permitiram a realização deste trabalho. Aos meus amigos por todo o apoio que me prestaram todos estes anos, e com um grande abraço que lhes agradeço todos os bons momentos que passamos juntos. Por último aos meus Pais e à Catarina também por todo o apoio que me deram e por sempre acreditarem em mim.

Palavras-chave

Vãos envidraçados, desempenho energético, análise financeira.

Resumo

As tendências construtivas e o factor “moda” apontam para o hábito de vãos envidraçados de maiores dimensões. Assim sendo, até que ponto a tecnologia e o material a usar nos vãos envidraçados de um edifício causam impacto no seu desempenho energético? Como se enquadram as diferentes opções com as características do nosso clima e qual a relação custo/benefício? Para responder a todas estas questões, e à luz dos recentes regulamentos na área do consumo energético de edifícios, será necessária uma caracterização do desempenho dos vãos envidraçados em relação aos requisitos energéticos da legislação vigente e um conhecimento das funções e características da envolvente envidraçada, dando natural importância ao desempenho energético e económico, parâmetros muito importantes em qualquer tipo de edifício.

O principal objectivo do presente estudo é analisar exclusivamente o sistema construtivo de vãos envidraçados em diferentes regiões climáticas de Portugal. Para tal, recorreu-se a uma análise paramétrica e sustentada no RCCTE (Decreto-Lei nº80/2006 de 4 de Abril) para avaliar energeticamente e economicamente os diferentes tipos de opções a considerar na especificação de vãos envidraçados. Assim, tendo por base um conjunto de pressupostos devidamente fundamentados foi estabelecida, a escolha óptima da caixilharia e tipo de vidro a usar em função de cada zona climática. Na realidade, tornou-se muito difícil generalizar o desempenho de um vão envidraçado, pois existem muitas variáveis envolvidas e de naturezas diferentes. Ainda assim, é possível melhorar o desempenho e o conforto e por sua vez reduzir a factura energética de um edifício.

Do estudo conclui-se que as melhores soluções energéticas são janelas de elevado desempenho com caixilho em PVC isolado e vidro baixo emissivo pois alcançam, de um modo geral, os melhores resultados em todas as regiões e para todos os tipos de construção (inércia térmica). Outro factor vantajoso das opções em PVC diz respeito aos valores razoáveis do indicador económico VAL (Valor Actualizado Líquido) quando comparado com uma solução base consistindo num vidro simples com caixilharia em alumínio sem corte térmico, principalmente em zonas com Invernos rigorosos. Conclui-se ainda que é a caixilharia em madeira, que apresenta a melhor relação custo/benefício para todas as zonas de Portugal.

Keywords

Glazed facades, energy efficiency, financial analysis.

Abstract

Constructive trends and the "fashion" factor are leading to the habit of using glazed facades of large dimensions even in dwellings. To what extent does the technology and the material to use in the glazed facades of a building causes impact in its energy performing? How to fit the different options with the characteristics of our climate and what is the solution showing a best cost/benefit ratio? The present thesis is a first approach to answer these questions what will be done in the frame of the recent energy regulation in the area of the energy consumption of buildings. It will require the characterization of the glazed facades performance regarding to energy consumption of the respective building as well as a deep understanding of the glazed façade performance having in mind the energy and economical perspective, which are a very important parameters irrespectively of the building type.

The main objective of the present study is to analyze different constructive options for windows (regarding glass and frame) of in different and representative climatic areas of Portugal. For that purpose, a parametric analysis was made based on the current national regulation calculation method (RCCTE, Decreto-Lei nº 80/2006 from April, 4th) to evaluate de energy and economical performance of different window options regarding frame materials and glass types. For a reference building typology the most advantageous windows option both regarding frame and glass type was determined for each climatic zone. However, it is very difficult to build a general algorithm aiming window selection because of the different physical nature of the relevant factors. Even though, it was possible to identify the most adequate constructive solution for windows in Portugal.

The best energy option in all regions and all types of construction (thermal inertia) are high performance windows with PVC insulated frames and low emissivity glasses). Even from the economic standpoint this solution shows a reasonable NPV (Net Present Value) comparing to the cheapest solution (simple aluminium frame with a single clear glass) particularly in the regions with a more severe winter. In the other hand Wood frames, were found to have the greatest cost/benefit ratio for all climate regions in Portugal.

Índice

Índice	1
Índice de figuras	4
Índice de tabelas	5
Índice de gráficos	5
Lista de acrónimos.....	6
Simbologia	7
1. Introdução	9
1.1. Sumário	9
1.2. Enquadramento	9
1.3. Objectivos.....	10
1.4. Contributo da dissertação	10
1.5. Organização do texto	10
2. A energia solar e os edifícios	11
2.1. Sumário	11
2.2. Introdução	11
2.3. Geometria Solar	11
2.4. Orientação de fachadas envidraçadas.....	13
2.5. Perdas e ganhos térmicos pela envolvente dos edifícios	14
2.6. Ventilação nos edifícios	14
2.7. Propriedades dos vãos envidraçados	15
2.7.1. Aspecto visual	15
2.7.2. Factores humanos	16
2.7.2.1. Conforto térmico.....	16
2.7.2.2. Conforto visual.....	18
2.7.3. O vidro e a radiação solar	19
2.7.4. Desempenho térmico e óptico.....	20
2.7.4.1. Coeficiente de transmissão térmica (U)	21
2.7.4.2. Factor solar (g)	21
2.7.4.3. Coeficiente de transmissão visível (TV)	22
2.7.4.4. Coeficiente de reflexão visível (RV)	23
2.7.4.5. Coeficiente de selectividade espectral (CSE)	23
2.7.5. Propriedades técnicas	24
2.7.5.1. Permeabilidade ao ar	24
2.7.5.2. Condensação.....	24

2.8.	Conclusão	26
3.	Tecnologia aplicada nos vãos envidraçados	27
3.1.	Sumário	27
3.2.	Introdução	27
3.3.	Tipos de vidro.....	28
3.3.1.	Vidro simples incolor	28
3.3.2.	Vidro simples colorido	28
3.3.3.	Vidro duplo incolor.....	29
3.3.4.	Vidro duplo colorido.....	29
3.3.5.	Vidro duplo colorido de alto desempenho	30
3.3.6.	Vidro duplo reflectivo.....	30
3.3.7.	Vidro duplo baixo emissivo (<i>low-E</i>)	31
3.3.8.	Vidro multi-camada.....	34
3.4.	O gás e espessura da câmara	35
3.5.	Perfil separador e selagem	36
3.6.	Tecnologias emergentes.....	37
3.6.1.	Adição de isolamento	37
3.6.2.	Janelas de vácuo.....	37
3.6.3.	Janelas inteligentes	37
3.6.4.	Integração de energia fotovoltaica.....	40
3.7.	A caixilharia.....	42
3.7.1.	Tipos de janelas.....	42
3.7.2.	Tipos de materiais	43
3.7.2.1.	Alumínio	44
3.7.2.2.	Madeira	44
3.7.2.3.	PVC.....	45
3.7.2.4.	Fibra de vidro	45
3.7.2.5.	Combinados.....	46
3.7.2.6.	Tecnologias emergentes.....	46
3.7.3.	Sistemas de fachada	47
3.7.3.1.	Vidro exterior colado (VEC).....	47
3.7.3.2.	Vidro exterior agrafado (VEA).....	48
3.7.3.3.	Vidro encapsulado em silicone (VES).....	48
3.8.	Dispositivos de sombreamento e de luz natural	49
3.8.1.	Protecções solares móveis e fixas	50

3.8.2.	Protecções solares interiores.....	50
3.8.3.	Protecções solares exteriores.....	50
3.8.4.	Sistemas de luz natural.....	51
3.9.	Conclusão.....	52
4.	Metodologia de análise.....	53
4.1.	Sumário.....	53
4.2.	Procedimento e metodologia desenvolvida.....	53
4.2.1.	Perdas e ganhos térmicos através dos envidraçados.....	54
4.2.1.1.	Estação de aquecimento.....	54
4.2.1.2.	Estação de arrefecimento.....	56
4.2.1.3.	Indicador global de necessidades energéticas.....	58
4.2.1.4.	Factores de sombreamento.....	58
4.2.1.5.	Factor solar do vão envidraçado.....	58
4.3.	Condições de referência.....	59
4.4.	Apresentação de resultados.....	61
4.4.1.	Inércia térmica fraca.....	62
4.4.2.	Inércia térmica média.....	63
4.4.3.	Inércia térmica forte.....	64
4.4.4.	Análise financeira.....	65
4.5.	Análise e discussão dos resultados.....	67
4.5.1.	Análise energética.....	67
4.5.2.	Análise financeira.....	68
4.6.	Conclusões.....	69
5.	Epílogo.....	71
5.1.	Sugestões para trabalhos futuros.....	71
6.	Bibliografia.....	73
	Anexo I.....	79
	Anexo II.....	81
	Anexo III.....	83

Índice de figuras

Figura 1 – Percurso do sol durante o dia ao longo do ano [11].....	12
Figura 2 - Sistema de ventilação controlável "Ventalis" [14]	14
Figura 3 – Casa <i>Belyea Faigin</i> por <i>Johnston Architects</i> [38]	15
Figura 4 – Evolução da temperatura num edifício passivo durante o ano (hemisfério norte) [19].....	16
Figura 5 – Influência das janelas no conforto térmico [18].....	17
Figura 6 – O factor visual descreve quanto uma pessoa “vê” uma superfície [18]	18
Figura 7 – Espectro do raio solar global segundo a EN 410 [21].....	19
Figura 8 – Processos de transferência de calor numa janela [4]	20
Figura 9 – Comportamento térmico do vidro à energia solar incidente [15]	22
Figura 10 – Comportamento óptico do vidro à energia solar incidente [15]	23
Figura 11 – Caracterização da condensação superficial em diferentes faces num vidro duplo [4]	25
Figura 12 – Rótulo <i>NFRC</i> de uma janela com vidro duplo low-E e caixilho em PVC [42]	26
Figura 13 – Vidro simples incolor [45]	28
Figura 14 – Vidro simples colorido [45]	29
Figura 15 – Vidro duplo incolor [45]	29
Figura 16 – Vidro duplo colorido [45].....	30
Figura 17 – Vidro duplo colorido de alto desempenho [45].....	30
Figura 18 – Camada altamente reflectiva num sistema de vidro duplo colorido bronze [46]	31
Figura 19 – Desempenho do vidro baixo emissivo no Inverno e no Verão [49]	32
Figura 20 – Vidro <i>low-E⁺</i> (alto ganho solar); Vidro <i>low-E</i> (ganho moderado); Vidro <i>low-E</i> (baixo ganho solar) [45]	32
Figura 21 – Vidro triplo (3 vidros); Vidro triplo (2 vidros e 1 filme); Vidro quadruplo (2 vidros e 2 filmes) [46]	34
Figura 22 – Variação do factor-U com a espessura da câmara em função do gás usado [50]	35
Figura 23 – Exemplo da selagem de um vidro duplo com perfil separador em Alumínio [51] e a comparação da distribuição de temperaturas, no caixilho e no vidro, com um perfil em material compósito [26].....	36
Figura 24 – Funcionamento do vidro electrocrómico [28].....	38
Figura 25 – Relações de consumo de energia dos principais grupos de janelas [27].....	39
Figura 26 – Protótipo " <i>Zero Energy Window</i> " [9].....	40
Figura 27 – Fachada envidraçada com painéis fotovoltaicos como revestimento (<i>APS, Fairfield, Califórnia</i>) [29]	41
Figura 28 – Exemplo de <i>retrofit</i> (<i>Okotec, Berlim, Alemanha</i>) [29].....	41
Figura 29 – Células fotovoltaicas integradas num vão envidraçado [46].....	41
Figura 30 – <i>Dynamic Shading Window System</i> [54].....	41
Figura 31 – Exemplos de vários tipos de caixilharia e respectivo factor-U (kWh/m ² .K)[45]	43
Figura 32 – (VEC) Representação dos sistemas de “2 lados” e sistemas de “4 lados” [34].....	47
Figura 33 – Exemplos de fachadas em vidro exterior agrafado (VEA) [56]	48
Figura 34 – Sistema VES e exemplo de fachada em vidro encapsulado [35]	48
Figura 35 – Exemplos de sombreamento exterior: fixo [57] e móvel [58].....	49

Índice de tabelas

Tabela 1 – Tipos de janelas usadas nos vãos envidraçados e suas propriedades [45].....	60
Tabela 2 – <i>Ranking</i> das relações energéticas totais (aquecimento+arrefecimento) para as 9 zonas climáticas considerando inércia térmica fraca e todas as janelas como opção	62
Tabela 3 – <i>Ranking</i> das relações energéticas totais (aquecimento+arrefecimento) para as 9 zonas climáticas considerando inércia térmica média e todas as janelas como opção	63
Tabela 4 – <i>Ranking</i> das relações energéticas totais (aquecimento+arrefecimento) para as 9 zonas climáticas considerando inércia térmica forte e todas as janelas como opção.....	64
Tabela 5 – Custos associados ao tipo de caixilharia (CYPE).....	81
Tabela 6 – Custos associados ao tipo de vidro (CYPE)	81
Tabela 7 – <i>Ranking</i> das relações energéticas totais (aquecimento+arrefecimento) para as 9 zonas climáticas considerando inércia térmica fraca com sombreamento exterior ($\alpha=60^\circ$) e todas as janelas como opção...	83
Tabela 8 – <i>Ranking</i> das relações energéticas totais (aquecimento+arrefecimento) para as 9 zonas climáticas considerando inércia térmica média com sombreamento exterior ($\alpha=60^\circ$) e todas as janelas como opção.	84
Tabela 9 – <i>Ranking</i> das relações energéticas totais (aquecimento+arrefecimento) para as 9 zonas climáticas considerando inércia térmica forte com sombreamento exterior ($\alpha=60^\circ$) e todas as janelas como opção ...	85

Índice de gráficos

Gráfico 1 – Valor actualizado liquido das várias opções em comparação com o menor investimento	65
Gráfico 2 – Taxa interna de rentabilidade das várias opções em comparação com o menor investimento...	66

Lista de acrónimos

UE – União Europeia

DGEG – Direcção Geral de Energia e Geologia

ADENE – Instituição privada participada pelo Ministério da Economia e da Inovação e promove actividades de interesse público no domínio da Política Energética

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

ASHRAE – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

NFRC – National Fenestration Rating Council

WMO – World Meteorological Organization

PV – Photovoltaic

MSVD – Magnetron Sputter Vacuum Deposition

DSWS – Dynamic Shading Window System

PVC - Polyvinyl chloride

VAL – Valor Actualizado Líquido

TIR – Taxa Interna de Rentabilidade

Simbologia

factor-U – Trocas por condução

factor-g – Trocas por radiação

U_w – Coeficiente global de transferência de calor da janela

U_f – Coeficiente global de transferência de calor da caixilharia

U_g – Coeficiente global de transferência de calor do vidro

Ψ – Coeficiente global de transferência de calor linear do vidro

A_f – Área da caixilharia visível

A_g – Área do vidro visível

L_f – Perímetro do vidro visível

Q_t – Perdas de calor por condução através da envolvente dos edifícios

Q_v – Perdas de calor resultantes da renovação de ar

Q_{gu} – Ganhos de calor úteis

A_p – Área útil de pavimento

N_{ic} – Necessidades nominais de energia útil de aquecimento

N_i – Requisitos energéticos para a estação de aquecimento

R_i – Necessidades energéticas relativas de aquecimento

A – Área do vão envidraçado

GD – Graus-dias

a – Inércia térmica

γ – Relação dos ganhos totais brutos

Q_g – Ganhos térmicos brutos

η – Factor de utilização dos ganhos térmicos

G_{sul} – Energia solar média mensal incidente numa superfície vertical orientada a sul

M – Duração média da estação de aquecimento

X_j – Factor de orientação

$F_{(h, o, f, g, w)}$ – Factores de sombreamento

N_{vc} – Necessidades nominais de energia útil de arrefecimento

N_v – Requisitos energéticos para a estação de arrefecimento

R_v – Necessidades energéticas relativas de arrefecimento

R_g – Indicador global de necessidades energéticas

Q_g – Ganhos totais brutos

θ_m – Temperatura média do ar exterior na estação convencional de arrefecimento

θ_i – Temperatura do ar no interior do edifício

I_{ij} – Intensidade média da radiação solar incidente em cada orientação

g_{\perp} – Factor solar do vão envidraçado para radiação incidente na perpendicular ao envidraçado e que tem em conta dispositivos de protecção solar

$g_{\perp v}$ – Factor solar do vidro

F_w – Factor de correcção da selectividade angular

F_h – Factor de sombreamento do horizonte

F_o – Factor de sombreamento por elementos horizontais sobrepostos ao envidraçado

F_f – Factor de sombreamento por elementos verticais adjacentes ao envidraçado

F_g – Fração envidraçada

F_s – Factor de obstrução

1. Introdução

1.1. Sumário

Este capítulo agrupa esta investigação de uma forma geral. Faz-se o enquadramento do trabalho, abordam-se essencialmente os objectivos gerais, as motivações e o contributo desta investigação. Apresenta-se ainda a estrutura do documento escrito.

1.2. Enquadramento

Com a entrada em vigor dos novos regulamentos, na área do consumo energético de edifícios, nomeadamente a introdução do sistema de certificação energética de edifícios, renovados desafios no que respeita à caracterização do comportamento térmico do parque construtivo se colocam. Neste contexto, para uma maior eficiência energética, o conhecimento do comportamento térmico dos vãos envidraçados nos edifícios adquire particular importância tornando-se num tema indispensável. Como consequência do sistema de certificação assistimos à necessidade de criar estruturas capazes de reduzir o consumo energético e melhorar o conforto térmico no interior das habitações. Relativamente à habitabilidade, os vãos envidraçados representam uma parte importante no que respeita à qualidade de vida e do conforto nos edifícios, pois actuam como verdadeiros filtros das condições físicas entre o exterior e o interior. Na medida em que se impõe cada vez mais as necessidades de uso racional de energia é preciso repensar a questão de projecto e de qualidade dos vãos envidraçados como parte da envolvente de um edifício. Isto requer rever princípios naturais básicos para o controlo ambiental em edifícios e reconhecer que os vários requisitos de desempenho e funções só podem ser cumpridos satisfatoriamente na medida em que se reavaliar a integração física e funcional dos vãos. A prioridade é procurar e detalhar informação e procedimentos de análise que permitam projectos de janelas rentáveis para qualquer tipo de edificação, essencialmente residencial, agregando a legislação vigente, aspectos ambientais, perceptuais, produtivos e económicos.

O consumo energético dos edifícios e as consequentes emissões de CO₂ para a atmosfera, responsáveis por importantes impactos ambientais, têm estado em contínua ascensão, pelo que se torna fundamental exigir aos edifícios o cumprimento de requisitos mínimos de eficiência energética. Esta necessidade resulta do facto da energia consumida nos edifícios representar cerca de um terço do consumo energético da UE. No caso de Portugal, apesar do consumo de energia no sector dos edifícios ser inferior à média europeia (22% do total do consumo), a sua tendência é a de um crescimento elevado no futuro estimando-se em 7,5% a taxa de crescimento anual. Para inverter esta situação, a par da necessidade de instalações e de equipamentos mais eficientes, a utilização de materiais e sistemas de construção eficientes, entre os quais se incluem os vãos envidraçados com um forte compromisso nos desafios do desenvolvimento sustentável, pode desempenhar um papel fundamental. Neste panorama, é indispensável a escolha e instalação de janelas mais eficientes do ponto de vista da sua contribuição para a redução dos consumos energéticos dos edifícios e importante redução das emissões de CO₂ para a atmosfera. [1]

1.3. Objectivos

O objectivo principal deste trabalho é avaliar a relação custo/benefício de diferentes opções construtivas de vãos envidraçados em diferentes zonas climáticas de Portugal. Por outro lado, caracterizar o desempenho e propriedades dos vãos envidraçados do ponto de vista de energético nomeadamente a escolha da caixilharia e do tipo de vidro. Factores preponderantes no comportamento térmico de um edifício, constituindo uma prioridade de modo a alcançar uma redução nos consumos energéticos, não obstante das restrições legais, da arquitectura original do edifício, da orientação geográfica, das condições climatéricas, da segurança e da estética.

1.4. Contributo da dissertação

Este documento tem como missão transmitir sensibilidade e conhecimento para balizar gamas de produtos usados nos vãos envidraçados em Portugal. Resume-se a um contributo científico para toda a comunidade em geral e contribuir para a diminuição da necessidade energética mundial em particular. Esta exigência de aumento da eficiência energética dos edifícios permite uma contribuição decisiva com soluções de janelas para a sustentabilidade e qualidade da construção. Para construir edifícios eficientes é necessário apostar em produtos sustentáveis ao nível do isolamento térmico e aproveitamento solar. O reforço das características dos vãos envidraçados e a constante inovação na área é o contributo para a certificação energética dos edifícios. Este contributo para o avanço do conhecimento, não é apresentado de forma explícita, ficando o leitor responsável de extrair essa informação com a leitura das conclusões.

1.5. Organização do texto

A presente dissertação divide-se em duas partes distintas. A primeira do qual fazem parte os capítulos introdução, a energia solar e os edifícios e tecnologias aplicadas nos vãos envidraçados, que documenta num todo, o estado da arte e os parâmetros energéticos associados aos vãos envidraçados. E uma segunda parte de investigação (metodologia de análise, caso de estudo, apresentação e análise dos resultados, discussão e conclusões) que basicamente transcende toda a informação adquirida para o cenário real à luz da regulamentação em Portugal. A primeira parte, sobre a energia solar nos edifícios, aborda as propriedades da radiação solar e seu comportamento com os vãos envidraçados. Seguidamente, são apresentadas tecnologias disponíveis aplicáveis aos vãos envidraçados. Toda esta pesquisa incidiu em informação sobre trabalhos já realizados sobre vãos envidraçados nos edifícios e definir motivações, tendências e tecnologias emergentes. Na segunda parte, a adopção de uma metodologia de análise paramétrica devidamente fundamentada na selecção de vãos envidraçados em Portugal num caso de referência, conduzirá a um processo racional de escolha de materiais e componentes. Na metodologia é enunciado o fundamento utilizado no estudo para obter conhecimento do comportamento energético e económico dos materiais mais usados nos vãos envidraçados. Na discussão, os resultados foram interpretados depois de obtidos pela metodologia aplicada ao modelo base. Finalmente nas conclusões estão presentes todas as verdades que se obtiveram com a realização deste trabalho académico.

2. A energia solar e os edifícios

2.1. Sumário

Neste capítulo são abordadas as principais características, intrínsecas aos vãos envidraçados, imprescindíveis à optimização e dimensionamento destes na concepção de edifícios.

2.2. Introdução

A envolvente exterior é o principal factor de regulação para a climatização interior e para o bem-estar do utilizador. Os sistemas de caixilharia, vidros e fachadas são parte fundamental da envolvente exterior e a sua permeabilidade ao ar e isolamento térmico têm influencia directa no consumo de energia. Segundo dados da ADENE e da DGEG, a melhoria dos vãos envidraçados pode ter um impacto até 5,7% na redução dos custos com energia em edifícios residenciais e de 9% em edifícios de serviço. Com efeito, estima-se que entre 25 a 30% das necessidades de aquecimento são devidas a perdas de calor com origem nos vãos envidraçados. [2]

As superfícies envidraçadas desempenham um papel muito importante no domínio da eficiência térmica dos edifícios. Nos edifícios residenciais, comerciais ou industriais, ao preencher um vão, seja em fachadas ou não, as janelas acumulam várias funções. Representam o contacto visual com o exterior e, ao mesmo tempo, permitem a entrada de luz nos ambientes e mantêm a clássica função de troca de ar e ventilação natural. Segundo as modernas técnicas de conservação de energia, o dimensionamento de um projecto de um vão envidraçado deve levar em atenção um aproveitamento optimizado da luz do dia, evitando o desperdício de iluminação artificial. Deve propor também soluções correctas para a troca de ar nos ambientes independentemente de aparelhos de climatização. O conjunto janela tem como principal função garantir a estanquicidade e a operacionalidade dos vãos, contribuindo para a optimização do desempenho energético e ambiental do edifício. [10]

2.3. Geometria Solar

É visto que a energia anual economizada por uma janela particular depende de vários factores: parâmetros próprios da janela, sua orientação, condições climáticas e parâmetros de construção. *M.C. Singh* e *S.N. Garg* concluem que, para o mesmo edifício, durante um ano os consumos energéticos variam com diferentes orientação das fachadas envidraçadas. [6]

Então é importante conhecer os diferentes percursos do sol ao longo do dia para todo o ano, no sentido de aproveitar da melhor forma os ganhos solares para o interior de um edifício nos casos em que o contributo da radiação se afigura necessário, e restringir a sua entrada, nos casos em que o mesmo efeito se afigura inconveniente. O estudo da forma do edifício e das obstruções à incidência de radiação solar designa-se habitualmente por geometria da insolação ou geometria solar. Geralmente, incluem-se neste estudo, os efeitos de palas e sombreamentos do próprio edifício, bem como os efeitos sombreadores devidos a edifícios vizinhos, a árvores, vegetação e à forma urbana do espaço circundante. Contudo, além da energia recebida pela radiação solar directa e difusa, um edifício recebe também a energia solar

reflectida pelo solo ou por edifícios circundantes, o que pode alterar a radiação total recebida, alterando consequentemente os critérios de orientação. [11]

A posição do Sol relativamente a um ponto da Terra varia ao longo de do dia e também ao longo do ano. Um observador situado num ponto da superfície terrestre vê o sol tomar diferentes posições no seu horizonte visual durante o dia devido ao movimento de rotação da terra em torno do eixo polar. Também notará que no Verão o sol atinge valores mais altos que no Inverno devido ao movimento de translação em torno do sol. [12]

A energia proveniente do Sol que atinge a Terra por unidade de tempo e numa superfície perpendicular à direcção da radiação será maior ou menor consoante a latitude, o tipo de clima e a altitude. Em termos de projecto será mais importante considerar a energia solar média incidente numa superfície vertical orientada a Sul na estação de aquecimento. [13]

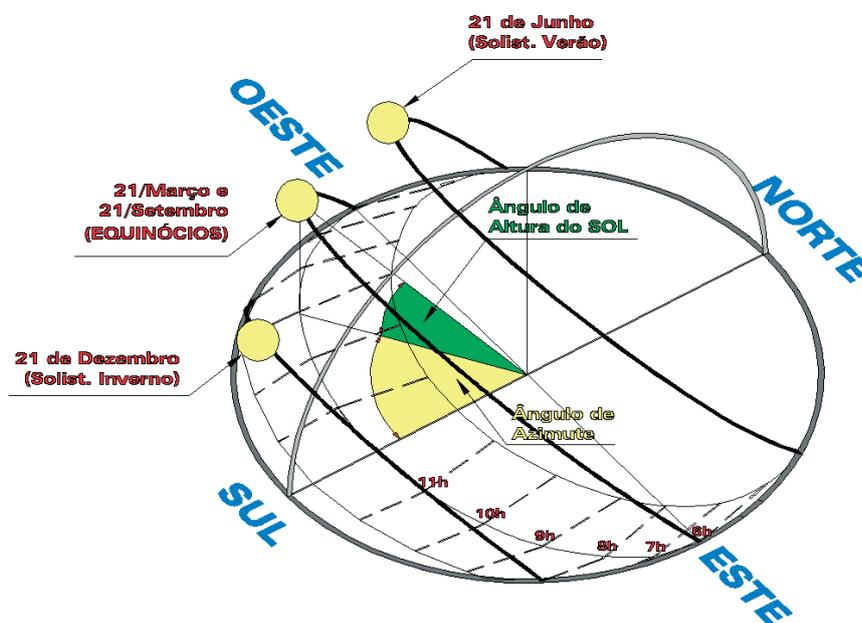


Figura 1 – Percurso do sol durante o dia ao longo do ano [11]

Em Portugal, no solstício de Inverno (21 de Dezembro) o sol nasce relativamente próximo da orientação Sudeste e põe-se relativamente próximo da orientação Sudoeste, variando o ângulo de azimute do nascer e do pôr-do-sol com a latitude do lugar. Neste dia, o ângulo de altura do sol apresenta os valores mais baixos de todo o ano. Nos equinócios (21 de Março e 21 de Setembro) o sol nasce exactamente na orientação Este e põe-se exactamente na orientação Oeste. No solstício de Verão (21 de Junho) o sol nasce relativamente próximo da orientação Nordeste e põe-se relativamente próximo da orientação Noroeste, variando o ângulo de azimute do nascer e do pôr-do-sol com a latitude do lugar. Neste dia, o ângulo de altura do sol apresenta os valores mais altos de todo o ano. [11]

2.4. Orientação de fachadas envidraçadas

A orientação do Sol ao longo do ano tem uma grande importância, no que respeita à definição da localização e dimensionamento dos vãos envidraçados num edifício. Apresentam-se algumas linhas de orientação relativamente à utilização dos envidraçados em Portugal. [11]

Em termos anuais verifica-se que um vão envidraçado **orientado a Sul**, receberá um maior nível de radiação solar do que noutras orientações, sendo que no Verão é uma fachada mais facilmente protegida dessa mesma radiação. Então:

– No Inverno, sendo necessário aquecer os edifícios, a estratégia correcta será a de captar a radiação solar disponível. É a orientação a Sul aquela que propicia maiores ganhos solares. O percurso do sol no Inverno é vantajoso para esta orientação, uma vez que o seu percurso se efectua para azimutes muito próximos do Sul geográfico.

– No Verão torna-se necessário minimizar os ganhos solares, uma vez o sol percorre Nordeste até Noroeste e aparece em todas as orientações, sendo que é a horizontal, que maior nível de radiação recebe. Assim, verifica-se que o percurso do sol, sendo próximo do zénite, apresenta um ângulo de incidência com a normal de valor mais elevado. Carrega menos ganhos solares facilmente atenuáveis se existir uma pala de sombreamento.

Num vão envidraçado **orientado a Este**, o dimensionamento deverá ter em conta que:

– No Inverno um vão com esta orientação recebe pouca radiação, pois o sol nasce próximo da orientação Sudeste, incidindo na fachada durante poucas horas do período da manhã e com um pequeno ângulo de incidência.

– No Verão a radiação solar incide em abundância numa fachada com esta orientação durante longas horas da manhã, desde o nascer do sol, que ocorre cedo e próximo da orientação Nordeste, até ao meio-dia. Os ângulos de incidência são próximos da perpendicular à fachada, o que maximiza a captação de energia solar, que nesta estação é indesejável.

Num vão envidraçado **orientado a Oeste**, sendo simétrico em relação a um vão orientado a Este, os efeitos da acção solar são semelhantes aos deste, diferindo apenas no período do dia em que ocorrem. É no período da tarde que ocorrem as maiores temperaturas do ar no exterior, conjugando-se assim dois efeitos muito negativos. Assim:

– No Inverno uma fachada orientada a Oeste recebe pouca radiação durante poucas horas do período da tarde. Os ângulos de incidência são elevados, o que reduz o efeito da radiação.

– No Verão a radiação solar incide em abundância numa fachada com esta orientação durante longas horas da tarde, desde o meio-dia até ao pôr-do-sol, que ocorre tarde e próximo da orientação Noroeste. Estas fachadas são responsáveis por grandes cargas térmicas nos edifícios, sendo necessário ter um maior cuidado com elas, quer em termos de áreas, tipos de vidros e sombreamentos.

A fachada **orientada a Norte** é a menos problemática num edifício em termos de radiação solar, sendo pois a mais fria:

– No Inverno não recebe nenhuma radiação directa, porém recebe radiação difusa a partir da abóbada celeste e no Verão recebe uma pequena fracção de radiação directa do sol no princípio da manhã e fim da tarde.

2.5. Perdas e ganhos térmicos pela envolvente dos edifícios

A transmissão de calor por condução através da envolvente dos edifícios, quer sejam as perdas de calor através dos elementos construtivos da envolvente no Inverno, quer os ganhos indesejáveis de calor através dos mesmos elementos no Verão, são fenómenos que muito influenciam o comportamento térmico dos edifícios. Para minimizar estes efeitos em ambas as estações, deve aumentar-se a resistência térmica dos elementos construtivos. O que no caso da envolvente envidraçada se consegue através da selecção de janelas cujo conjunto (vidro+caixilho) apresente valores de resistência térmica mais elevados.

Restringir a condução é uma estratégia que, num clima temperado como o de Portugal, se deve promover nos edifícios para conseguir obter conforto no seu interior tanto de Inverno como de Verão. Enquanto no Inverno interessa restringir perdas de calor para o exterior através da envolvente, no Verão torna-se mais favorável restringir os ganhos excessivos de calor exterior de forma a manter uma temperatura mais constante no interior dos edifícios. [11]

2.6. Ventilação nos edifícios

No caso de processos de ventilação natural os edifícios estão sujeitos a trocas de massa de ar entre o interior e o exterior dependentes das diferenças de temperatura. Noutros casos a ventilação é forçada por equipamento mecânico de forma regulada e controlada. Qualquer destes processos induz no edifício uma carga térmica que importa ter em atenção no balanço térmico de qualquer edifício.

De salientar o importante papel da ventilação natural no Verão, como processo de arrefecimento nocturno. Mas também não é só no Verão que tal efeito é importante. Nas estações intermédias, Outono e Inverno, a ventilação natural é o processo mais eficiente no controlo do sobre e sub aquecimento dos edifícios, quando a temperatura exterior apresenta praticamente sempre valores abaixo das condições de conforto, interessa limitar as infiltrações. [11]

A estanquicidade dos vãos envidraçados é uma das evoluções tecnológicas mais positivas, porque permite controlar de forma eficaz a troca de calor entre o interior e o exterior. Mas esta estanquicidade obriga a definir a estratégia de ventilação natural, pelo menos para garantir as renovações de ar essenciais para a salubridade do ar interior. Com uma caixilharia mais estanque as renovações de ar essenciais podem ser conseguidas por ventilação natural e, quando esta não é desejada, através de grelhas de ventilação incorporadas no vão envidraçado ou de uma ventilação mecânica adequada. Acresce que estes processos são na maioria dos casos os únicos que permitem a renovação do ar interior, necessária por questões de conforto, e a necessidade de se manter esse mesmo ar num estado higrométrico que possa evitar a ocorrência de condensações interiores. [14]



Figura 2 - Sistema de ventilação controlável "Ventalis" [14]

2.7. Propriedades dos vãos envidraçados

Associando estética e segurança, os vãos envidraçados deixam de ser apenas produtos estruturais para inovar em termos de materiais e *design*. Além do conforto térmico e acústico, as janelas permitem fachadas diferenciadas e modernas e grandes possibilidades de renovação. Para seleccionar uma janela é necessário abordar temas, tais como o aspecto visual, o conforto, a radiação solar e propriedades térmicas, ópticas dos envidraçados.

2.7.1. Aspecto visual

Quando escolhemos as janelas para uma nova construção ou para um projecto de remodelação, a aparência é habitualmente a nossa primeira consideração. Muito frequentemente escolhe-se com base no gosto pessoal e não porque a janela ofereça um melhor desempenho. Contudo, o desempenho e o custo são dados incontornáveis. São factores que merecem ser levados em consideração com alguma atenção. Apesar de tudo a primeira base de selecção de uma janela é contribuir para alcançar um conceito arquitectónico exterior e interior. A utilização destes produtos racionalmente significa economia, segurança e estética, mas uma janela mal dimensionada pode tornar o ambiente escuro, demasiado quente ou frio e sem controlo de iluminação.

Proporcionando um toque requintado e confortável, os vãos envidraçados, bem dimensionados, adaptam-se satisfatoriamente às condições do clima. Também contam com as vantagens de possibilitar vários desenhos, acabamentos e detalhes. O vidro é um material nobre que oferece aos arquitectos e profissionais soluções criativas e inovadoras na concepção de edifícios, é capaz de transformar os espaços, oferecendo sensação de espaço, preservando o nível de intimidade desejado. A sua incrível diversidade de tons, de padrões, de aspectos e formas convertem-no num material de possibilidades infinitas. [15]



Figura 3 – Casa Belyea Faigin por Johnston Architects [38]

2.7.2. Factores humanos

2.7.2.1. Conforto tímico

O conforto tímico está integrado no conforto ambiental do qual faz parte o conforto visual incluindo a dinâmica das cores, conforto acústico e qualidade do ar. O estudo do conforto tímico está estritamente ligado com as áreas de Engenharia e Arquitectura por serem responsáveis pela concepção e criação dos ambientes nos quais o Homem passa grande parte da sua vida. O organismo humano pode ser comparado a uma “máquina tímica” a qual gera calor quando executa algum trabalho. O calor gerado pelo organismo deve ser dissipado para o ambiente de modo a que não aumente nem diminua a temperatura interna do corpo. Como o corpo humano  homot mico deve manter a temperatura corporal praticamente constante (37 C). Desequilrios ocasionados entre a geração e a dissipação do calor pelo organismo podem ocasionar sensações desconfortáveis. [16]

Um edifício supostamente confortável (curva A na figura 4) tem um bom isolamento, ganhos solares passivos (incluindo sistemas de sombreamento móveis e eficientes) e sistemas de habitação adaptativos. De Verão o edifício está protegido da radiação solar e possui sistemas de arrefecimento passivo. De Inverno utiliza os ganhos solares para aumentar a temperatura interior. O resultado é um edifício que na maioria dos climas europeus fornece conforto sem recurso a outra energia que não a do sol durante a maior parte do ano. A energia usada para aquecimento  reduzida de forma substancial como resultado da estação de aquecimento mais curta. Não  necessário arrefecimento se as cargas internas se mantiverem dentro dos limites razoáveis. Por outro lado, um edifício mal dimensionado (curva B) não possui um nível de isolamento adequado, nem é protegido da radiação solar. Não foi estudado de modo a usar de forma adequada a energia solar, nem para o arrefecimento passivo. A flutuação de temperatura atinge valores muito baixos de Inverno e muito altos de Verão. É por isso necessário instalar sistemas de climatização caros e com elevado consumo energético, de modo a compensar o facto do edifício não se adequar ao ambiente que o rodeia. [19]

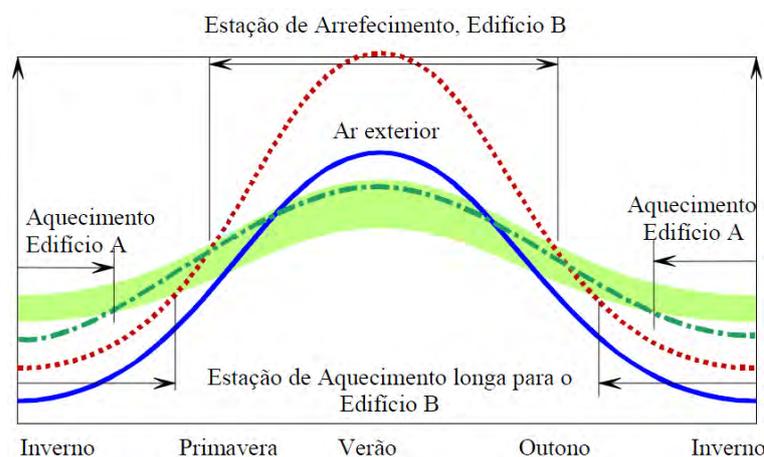


Figura 4 – Evolução da temperatura num edifício passivo durante o ano (hemisfério norte) [19]

O capítulo *Fenestration* da *ASHRAE* [17] oferece a orientação básica sobre janelas e conforto “Em climas frios, as janelas com o factor-U mais baixo tendem a dar os melhores resultados de conforto... Em climas quentes ou para orientações onde as cargas de arrefecimento são importantes, janelas com mais baixa temperatura superficial (para um dado factor-g) tendem a dar os melhores resultados de conforto”. Este conselho é um tanto limitado, não fornece nenhum modo explícito de avaliar se um dado produto produzirá resultados satisfatórios.

Uma janela influi no conforto térmico de três modos: radiação solar transmitida, radiação de onda longa emitida pela superfície do vidro interior quente ou fria, e movimento do ar induzido causada por uma diferença entre a temperatura da superfície do vidro e a temperatura do ar adjacente (convecção). Alguém que se sentou alguma vez perto de uma janela fria num dia de Inverno ou à luz solar directa num dia quente reconhece que as janelas podem causar desconforto térmico. Apesar deste largo conhecimento não há nenhum método padrão para quantificar a extensão de tal desconforto. Os sistemas de AVAC são projectados para responder aos sensores de temperatura do ar, que de facto não reflectem os problemas de desconforto, geralmente de assimetria radiativa, causados pelas janelas. [18]

A compreensão da influência das janelas no conforto térmico é importante não só para ajudar os desenhistas a criarem edifícios cómodos, é também para ajudar a avaliar os benefícios de janelas melhoradas. Embora seja bem claro que janelas de alto desempenho podem reduzir o consumo de energia num edifício, uma melhor compreensão de como elas afectam o conforto poderia levar a maiores economias. [15]

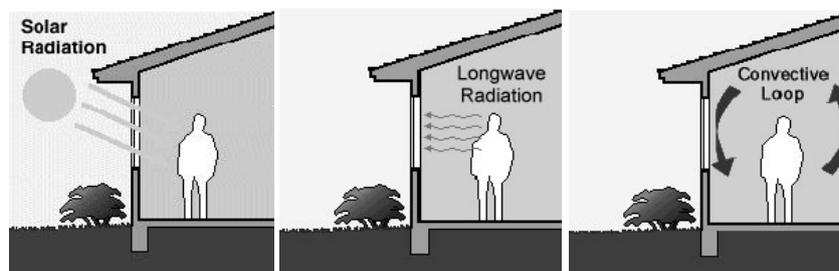


Figura 5 – Influência das janelas no conforto térmico [18]

Radiação de onda curta – No Inverno a luz solar directa no corpo de uma pessoa pode ser percebida como uma agradável presença. Contudo, na radiação diurna solar de Verão causará quase certamente o desconforto. A radiação de onda curta causa o desconforto térmico directamente quando é absorvida pelo corpo (roupa) e aumenta indirectamente a temperatura do ar e das superfícies num espaço. [18]

Radiação de onda longa – Radiação que quando emitida por uma janela quente ou fria afecta o conforto do ocupante de dois modos, primeiro influi na troca de calor radiativo total entre o corpo e o meio afectando o equilíbrio de calor no corpo e por isso o conforto, em segundo lugar, mesmo quando há um calor total equilibrado, pode resultar de campos de radiação assimétrica perto de janelas e causar desconforto local de uma ou várias partes do corpo. [18]

Correntes convectivas – O movimento do ar pode ser visto como uma brisa agradável quando o ambiente é quente, tradicionalmente usado para o arrefecimento nos edifícios ventilados, ou pode ser considerado como uma corrente de ar desagradável. A corrente de ar é definida como o arrefecimento de um local não desejado do corpo causado pelo movimento do ar. Normalmente ocorre quando o equilíbrio do calor do corpo é neutro ou frio. [18]

2.7.2.2. Conforto visual

O conforto visual nos edifícios é uma condição importante a alcançar para promover o bem-estar, a saúde e a produtividade. Em parte, o conforto visual é determinado pelo panorama da edificação para o exterior, vista esta que tem extrema relevância para o nosso bem-estar. O conforto visual é também determinado pela iluminação natural que captamos com os nossos olhos, receptores extremamente sensíveis e complexos, que precisam de conforto para funcionarem de forma eficiente. Apesar de nem toda a radiação solar ser benéfica para o ser humano, a luz natural, com o seu largo espectro de tipos de radiação é a que melhor que assimilamos e que menos cansaço nos causa quando trabalhamos. [39]

O factor visual de um espaço influenciam o conforto e a produtividade dos ocupantes, mas também o seu consumo energético. O objectivo é garantir iluminação suficiente, sendo de evitar o brilho excessivo, e garantir privacidade. [20]

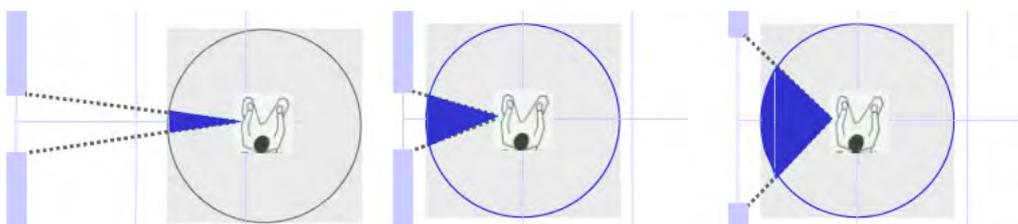


Figura 6 – O factor visual descreve quanto uma pessoa “vê” uma superfície [18]

Enedir Ghisia e John A. Tinker, apresentam uma metodologia para prever o potencial de energia poupada em iluminação usando o conceito da área ideal envidraçada onde há efectivamente integração da luz natural com a artificial. Grandes áreas envidraçadas permitem mais luz do dia num espaço, mas também podem possibilitar excessivos ganhos ou perdas de calor que levam ao consumo de energia. Especificar uma área ideal envidraçada para um espaço, em qual há um equilíbrio entre fornecimento de luz natural e carga térmica solar, conduzirá a uma situação onde o consumo de energia do espaço é otimizado. [7]

Sistemas de controlo, sendo o sombreamento exterior uma das medidas referenciada neste documento, também são necessários. Por um lado, para determinar a quantidade de luz natural que entra num edifício e nos permite desempenhar diversas actividades e funções, por outro existe o desafio de determinar a quantidade e qualidade da luz natural que deixamos entrar e que vai determinar o ambiente do espaço que ocupamos. Os sistemas de sombreamento exterior que existem no mercado são extremamente diversificados e algumas das suas características são determinantes para o conforto visual. [20]

Em seguida, apresenta-se uma lista dos factores primários que influenciam o conforto através de uma janela. Organizado segundo os parâmetros que afectam condições de visão entre a pessoa e o meio, os que determinam a temperatura superficial interior da janela e os factores humanos:

- Geometria da janela
 - Geometria do espaço
 - Localização do ocupante
 - Tipo de vidro
 - Tipo de caixilho
 - Condições exteriores (T_{db} , vento, sol)
 - Condições interiores (T_{ar} , HR, velocidade do ar)
 - Factores humanos (roupa, taxa metabólica, localização)
- } Factores visuais
- } Temperatura interior superficial do vidro

2.7.3. O vidro e a radiação solar

Dados recentes da *WMO* indicam que a radiação solar incidente sobre uma superfície perpendicular ao eixo Terra/Sol, situada no topo da atmosfera, é de 1367W/m^2 . Após atravessar a atmosfera, num dia de céu relativamente limpo, a radiação solar atinge a superfície terrestre com uma potência inferior em cerca de 30% da registada no topo da mesma, ou seja aproximadamente de 1000W/m^2 . Esta radiação que atinge o solo é constituída por três componentes: radiação directa (atinge directamente a superfície), radiação difusa (desviada em diferentes direcções pelos componentes da atmosfera) e radiação reflectida (proveniente da reflexão no solo e objectos circundantes). [40]

Um raio solar ao atingir a terra é composto aproximadamente por 3% de raios ultravioletas responsáveis pela energia transmitida directamente através do vidro que a longo prazo pode resultar no desbotamento de tecido, na deterioração de plástico ou alterações da aparência de muitos tipos de madeira, 55% de raios infravermelhos de onda curta que quando absorvidos e irradiados pelo vidro convertem-se em energia de onda longa e 42% de luz visível. Estas três partes da radiação correspondem respectivamente a três faixas de comprimento de onda. Os ultravioletas ocorrem de $0,28$ a $0,38\mu\text{m}$, a luz visível de $0,38$ a $0,78\mu\text{m}$ e os infravermelhos de $0,78$ a $2,5\mu\text{m}$. A repartição energética do raio solar global, em função do comprimento de onda entre $0,3$ e $2,5\mu\text{m}$ (espectro), numa superfície perpendicular à incidência do raio. Este espectro determina os requisitos da norma EN 410 [60] e um determinado número de parâmetros normalizados relativos à caracterização do ar e da radiação difusa. [21]

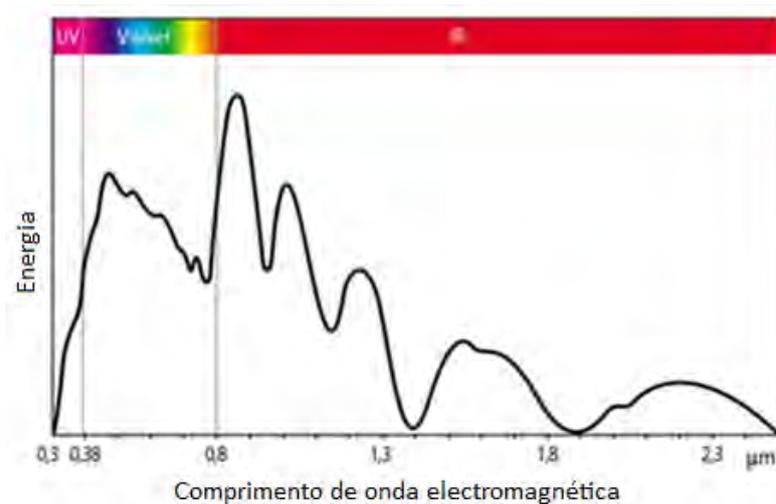


Figura 7 – Espectro do raio solar global segundo a EN 410 [21]

A sensação de luz que nos é conferida pela radiação solar é devida à acção exclusiva duma radiação electromagnética situada numa faixa de comprimento de onda entre $0,38$ e $0,78\mu\text{m}$. Com efeito, são estas radiações que, com maior ou menor eficácia do nosso globo ocular dependendo do comprimento de onda permitem o fenómeno fisiológico da visão. A eficácia luminosa das diferentes radiações permite transformar um fluxo de energia emitido por uma fonte de radiação num fluxo luminoso. [21]

Três coisas acontecem à radiação solar que atravessa uma superfície transparente: alguma radiação é transmitida, outra reflectida e o resto é absorvida, devolvendo parte para o exterior e parte para o interior. Os vestígios destas três relações sobre o conjunto dos comprimentos de onda constituem as curvas espectrais do vidro. Para uma dada reflexão incidente estas relações dependem da cor do vidro, da sua espessura e no caso de vidro com capa da natureza desta. Manipular estas proporções de energia transmitida, reflectida e absorvida para diferentes comprimentos de onda de radiação solar, tem sido a fonte inspiradora para os avanços tecnológicos realizados nos vidros para vãos envidraçados. O desenvolvimento e aperfeiçoamento do desempenho das superfícies envidraçadas é baseada no progresso tecnológico de capas metálicas e filmes isolantes aplicados ao vidro. Assim, a escolha do vidro deve ser feita tendo em consideração as suas principais características descritas no próximo tema. [15]

2.7.4. Desempenho térmico e óptico

As características de comportamento térmico e óptico do vidro são aquelas que quando mal ajustadas em fase de projecto tem repercussões graves durante o funcionamento normal do edifício. A distinção entre comportamento térmico e óptico é realizada devido ao facto do vidro se comportar de uma forma particular para o comprimento de onda da radiação que o atinge. Assim para comprimento de onda dentro do domínio do visível o comportamento do vidro denomina-se óptico e para comprimentos de onda no domínio dos infravermelhos o comportamento do vidro denomina-se térmico. Os mecanismos de transmissão de calor que envolvem variações de temperatura (condução, convecção e radiação) são complexos, pois ocorrem quase sempre em simultâneo. A evaporação e a condensação também são mecanismos de troca de calor, apesar de não resultarem num aumento da temperatura sensível. As características dos materiais de construção relacionadas ao seu desempenho térmico podem ser analisadas em função da energia que emitem e em função do comportamento que apresentam face à energia incidente. Estes fenómenos básicos de transferência de calor aplicados aos vãos envidraçados são analisados conjuntamente de modo a caracterizar energeticamente vários pontos fundamentais de um vão envidraçado. [22]

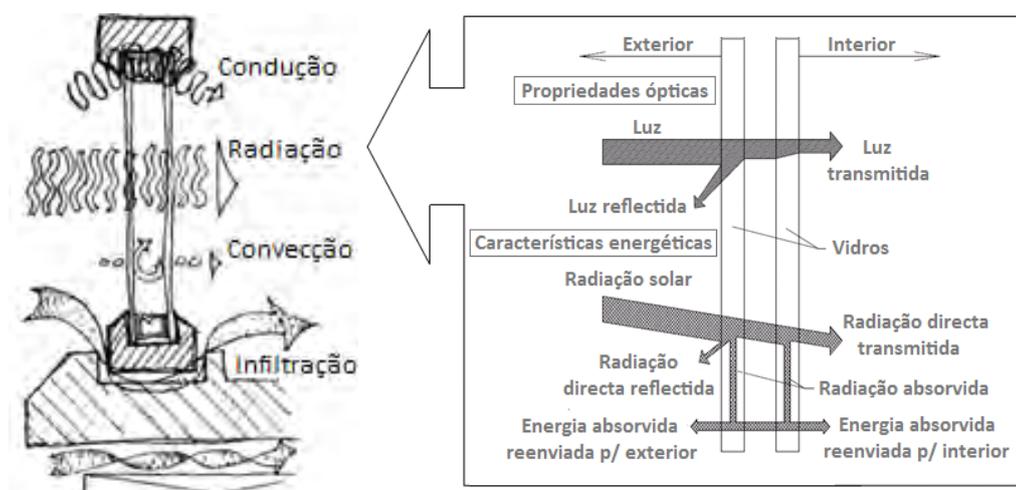


Figura 8 – Processos de transferência de calor numa janela [4]

Annica Nilsson e Arne Roos, mostraram exemplos de como podem ser organizadas propriedades ópticas e térmicas de janelas que incluem revestimentos de vitrificação e usadas para avaliar o desempenho de uma janela num edifício específico. Os parâmetros de interesse são o factor solar, o coeficiente de transmissão térmica, a transmissibilidade visível a temperatura do vidro. Está claro que existe uma variação enorme entre janelas e que a escolha certa não é uma tarefa simples. Das simulações energéticas simuladas concluíram que o factor-U e o factor-g são importantes para o desempenho de energia da janela. Os resultados obtidos não levam o factor-TV em conta que é um parâmetro adicional importante para reduzir a necessidade de energia num edifício. [3]

2.7.4.1. Coeficiente de transmissão térmica (U)

Quando existe uma diferença de temperaturas interior e exterior, o calor flui pelos elementos constituintes da janela através da troca de calor que existe entre duas superfícies de cada elemento. O seu valor convencional é estabelecido por coeficientes de convecção superficiais definidos previamente e nas condições de teste segundo a norma NP EN 673: 2000 [61]. Em todo o caso, a forma como a transferência de calor ocorre depende dos coeficientes de transmissão térmica do vidro e da caixilharia, das respectivas áreas, entre outras. [22]

Surge assim a necessidade de definir a forma de cálculo do coeficiente global de transmissão térmica de um vão envidraçado. A resposta é quantificada pelo coeficiente global de transferência de calor e representa o fluxo de calor que atravessa 1 m² da superfície para uma diferença de temperatura de 1°C entre o interior e o exterior. [17]

$$U_w = \frac{A_f \cdot U_f + A_g \times U_g + L_g \times \psi}{A_f + A_g} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right) \quad (\text{eq.1})$$

Onde:

- U_w – Coeficiente global de transferência de calor da janela (W/m².K)
- U_f – Coeficiente global de transferência de calor da caixilharia (W/m².K)
- U_g – Coeficiente global de transferência de calor do vidro (W/m².K)
- Ψ – Coeficiente global de transferência de calor linear do vidro (W/m.K)
- A_f – Área da caixilharia visível (m²)
- A_g – Área do vidro visível (m²)
- L_f – Perímetro do vidro visível (m)

2.7.4.2. Factor solar (g)

O factor solar define-se como sendo o quociente entre a energia solar transmitida através do vidro para o interior e a energia solar nele incidente. Esta energia solar transmitida é o somatório da energia solar que entra por transmissão directa e a energia que o vidro confere ao ambiente interior devido ao seu aquecimento intrínseco por absorção energética. [13]

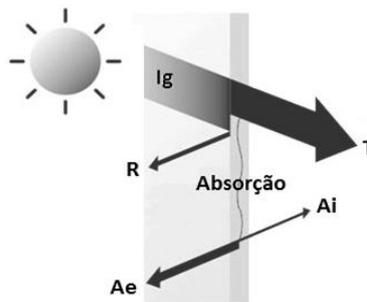


Figura 9 – Comportamento térmico do vidro à energia solar incidente [15]

Onde:

- I_g – Energia solar global incidente (radiação directa + difusa)
- T – Transmissão energética global
- R – Reflexão energética global
- A_e – Fração da energia absorvida reenviada para o exterior
- A_i – Fração da energia absorvida reenviada para o interior

O factor solar constitui uma medida da fracção da energia solar que efectivamente atravessa para o interior dos compartimentos e é variável com o ângulo de incidência solar, condições externas de convecção natural, velocidade do vento e espessura do vidro. De acordo com a NP EN 410: 2000 [60] o factor solar de um vidro é calculado pela soma do factor de transmissão directa da energia solar com o factor de transmissão secundária de calor do envidraçado relativamente ao interior. Este último é o resultado da transmissão de calor por convecção e por radiação da energia que tinha sido previamente absorvida pelo envidraçado. O factor solar é determinante do ponto de vista de projecto da envolvente dos espaços, já que é este que dita qual a quantidade de radiação solar que chega ao interior. No mercado é comum encontrar factores solares para os vidros que variam entre 0,10 (vidro duplo de cor azul de controlo solar) e os 0,90 (vidro simples incolor). [22]

Em termos de regulamentação portuguesa o factor solar de um vão envidraçado (g_{\perp}) é o quociente entre a energia solar transmitida para o interior através de um vão envidraçado com o respectivo dispositivo de protecção solar e a energia da radiação solar que nele incide. [13]

2.7.4.3. Coeficiente de transmissão visível (TV)

É a percentagem da luz visível que atinge um envidraçado que passa para o interior (figura 10). Vidros com transmissibilidade elevada possuem um aspecto transparente e proporcionam uma iluminação abundante e vistas inalteradas. Vidros com transmissibilidade baixa devem ser usados em locais onde existam problemas de encandeamento graves, contudo possuem a desvantagem de criarem ambientes luminosos interiores insuficientes em certas condições meteorológicas sendo inadequados para a maior parte das aplicações de iluminação natural, uma vez que não permitem a entrada de luz natural suficiente para um correcto e adequado desempenho de tarefas visuais típicas. Há quase sempre a necessidade de utilização da iluminação artificial para complementar períodos diurnos significativos. Em termos práticos os valores dos factores de transmissão de luminosa podem oscilar entre os 5% (vidro duplo de cor azul) os 90% (vidro simples incolor). [22]

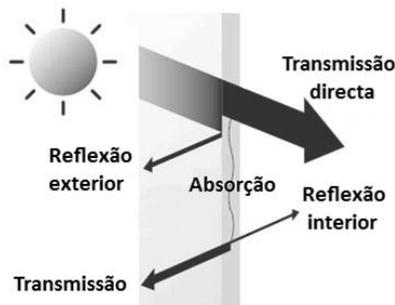


Figura 10 – Comportamento óptico do vidro à energia solar incidente [15]

A natureza da luz, a variação na transmissão e a absorção experimentada por materiais diferentes dão desempenhos e usos aos vidros também diferentes. A gama de selectividade de transmissão entre luz e calor é limitado pelo facto de que 53% de toda energia na radiação solar está no espectro visível. Portanto não é possível diminuir a transmissão de radiação total abaixo de 50% sem afectar a transmissão de luz. O factor-TV deverá ser definido de acordo com a tipologia de espaço e com as características de iluminação que se pretendem para esse mesmo espaço. [23]

2.7.4.4. Coeficiente de reflexão visível (RV)

Indica em que grau um determinado vidro se comporta como um espelho. Corresponde à parte visível da radiação que atinge o vidro e que é reflectida. A maioria dos fabricantes de vidro fornecem os valores da reflectividade exterior, responsável pela visão para o exterior diurna e da reflectividade interior, responsável pelo efeito de espelho à noite. Todos os vidros lisos são de algum modo reflectivos podendo ainda ser efectuados vários tratamentos, tais como a deposição superficial de filmes metálicos para aumento da sua reflectividade. [21]

Vidros com elevada reflectividade possuem uma baixa transmissibilidade e consequentemente possuem as desvantagens inerentes a esta propriedade (ambiente interior pobre em luz natural). Em termos práticos os valores de reflexão luminosa podem ir dos 5% (vidro simples incolor) até aos 60% com utilização de películas de protecção na superfície exterior do vidro. [22]

2.7.4.5. Coeficiente de selectividade espectral (CSE)

A selectividade espectral refere-se à capacidade de um determinado material envidraçado responder de modo diferente à radiação de diferentes comprimentos de onda ou, por outras palavras, um vidro espectralmente selectivo ideal permite a transmissão abundante de luz visível e rejeita o calor associado à radiação infravermelha. A selectividade espectral é avaliada através do coeficiente CSE que se define como sendo o quociente entre o factor-TV e o factor-g do vidro. Valores de CSE superiores a 1,2 indicam uma selectividade espectral crescente. Novos tipos de envidraçados, comercialmente disponíveis, possuem esta propriedade permitindo que o controlo solar possa ser efectuado por vidros praticamente incolores. [15]

Este tipo de vidros possuem uma camada de um filme responsável pela selectividade espectral e uma cor neutra ou levemente azul esverdeada. [23]

2.7.5. Propriedades técnicas

2.7.5.1. Permeabilidade ao ar

A permeabilidade ao ar de uma janela é a medida do caudal de ar que escapa por esta através das juntas caixilho/vidro. São perdas e ganhos por ventilação, geralmente não controlada e não desejada, causada por falhas nos vãos envidraçados. Este efeito é medido em termos de quantidade de ar que passa por uma unidade de área da janela devido a variações de pressão. Na realidade as infiltrações variam ligeiramente com o vento e com a temperatura. Os efeitos do factor-U e do factor-g nesta situação pouco interessam. A questão primordial para controlar a infiltração depende do tipo de janela e da qualidade da assemblagem, essencialmente da caixilharia e das ferragens. Janelas fixas ajudam a reduzir as infiltrações, pois são mais fáceis de isolar. As janelas operáveis são necessárias para a ventilação, mas são mais susceptíveis de maior permeabilidade. [22]

Em termos de regulamentação portuguesa a norma EN 12207 [62] indica as diferentes zonas em que se deslocam estas infiltrações de acordo com a pressão do vento e o caudal em m^3 (tanto pela superfície da janela como pelo comprimento das juntas). Uma janela ensaiada pertence a uma determinada classe e será classificada com um grau que vai desde Classe 0 (sem ensaiar) a Classe 4 (menor permeabilidade). [41]

2.7.5.2. Condensação

A condensação nas superfícies das janelas são responsáveis pela visibilidade obstruída, redução da intensidade da iluminação natural e a deterioração de objectos interiores (manchas, pintura descascada). A condensação superficial ocorre quando a temperatura à superfície de um sólido (vidro ou caixilho) é mais baixa do que o ponto de orvalho do ar húmido na sua vizinhança imediata. A humidade apresenta-se no ar na forma do vapor e transforma-se em água líquida em contacto com essas superfícies frias. As gotas resultantes formam um filme de água e percorrem o vidro quando a condensação é pesada ou não se evaporam suficientemente rápido. Tal condensação pode ser reduzida ou eliminada aumentando a temperatura superficial interior e/ou reduzindo a humidade relativa do ar interior. Cada vez mais aumentam as características de estanquicidade e impermeabilidade afim de evitar transferências térmicas com o exterior. [19]

O fenómeno da condensação superficial sobre vidros duplos apresenta-se em três diferentes formas, em particular sobre a face exterior, sobre as superfícies internas do vidro duplo e sobre a face interior. Devido ao efeito de ponte térmica derivada do caixilho e dos perfis separadores dos vidros, a formação de condensação será muito diferente consoante nos encontramos dentro ou fora do edifício. A condensação superficial sobre a face interior começa sempre nos cantos, precisamente por causa do arrefecimento suplementar induzido pela ponte térmica. Os perfis separadores em materiais compósitos, logo mais isolantes, permitem reduzir o risco de ocorrência de condensação nos cantos. A condensação superficial sobre a face exterior raramente se forma nos cantos, porque a periferia do vidro exterior aquece por efeito da ponte térmica. O ponto mais frio da face exterior do vidro situa-se geralmente na zona mais central, onde as perdas térmicas são menos significativas. [25]

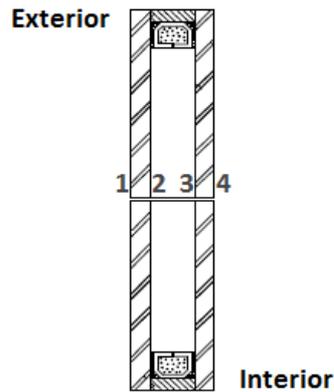


Figura 11 – Caracterização da condensação superficial em diferentes faces num vidro duplo [4]

Condensação na **face exterior** (1) – A condensação superficial sobre a face 1 do vidro duplo aparece quando a temperatura sobre a face do vidro é claramente mais baixa que a temperatura do ar exterior e se o ponto de condensação deste último é superior à temperatura do vidro. A temperatura superficial no exterior de um vidro é função do fluxo de calor que vem do interior e atravessa o vidro, que por si já é função da diferença de temperatura entre as superfícies interior e exterior do vidro e do factor-U, da troca de calor com o ar exterior por convecção e perdas por radiação, essencialmente para a atmosfera. A condensação superficial no exterior dos vidros é um fenómeno que ocorre por vezes durante a noite ou primeiras horas da manhã, em vidros bem isolados, com tempo limpo e na ausência de vento. Este fenómeno não deve ser interpretado como uma falta de qualidade do vidro duplo, mas antes como a evidência de um bom isolamento térmico. [25]

Condensação nas **faces internas** (2 e 3) – A formação de condensação nas faces internas do vidro duplo é uma indicação de que a câmara de ar ou de gás deixou de estar estanque. Os agentes de desidratação da ficam assim rapidamente saturados e todo o ar húmido que consiga penetrar através da junta periférica diminuirá a visibilidade por formação de condensação nas faces internas do vidro duplo. Este processo é irreversível pelo que o vidro duplo deve ser substituído assim que se manifeste esta ocorrência, no entanto pode ocorrer alguma condensação em circunstâncias muito especiais. [25]

Condensação na **face interior** (4) – O fenómeno da condensação superficial sobre a face 4 do vidro duplo depende essencialmente dos factores como o clima exterior, a temperatura do ar no interior, a produção de humidade no edifício, o débito da ventilação e a temperatura superficial da parede. Para limitar a condensação convém agir sobre cada um destes parâmetros à excepção do clima exterior sobre o qual naturalmente não temos nenhum controlo. [25]

2.8. Conclusão

Este capítulo pretendeu mostrar a importância que determinadas propriedades dos envidraçados têm à escala da construção e do desempenho energético de edifícios. Foi possível demonstrar que na fase de projecto devemos antecipar um conjunto de situações e parâmetros como o factor-U, o factor-g e o factor-TV que são essenciais para o bom ou mau dimensionamento de um vão envidraçado e condicionarão o desempenho energético de uma construção na sua utilização. O rótulo do desempenho energético do *NFRC* resume muito do que foi dito das características de desempenho de uma janela. É uma certificação conceituada que identifica os principais factores da qualidade de um vidro. Usando a informação contida no rótulo os construtores e consumidores podem comparar um produto credível com outro e tomar decisões informadas sobre as janelas adquiridas.

		World's Best Window Co. Millennium 2000+ Vinyl-Clad Wood Frame Double Glazing • Argon Fill • Low E Product Type: Vertical Slider	
ENERGY PERFORMANCE RATINGS			
U-Factor (U.S./I-P)		Solar Heat Gain Coefficient	
0.35		0.32	
ADDITIONAL PERFORMANCE RATINGS			
Visible Transmittance		Air Leakage (U.S./I-P)	
0.51		0.2	
Condensation Resistance			
51			

Figura 12 – Rótulo *NFRC* de uma janela com vidro duplo low-E e caixilho em PVC [42]

3. Tecnologia aplicada nos vãos envidraçados

3.1. Sumário

É o capítulo mais extenso e abrange o tema de um modo informativo de maneira a que se fique a conhecer a tecnologia aplicada nos vãos envidraçados. Desde, a concepção e tipos, às tendências construtivas emergentes do vidro, fazendo referência também à importância da caixilharia e dos dispositivos de sombreamento, incluindo a integração de energia fotovoltaica.

3.2. Introdução

O vidro é feito de uma mistura de matérias-primas naturais. Ilustres historiadores contam que o vidro foi descoberto por acaso, quando navegadores egípcios e fenícios ao fazerem fogueiras na praia, perceberam que a areia e o calcário das conchas se combinavam através da acção da alta temperatura dando origem a um material vítreo. As matérias-primas do vidro sempre foram as mesmas há milhares de anos. Somente a tecnologia é que mudou acelerando o processo e possibilitando maior diversidade para seu uso. [43]

Existem abordagens fundamentais para melhorar o desempenho das superfícies vidradas. As técnicas de modificação da superfície estão preocupadas com a mudança dos constituintes ou da estrutura do vidro na face. Muitas das primeiras superfícies modificadas e produtos capeados eram apenas no sentido do melhoramento da reflectividade do vidro para diminuir o sobreaquecimento. [23]

Historicamente existem duas maneiras de se aplicar revestimentos em vidro. No processo *on line* (pirolítico) o revestimento é aplicado durante a produção de vidro. O processo *off line* acontece depois que o vidro plano é produzido usando o *Magnetron Sputter Vacuum Deposition*. Em geral, o processo *MSVD* oferece mais opções de revestimento e opções de ganho de luz e de calor melhores que o processo pirolítico. O *MSVD* trabalha a nível molecular para produzir um desempenho excelente e oferece vantagens significativas sobre os revestimentos *hard coating* (pirolíticos) e tradicionais. Utilizando gases variados, como Árgon ou Azoto e Oxigénio, adicionando camadas metálicas e dieléctricas em diferentes sequências, consegue-se produzir uma grande variedade de revestimentos para atender aos requisitos de estética e desempenho. Os revestimentos pós-temperáveis *sputtering* já podem receber tratamento com calor e têmpera, ao contrário dos revestimentos tradicionais *soft coating*, que exigem que o vidro seja cortado e temperado antes do revestimento limitando as opções e aumentando o tempo de produção. [44]

Os vidros coloridos ou tingidos têm uma aparência e desempenho derivado de graus diferentes de absorção e transmissão fornecido por químicos no derretimento. Vidros comerciais correntes usualmente usam corantes ao mesmo tempo que reduzem o conteúdo de óxido de ferro diminuindo a visão. [23]

A cor aparente de um vidro é o resultado da absorção selectiva da gama visível espectral. A cor dos envidraçados afecta a aparência das vistas do exterior e das superfícies e objectos interiores. Os vidros com tonalidades fortes podem alterar significativamente a aparência das cores no interior. Existe uma correlação estreita entre a cor dos envidraçados e as suas propriedades fotométricas. De um modo geral, quanto mais escura for a cor mais baixa será a transmissão da radiação visível e, consequentemente maior poderá ter de ser o recurso à iluminação artificial. [24]

3.3. Tipos de vidro

A seguir apresentam-se valores das principais características dos vários tipos de vidro: factor-U ($W/m^2.K$), factor-g e factor-TV. Notar que estes valores só são válidos para o centro dos vidros, não podendo nunca servir para avaliar a totalidade do vão envidraçado. A escolha das caixilharias é determinante para a avaliação do comportamento total do envidraçado. A informação presente é a média de produtos similares de diferentes fabricantes. Produtos específicos terão desempenhos energéticos ligeiramente mais altos ou mais baixos. [45] [46]

3.3.1. Vidro simples incolor

O ingrediente principal da massa para fabricar vidro incolor ou transparente é areia de sílica misturada com sais alcalinos, tais como cinza de madeira e soda. A figura ilustra o desempenho de um vidro típico simples incolor. Relativamente a todas as outras opções é a que permite maior transferência de energia e maior factor-TV. [45]

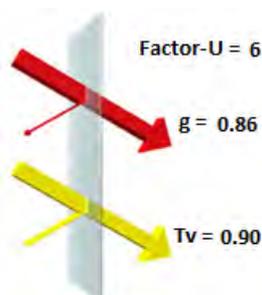


Figura 13 – Vidro simples incolor [45]

3.3.2. Vidro simples colorido

Os vidros coloridos são feitos adicionando corantes à massa incolor, criando as cores mais conhecidas (bronze, cinza, verde e azul). A presença destes pigmentos coloridos fazem o vidro tornar-se termo-absorvente em proporções diferentes de acordo com a respectiva cor. Existem mais duas formas de produção industrial de vidro colorido: deposição de uma camada reflectiva ou aplicação de uma película plástica colorida. A figura na página seguinte, ilustra o desempenho de um vidro típico simples colorido (bronze ou cinza). O primeiro propósito da cor é reduzir o factor-g do vidro, mas também reduz bastante a o factor-TV em relação ao vidro simples incolor ou outro tipo de vidro colorido como o verde ou azul. O vidro colorido é útil no controlo do encadeamento, mas a cor não tem nenhum efeito no factor-U, reduz apenas o factor solar que pode ser um benefício no Verão e subestimar um pouco o Inverno. Depende das condições dos climas locais. [45]

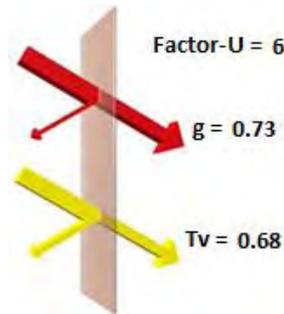


Figura 14 – Vidro simples colorido [45]

3.3.3. Vidro duplo incolor

O vidro duplo tradicional (insulado) é constituído por dois vidros incolores separados entre si por um perfil, normalmente metálico que forma uma câmara de ar. Este vidro duplo oferece um isolamento térmico aproximadamente duas vezes superior à de um vidro simples. O processo consiste em colocar entre os dois vidros ar desidratado ou um gás que melhore o isolamento. Os dois vidros são separados por um perfil, geralmente em alumínio que contém um hidro-secante garantindo a completa ausência de vapor de água. Este sistema faz com que o vidro duplo incolor seja um óptimo isolante térmico, acústico e tenha elevada transmissão visível. [45]

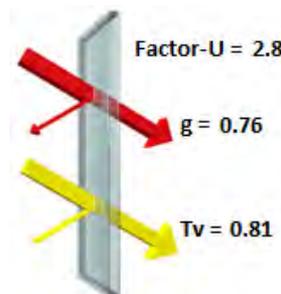


Figura 15 – Vidro duplo incolor [45]

3.3.4. Vidro duplo colorido

A figura na página seguinte mostra o desempenho de um vidro típico duplo colorido (bronze ou cinza). O vidro exterior é colorido e o vidro da zona interior é incolor. Produtos coloridos são semelhantes em desempenho energético. Também reduz o factor-g comparado com o vidro duplo incolor ou até mesmo o caso do verde e azul-claro que oferecem um factor-TV significativamente mais alto. Mudando a cor da janela pode aumentar a privacidade visual durante o dia, porém à noite o efeito é invertido, especialmente se o vidro for combinado com uma camada reflectiva. As prioridades para o vidro duplo colorido são reduzir a transmissão visível e reduzir a quantidade de energia solar transmitida pelo vidro. Para as fachadas onde a luz natural é desejável deve-se usar uma coloração de alto desempenho. [45]

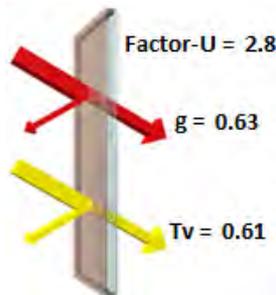


Figura 16 – Vidro duplo colorido [45]

3.3.5. Vidro duplo colorido de alto desempenho

Na tentativa de resolver o problema da redução da transmissibilidade visível com vitrificação colorida tradicional, surgiram os fabricantes de vidro colorido de alto desempenho. Este tipo de vidro transmite preferencialmente a parte da luz visível do dia do espectro solar, mas absorve a parte próxima da zona infravermelha. Isto é realizado com aditivos especiais durante o processo de fabrico do vidro. O vidro colorido é durável e pode ser usado em aplicações de janela monolítica ou multi-vítrea. Vidros de espectro selectivo têm uma coloração verde ou azul-claro e têm o factor-TV mais elevado que o vidro tradicional bronze e têm factor-g mais baixo. A coloração do vidro não interfere com o factor-U, mas porque são vidros absorptivos são usados como vitrificação externa numa janela de vidro duplo. A coloração de alto desempenho trouxe uma melhoria significativa no vidro convencional incolor, bronze ou cinza e uma melhoria modesta no verde e azul que já têm alguma selectividade. [45]

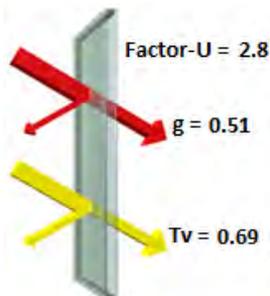


Figura 17 – Vidro duplo colorido de alto desempenho [45]

3.3.6. Vidro duplo reflectivo

Os vidros, reflectivos ou metalizados, são vidros que sofrem um tratamento onde recebem óxidos metálicos com a finalidade de reflectir os raios solares reduzindo a entrada de calor. Proporcionam ambientes mais confortáveis e economizam energia usada em aparelhos de climatização essencialmente em climas quentes. O vidro reflectivo filtra os raios solares através da reflexão da radiação, garante o algum controlo da intensidade de luz e de calor transmitido para os ambientes internos. [46]

A transformação do vidro pelo método de flutuação em reflectivo consiste na aplicação de uma camada metalizada numa das suas faces feita pelos processos *hard-coating* ou *soft-coating*. [24]

O vidro reflectivo não é um espelho, ele reflecte parcialmente para o lado onde há mais luz. Isso significa que durante o dia a reflexão é externa e durante a noite é interna. Se essa reflexão for excessiva o resultado pode ser desagradável. Portanto é preciso considerar a percentagem de reflectividade interna. É importante considerar também o efeito da cor ao especificar um vidro reflectivo. Enquanto o factor-g do vidro decai com vidro colorido, o factor-TV decresce mais rapidamente. O factor solar pode ainda ser reduzido dependendo da espessura e reflectividade da camada e a sua localização no sistema de vitrificação. Vidros reflectivos são normalmente usados em edifícios comerciais para grandes envidraçados em climas quentes ou para janelas com ganhos de calor solares significativos. [46]

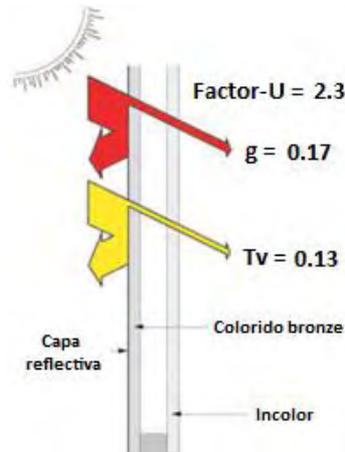


Figura 18 – Camada altamente reflectiva num sistema de vidro duplo colorido bronze [46]

3.3.7. Vidro duplo baixo emissivo (*low-E*)

A camada múltipla mais importante dos últimos anos, que tem transformado o desempenho dos envidraçados, tem sido a camada de baixa emissividade selectiva. [23]

Jitka Mohelnikova e *Hasim Altan* classificam e analisam o potencial de vidros baixo emissivos e concluem que estes vidros especiais têm uma vasta aplicação dentro da arquitectura solar. A concepção de edifícios energeticamente eficientes requerem necessidades mínimas para os sistemas AVAC em condições climáticas reais. O vidro tem um papel importante em edifícios eficientes, pois as construções são baseadas na utilização dos ganhos térmicos proveniente da radiação solar. Hoje em dia vidros especiais são usados em muitos edifícios e alguns têm capacidade para filtrar a parte ultravioleta ou infra-vermelha da radiação solar outros reduzem a transmissão de luz visível. No caso de vidros anti-reflectivos aumenta-se a radiação visível, mas também há vidros altamente reflectivos para a radiação de infra-vermelhos de ondas longas. Estes vidros pertencem ao grupo principal de envidraçados geralmente recomendados para propósitos arquitectónicos chamados de vidros *low-E*. [4]

Camadas *low-E* usam materiais que têm propriedades intrínsecas de baixa emissão para a radiação térmica. Tais capas são definidas como aquelas que são predominantemente transparentes sobre o comprimento de onda visível e reflectiva na onda longa e onda curta infravermelha e raios ultravioleta. É um vidro que impede a transparência térmica entre dois ambientes. É um vidro com excepcional desempenho energético, reflectividade externa fica entre 8% e 10% e factor-TV entre 70% e 80%. É importante aliado da estética das fachadas, pois auxilia no controlo solar, sem criar o efeito espelho.

Essencialmente só a parte luminosa é transmitida através da janela, resultando numa “iluminação fria” para interiores. Algumas das películas *low-E* actuais para uso comercial e residencial rejeitam tanto calor quanto os vidros reflectivos, embora as janelas de baixa emissividade pareçam janelas incolores comuns. [48]

No Inverno a radiação térmica proveniente do aquecimento interior é reflectida pela capa de baixa emissividade. O calor é assim conservado no interior da divisão. No Verão, a capa filtra a radiação solar e limita assim o aquecimento no interior da divisão, como também calor de ondas longas emitidas de outros objectos externos, como pavimento e edifícios adjacentes. A capa não deixa passar cerca de 40% de energia solar. [47]

Existem basicamente três tipos de películas *low-E*: *thin films*, *thick films* e *microgrid*:

As *thin films* (*soft coats*) estão sujeitas à corrosão e necessitam ser protegidas. Requerem camadas múltiplas de material ultra fino, sendo produzidas pelo método *MSVD*.

As *thick films* (*hard coats*) resistem bem à erosão e à corrosão, sendo fabricadas sob altas temperaturas. Apresentam espessuras maiores e são fabricadas com semicondutores como o óxido de estanho entre outros. Alguns membros dessa classe de películas apresentam alta reflectividade à radiação infravermelha devido à concentração controlada de portadores de carga.

O último tipo de reflector selectivo é produzido mecanicamente pela gravação de lâminas de metal para a criação de aberturas de aproximadamente 2,5 micron para permitir a passagem da luz mas não a radiação longa que é reflectida. A técnica é usada só às vezes para melhorar o desempenho de *thick films* como as de óxido de estanho. [48]

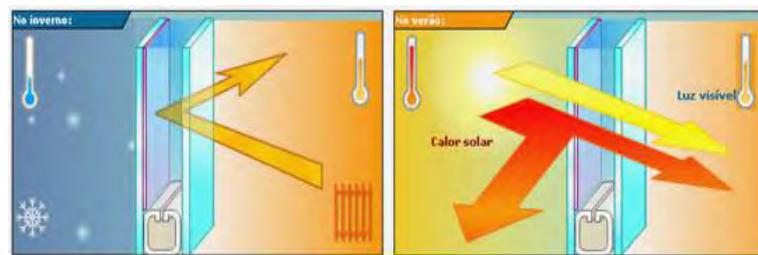


Figura 19 – Desempenho do vidro baixo emissivo no Inverno e no Verão [49]

Estas camadas *low-E* contribuem com um factor-U baixo e são projectadas para reflectir a radiação solar controlando os ganhos solares totais. Permitem ainda obter um alto ganho solar ou um baixo ganho solar, ou um ganho solar moderado, contribuindo sempre com bons níveis de transmissão de luz natural, de acordo com a figura que se segue.

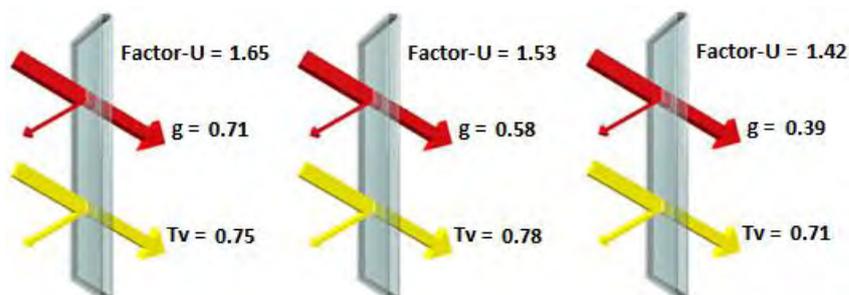


Figura 20 – Vidro *low-E*⁺ (alto ganho solar); Vidro *low-E* (ganho moderado); Vidro *low-E*⁻ (baixo ganho solar) [45]

Vidro duplo com alto ganho solar ($low-E^+$) – Vidros de alto ganho solar *hard coat* devido ao processo adjacente na produção do vidro. As propriedades aqui apresentadas são típicas de um vidro *low-E* projectado para reduzir a perda de calor, mas admitir alto ganho solar. Vidros *low-E* com alto ganho solar servem melhor os edifícios localizados, essencialmente, em climas com necessidades de aquecimento. [45]

Vidro duplo com ganho solar moderado ($low-E$) – Estes vidros *low-E* são produtos *soft coat*, devido ao processo adjacente na produção do vidro. Tais camadas reduzem perda de calor e deixam entrar uma quantia razoável de ganho solar e é geralmente usado em climas com necessidades de aquecimento e arrefecimento. [45]

Vidro duplo com baixo ganho solar ($low-E^-$) – Os vidros *low-E* são produtos também referidos *soft coat*. Este tipo vidro *low-E* reduz perda de calor no Inverno, mas também reduz ganho de calor no Verão. Comparado à maioria dos vidros colorido e reflectivo, o vidro *low-E* provê um nível mais alto de transmissão de luz visível para uma determinada quantia de redução de calor solar. Vidros de baixo ganho solar *low-E* são, normalmente, usados em edifícios localizados em climas com necessidades de arrefecimento. [45]

Vidros *low-E* baseados melhoram consideravelmente a eficiência energética de uma janela e no caso de substituição mantém-se o seu aspecto original. Adicionando um capeamento de baixo índice refractivo e anti-reflectivo, cobrindo ambos os lados do vidro *low-E*, possibilita ganhar mais luz natural e alterar os ganhos solares enquanto o factor-U permanece igual. *Tobias Rosencrantz* e seus colaboradores, investigaram a influência do factor de luz natural, factor solar e necessidade de aquecimento anual quando são colocadas capas anti-reflectivas num vidro *low-E* em relação a um vidro sem capas e a um vidro normal incolor numa habitação familiar típica na Escandinávia. O estudo demonstra que o benefício principal de usar camadas anti-reflectivas em vidros baixo emissivos é a melhoria da transmissão de luz visível. Para manter o factor-TV num espaço em que os vidros são substituídos com vidros *low-E*, o tratamento anti-reflectivo poderá ser uma alternativa economicamente possível, especialmente num cenário com custos de energia crescentes. [5]

3.3.8. Vidro multi-camada

Acrescentando um segundo vidro, o valor de isolamento do vidro é duplicado. Como esperado, acrescentando um terceiro ou quarto vidro o valor de isolamento da janela aumenta, contudo convergindo para um ponto de estagnação, assim surgiram as janelas de vidro triplo e quádruplo e ficaram comercialmente conhecidas por "super-janelas" e disponíveis nos anos 1980 como uma resposta ao desejo de janelas mais eficientes energeticamente. Cada vidro adicional acrescenta valor de isolamento, mas também acrescenta peso e espessura. Ainda reduz o factor-TV e o factor-g. [46]

É evidente que há limites físicos e económicos no número de vidros que podem ser acrescentados a uma janela. Contudo, as unidades de vidro múltiplo não são limitadas ao vidro. Uma inovação é baseada na substituição do vidro por um filme plástico na camada interior do meio dos vidros. O baixo peso do filme plástico é vantajoso, porque é muito fino e não aumenta a espessura da unidade. Como com vidro triplo ou quádruplo, as janelas que usam filmes plásticos reduzem o factor-U da janela dividindo o espaço interior em múltiplas câmaras. [15]

A figura mostra janelas multi-camada com um fluxo de calor muito baixo, bem como baixo factor-g. Em todos os casos existem várias camadas de vitrificação e perfis separadores de baixa condutividade. Exceptuando o caso *standard* estamos na presença de revestimentos *low-E* e gás Cripton. Nestes casos, as camadas interiores são um filme plástico suspenso. Os revestimentos *low-E* podem ser aplicados ao vidro ou ao plástico. A combinação de múltiplos vidros e filmes plásticos com revestimentos *low-E* e gás garantem alto desempenho do ponto de vista do coeficiente global de transferência de calor da janela. [46]

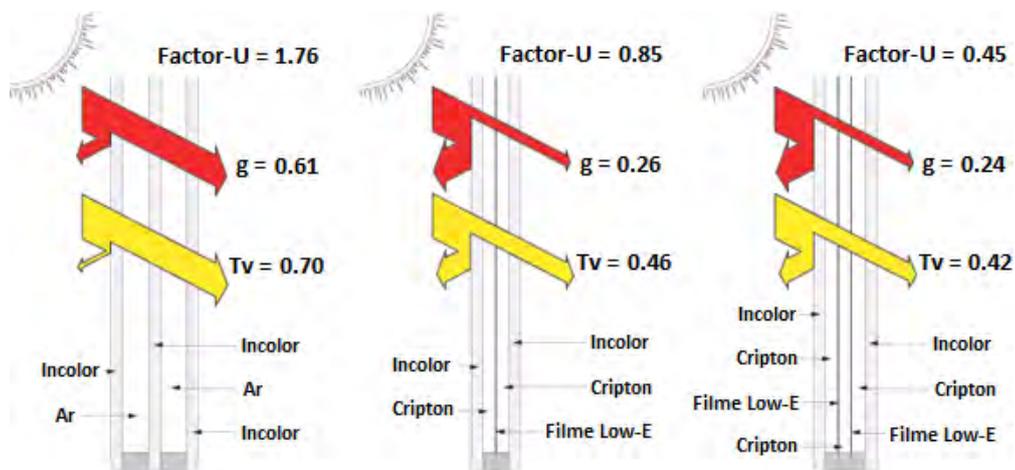


Figura 21 – Vidro triplo (3 vidros); Vidro triplo (2 vidros e 1 filme); Vidro quádruplo (2 vidros e 2 filmes) [46]

3.4. O gás e espessura da câmara

No vidro duplo convencional o gás utilizado no preenchimento do espaço entre as duas superfícies é ar atmosférico normal composto sobretudo por Oxigénio e Azoto, que já proporciona um considerável nível de isolamento térmico e acústico. Mas outro grande avanço em tecnologia de janelas foi a introdução de gás inerte no espaço entre os dois vidros e devida selagem. Gases que por serem maus condutores de calor e terem maior densidade, conferem um poder isolante consideravelmente maior. Minimizam a troca de calor por condução, porque têm uma condutividade mais baixa que o ar e sendo mais pesados que o ar suprimem as correntes de convecção entre os vidros. No grupo dos gases raros, o Árgon, o Criptón e o Xénon preenchem estes requisitos e por não afectarem a transmissão luminosa começaram a ser utilizados na indústria do vidro duplo com resultados surpreendentes. Sendo gases que são obtidos por purificação a partir do ar atmosférico é lógico que a sua produção é tanto mais cara quanto mais raros forem. Dada a sua escassez a produção industrial de vidro duplo preenchido com Criptón ou Xénon tem custos elevados. A produção de vidro duplo com Árgon tem-se afigurado como a solução mais eficaz e com custos contidos. Embora, ainda existam misturas de Árgon e Criptón num compromisso entre desempenho térmico e custo. [45] [46]

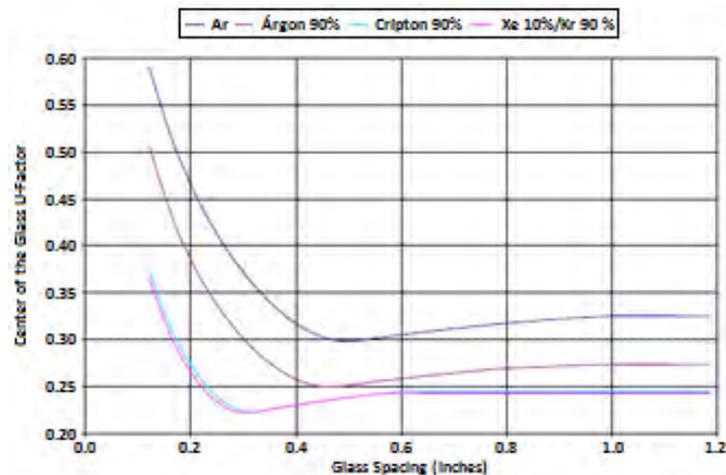


Figura 22 – Variação do factor-U com a espessura da câmara em função do gás usado [50]

Em suma os melhores resultados têm sido obtidos combinando o preenchimento com Árgon com a utilização de vidros de baixa emissividade. O vidro duplo de *low-E* preenchido com Árgon representa uma melhoria de 40% na capacidade de isolamento relativamente ao vidro duplo convencional. O preenchimento com Árgon por si só, independentemente do tipo de vidro duplo empregue possibilita uma melhoria de 15% na capacidade de isolamento. Contudo, encher a câmara de Árgon ou Criptón representa ainda um enorme desafio para os fabricantes na obtenção de 100% de pureza. Os gases são inertes, não tóxicos e ocorrem naturalmente na atmosfera, mas mantê-los com o mesmo desempenho térmico a longo prazo requer que a selagem garanta estanquicidade e mantenha a sua integridade ao longo do tempo. Manter o gás na câmara depende bastante da forma do vidro, material e mais importante, o controlo de qualidade da assemblagem do vidro multi-vítreo. [45] [46]

3.5. Perfil separador e selagem

As camadas de vidro devem ser seguras separadamente à distância apropriada através do perfil separador. Por causa das suas propriedades estruturais excelentes, os fabricantes de janelas começaram a usar perfis de alumínio nos anos 1960 e 1970. Infelizmente o alumínio é um excelente condutor de calor e usado na maioria das extremidades dos sistemas normalizados representa uma perda térmica significativa na extremidade do conjunto que reduz os benefícios do envidraçado. Para além do aumento da perda de calor a extremidade mais fria é mais propensa a condensação. Com o intuito de resolver este problema, os fabricantes desenvolveram uma série de sistemas de perfis inovadores para focalizar estas questões, inclusive soluções que dependem da substituição de materiais, como também de todo o conjunto do perfil ser radicalmente novo. Uma alternativa para reduzir a perda de calor é substituir o perfil de alumínio por um metal menos condutivo e alterar a forma seccional do perfil. Outra aproximação é substituir o metal por um conjunto que use materiais melhor isolantes. Outra opção é a aplicação de um perfil isolante de espuma de silicone. PVC extrudido e perfis de fibra de vidro também são usados para substituir os metais. Há também várias formas híbridas que incorporam rupturas térmicas nos perfis de metal ou usam um ou mais dos elementos acima descritos. Alguns perfis são projectados especificamente para acomodar três e quatro camadas de vidro ou conjuntos que incorporem filmes de plástico. Todos eles são projectados para interromper o caminho da transferência de calor para a extremidade do envidraçado. Os perfis isolantes são cada vez mais importantes, na medida em que os fabricantes procuram passar da vitrificação dupla convencional para envidraçados de alto desempenho. Para propósitos de determinar o factor-U da janela a contribuição da largura do perfil é mais importante em janelas menores que têm proporcionalmente uma área de largura maior. Numa janela residencial de tamanho típico, mudar de um perfil de alumínio *standard* para um perfil de alto desempenho, resulta numa redução do factor-U global da janela aproximadamente $0,10\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ [15]

O benefício mais significativo é o aumento da temperatura da superfície interior até à extremidade da janela que é o ponto fulcral para evitar condensação e reduz também tensões térmicas no vidro. Como janelas altamente isolantes de camadas múltiplas estão a ser desenvolvidas, a concepção de um perfil de baixa condutividade torna-se uma prioridade. [26]

Em relação à selagem do vidro, geralmente é usado na primeira barreira butil sobre o perfil separador, anterior à montagem dos vidros, responsável por impedir que humidade penetre no interior da câmara. A segunda barreira é perimetral em poliuretano ou silicone colocada no momento em que são unidos os vidros sobre o perfil. Esta dupla selagem protege o conjunto e auxilia a primeira selagem a evitar humidade, garante perfeitamente a longo prazo a estanqueidade da câmara. [51]

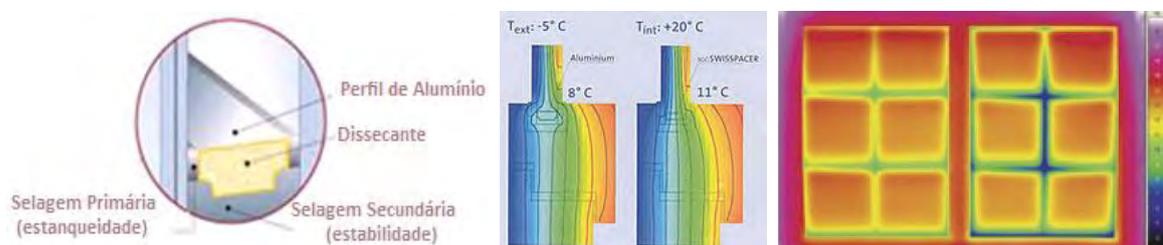


Figura 23 – Exemplo da selagem de um vidro duplo com perfil separador em Alumínio [51] e a comparação da distribuição de temperaturas, no caixilho e no vidro, com um perfil em material compósito [26]

3.6. Tecnologias emergentes

3.6.1. Adição de isolamento

Há várias opções para isolar janelas ao melhor nível com o material isolante *aerogel*. Normalmente são usados favos ou tubos capilares localizados entre os vidros. Estes materiais fornecem luz difusa não uma visão clara. Alguns destes materiais são usados em aplicações solares passivas. O *aerogel* é um material, parecido a uma espuma composto de 4% Sílica e 96% ar. As células microscópicas da espuma contêm ar (ou outro gás) prevenindo a convecção e ainda permitindo a passagem de luz. A radiação térmica de onda longa é praticamente eliminada devido às múltiplas paredes das células que absorvem e irradiam os raios. As partículas que compõem as paredes das células difundem, ligeiramente a passagem da luz solar criando uma neblina azulada semelhante à do céu. [46]

3.6.2. Janelas de vácuo

O gás termicamente mais eficiente é não ter nenhum gás, o vácuo. Por todo o mundo pesquisadores desenvolvem o isolamento de janelas nas quais o espaço entre os vidros é evacuado. Se a pressão de vácuo for suficientemente baixa não haverá trocas de calor por condução nem por convecção entre os vidros, assim melhorando o factor-U da janela. A vitrificação de vácuo, como complemento, deve ter um bom revestimento *low-E* para reduzir a transferência de calor por radiação. Contudo as assemblagens das janela de vácuo apresentam um enorme número de problemas de engenharia. Uma das questões principais é a exigência estrutural para resistir à pressão atmosférica e variações de pressão causadas pelo vento e vibrações. Pode também ocorrer elevada fadiga térmica entre vidros grandes e facilmente tendem a curvar e dobrar com a variação de pressões. Em protótipos foram utilizados pequenos pilares de vidro ou esferas para manter a separação entre os vidros. Os pilares são muito pequenos, mas um tanto visíveis reduzindo o factor-TV. [46]

3.6.3. Janelas inteligentes

As novas tecnologias estão a produzir cada vez janelas mais eficientes, mas uma nova geração de janelas está a emergir, adaptando-se a condições que se modificam ao longo do tempo, são chamadas “janelas inteligentes”. Estes materiais têm propriedades ópticas solares variáveis que podem ser passivamente ou activamente alteradas. A sua aplicação no vidro permite a regulação dinâmica da transferência de energia solar pelo envidraçado, do conforto visual, do conforto térmico, do pico de carga, do controlo de brilho, da privacidade e da luz natural. Há diferentes tipos de materiais cromogénicos na concepção de edifícios baseados segundo princípios físicos diferentes. Algumas das janelas que se vão abordar estão já comercialmente disponíveis e outras estão a ser desenvolvidas em laboratórios de pesquisa. [52]

Janelas fotocromáticas – Os materiais fotocromáticos modificam a sua transparência em resposta à intensidade de luz incidente. Este tipo de janelas pode ser útil em conjunto com a luz natural permitindo somente luz para iluminar certos propósitos evitando luz solar em excesso que causa encadeamento e sobrecarga no sistema de arrefecimento. Embora, pequenas unidades tenham sido produzidas como um produto para consumo, janelas rentáveis e fiáveis, não estão ainda comercialmente disponíveis. [46]

Janelas electrocrómicas – As janelas electrocrómicas permitem modelar a luz visível próxima dos raios infravermelhos de forma a controlar as condições térmicas nos edifícios, reduzindo gastos energéticos com o arrefecimento no verão e aquecimento no Inverno. Com um comutador uma janela electrocrómica pode modificar a cor de clara a totalmente escurecida ou qualquer outro nível de cor entre o intervalo. Em edifícios estas janelas levam em conta o isolamento, reduzir o brilho e diminuir o factor solar. O electrocromismo pode ser definido como uma alteração reversível das propriedades ópticas de um material induzida por uma estimulação eléctrica externa. Estes materiais alteram o índice de refacção devido à injeção ou extracção de iões quando aplicado um potencial. Como resultado da alteração do índice de reflexão obtém-se uma modificação na coloração do aparelho electrocrómico. As janelas funcionam com uma voltagem muito baixa e só usam a energia para modificar a sua condição não para se manterem num determinado estado. [53]

Estas janelas normalmente têm uma variação de factor-TV 0.50 a 0.70, e uma variação inferior de 0.02 a 0.25. O factor-g vai de 0.10 a 0.50. É desejável uma transmissão de visibilidade baixa para a privacidade e para o controlo de luz solar directa e brilho, potencialmente eliminando a necessidade de protecção interior. Uma alta transmissão é desejável para admitir a luz do dia durante os períodos nublados. Maior a variedade na transmissão, mais a janela se torna capaz de satisfazer uma larga variedade de exigências ambientais. [46]

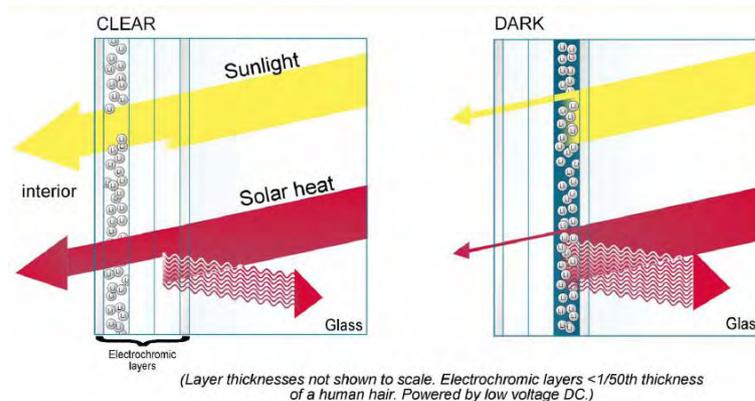


Figura 24 – Funcionamento do vidro electrocrómico [28]

Janelas termocrómicas – Como indica o prefixo termo o calor causa alterações nas propriedades destas janelas. Em resposta a modificações na temperatura ambiente a janela termocrómica compensa ficando difusa ou transparente. Várias tecnologias estão a ser exploradas, mas os revestimentos à base de gel parecem ser os mais prometedores. Existe no mercado um produto *cloud gel* que é um filme plástico fino que pode ser incorporado normalmente em qualquer assemblagem de uma janela. As temperaturas de resposta do *cloud gel* podem ser ajustadas dependendo de necessidade e localização. Este tipo de janela, para além de modificar automaticamente de transparente a difusa em resposta ao calor, também se torna reflectiva reduzindo a transmissão de solar. Isto pode reduzir significativamente custos energéticos nas estações de arrefecimento. Como não possibilita a visão no modo difuso esta vitrificação é provavelmente melhor ajustada para clarabóias. [53]

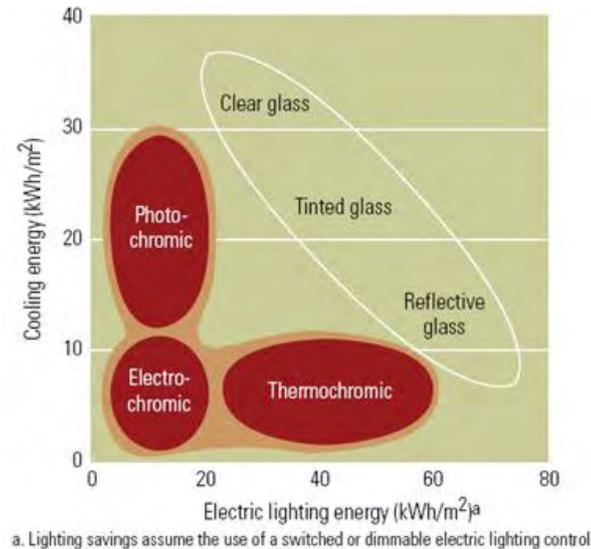


Figura 25 – Relações de consumo de energia dos principais grupos de janelas [27]

Janelas de cristal líquido – Uma camada muito fina de cristais líquidos é colocada entre dois condutores eléctricos transparentes, em filmes plásticos finos e o conjunto *PDLC* (*Polymer Dispersed Liquid Crystal device*) é laminado entre duas camadas de vidro. Quando desligado, os cristais líquidos estão num estado casual e não alinhados, assim eles espalham a luz e o vidro torna-se numa camada branca translúcida que bloqueia a visão directa e fornece privacidade. Quando ligado, os cristais alinham-se e o vidro passa a modo transparente. Para além da difusão da luz as propriedades ópticas dos dois estados são quase idênticas, a janela tem quase o mesmo ganho solar com o sistema ligado ou desligado havendo apenas uma ligeira modificação nas propriedades. Porque necessita de energia constante para manter o seu estado transparente as janelas de cristal líquido não fornecem benefícios energéticos. A janela de cristal líquido está comercialmente disponível e é usada apenas para o controlo de privacidade. [53]

Janelas SPD – Este filme *SPD* (*Suspended Particle Device*) é electricamente controlado e utiliza uma camada fina parecida a um líquido, na qual as numerosas partículas microscópicas são suspensas. No seu estado não accionado as partículas são orientadas aleatoriamente e bloqueiam parcialmente a transmissão de luz solar e visibilidade. Os condutores eléctricos transparentes permitem que um campo eléctrico seja aplicado ao filme de partículas suspensas alinhando-as desbloqueando o modo opaco. [46]

Janelas gasocrómicas – Janelas que produzem um efeito semelhante às janelas electrocromáticas, mas de forma diferente. Hidrogénio diluído a 3% é introduzido na cavidade numa unidade de vidro duplo. A exposição ao oxigénio torna a janela no estado original transparente. Para manter um determinado estado é simplesmente não promover alterações no conteúdo do gás. O componente óptico activo é uma película porosa em forma de coluna com menos de 1 micrometro de espessura de óxido de Tungsténio. Este catalisador faz com que a cor do vidro seja azul muito escuro suficiente para não bloquear a visibilidade. Isto elimina a necessidade de eléctrodos transparentes ou uma camada condutiva de iões. Variações de espessura no filme e na concentração de Hidrogénio pode afectar a intensidade e velocidade de coloração. O factor-TV pode variar entre 0,10 a 0,59 com factor-g num intervalo de 0,12 a 0,46. Níveis de transmissibilidade visível menores que 0,01 para privacidade ou controlo solar são possíveis. Janelas gasocrómicas são agora submetidas a ensaios de durabilidade acelerada e a ensaios no terreno e são esperadas chegar ao mercado num futuro próximo. [46]

Foi criado, pelo *U.S. Department of Energy*, um protótipo que preenche características significantes dos sistemas usados nas janelas. Para alcançar um factor-U significativamente baixo tem que se abandonar um sistema convencional *low-E* e gás no sistema vítreo e optar por uma vitrificação de vácuo com *aerogel* ou um sistema de janelas em multi-camadas. Baseado no desejo de desenvolver um protótipo a custo disponível e integrado na capacidade industrial foi seleccionada uma janela de três camadas com tecnologia *low-E* e Criptón. Uma camada de plástico rígida é adicionada ao centro como uma solução económica para diminuir a transmissão de calor. É usado um caixilho em fibra de vidro pelo exterior combinado com madeira pelo interior. Finalmente o controlo solar é feito dinamicamente usando vidro electrocrómico do lado exterior. Este protótipo, em muitos climas dos E.U.A., é considerado, pelo seu desempenho como “Zero Energy Window”. [9]

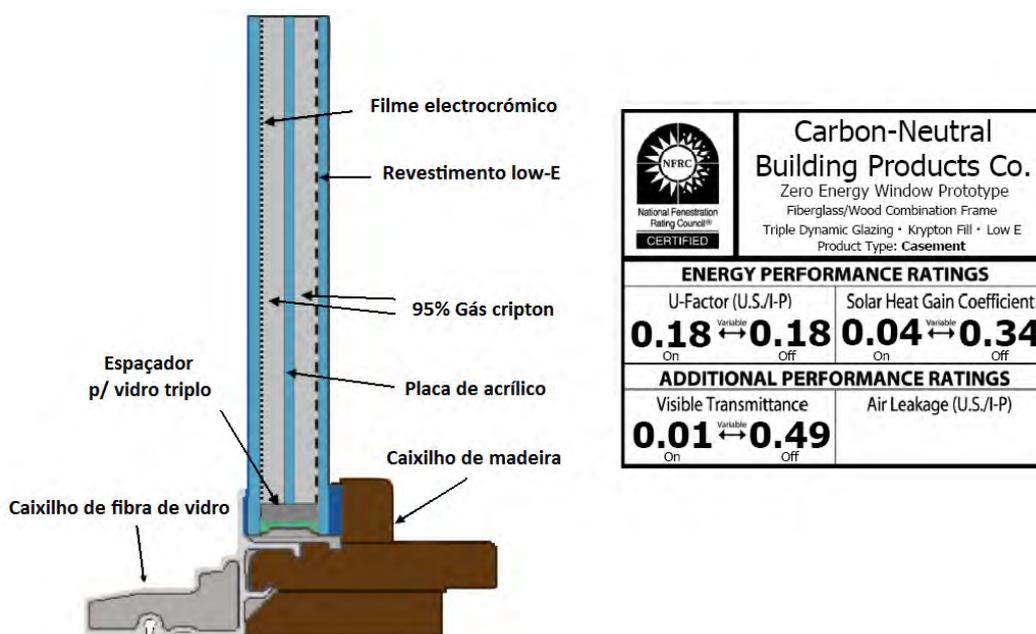


Figura 26 – Protótipo "Zero Energy Window" [9]

3.6.4. Integração de energia fotovoltaica

Devido ao crescente aumento da preocupação com relação às questões ambientais e à busca por uma maior eficiência energética, os sistemas solares fotovoltaicos integrados nos edifícios e interligados à rede eléctrica têm tido um impulso crescente. Em conjunto com outros elementos construtivos, caminham para o sucesso, na busca de uma arquitectura mais eficiente e sustentável. [29]

Células PV são dispositivos semicondutores que produzem electricidade quando expostos à luz solar. Mais intensa a radiação solar, mais potencial para gerar corrente eléctrica. Neste sentido, as células PV podem ser parte integral num edifício e ser aplicadas nas paredes, na cobertura e nos vidros. A própria envolvente do edifício injecta electricidade na rede que flui no sistema eléctrico do edifício. O vidro de visão fotovoltaico integra um filme fino, semitransparente PV num painel de vidro exterior ou numa janela de vidro duplo tradicional. Todos os tipos de células PV podem estar integradas e/ou laminadas no vidro, mas só o filme fino fotovoltaico será translúcido. [46]

O *Rensselaer Polytechnic Institute*, desenvolveu um sistema (*DSWS*) de janelas alimentadas por energia solar que aquecem, arrefecem, iluminam ou obscurecem o interior dos espaços. O *Dynamic Shading Window System* utiliza uma tecnologia de energia solar que converte a luz do sol numa forma armazenável de energia que pode ser utilizada para climatizar ou iluminar o edifício. O sistema bloqueia os raios de sol mais fortes possibilitando que apenas a luz difusa possa penetrar nos espaços interiores. Este sistema pode ser integrado em construções novas ou existentes. [54]

Instalações solares fotovoltaicas integradas a prédios e a escritórios interligados à rede eléctrica pública são alguns exemplos de aplicações ideais, onde os picos de consumo e de geração são muitas vezes coincidentes. O sistema integrado nos edifícios, ao mesmo tempo em que gera energia, pode substituir elementos construtivos convencionais da edificação (telhas, janelas, materiais de fachada, elementos de sombreamento) possibilitando assim uma maior economia ao proprietário. Esta flexibilidade mostra uma grande variedade de aplicações na busca pela integração da edificação. As figuras em baixo mostram exemplos dessas respectivas substituições de elementos. [29]

AbuBakr S. Bahaj, Patrick A.B. James e Mark F. Jentsch consideram que os filmes *PV* integrados nos envidraçados são potencialmente a solução mais promissora para edifícios integralmente envidraçados no Médio Oriente, especialmente se a meta de 60% de eficiência para a terceira geração de células *PV* for alcançada. As simulações antedizem que esta solução fotovoltaica cobrindo aproximadamente 40% da área de um edifício alto totalmente envidraçado no Médio Oriente renderia um ganho de energia acima das cargas de gastos pelos sistemas *AVAC*. Tal poderia ajudar a criar edifícios envidraçados verdadeiramente sustentáveis em climas quentes. [8]



Figura 27 – Fachada envidraçada com painéis fotovoltaicos como revestimento (*APS, Fairfield, Califórnia*) [29]



Figura 28 – Exemplo de *retrofit* (*Okotec, Berlim, Alemanha*) [29]



Figura 29 – Células fotovoltaicas integradas num vão envidraçado [46]



Figura 30 – *Dynamic Shading Window System* [54]

3.7. A caixilharia

A caixilharia é o elemento de transição entre as áreas opacas e as áreas envidraçadas e tem como principal função garantir a estanquicidade e a operacionalidade dos vãos, contribuindo para a optimização do desempenho energético do edifício. Apesar de representar uma proporção aparentemente pequena na envolvente as funções da caixilharia são extremamente importantes para o edifício. A caixilharia suporta os painéis de vidro que constituem as áreas envidraçadas, tanto na sua posição fechada como nas suas diversas posições abertas, garante a estanquicidade dos espaços interiores, absorve os movimentos díspares com os seus elementos rígidos distintos. Para além destas funções essenciais, a caixilharia conjugada com ferragens de qualidade, poderá tornar mais interessante e diversificar a relação entre o interior e o exterior potenciando alterações na dimensão e distribuição dos espaços. [55]

Ao longo da última década, tal como as características técnicas dos vidros, as caixilharias também sofreram uma grande evolução tecnológica. A estanquicidade e novos materiais de caixilharia são uma das evoluções positivas, porque permitem controlar de forma eficaz a troca de calor entre o interior e o exterior. Mas esta estanquicidade obriga a definir a estratégia da ventilação natural, pelo menos para garantir as renovações de ar essenciais para a salubridade do ar interior. Para a quantificação do número nominal de renovações temos que determinar a classe de exposição à acção do vento e definir a permeabilidade ao ar da caixilharia a utilizar. Para o mesmo tipo de caixilharia, a área de defeitos da caixilharia é proporcional à área de envidraçados, portanto quanto mais envidraçados houver maior a taxa previsível de renovação de ar. O conjunto das caixilharias do edifício é considerado como um subsistema do edifício e deve atender a vários requisitos que influem no seu desempenho como o controlo de iluminação, o isolamento térmico e acústico, a facilidade de utilização, a estabilidade estrutural, a manutenção, a estética, a segurança e a estanquicidade. [30]

3.7.1. Tipos de janelas

Questões estéticas e de espaço influenciam a escolha do tipo de janelas a instalar. Muitas são as opções disponíveis no mercado. As janelas incorporam um sistema de partes fixas e móveis incluindo acessórios que se encaixam e/ou se ajustam para permitir o funcionamento. As janelas são classificadas de acordo com a movimentação das suas folhas. Para atender as exigências de circulação do ar e conforto existem meios para combinar diferentes tipologias de janelas, adicionando funções para iluminação ou ventilação. Normalmente esta função é conseguida quando são especificadas ferragens oscilo/batentes, permitindo alternadamente que a respectiva janela abra ou bascule. As janelas de correr com a vantagem de “desaparecerem” para o lado para o qual correm fazem com que a relação entre interior e exterior seja realizada sem barreiras. Hoje há ferragens para janelas de correr que permitem o movimento basculante para ventilação. A posição basculante é importante porque permite ventilar os espaços sem ameaçar a segurança dos mesmos face a uma tentativa de intrusão. [31]

3.7.2. Tipos de materiais

O primeiro passo para escolher bem o material de composição das caixilharias é conhecer as características, vantagens e desvantagens dos materiais mais usados no seu fabrico. [10]

A inovação no processo de fabrico da caixilharia tem vindo a evoluir desde o fabrico artesanal das janelas de madeira para um fabrico industrializado a partir de perfis normalizados obtidos por fresagem da madeira ou extrusão do alumínio e do PVC. Considerar também a introdução de novos materiais como os compósitos. Mas os custos de desenvolvimento e a própria química tornam pouco provável o desenvolvimento de novos polímeros ou ligas metálicas para a caixilharia. As áreas a ter em conta são aquelas onde aparecem os compósitos ou compostos de plásticos existentes para melhorar as propriedades e reduzir custos, para revitalizar e alterar a indústria da caixilharia. [32]

A próxima figura apresenta alguns tipos principais de materiais e combinações disponíveis no mercado:

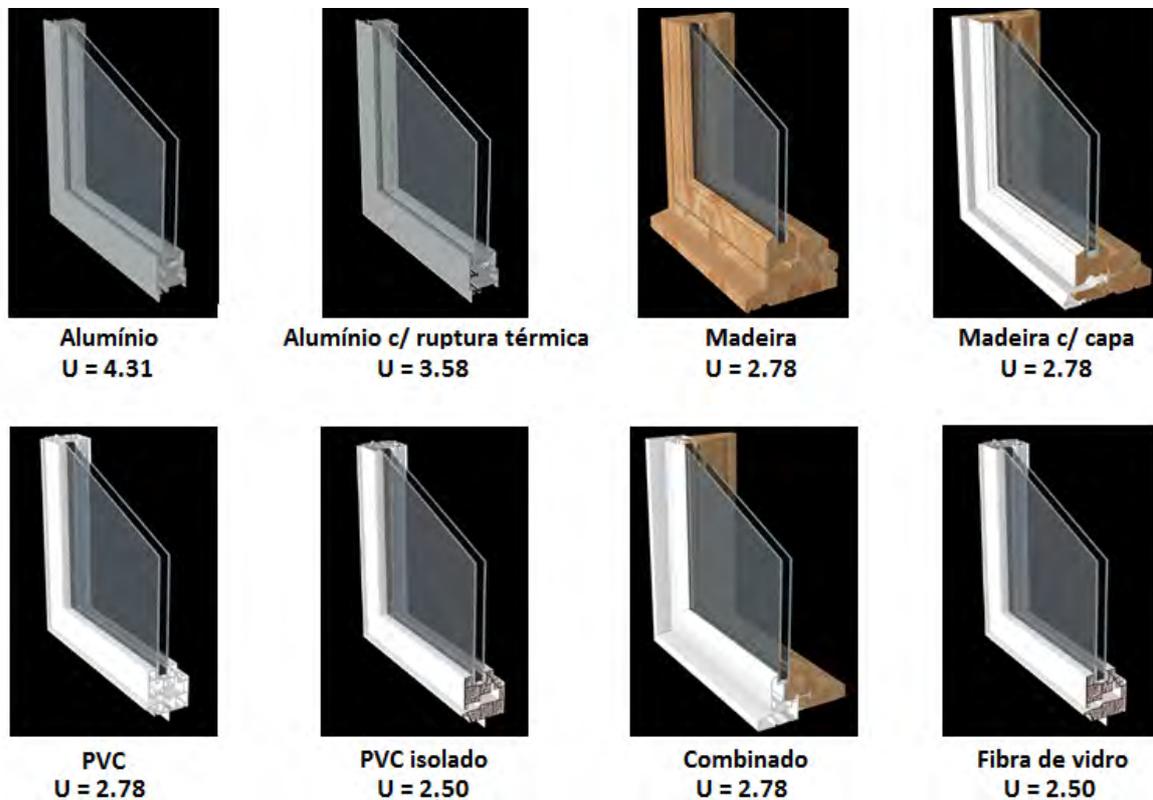


Figura 31 – Exemplos de vários tipos de caixilharia e respectivo factor-U ($\text{kWh/m}^2 \cdot \text{K}$) [45]

3.7.2.1. Alumínio

Com uma vasta gama de cores e acabamentos, o alumínio adapta-se a todos os estilos arquitectónicos e apresenta a possibilidade de optar por dois acabamentos diferentes para a mesma janela (interior e exterior). O alumínio mostrou-se extremamente vantajoso para a construção civil como matéria-prima para caixilharias devido a características como leveza, função estrutural e baixa manutenção. O material é resistente à corrosão e quando submetido aos tratamentos superficiais, tais como a anodização, lacagem ou pintura apropriada, a sua resistência é reforçada. O alumínio é um dos materiais mais económicos do mercado, mas é um mau isolante térmico e acústico. [10]

As caixilharias em alumínio dividem-se em dois tipos: as tradicionais com perfis em alumínio extrudido, e as caixilharias em alumínio com ruptura térmica constituídas por dois perfis independentes unidos por uma poliamida. Esta é a responsável pelo corte térmico ao garantir o isolamento entre o elemento exterior e interior. Os perfis são normalmente em alumínio extrudido, isto permite que se possa ter acabamentos diferentes para o exterior e o interior da caixilharia podendo mesmo utilizar-se materiais diferentes. As peças de união podem ser reforçadas com fibra de vidro. A utilização de perfis com corte térmico permite aumentar o nível de conforto interior, pois a um maior isolamento térmico associa-se um melhor isolamento acústico. Além disso, ao diminuir a diferença de temperatura entre o interior e o caixilho, permite minimizar a condensação no interior. [33]

3.7.2.2. Madeira

O material tradicional de caixilharia é a madeira por causa da sua disponibilidade e a facilidade de pintura e montagem nas formas complexas necessárias. A madeira é favorecida em muitas aplicações residenciais por causa da sua resistência, aparência e tradição no desenho da casa. De um ponto de vista térmico e acústico, as janelas com perfil em madeira obtêm óptimas prestações sendo também o material mais ecológico. A desvantagem deste tipo de caixilharia é a sua sensibilidade às alterações climáticas que provocam contracções, dilatações e empenos na madeira. A madeira não é intrinsecamente o material mais durável por causa da sua susceptibilidade para apodrecer, mas estas janelas bem construídas e bem mantidas podem ter uma vida muito longa. A pintura e os tratamentos protegem a superfície exterior e permite uma fácil modificação de cores. Revestimentos em alumínio ou PVC podem ser aplicados para melhorar as propriedades, criando uma superfície permanentemente resistente à intempérie e impedir a infiltração de água. Os materiais de revestimento não devem tocar a vitrificação ou estenderem-se em direcção ao interior da janela. Quando instalados nesta maneira, eles podem causar problemas de condensação e reduzir o isolamento térmico. As armações revestidas têm reduzidas exigências de manutenção conservando o aspecto atraente da madeira no interior. [45]

3.7.2.3. PVC

Pelas suas características isolantes, térmicas e acústicas, bem como pela resistência, o PVC garante excelentes resultados finais. A nível estético é possível conseguir acabamentos em diversas cores ou em diferentes imitações de madeira e outros materiais. Desta forma obtêm-se janelas bem isoladas, mais resistentes e duradouras e com um acabamento tradicional que sugere mais conforto. As caixilharias de PVC usam um material (policloreto de vinil), obtido basicamente a partir do sal (cloreto de sódio) e petróleo (etileno). São ideais para aplicação em ambientes agressivos, não precisam ser pintado, apresentam facilidade de manutenção e limpeza, possuem excelente sistema de vedação e são resistentes a agentes biológicos. À resina de PVC são adicionados aditivos especiais para conferir o desempenho desejado no produto final. A homogeneidade dessa mistura é obtida num misturador intensivo específico. A máquina de extrusão é alimentada com o composto de PVC. A aplicação de calor e a mistura mecânica intensa promovem a plastificação do composto de PVC permitindo que seja moldado em diferentes tipos de perfil pela passagem através de uma matriz. Já na linha de montagem, os perfis são cortados e recebem barras de aço galvanizado que reforça a estabilidade da caixilharia. Depois de trabalhados e reforçados, os perfis são soldados, originando uma caixilharia monobloco. [10]

Outra das principais características deste material é o seu toque agradável pela ausência de arestas ou ângulos pontiagudos. A cor branca ou imitando madeira são as mais indicadas, uma vez que o pigmento das coloridas não resiste à alta incidência de raios ultravioletas. Os avanços recentes melhoraram a estabilidade dimensional e a resistência à degradação da luz solar e a temperatura extremas, havendo também a possibilidade de capeamento exterior do perfil em alumínio. [10]

Quanto ao comportamento térmico, as armações de PVC são comparáveis com as de madeira, há diferenças menores dependendo da construção da armação, pois todas as formas são possíveis. Mas têm um melhor desempenho que a caixilharia em alumínio. As pequenas câmaras ocas dentro do caixilho que reduzem a troca de calor por convecção, ainda podem ser reforçadas para melhorar o desempenho térmico com a adição de material isolante que no caso de estudo será denominado de PVCi. [45]

3.7.2.4. Fibra de vidro

A caixilharia de fibra de vidro não tem praticamente manutenção. Pode ser pintada numa vasta selecção de cores, não entra em putrefacção ou corrói e é muito resistente. Armações de fibra de vidro são aproximadamente três vezes mais fortes que alumínio e oito vezes mais forte que o PVC, e pode resistir a condições extremas de calor, frio ou a ar de maresia. [15]

A fibra de vidro é um isolador natural e é muito pouco condutivo, porque é feita de vidro e a armação expande-se e contrai à mesma taxa que o vidro na janela, reduzindo assim a energia perdida pelo caixilho ao contrário de outros tipos de caixilharia como de madeira, alumínio, ou PVC. Adicionalmente a fibra de vidro necessita de menos quantidade de energia para ser produzida e tem a maior durabilidade que qualquer outro material para armações, por isso é que alguns peritos afirmam que a fibra de vidro é a escolha disponível mais amiga do ambiente. Normalmente estas armações de alto desempenho têm as cavidades preenchidas com espuma isoladora semelhante ao PVCi e têm um desempenho térmico superior à madeira ou PVC. Porque é um material mais forte que o PVC pode ter formas perfilares menores e assim ocupar menor área beneficiando a fracção envidraçada. [45]

3.7.2.5. Combinados

Os fabricantes estão virados cada vez mais para desenhos de caixilharias híbridas que usam dois ou mais materiais para produzir um caixilho de janela completo. A indústria da madeira já constrói a algum tempo caixilharia com revestimento de alumínio e PVC para reduzir necessidades de manutenção exteriores. Os fabricantes oferecem embutidos de madeira interiores para produzir o fim e a aparência que muitos proprietários de casa desejam. Os desenhos com perfis separados podem ter um elemento de madeira interior ligado a um elemento em PVC ou fibra de vidro ou alumínio exterior. Cada vez mais veremos combinações híbridas melhor refinadas, pois os fabricantes continuam a tentar fornecer melhores produtos com custos de produção mais baixos. Pode ser importante para um proprietário de casa aprender sobre estes materiais da perspectiva de exigências de manutenção e opções de fins interiores. Contudo fica cada vez mais difícil estimar de maneira eficaz as propriedades térmicas do caixilho. [45]

3.7.2.6. Tecnologias emergentes

Pultrusão – Os perfis obtidos por pultrusão têm elevada estabilidade dimensional, baixa condutibilidade térmica, elevada resistência à corrosão e um módulo de elasticidade elevado. As principais desvantagens são o seu custo, as propriedades de conformação e o acabamento superficial fino. No entanto, devido à sua rigidez não precisa de reforço metálico e assim apresenta alguma vantagem em relação ao PVC. [32]

Compostos de madeira e plástico – São compostos por vários tipos de plásticos (PP, PE, PVC) com aditivos de serrim, aglomerado de madeira e juta. A elevada percentagem até 70%, de madeira pode induzir em confusão acerca do material ser um plástico. Os *WPC (wood plastics composites)* podem ser pregados, pintados e tratados como madeira, obtendo um comportamento à corrosão por fungos e térmitas semelhante aos plásticos. Estes materiais reduzem custos e quanto mais derivados de madeira se introduzir maior será a resistência mecânica e menor serão os valores. [32]

Pultrusão de termoplásticos – Trata-se de uma extrusão de PVC localmente reforçada com fibra de vidro contínua. Este material utiliza filamentos de fibra de vidro encapsulados numa matriz de PVC por co-extrusão. As fibras conferem ao compósito uma elevada resistência mecânica e o PVC permite obter bons acabamentos superficiais. No entanto não permite soldadura dos cantos, pelo que se torna pouco aplicável à construção de aros e folhas com bom isolamento térmico. [32]

Materiais baseados em poliestireno – Espumas estruturais de poliestireno são propostas como material para caixilharia. Possuem acabamento semelhante à madeira e facilidade de trabalho aliada ao baixo preço e possibilidade de extrusão de polímeros ou materiais reciclados. A principal desvantagem é a sua combustibilidade. [32]

Materiais baseados em ABS/ASA – A *GE Plastics* desenvolveu um compósito em ABS/ASA para caixilharia. Utiliza uma camada interior de ABS e uma camada exterior de ASA co-extrudida para melhorar a resistência à corrosão atmosférica. Apesar das diferenças de preço, este compósito permite cadências de produção 30 a 40 % superiores comparativamente com perfis equivalentes em PVC. [32]

3.7.3. Sistemas de fachada

O vidro, como material utilizado em fachada como sistema construtivo, é uma tendência recente da construção. O documento referido faz uma abordagem em termos das técnicas construtivas e tecnológicas de alguns sistemas utilizados para a construção de fachadas em vidro tendo em linha de conta a tendência para cada vez maior incorporação de tecnologia do vidro. Assim a existência de vidros auto-laváveis, de fachadas fotovoltaicas ou vidros que controlam automaticamente a luminosidade interior são já desenvolvimentos promissores do que o futuro pode reservar neste tipo de fachada. [34]

3.7.3.1. Vidro exterior colado (VEC)

Neste tipo de sistema de fachada, também designado por “fachada cortina”, o vidro é aplicado sobre caixilharia de suporte e dependendo do desenho do caixilho e do modo de fixação pode dar origem a vários sistemas. A caixilharia usualmente pré-fabricada assenta por sua vez em partes da estrutura do edifício produzindo assim fachadas que se constituem como uma “cortina” de elementos que se repetem ao longo da fachada. A estrutura da caixilharia pode ainda ficar oculta parecendo a estrutura pelo exterior totalmente constituída por painéis de vidro adjacentes. Os materiais constituintes da caixilharia podem ser variados, sendo os mais comuns o ferro, o alumínio e o PVC. [34]

A divisão do sistema de construção em fachada cortina em outros subsistemas pode ser feita de diversos modos dependendo da característica escolhida para classificar. A norma ETAG 002 “Sistemas de Vidro Exterior Colados” [63] procede a uma divisão em sistemas apoiados em que a transferência do peso do vidro é realizada através do sistema caixilho/selante sendo transmitida do caixilho para a estrutura e não apoiados em que o selante transfere todas as acções incluindo o peso próprio do vidro ao caixilho, e este transmite as cargas à estrutura. Outro modo de classificação utilizado principalmente pelos fornecedores de sistemas é dada pelo número de vértices pelo qual se dá a sustentação do vidro. Assim, os sistemas classificam-se de “2 lados”, em que os vidros são montados tradicionalmente sobre 2 lados sendo os outros dois colados sobre uma estrutura de conservação ou de “4 lados” ou sistema integral, em que os vidros são colados sobre 4 lados em caixilhos não aparentes e se traduzem num aspecto exterior uniforme. [34]

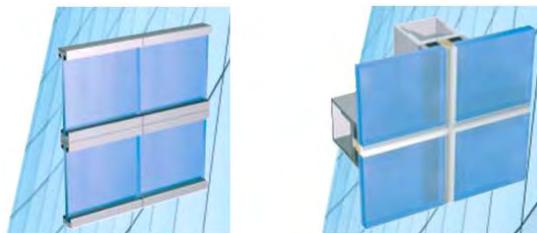


Figura 32 – (VEC) Representação dos sistemas de “2 lados” e sistemas de “4 lados” [34]

3.7.3.2. Vidro exterior agrafado (VEA)

O que distingue o vidro exterior agrafado da fachada cortina é para além de um âmbito diferente de aplicações o facto de a sustentação se dar neste caso pontualmente isto é, não há ligação contínua ao longo das arestas do vidro como acontece no sistema de vidro colado. Este sistema permite realizar paredes em vidro sem caixilho que são fixas através de um dispositivo mecânico pontual atravessando ou não o vidro, geralmente em aço e dimensionado de forma otimizada para maior leveza. A transmissão/absorção de esforços é geralmente feita a partir de elementos metálicos de aço inoxidável denominados grampos (que fazem o papel de “agrafos”) e aranhas que são ligados à estrutura do edifício. Os grampos podem ser articulados ou fixos por rótulas o que lhes permite oferecer características de transmissão de esforços diferentes. No plano arquitectónico, este método de fixação põe em evidência a luz, a transparência e as perspectivas ao alcance da visão. [34]



Figura 33 – Exemplos de fachadas em vidro exterior agrafado (VEA) [56]

3.7.3.3. Vidro encapsulado em silicone (VES)

Os silicones contam com uma versatilidade surpreendentemente capazes de absorver com resistência esforços e dilatações, resistir ao envelhecimento, raios UV, altas ou baixas temperaturas, ataques químicos, contando com a estabilidade duradoura e alta capacidade hidrofóbica. O sistema consiste em encapsular as peças na zona perimetral a um perfil pré extrudido de borracha de silicone com dureza, cor e composição química adequada. O encapsulamento de vidros, que pode ser aplicado a qualquer tipo de vidro e a materiais de revestimento de fachadas, confere à peça uma característica de um corpo rígido central com as suas juntas controladamente flexíveis e tornando-a protegida praticamente inquebrável. O vidro pode ser aplicado em situações de grande dificuldade de colocação sobre vários tipos de estrutura, eliminando os quadros de fixação, dependendo apenas de um plano de assentamento. [35]



Figura 34 – Sistema VES e exemplo de fachada em vidro encapsulado [35]

3.8. Dispositivos de sombreamento e de luz natural

A arquitectura moderna libertou a construção das paredes como suporte. Ao mesmo tempo que revela uma nova construção leve e aberta cria-se a necessidade de proteger o interior dos raios excessivos. Estes sistemas têm como finalidade essencial controlar adequadamente a radiação solar. São valiosos para a criação arquitectónica, características de posição, forma e cor, e constituem um dos elementos de maior expressão quando presentes nas fachadas. Por terem ainda outras finalidades influenciam também nas condições do espaço interior. As condições de insolação dos vãos envidraçados são fortemente condicionadas não só pela sua orientação, mas também pelas obstruções à radiação solar directa. Estas obstruções podem resultar de edifícios fronteiros aos vãos, de palas ou outras saliências do próprio edifício e de vegetação. Em casos correntes, procura-se maximizar a insolação dos vãos envidraçados nos períodos frios e em minimizá-la nos períodos quentes. [31]

Frequentemente o *design* destes elementos de protecção é visto como um elemento arquitectónico necessário. O seu dimensionamento é realizado juntamente com a arquitectura sendo entendidos como elementos da fachada do edifício. Por vezes a sua eficiência não é verificada fazendo com que o conforto e sustentabilidade do edifício em estudo sejam comprometidos. É necessário conhecer com exactidão o movimento aparente do sol em cada ponto do planeta, só desta forma é possível projectar elementos de protecção que afastem o sol nas épocas indesejadas e permitam a sua radiação quando esta é desejável. No objectivo de atingir um desenvolvimento sustentável é cada vez mais importante o conhecimento destas técnicas de dimensionamento evitando assim o uso excessivo de equipamentos de climatização. É nesta perspectiva que hoje em dia estes dispositivos podem ser integrados nas fachadas como fontes de energia solar recorrendo a células fotovoltaicas como já anteriormente referido. Os dispositivos de sombreamento classificam-se pela sua mobilidade (móvel ou fixo) e pela sua localização (exterior ou interior). [12]

Um sistema para a luz natural é uma adaptação da janela que tem como objectivo melhorar e otimizar a quantidade de distribuição de luz natural no espaço. Os sistemas para a luz natural utilizam a luz do zénite e do céu de maneira eficiente guiando-a com mais profundidade e uniformidade para o interior dos ambientes. Podem ter o mesmo efeito de protecção solar que normalmente se consegue com os dispositivos de sombreamento externo reduzindo as temperaturas internas e/ou os custos devido à diminuição da carga térmica. Além disso estes sistemas podem reduzir a ocorrência de encadeamento causado pelo sol ou pela luz difusa, os custos de energia para a luz artificial e possibilitam maior liberdade de disposição de locais. Os sistemas para a luz natural podem consistir em elementos fixos ou móveis. [36]



Figura 35 – Exemplos de sombreamento exterior: fixo [57] e móvel [58]

3.8.1. Protecções solares móveis e fixas

As protecções móveis são aquelas que permitem uma graduação que se adaptam manualmente ou automaticamente ao controlo de radiação solar em cada instante, por outro lado as protecções fixas não apresentam possibilidade alguma de regulação, razão pela qual a sua influência prolongar-se durante todo o ano. As protecções móveis são mais convenientes por permitirem adaptação às necessidades térmicas devido à flexibilidade de uso. Por outro lado, se a protecção fixa tiver um comportamento satisfatório face às exigências térmicas, ou seja se for posicionada e dimensionada adequadamente apresentará algumas vantagens. Menos custo de manutenção e dispensar a intervenção de usuários que muitas das vezes não utilizam de forma adequada. Estas propriedades móveis das protecções solares encontram-se nos dispositivos de sombreamento exterior e interior. [11]

3.8.2. Protecções solares interiores

A protecção solar interior deixa que a radiação solar seja absorvida pelo vidro e alcance a protecção para ser parcialmente absorvida e parcialmente reflectida. A parcela absorvida converte-se em calor e é libertado para o interior. Nas protecções interiores o coeficiente de reflexão, relacionado com a cor, é importante na determinação da sua eficácia, pois apenas a radiação reflectida pela protecção, no comprimento de onda original, é dependendo do tipo de vidro transmitido para o exterior e não afecta o meio interno. Existe no mercado uma grande variedade de elementos de protecção que são aplicados no interior de vãos envidraçados para reduzir ou controlar a incidência da radiação solar (estores de lâminas, telas, cortinas, portadas) cujas contribuições quantitativas para o cálculo do factor solar de um vão, em termos de regulamentação portuguesa, são encontradas no DL80. [31]

As telas de filtro solar são a última inovação mundial no campo da protecção solar, filtram a radiação solar, reflectem fortemente o calor (até 94 %) durante os meses mais quentes do ano e cortam a luminosidade interior permitindo ao mesmo tempo a visão total para o exterior. [37]

3.8.3. Protecções solares exteriores

Sem perder qualquer das mais-valias que as janelas nos oferecem os sistemas de sombreamento exterior têm a função primordial de cortar a incidência dos raios solares não desejados antes de atravessarem o vidro. A protecção solar disposta junto à face externa da edificação faz com que parte da radiação incidente seja reflectida e o restante seja absorvida, elevando, assim, a temperatura da protecção. Parte deste calor é removido por correntes convectivas e não chega ao vidro. A parte que chega é absorvida e convertida em onda longa. Existe uma grande variedade de elementos de protecção que são aplicados pelo exterior de vãos envidraçados para reduzir ou controlar a incidência da radiação solar (palas, beirados, toldos, portadas, venezianas, persianas, estores de enrolar, estores metálicos orientáveis), mas nem todos estes sistemas salvaguardam os aspectos qualitativos ou estéticos pretendidos. Destas várias configurações de protecções exteriores solares, função de diversos factores, resumidamente podem ser classificadas em dois grandes grupos: verticais e horizontais. Cada grupo tem a sua eficiência característica podendo variar em função das suas características geométricas. Pelas observações feitas é possível concluir que quanto maior for o elemento de protecção menor for o espaçamento entre elementos, e menor for o ângulo incidente dos raios solares maior será a sua eficiência. [12]

Em termos de regulamentação portuguesa estes dispositivos contribuem para o cálculo do factor de sombreamento de um vão envidraçado dependendo da posição. [13]

O sistema seleccionado deve permitir visibilidade e uma boa ventilação natural com a janela aberta, mesmo quando este se encontra descido e orientado na posição de sombrear, deve ser orientável para permitir vários graus de protecção da radiação solar consoante a inclinação dos raios solares, deve ser facilmente operável preferivelmente pelo interior, deve evitar que a radiação térmica captada pelo próprio elemento de sombreamento seja transmitida para o interior garantindo uma distância suficiente entre o elemento de sombreamento e o vão envidraçado para que a ventilação natural possa realizar-se, a oclusão nocturna deve melhorar o coeficiente de transmissão térmica, contribuindo no Inverno para isolar termicamente a envolvente e reduzir as perdas de calor. [59]

3.8.4. Sistemas de luz natural

Esta questão refere-se aos aspectos a ter em consideração na especificação do sistema de sombreamento exterior tendo como objectivo controlar a qualidade da iluminação natural que atinge os espaços interiores. O principio destes elementos é captar e redireccionar a luz natural. Os elementos fixos podem ser os próprios beirais ou prateleiras de luz fixas ou outros elementos de redireccionamento de luz. No caso de elementos móveis estes podem ser controlados manual ou automaticamente, o controlo automático pode ser baseado na disponibilidade de luz natural. O sistema especificado deve permitir controlar o nível de luminosidade que se pretende admitir para o interior da habitação facilitando a criação de uma diversidade de atmosferas. [31]

Num sistema de lamelas pode-se ter uma função dupla, a parte superior das lâminas poderá reflectir a iluminação solar para o tecto do espaço, difundindo-a fazendo com que chegue aos espaços mais recuados da habitação enquanto a parte inferior das lâminas poderá estar orientada de forma a obscurecer para não criar zonas de reflexo nem brilho nas superfícies. Por outro lado pode ter uma função dupla invertida, a parte superior das lâminas poderá obscurecer os espaços interiores e a parte inferior reflectir de forma difusa a radiação solar. [59]

O sistema de estores exteriores orientáveis para obscurecimento representa um sistema de sombreamento exterior que contempla todos os aspectos anteriormente referidos. O sistema é composto por lamelas em alumínio que deslizam em calhas laterais comandadas de forma manual ou por um motor eléctrico. Para além de as recolher e descer, este sistema permite ainda orientar as lâminas de forma a excluïrem a radiação indesejada, ventilar os espaços interiores e deixarem visibilidade para o exterior. Reflecte até 80% dos raios solares e permite controlar a qualidade da iluminação natural no interior. A variante deste sistema que oferece a possibilidade de simultaneamente, orientar as lâminas em dois ângulos diferentes não só permite controlar a luz que entra, mas regulá-la. Existem hoje sistemas verticais que deslizam num plano entre calhas paralelas à fachada ou ao corpo que sombreiam e existem igualmente com braços projectantes servindo efectivamente como toldos. [59]

3.9. Conclusão

Obviamente, economizar energia não depende apenas de uma correcta especificação do vidro a ser utilizado como resumido no anterior capítulo. Os projectistas devem-se consciencializar de que para um projecto arquitectónico de um vão envidraçado bem resolvido e especificado o primeiro passo para uma maior redução do consumo de energia é ter uma visão global de todos os aspectos técnicos e de construção referidos. E devem ter em mente que hoje em dia, a fonte renovável de energia a ser usada na edificação passou a ser o próprio projecto e a construção deve estar adequada a esta realidade por isso a necessidade e a responsabilidade em especificar o vidro certo no lugar certo. Ao seleccionar vidros e caixilhos eficientes com protecção solar adequada obtêm-se ganhos efectivos em qualquer clima e, como podem reduzir o consumo de energia num edifício, uma melhor compreensão de como estes factores afectam todos os aspectos do conforto poderia levar a maiores economias.

Os componentes individuais de uma janela trabalham para resistir a forças que actuam como um todo. O calor flui através do vidro, dos perfis que separam o vidro para formar a caixa-de-ar e pelo caixilho da mesma forma. Ao interromper o caminho interpondo um material menos condutor, impede-se naturalmente o fluxo do calor. Existem várias formas de impedir a condutividade do calor pelos materiais, desde inserir gás de baixa condutibilidade como o gás Árgon na câmara de ar entre os vidros e utilizar perfis separadores e caixilhos termicamente resistentes.

De salientar que a resposta dos vidros *low-E* é muito eficaz. Menos calor é perdido para o meio exterior no Inverno e em estações de arrefecimento bloqueia a sua entrada. O sistema age todo em efeito para melhorar o efeito *greenhouse*.

O caixilho representa cerca de 25% da área de uma janela, portanto este é um material que não deve ser condutor térmico. Na generalidade a madeira e o PVC funcionam bastante bem, ao contrário do alumínio que apresenta um mau desempenho energético.

Segundo as modernas técnicas de conservação de energia, o dimensionamento de um projecto de janela também deve levar em atenção um aproveitamento optimizado da luz do dia, evitando o desperdício de iluminação artificial. Deve propor também soluções correctas para a troca de ar nos ambientes, independentemente dos sistemas AVAC. É necessário que a utilização destes sistemas seja planeada juntamente com o sistema de iluminação artificial para que efectivamente resultem em economia energética. É importante também realçar que os sistemas para a luz natural devem estar integrados no edifício demonstrando real unidade entre arquitectura e tecnologia.

No geral, a complexidade das características do vidro nos edifícios, associa-se agora, a uma panóplia de sistemas que adicionam mais variáveis à problemática. Contudo, o “verdadeiro” desempenho de uma janela depende, naturalmente, de um ensaio obtido pelo protótipo da respectiva série em laboratório, e, em grande medida, da qualidade da execução e aplicação em obra em cada caso concreto.

Com esta análise bibliográfica, pode-se afirmar que o vidro é, inequivocamente, um material com uma evolução tecnológica que se tem vindo a evidenciar no sector da construção. Evoluiu muito e continua a evoluir. O estado da arte dos vãos envidraçados permite muito boas soluções para climas frios e para climas quentes. Assim, as janelas tornam-se certamente em componentes complexas e interessantes de dimensionar e optimizar de uma forma apropriada para um clima ameno como o de Portugal.

4. Metodologia de análise

4.1. Sumário

Neste capítulo é desenvolvida uma metodologia devidamente fundamentada no método utilizado pelo RCCTE para comparar o desempenho energético de diferentes opções construtivas de vãos envidraçados e determinar diferentes potenciais poupanças para todas as zonas climáticas de Portugal, bem como a relação custo/benefício.

4.2. Procedimento e metodologia desenvolvida

Uma vez que todas as metodologias pesquisadas no sentido de calcular o desempenho energético são calculadas com base em simulações dinâmicas seria necessário ter acesso a ficheiros climáticos representativos de todas as zonas para cumprir com os objectivos propostos. Assim, optou-se por desenvolver uma análise estática com metodologia sustentada no RCCTE vocacionada exclusivamente à análise paramétrica do impacto energético dos vãos envidraçados.

O método usado consiste de uma forma geral direccionar bases da metodologia do RCCTE na análise particular do comportamento energético de diferentes opções construtivas com diversos produtos nos vãos envidraçados. A finalidade é calcular as necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento para um caso de referência, em relação aos requisitos energéticos impostos pela legislação em vigor (artigo 5º e artigo 6º do RCCTE) para zonas climáticas diferentes, com origem apenas no comportamento dos diferentes sistemas usados nos envidraçados. Um dos principais objectivos é obter um indicador global de necessidades anuais para cada tipo de janela, que significa o ponto de partida para análise económica e saber como as variáveis implícitas no RCCTE se podem relacionar entre si e em que proporções afectam as necessidades energéticas relativas aos valores limites nominais de energia útil.

O RCCTE aplica-se a cada uma das fracções autónomas de todos os novos edifícios de habitação e de todos os novos edifícios de serviços sem sistemas de climatização centralizados. Este regulamento tem como objectivo central estabelecer as regras a observar para a satisfação das exigências de conforto térmico, seja ele de aquecimento ou de arrefecimento, e de ventilação para garantia da qualidade do ar no interior dos edifícios sem dispêndio excessivo de energia.

Neste caso em concreto a metodologia proposta apenas toma em linha de análise as perdas e ganhos térmicos envolvendo unicamente os vãos envidraçados. São considerados, no Inverno e no Verão, somente os ganhos solares e as perdas por condução pela envolvente transparente não sendo objecto de estudo parâmetros acerca da envolvente opaca e de características do edifício, como o caso da ventilação e das cargas internas, focalizando os resultados apenas nas diferentes opções dos vãos envidraçados. De seguida, sucedem todas equações e pressupostos tomados na realização deste trabalho.

4.2.1. Perdas e ganhos térmicos através dos envidraçados

A avaliação realizada não é um indicador absoluto do desempenho de energia de fachadas envidraçadas. Na realidade, como já referenciado, o desempenho pode variar de acordo com tantos factores que é difícil ter precisão na análise. Não obstante, esta avaliação permitirá comparar vários parâmetros de estudo sob as mesmas condições com base num indicador energético relativo representativo das somas das necessidades na estação de aquecimento e arrefecimento para cada opção. O documento elaborado com base no Decreto-Lei nº. 80/2006, não pretende substituir de alguma forma o RCCTE.

4.2.1.1. Estação de aquecimento

Necessidades de aquecimento em relação ao correspondente valor limite de referência para as necessidades nominais de energia útil para aquecimento N_i (imposto e calculado pela legislação em vigor):

$$R_i = \frac{N_{ic}}{N_i} \quad (\text{eq.2})$$

As necessidades nominais de energia útil de aquecimento (N_{ic}) correspondem à quantidade de energia útil necessária para manter em permanência uma fracção autónoma ou um edifício a uma temperatura interior de conforto de referência durante a estação de aquecimento ($T_i = 20^\circ\text{C}$):

$$N_{ic} = \frac{Q_t + Q_v - Q_{gu}}{A_p} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{ano}} \right) \quad (\text{eq.3})$$

Onde:

- Q_t – Perdas de calor por condução através da envolvente dos edifícios;
- Q_v – Perdas de calor resultantes da renovação de ar;
- Q_{gu} – Ganhos de calor úteis, resultantes da iluminação, dos equipamentos, dos ocupantes e dos ganhos solares através dos envidraçados;
- A_p – Representa a área útil de pavimento (m^2);

As necessidades nominais de aquecimento são resultante do valor integrado de várias parcelas, mas para efeitos de cálculo na optimização e dimensionamento dos vãos envidraçados apenas vão ser analisadas as de carácter relevante. Apenas os parâmetros da envolvente e físicos do envidraçado e as condições climáticas serão levadas em consideração, está baseado numa fórmula simples que inclui os graus-dias e a radiação solar total ao longo da estação de aquecimento para a qual é variável cada orientação. Não foram calculadas as perdas de calor pela envolvente opaca e as perdas de calor resultantes da renovação de ar, porque neste caso não são fazem parte do objectivo de estudo. Assim, para calcular as necessidades de energia útil de aquecimento em relação aos envidraçados, temos que:

$$N_{ic} = \frac{Q_{ext} - Q_{gu}}{A_p} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{ano}} \right) \quad (\text{eq.4})$$

- Perdas de calor por transmissão térmica através da envolvente envidraçada:

$$Q_{ext} = 0,024 \cdot U \cdot A \cdot GD(kWh) \quad (\text{eq.5})$$

Onde:

0,024 – 24horas/1000;

U – Coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado (caixilho + vidro) (W/m².°C);

A – Área vão envidraçado medida pelo interior (m²);

GD – Graus-dias (define-se como o somatório das diferenças positivas entre a temperatura base de 20°C e a temperatura do ar exterior ao longo da estação de aquecimento).

- Ganhos solares brutos através dos envidraçados:

$$Q_s = G_{sul} \sum_j \left[X_j \sum_n \left(A \cdot F_h \cdot F_o \cdot F_f \cdot F_g \cdot F_w \cdot g_{\perp} \right)_{nj} \right] M(kWh) \quad (\text{eq.6})$$

Onde:

G_{sul} – Energia solar média mensal incidente numa superfície vertical orientada a sul (kWh/m².mês);

M – Duração média da estação de aquecimento em meses;

X_j – Factor de orientação, para as diferentes exposições;

A – Área total do vão envidraçado, área da janela incluindo vidro e caixilho (m²);

F_(h, o, f, g, w) – Factores de sombreamento;

g_⊥ – Factor solar do vão envidraçado para radiação incidente na perpendicular ao envidraçado e que tem em conta dispositivos de protecção solar.

- Ganhos solares úteis através dos envidraçados:

$$Q_{gu} = \eta \cdot Q_g(kWh) \quad (\text{eq.7})$$

Onde:

Q_g – Ganhos térmicos brutos associados apenas ao aproveitamento da radiação solar (Q_s);

η – Factor de utilização dos ganhos térmicos.

- Factor de utilização dos ganhos solares:

Este factor (η) é calculado em função da inércia térmica do edifício (a) e da relação (γ) entre ganhos totais brutos e as perdas térmicas totais do edifício, conforme representado na equação seguinte. Deve notar-se que o valor η garante a fracção dos ganhos que é útil durante a estação de aquecimento, o objectivo é que a temperatura no interior do edifício seja mantida igual a 20°C.

$$\eta = \frac{1 - \gamma^a}{1 - \gamma^{a+1}} \xrightarrow{se} \gamma \neq 1 \wedge \eta = \frac{a}{a+1} \xrightarrow{se} \gamma = 1 \quad (\text{eq.8})$$

A relação entre os ganhos solares brutos e as necessidades brutas de aquecimento, define-se nesta metodologia sendo $\gamma=1$. A informação prestada por conceituados Projectistas permitiu afirmar de uma pequena amostra que este pressuposto é representativo e simplificador para o cáculo das necessidades energéticas, embora subestime um pouco o Inverno não afecta os resultados de γ obtidos geralmente no Verão. Não é muito desfavorável, pois os requisitos energéticos para a estação de arrefecimento são de ordem de grandeza inferior (mais "sensíveis") que os requisitos para a estação de aquecimento.

Então, os valores de estudo relativamente a η são 0.6, 0.7, 0.8, respectivamente edifício padrão com inércia térmica fraca ($a=1.8$), média ($a=2,6$) ou forte ($a=4,2$).

4.2.1.2. Estação de arrefecimento

Necessidades de arrefecimento em relação ao correspondente valor limite de referência para as necessidades nominais de energia útil para arrefecimento N_v (imposto e calculado pela legislação em vigor):

$$R_v = \frac{N_{vc}}{N_v} \quad (\text{eq.9})$$

As necessidades nominais de energia útil de arrefecimento (N_{vc})   o parâmetro que exprime a quantidade de energia útil necessária para manter em permanência um edifício ou uma fracção aut noma a uma temperatura interior de referência durante a estação de arrefecimento ($T_i = 25^\circ\text{C}$).

$$N_{vc} = \frac{Q_g (1-\eta)}{A_p} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{ano}} \right) \quad (\text{eq.10})$$

Onde:

- Q_g – Ganhos totais brutos do edifício ou da fracção aut noma;
- $(1-\eta)$ – Factor de utilização dos ganhos térmicos na estação de arrefecimento;
- A_p – Representa a área útil (m^2);

As necessidades nominais de arrefecimento são resultante do valor integrado de várias parcelas, mas para efeitos de cáculo na optimização e dimensionamento dos vãos envidraçados apenas vão ser analisadas as de carácter relevante. Apenas os parâmetros da envolvente e físicos do envidraçado e as condições climáticas são levadas em consideração, está baseado numa fórmula simples que inclui os graus-dias e a radiação solar total ao longo da estação de arrefecimento para a qual é variável cada orientação. Não foram calculadas as trocas por condução pela envolvente opaca e as perdas por ventilação, bem como as cargas internas, pois neste caso não fazem parte do objectivo de estudo. Assim, para calcular as necessidades de energia útil de arrefecimento em relação aos envidraçados, temos que:

$$N_{vc} = \frac{(Q_s - Q_1) \cdot (1-\eta)}{A_p} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{ano}} \right) \quad (\text{eq.11})$$

- Perdas de calor por transmissão térmica pela envolvente envidraçada:

$$Q_1 = 2,928 \cdot U \cdot A \cdot (\theta_m - \theta_i) \text{ (kWh)} \quad (\text{eq.12})$$

Onde:

2,928 – (122 dias × 24 h)/1000;

U – Coeficiente de transmissão térmica do vão envidraçado (caixilho + vidro) (W/m².°C);

A – Área do elemento medida pelo interior (m²);

θ_m – Temperatura média do ar exterior na estação convencional de arrefecimento na zona climática de Verão onde se localiza o edifício (°C);

θ_i – Temperatura do ar no interior do edifício (20°C).

O valor da expressão do fluxo de calor Q_1 , devido à diferença de temperatura interior/exterior ($\theta_m - \theta_i$), é sempre negativo. Dado que a temperatura média exterior θ_m durante toda a estação de arrefecimento para todas as regiões climáticas em Portugal é sempre inferior à temperatura interior de referência θ_i . Nestas condições, a diferença de temperatura interior/exterior, em termos médios e ao longo de toda a estação de arrefecimento, está na origem de uma perda de calor para o exterior (ganho).

- Ganhos solares pelos vãos envidraçados:

$$Q_s = \sum_j \left[I_{rj} \sum_n (A \cdot F_h \cdot F_o \cdot F_f \cdot F_g \cdot F_w \cdot g_{\perp})_{nj} \right] \text{ (kWh)} \quad (\text{eq.13})$$

Onde:

I_{rj} – Intensidade média da radiação solar incidente em cada orientação (kWh/m²);

A – Área efectiva colectora da radiação solar da superfície n que tem a orientação j (m²);

$F_{(h, o, f, g, w)}$ – Factores solares conforme definido na situação de Inverno. Devido ao facto do sol descrever uma trajectória distinta em cada estação, os factores solares na estação de Verão são diferentes dos utilizados na estação de Inverno;

g_{\perp} – Factor solar do vão envidraçado para radiação incidente na perpendicular ao envidraçado e que tem em conta dispositivos de protecção solar.

- Factor de utilização dos ganhos solares:

Durante a estação de arrefecimento, o objectivo é que a temperatura no interior do edifício seja mantida igual a 25°C. Os ganhos responsáveis pelos aumentos de temperatura interior acima do valor de referência, ou seja os ganhos de calor não úteis são os que os sistemas de climatização têm de retirar e representam as necessidades de arrefecimento. Assim sendo, a fracção de ganhos de calor não úteis representa neste caso a quantidade (1- η), com η definido já anteriormente.

4.2.1.3. Indicador global de necessidades energéticas

Valor energético global que resulta da soma das necessidades relativas de cada estação (aquecimento e arrefecimento) que neste estudo define o desempenho global de cada opção seleccionada:

$$R_g = \frac{N_{ic}}{N_i} + \frac{N_{vc}}{N_v} \quad (\text{eq.14})$$

4.2.1.4. Factores de sombreamento

No que respeita aos vãos envidraçados, para cumprimento dos requisitos e exigências do RCCTE e dos objectivos deste trabalho é necessário calcular os factores solares, que tomam conta de existência de eventuais “obstáculos” associados à transmissão da radiação solar para o interior do espaço útil através do vão envidraçado:

Factor de obstrução (F_s) – Representa a redução na radiação solar que incide no vão envidraçado devido ao efeito de sombreamento permanente causado por diversos tipos de obstáculos:

$$F_s = F_h \cdot F_o \cdot F_f \quad (\text{eq.15})$$

Onde:

- F_h – Factor de sombreamento do horizonte por obstruções longínquas exteriores ao edifício;
- F_o – Factor de sombreamento por elementos horizontais sobrepostos ao envidraçado (palas, varandas);
- F_f – Factor de sombreamento por elementos verticais adjacentes ao envidraçado;

Fracção envidraçada (F_g) – Corresponde à redução da transmissão de energia solar associada à existência do caixilho, sendo dada pela relação entre a área envidraçada e a área total do vão envidraçado;

Factor de correcção da selectividade angular (F_w) – Traduz a redução dos ganhos solares causada pela variação das propriedades do vidro com o ângulo de incidência da radiação solar directa.

4.2.1.5. Factor solar do vão envidraçado

O factor solar do vão envidraçado (g_{\perp}) é o valor que representa a relação entre a energia solar transmitida para o interior através de um vão envidraçado com o respectivo dispositivo de protecção em relação à quantidade de radiação solar incidente na direcção normal ao envidraçado (vidro+protecção).

Para maximizar o aproveitamento da radiação solar na estação de aquecimento e não adulterar o desempenho do vidro aplicado na estação de arrefecimento, os dispositivos de protecção móveis (estores, portadas) estão totalmente abertos e é apenas considerado o factor solar do vidro, mas é considerada a existência, pelo menos, de cortinas interiores muito transparentes de cor clara, por questões de privacidade. Mas são considerados valores para factores solares do vidro desde 0.33 a 0.86, permitindo assim, tentar perceber as restrições postas em causa pela legislação.

4.3. Condições de referência

Dados do edifício padrão – Numa primeira fase foi definido um caso modelo para ser sujeito à aplicação de vários sistemas construtivos de vãos envidraçados e proceder à análise energética dessas mesmas opções confrontando-as com a metodologia referida anteriormente. O edifício padrão tem como área útil de pavimento 100m^2 que corresponde mais ou menos à área de um T2, tem como pé direito 2,70m, área envidraçada média de 15% da área útil de pavimento e factor de forma igual a um. Foi escolhido este valor, porque é o valor que não é penalizado sem comprometer a arquitectura do edifício. É um valor que nem é muito penalizador nem é desprezado. Os vãos envidraçados são distribuídos em 15% na orientação Norte, 35% a Sul, 25% a Este e Oeste. Inicialmente, são considerados os valores de inércia térmica fraca, média e forte, e não são considerados dispositivos de sombreamento exterior incluindo mesmo sombreamento causado por factores externos, posteriormente serão usados apenas os dispositivos de sombreamento exterior para os mesmos tipos de construção.

Dados de localização – Tinha-se a necessidade de escolher locais para o estudo dos vãos envidraçados em Portugal. Numa tentativa de proceder a uma avaliação do comportamento energético global das fachadas envidraçadas a nível Nacional foram agrupadas as 9 regiões climáticas de Portugal Continental, com algumas margens de erro é certo, mas representativas de todos os concelhos. Assim, para cada zona climática foi necessário reunir todos os valores referentes à sua localização, como o número de graus-dias, a duração da estação de aquecimento, a intensidade da radiação solar para a estação de arrefecimento, bem como a temperatura do ar exterior e calcular as respectivas médias e desvios [Anexo I]. Assim permitiu ter uma ideia de como se comporta globalmente cada zona climática para cada tipo de aplicação nos vãos envidraçados.

Dados económicos – Um dos métodos usados para avaliar a rentabilidade do projecto foi o VAL (valor actualizado líquido) que se caracteriza pela transferência, para o instante presente, de todos os valores do fluxo de caixa esperado, descontados à taxa mínima de atractividade, no período considerado do investimento. Outro método foi a TIR (taxa interna de rentabilidade), por definição é o retorno de um projecto à taxa de juros para a qual o valor presente das receitas torna-se igual às despesas. Equivale a dizer que a TIR é o que torna nulo o valor actual (presente) líquido do projecto. A comparação dos diferentes produtos foi feita em relação à poupança energética segundo o indicador global de necessidades (R_g) da janela cujo investimento inicial era menor, o caso de vidro simples incolor com caixilharia em alumínio (janela A), sendo que fluxo de caixa esperado foram as diferenças de desempenho e manutenção das diferentes janelas em relação à mesma. Para tal foram consideradas os seguintes valores:

- Aumento anual da energia 4%;
- Taxa de inflação de 3%;
- Custo de oportunidade do investimento de 8%;
- Custo de investimento e manutenção para cada tipo de janela retirado do *software CYPE*, criado para a Engenharia e construção ditando a orçamentação; [Anexo II]
- Análise feita para 20 anos;
- Preço da electricidade $0,11\text{€}/\text{kWh}$;
- COP=3 (Verão e Inverno). Valor que corresponde à referência de Verão e difere da de Inverno compensando de certa forma o valor γ considerado para a estação de aquecimento na eq.8;
- R_g (eq.14) como é uma grandeza adimensional houve necessidade de arranjar um múltiplo comum para as várias zonas climáticas para obter $\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{ano}$. O indicador energético de cada tipo de janela é em relação à soma dos limites das necessidades energéticas para cada região.

Dados da envolvente envidraçada – Sendo a escolha da caixilharia e do tipo de vidro para os vãos envidraçados preponderante no comportamento térmico do edifício, optou-se por comparar diversos sistemas de janelas (vidro+caixilho) de diferentes características, desde os materiais mais usados aos mais ousados. O conjunto de janelas estudadas que formam a superfície envidraçada estão representadas na tabela seguinte e foram referenciadas por letras e cada uma é constituída por um tipo de vidro e um tipo de caixilho. No caso do vidro duplo ou mais camadas foi referenciado o tipo de gás usado na câmara. Embora não seja contabilizada no RCCTE, o factor-g neste caso é tido em conta apenas num sentido especulativo em caso de janelas com desempenhos energéticos idênticos. A luz visível leva em consideração o factor-TV do vidro e a obstrução causada pelo devido caixilho. É apresentado o factor-g do vidro e logo a seguir o factor-g do vão segundo definido anteriormente. A influência do caixilho no factor solar do vão é contemplada com o valor F_g na eq.6 e eq.13 (redução da transmissão de energia solar associada à existência do caixilho). Por fim, temos o valor do factor-U global do vão envidraçado (vidro+caixilho) calculado segundo a eq.1.

Janela	Vidro	Gás	Caixilho	TV	g_v	$g_{vão}$	$U_{vão}$ (W/m ² .K)
A	Simples incolor	-	Alumínio s/ RT	0,75	0,86	0,71	6,51
B	Simples incolor	-	Madeira ou PVC	0,65	0,86	0,71	4,77
C	Duplo incolor	Ar	Alumínio c/ RT	0,63	0,76	0,64	3,58
D	Duplo bronze	Ar		0,48	0,63	0,53	3,58
E	Duplo low-E (+)	Árgon		0,58	0,71	0,60	2,84
F	Duplo low-E	Árgon		0,60	0,58	0,49	2,73
G	Duplo low-E (-)	Árgon		0,55	0,39	0,33	2,67
H	Duplo incolor	Ar	Madeira ou PVC	0,59	0,76	0,64	2,78
I	Duplo bronze	Ar		0,44	0,63	0,53	2,78
J	Duplo low-E (+)	Árgon		0,54	0,71	0,60	2,10
K	Duplo low-E	Árgon		0,56	0,58	0,49	1,99
L	Duplo low-E (-)	Árgon		0,51	0,39	0,33	1,93
M	Duplo incolor	Ar	Fibra de vidro ou PVCi	0,63	0,76	0,64	2,50
N	Duplo bronze	Ar		0,48	0,63	0,53	2,50
O	Duplo low-E (+)	Árgon		0,58	0,71	0,60	1,65
P	Duplo low-E	Árgon		0,60	0,58	0,49	1,53
Q	Duplo low-E (-)	Árgon		0,55	0,39	0,33	1,48
R	Triplo low-E (+)	Crípton	Fibra de vidro ou PVCi	0,50	0,51	0,43	1,02
S	Triplo low-E (-)	Crípton		0,43	0,33	0,28	1,02

Tabela 1 – Tipos de janelas usadas nos vãos envidraçados e suas propriedades [45]

4.4. Apresentação de resultados

Segundo a metodologia apresentada, foram calculados os indicadores globais das necessidades energéticas do edifício padrão em todas as zonas climáticas com diferentes tipos de janelas.

Os dados são apresentados de forma simples segundo cada uma das zonas para cada tipo de inércia térmica sob a forma de 3 tabelas. Cada tabela para cada tipo de inércia contém a informação do indicador global das necessidades energéticas para as 9 regiões de todas as opções de janelas. Os balanços energéticos não diferenciam as necessidades de Verão ou Inverno.

Nas tabelas seguintes, cada tipo de janela está associada a uma letra e a uma cor que é sempre a mesma ao longo das colunas (zonas climáticas). As tabelas são uma espécie de *ranking* energético, na primeira linha de todas as colunas está a janela mais eficiente com o indicador global energético mais baixo e na última linha está a pior solução energética. Permitindo analisar o desempenho de cada janela acompanhando a mesma cor ao longo das zonas. É necessário ter em atenção os casos em que janelas em posições diferentes têm a mesma relação energética podendo nestes casos contar com o factor-TV para dar um parecer energético favorável a um dos casos, uma vez que quanto maior o factor de transmissão visível maior o potencial para reduzir nos custos de iluminação artificial.

Para facilitar a leitura das tabelas as cores designadas com tons azulados pertencem ao conjunto de janelas com caixilharia em PVC isolado ou fibra de vidro, os tons em castanho denominam as janelas em caixilharia de madeira ou PVC e por último os tons de cinzento que representam o conjunto dos perfis em alumínio. Cada tipo de janela pode ser consultada na tabela 1.

Posteriormente são apresentadas mais 3 tabelas da mesma natureza em anexo, mas os resultados obtidos são nestes casos recorrendo ao uso de palas horizontais com o ângulo da pala a 60°. [Anexos III]

Também são apresentados dois gráficos representativos da análise financeira para o projecto económico proposto. Pelo gráfico 1 e 2 verifica-se a variação da atractividade de cada tipo de janela através da análise do VAL e da TIR respectivamente. Apenas é referenciado o caso com inércia térmica forte, tipo de construção típica em Portugal, para a situação inicial sem sombreamento exterior.

A apresentação dos dados é feita de modo objectivo e concreto dando a conhecer, segundo a metodologia desenvolvida, o comportamento energético e a melhor relação custo/benefício das diferentes opções construtivas em vãos envidraçados. No próximo capítulo é feita uma análise geral dos resultados obtidos.

4.4.1. Inércia térmica fraca

Apresentação dos indicadores globais energéticos com construção de inércia térmica fraca sem sombreamento exterior para cada tipo de janela e região:

Janela	I1/V1	I1/V2	I1/V3	I2/V1	I2/V2	I2/V3	I3/V1	I3/V2	I3/V3
S	0,09	0,08	0,07	0,11	0,10	0,10	0,12	0,11	0,11
Q	0,11	0,10	0,09	0,13	0,13	0,12	0,15	0,14	0,14
L	0,12	0,11	0,10	0,14	0,14	0,13	0,16	0,15	0,14
G	0,13	0,12	0,12	0,16	0,14	0,15	0,18	0,16	0,16
R	0,13	0,13	0,12	0,16	0,17	0,16	0,18	0,18	0,18
P	0,15	0,14	0,13	0,19	0,17	0,18	0,21	0,19	0,20
K	0,16	0,15	0,14	0,19	0,18	0,18	0,22	0,20	0,20
F	0,17	0,16	0,15	0,21	0,20	0,18	0,24	0,22	0,21
I	0,18	0,17	0,15	0,22	0,21	0,20	0,25	0,23	0,23
N	0,18	0,17	0,17	0,22	0,21	0,21	0,25	0,23	0,24
O	0,18	0,17	0,17	0,22	0,21	0,21	0,26	0,24	0,24
J	0,19	0,18	0,18	0,23	0,22	0,22	0,27	0,24	0,25
D	0,20	0,19	0,18	0,24	0,24	0,23	0,27	0,26	0,26
E	0,20	0,20	0,19	0,25	0,24	0,24	0,28	0,26	0,27
H	0,21	0,20	0,19	0,25	0,24	0,24	0,29	0,27	0,27
M	0,21	0,21	0,21	0,26	0,25	0,26	0,30	0,27	0,29
C	0,23	0,23	0,23	0,27	0,27	0,28	0,31	0,30	0,31
B	0,26	0,28	0,29	0,32	0,33	0,35	0,36	0,36	0,38
A	0,29	0,34	0,36	0,35	0,39	0,43	0,39	0,42	0,46

Tabela 2 – *Ranking* das relações energéticas totais (aquecimento+arrefecimento) para as 9 zonas climáticas considerando inércia térmica fraca e todas as janelas como opção

4.4.2. Inércia térmica média

Apresentação dos indicadores globais energéticos com construção de inércia térmica média sem sombreamento exterior para cada tipo de janela e região:

Janela	I1/V1	I1/V2	I1/V3	I2/V1	I2/V2	I2/V3	I3/V1	I3/V2	I3/V3
S	0,05	0,05	0,04	0,08	0,07	0,07	0,10	0,09	0,08
Q	0,07	0,06	0,04	0,10	0,09	0,08	0,12	0,11	0,10
R	0,07	0,07	0,06	0,10	0,10	0,09	0,13	0,11	0,11
L	0,08	0,08	0,07	0,11	0,11	0,11	0,13	0,13	0,14
P	0,09	0,09	0,07	0,13	0,11	0,12	0,15	0,14	0,14
G	0,10	0,09	0,09	0,13	0,13	0,12	0,16	0,16	0,15
K	0,10	0,10	0,09	0,14	0,13	0,13	0,17	0,16	0,16
O	0,10	0,10	0,09	0,15	0,14	0,14	0,19	0,16	0,17
J	0,11	0,12	0,11	0,16	0,15	0,15	0,19	0,18	0,18
F	0,12	0,12	0,11	0,16	0,16	0,16	0,20	0,19	0,19
N	0,12	0,12	0,12	0,16	0,16	0,17	0,20	0,19	0,20
E	0,13	0,12	0,12	0,17	0,17	0,17	0,21	0,20	0,20
I	0,13	0,13	0,12	0,18	0,17	0,17	0,22	0,20	0,20
M	0,13	0,13	0,12	0,18	0,18	0,18	0,22	0,21	0,21
H	0,14	0,13	0,13	0,19	0,18	0,18	0,23	0,21	0,22
D	0,15	0,16	0,16	0,19	0,20	0,21	0,23	0,23	0,24
C	0,16	0,16	0,16	0,21	0,21	0,22	0,25	0,25	0,26
B	0,20	0,21	0,22	0,26	0,27	0,28	0,30	0,31	0,32
A	0,24	0,28	0,30	0,3	0,34	0,37	0,35	0,38	0,41

Tabela 3 – *Ranking* das relações energéticas totais (aquecimento+arrefecimento) para as 9 zonas climáticas considerando inércia térmica média e todas as janelas como opção

4.4.3. Inércia térmica forte

Apresentação dos indicadores globais energéticos com construção de inércia térmica forte sem sombreamento exterior para cada tipo de janela e região:

Janela	I1/V1	I1/V2	I1/V3	I2/V1	I2/V2	I2/V3	I3/V1	I3/V2	I3/V3
R	0,01	0,04	0,06	0,00	0,04	0,06	-0,01	0,03	0,06
O	0,02	0,05	0,08	0,01	0,04	0,06	0,00	0,04	0,06
P	0,02	0,06	0,08	0,02	0,06	0,08	0,01	0,06	0,08
S	0,02	0,07	0,10	0,02	0,06	0,09	0,01	0,06	0,09
J	0,03	0,07	0,10	0,03	0,06	0,09	0,02	0,06	0,09
Q	0,03	0,08	0,11	0,03	0,08	0,10	0,03	0,08	0,11
K	0,04	0,08	0,12	0,04	0,08	0,11	0,03	0,08	0,11
L	0,05	0,09	0,13	0,04	0,08	0,12	0,04	0,08	0,12
M	0,05	0,10	0,13	0,05	0,10	0,13	0,05	0,10	0,14
N	0,05	0,10	0,14	0,06	0,10	0,13	0,05	0,10	0,14
E	0,06	0,11	0,15	0,06	0,11	0,14	0,05	0,11	0,14
H	0,06	0,11	0,15	0,06	0,11	0,14	0,06	0,12	0,15
I	0,06	0,11	0,15	0,07	0,11	0,15	0,07	0,12	0,15
F	0,07	0,11	0,16	0,07	0,12	0,15	0,07	0,12	0,15
G	0,07	0,12	0,16	0,09	0,12	0,15	0,09	0,12	0,16
C	0,09	0,14	0,18	0,09	0,15	0,18	0,09	0,16	0,20
D	0,09	0,14	0,19	0,11	0,15	0,19	0,11	0,16	0,20
B	0,12	0,19	0,24	0,14	0,20	0,24	0,14	0,21	0,26
A	0,19	0,25	0,31	0,22	0,28	0,33	0,23	0,31	0,35

Tabela 4 – *Ranking* das relações energéticas totais (aquecimento+arrefecimento) para as 9 zonas climáticas considerando inércia térmica forte e todas as janelas como opção

4.4.4. Análise financeira

Resultados do VAL para cada tipo de janela e região com construção de inércia térmica forte sem sombreamento exterior:

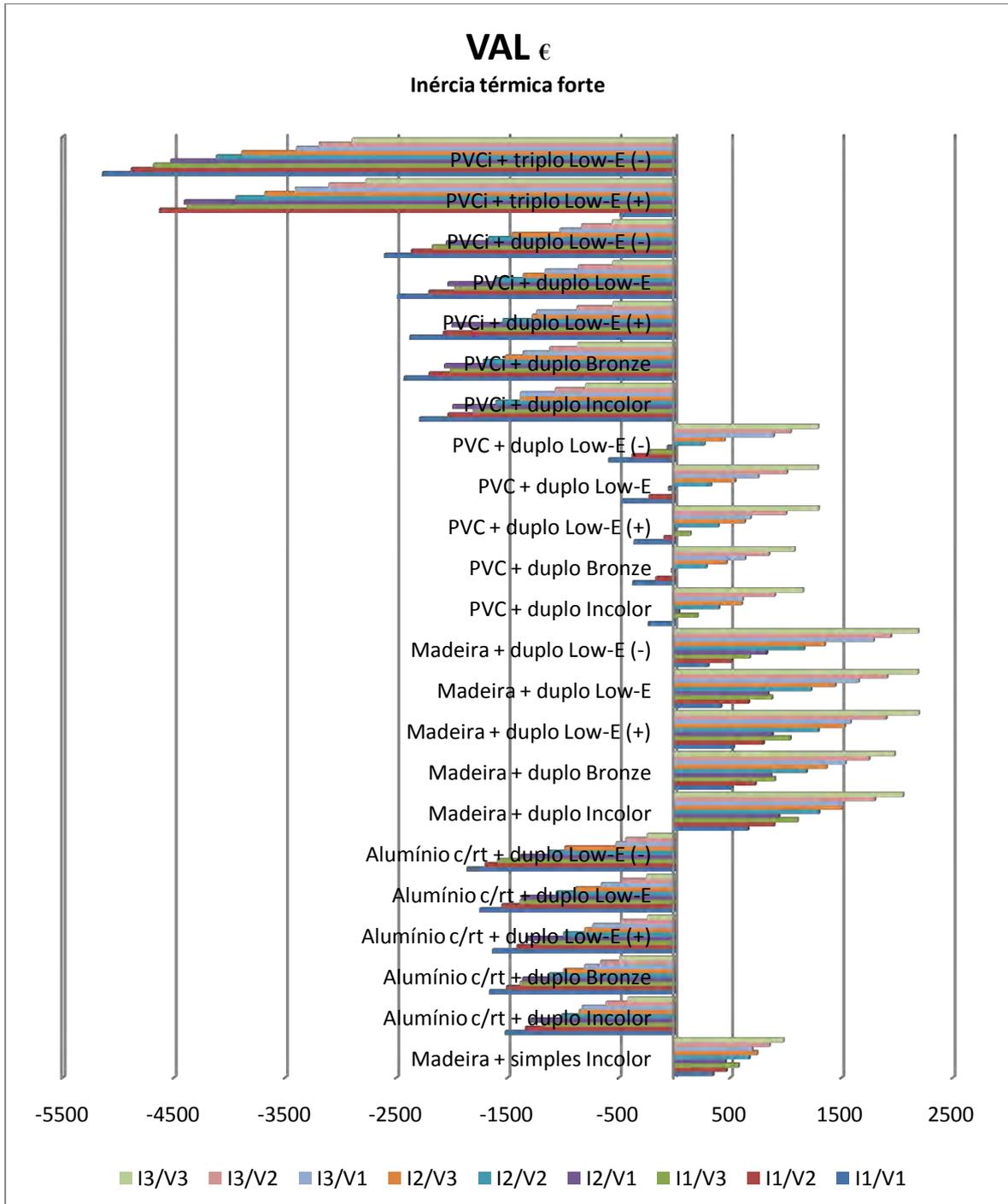


Gráfico 1 – Valor actualizado líquido das várias opções em comparação com o menor investimento

Resultados do TIR para cada tipo de janela e região com construção de inércia térmica forte sem sombreamento exterior:

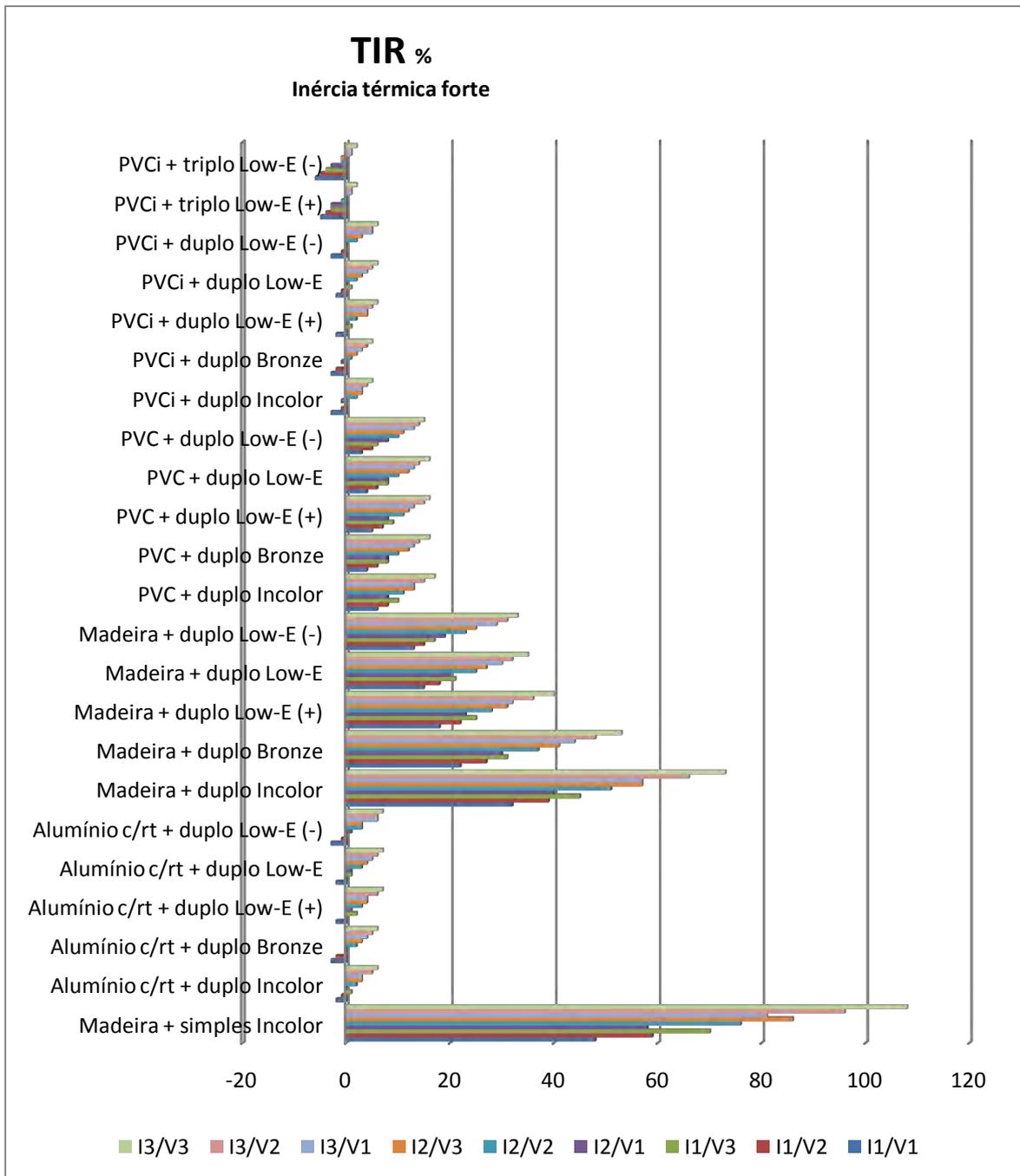


Gráfico 2 – Taxa interna de rentabilidade das várias opções em comparação com o menor investimento

4.5. Análise e discussão dos resultados

Os resultados devidamente sustentados, para dar a conhecer o comportamento energético dos vãos envidraçados em Portugal, estão assentes em cálculos baseados em médias para conseguir dar uma perspectiva geral da problemática. Para o desenvolvimento de um projecto em concreto é necessário um estudo mais cuidado. A análise dos resultados é discutida num conceito geral contribuindo para seleccionar gamas de produtos usados nos vãos envidraçados em Portugal.

4.5.1. Análise energética

Nos parágrafos que se seguem, apresenta-se a análise dos resultados obtidos no estudo paramétrico realizado para os três tipos de construção e para todas as opções construtivas e regiões climáticas sistematizados nas tabelas 2 a 4 e tabelas 7 a 9.

Fica claro que a inércia térmica do edifício à medida que aumenta, os indicadores energéticos têm tendência a diminuir revelando que os melhores resultados são obtidos em tipos de construção de inércia térmica forte. As melhorias energéticas são nos casos de janelas de alto desempenho cerca de 44% para inércia térmica média e o dobro para inércia térmica forte. O que se compreende analisando a eq.4 e eq.11, diminuindo a inércia térmica o resultado directo é uma diminuição do factor utilização dos ganhos o que penaliza os ganhos solares úteis na estação de aquecimento e aumenta os ganhos não úteis na estação de arrefecimento. Contudo verifica-se que existem janelas mais apropriadas para cada tipo de inércia térmica.

De uma forma geral, verifica-se que existe uma redução do consumo relativo em todas as situações em relação à pior opção energética (janela A). Havendo mesmo casos onde essa redução atinge o valor de 70%. À semelhança dos resultados apresentados pela DGEG [1] e ADENE [2], constatamos que a utilização de janelas eficientes diminui efectivamente o consumo em energia. Neste estudo registamos diminuições no consumo relativo menos acentuado em construções com inércia térmica fraca e mais caracterizado em construções com inércia térmica forte (principalmente nas zonas com Invernos rigorosos) que é explicado pelo facto de não haver um diferencial muito grande entre os consumos relativos na estação de arrefecimento em relação às de aquecimento entre as várias opções. Isto acontece porque para todas as regiões climáticas de Portugal a temperatura exterior é sempre inferior à temperatura interior de referência, logo uma janela com o factor-U e factor-g elevado tem altos ganhos solares, mas em conta partida tem elevados ganhos por condução por outro lado uma janela de alto desempenho tem menores ganhos solares e piores ganhos por condução. Este facto explica que à medida que os Invernos são mais rigorosos algumas das janelas de melhor desempenho ganham projecção.

É de particular interesse que no geral para todos os casos existe uma panóplia de opções com o mesmo indicador global energético o que nos permite à partida concluir que para o mesmo consumo relativo temos vários tipos de janelas como solução podendo já seleccionar a de menor custo para obter o mesmo desempenho.

É evidente que existe um forte compromisso entre o factor-U e factor-g que por sua vez dificulta uma análise energética particularizada, embora seja claro que as caixilharias actuais em PVC, madeira ou uma combinação destes conseguem prestações muito boas ao nível do isolamento especialmente quando associadas a vidro duplo *low-E*. Também é de realçar a efectividade do vidro baixo emissivo de baixo ganho solar que chega a reduzir 50% das necessidades relativas de arrefecimento em relação ao vidro simples.

É bem visível que a caixilharia isolada em fibra de vidro ou PVC de camada tripla com vidro *low-E* de baixo ganho solar (janela S) é a melhor opção mesmo em relação à sua rival janela R (alto ganho solar), exceptuando em construções com inércia térmica forte em que a promoção dos ganhos solares no Inverno

prevalece ligeiramente em relação à poupança no Verão. De maneira inversa, é importante restringir os ganhos solares em edifícios em que a inércia térmica é fraca. Projectando este raciocínio para todas as opções idênticas estamos numa situação de acordo com as restrições do regulamento em vigor para o factor solar em cada tipo de construção. Mas como a necessidade relativa de arrefecer é significativa em relação à necessidade relativa de aquecimento, janelas que previnem a radiação solar de entrar no edifício geralmente devem ser seleccionadas. E avaliando as prestações eficientes do benefício de um $factor-U \approx 1$ comprova-se que para minimizar os efeitos em ambas as estações, deve aumentar-se ao máximo a resistência térmica dos elementos construtivos.

No caso de aplicação de sombreamento exterior verifica-se que nas construções de inércia térmica fraca contribui para um menor consumo relativo das diferentes opções embora as necessidades relativas de aquecimento aumentem, a poupança relativa ao Verão compensa, o que já não se verifica em construções de inércia forte. Nesta situação o sombreamento desfavorece mais o Inverno em relação ao proveito no Verão. O que mais uma vez vai de encontro com o que foi dito sobre as vantagens da aplicação de protecções exteriores móveis, promover a protecção solar no Verão e não restringir os ganhos solares no Inverno.

Devido à evidente cumplicidade $factor-U$ e $factor-g$ tentou-se ainda uma abordagem analítica para tentar descobrir uma relação consistente e credível para estes factores, mas provavelmente devido a serem parâmetros de naturezas diferente não permitiu por nenhuma vez chegar a uma relação linear.

4.5.2. Análise financeira

Os dois métodos de avaliação são frequentemente utilizados de uma forma complementar. O VAL é um critério financeiro destinado a avaliar investimentos através da comparação entre os *cash flows* gerados por um projecto e o capital investido. A TIR permite avaliar os projectos de uma forma imediata, seleccionar aqueles cuja TIR se situa acima de um dado valor predefinido e eliminando aqueles cuja TIR está abaixo desse valor. Como se pode verificar com a análise em relação ao menor investimento, opção com o custo de produção mais baixo (solução base consistindo num vidro simples com caixilharia em alumínio sem corte térmico) as janelas com caixilharia em madeira são as que obtêm os valores de VAL mais elevados bem como a TIR. É claramente evidente que se tratam de soluções com um custo muito baixo e um alto benefício energético, mesmo quando se trata de soluções com vidro baixo emissivo. Essencialmente a TIR desta solução é directamente proporcional ao rigor dos Invernos. Motivo este que faz com as janelas de PVC passem a ter uma TIR superior ao custo de oportunidade e um VAL atractivo em zonas climáticas I3. Por outro lado, caem por terra as janelas de multi-camadas única exclusivamente, porque a sua alta eficiência não é suficiente face ao seu elevado custo. Como o caso das caixilharias em PVC isolado.

De salientar a fraca prestação das caixilharias em alumínio que não alcançam os mínimos de atractividade que vai de encontro à consideração de má qualidade. Por outro lado a janela de vidro simples com caixilharia em madeira, a segunda pior opção energética é a que iguala o VAL a zero mais rapidamente..

Em relação a outro tipo de construções o VAL e a TIR variam conforme o impacto causado nos consumos porém a conjectura económica das diversas opções de um modo geral mantém-se.

4.6. Conclusões

Ao discutir edifícios que precisam ser arrefecidos e aquecidos durante alturas diferentes do ano, a resposta, sobre o que pode ser considerado como janelas energeticamente eficientes fica mais complexa.

Este estudo investiga energia e economias de custo realizáveis por melhorar o desempenho de uma janela. Apresentando gráficos e tabelas facilmente compreensíveis de potenciais economias. O custo depende da durabilidade e dos euros gastos em energia que se “escapa” pelas janelas todos os anos. Uma janela com bons padrões de eficiência energética poupa dinheiro todos os meses, mas ainda assim pode não ser a melhor opção face ao custo inicial. A poupança energética juntamente com a durabilidade são componentes críticos no custo do ciclo de vida de uma janela e hoje em dia existem janelas de alta performance a esse nível.

O valor das janelas é definido de acordo com as especificações escolhidas como o modelo, dimensões, tipos de vidro, acessórios e opcionais. Na avaliação geral de custos o consumidor deve levar em consideração não somente o valor do produto, mas também outros custos relacionados a médio e longo prazo, como por exemplo a baixa manutenção das peças e a economia com aparelhos de refrigeração em função do maior conforto térmico. Considerando todas estas variáveis a escolha das soluções é bastante complexa, pois não há um comportamento energético linear que permita logo à partida definir uma opção, ainda assim os revestimentos *low-E* permitem uma alta proporção da luz visível do espectro solar transmitido bloqueando outros comprimentos de onda responsáveis pelos ganhos solares. A otimização da espessura do perfil separador de vitrificação pode melhorar significativamente a eficiência energética. Para a supressão de convecção, a utilização de Árgon ou Cripton é benéfico, qualquer que seja a latitude o vidro triplo baixo emissor com Cripton é considerado a solução mais eficiente energeticamente. Por fim, a escolha dos materiais da caixilharia pode ter um efeito profundo no total no factor-U da janela e na avaliação económica do ciclo de vida. Não há dúvida nenhuma que a melhor relação custo/benefício é aplicação de caixilharia em madeira podendo mesmo ser revestida em alumínio ou PVC para melhorar as propriedades. As janelas em madeira são fortes candidatas para uma solução eficiente universal. Pois para além de se poder adicionar capas protectoras no caixilho também se poderia aplicar vidro triplo, diminuindo indicadores energéticos e aumentando o seu ciclo de vida. As caixilharias em PVC também parecem ser uma das mais rentáveis soluções em Invernos rigorosos, mas o seu preço ainda compromete bastante em zonas climáticas mais amenas. Tem-se o garante de janelas bem isoladas, mais resistentes e duradouras.

Hoje é incontornável que a avaliação do desempenho dos edifícios deve ser feita na óptica do ciclo de vida perspectivando os investimentos e viabilizando períodos aceitáveis de avaliação que possam configurar períodos de retorno e taxas internas de rentabilidade que suportem eventuais sobre custos no investimento inicial.

5. Epílogo

Concluimos que o vidro é um material com qualidades extraordinárias as quais estão a ser aperfeiçoadas com o avanço da ciência e indispensável na concepção arquitectónica. Existe uma vasta gama de tipos de janelas e outras opções disponíveis no mercado, mas é necessário o seu profundo conhecimento para ter capacidade de tomar as decisões correctas no momento da sua escolha tendo em vista o seu propósito para tirar o máximo proveito possível das suas particularidades. Constatamos que é de extrema importância compreender as propriedades dos vãos envidraçados para que os seus limites sejam respeitados e as suas qualidades optimizadas e dimensionadas.

É esperado que esta pesquisa ajude a resolver o problema de falta de informação evidente na aplicação de vãos envidraçados e assistir tanto profissionais como particulares na criação de selecções baseadas em medidas de sustentabilidade bem como financeiras e considerações técnicas.

É essencial agir agora, pois os edifícios podem dar um grande contributo para a regressão das alterações climáticas e utilização energética. O progresso pode começar imediatamente pois existe actualmente o conhecimento e a tecnologia para reduzir a utilização de energia nos edifícios, enquanto se melhora os níveis de conforto. Resumindo, são pequenos e simples gestos e decisões na fase de projecto que têm implicações significativas no futuro da utilização dos edifícios, que por sua vez transformam para melhor o ambiente que nos rodeia e que permitirão uma melhor qualidade de vida para as gerações vindouras.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Na sequência do trabalho desenvolvido e das conclusões apresentadas nos pontos anteriores, de entre as possíveis linhas de investigação que poderão ser desenvolvidas na seguimento desta dissertação, destacam-se as de maior interesse:

- O estudo energético e económico dos vãos envidraçados considerando que o edifício utiliza painéis fotovoltaicos integrados na fachada para geração de energia. Começa-se a utilizar em Portugal esta forma de energia, logo seria interessante calcular o impacto para as diferentes regiões do país considerando esta fonte renovável de energia associada a outras.
- Estudar outros parâmetros de interesse, tais como, o efeito energético do factor-TV, o impacto de vários tipos de sombreamento ou dispositivos de luz natural alternativos, ou mesmo a influência no consumo energético dos caixilhos com ventilação controlada.
- Caracterização do consumo com uma simulação dinâmica computacional para uma análise mais refinada da eficiência energética dos vãos envidraçados, pois dessa forma comprovar a possibilidade de poupança energética com o uso de sistemas inteligentes de controlo solar.

6. Bibliografia

- [1] Ministério da Economia – Eficiência Energética nos Edifícios. DGEG, Programa P3E, 2002
- [2] ADENE/DGEG – Consumo doméstico. Balanço DGEG, 2005
- [3] A.M. Nilsson, A. Roos – Evaluation of optical and thermal properties of coatings for energy efficient windows. *Thin Solid Films* (2008), doi:10.1016/j.tsf.2008.11.083
- [4] M. Jitka, A. Hasim – Evaluation of optical and thermal properties of window glazing. Issue 1, Volume 5, (2009), ISSN- 1790-5079
- [5] T. Rosencrantz [et al] – Increased solar energy and daylight utilization using anti-reflective coatings in energy-efficient windows. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 89 (2005), doi:10.1016/j.solmat.2004.12.007
- [6] M.C. Singh, S.N. Garg – Energy rating of different glazings for Indian climates. *Energy* (2009), doi:10.1016/j.energy.2009.08.013
- [7] E. Ghisi, J.A. Tinker – An ideal window area concept for energy efficient integration of daylight and artificial light in buildings. *Building and Environment* 40 (2005), doi:10.1016/j.buildenv.2004.04.004
- [8] S.B. AbuBakr, A.B. James, F. Mark – Potential of emerging glazing technologies for highly glazed buildings in hot arid climates. *Energy and Buildings* 40 (2008), doi:10.1016/j.enbuild.2007.05.006
- [9] U.S. Department of Energy – Zero energy window prototype. *Energy Efficiency and Renewable Energy*, 2006
- [10] R. Rio – Caixilharias e perfis: Janelas para o mundo. *Arte e Construção*, Vol. 224, 2009
- [11] H. Gonçalves e J.M. Graça – Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal. Edição DGGE / IP-3E, 2004. ISBN- 972-8268-34-3
- [12] M.M. Ferreira da Cunha – Geometria de insolação: Optimização do dimensionamento de elementos de protecção solar. Tese de mestrado, Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005
- [13] DL 80/2006 – RCCTE Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios
- [14] Reynaers – *Eficiência energética*. 2009
- [15] J. Carmody [et al.] – Residential Windows: a guide to new technologies and energy performance. 3rd Edition. E.U.A.: Norton, W. W. & Company, Inc., 2007. ISBN- 0-393-73225-8
- [16] D.A. Silva da Fonseca – A casa de emissões nulas: Estudo conceptual. Tese de mestrado, Aveiro, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, 2007
- [17] ASHRAE – ASHRAE Handbook of Fundamentals: Chapter 31, Fenestration. 2005

- [18] C. Huizenga [et al.] – Window performance for human thermal comfort. Final report to the National Fenestration Rating Council, 2006
- [19] Departamento Autónomo de Arquitectura da Universidade do Minho – Noções básicas sobre conforto térmico, Programa 2006/07
- [20] V. Leal – Energy in Buildings: Lighting. PhD program Sustainable Energy Systems, MIT Portugal, 2009
- [21] Saint Gobain Glass – Suporte técnico: O vidro e a radiação solar.
- [22] F.J. Ramalheira – Manual de boas práticas de escolha de vãos envidraçados: Exigências funcionais de vãos envidraçados. Tese de mestrado, Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005
- [23] E. Giacomini – Tecnologias de fachadas: Material o vidro. Tese de mestrado, Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005
- [24] J. Martins, E. Pinto – Materiais de construção: Vidros. 1ª Edição, 2004
- [25] Saint Gobain Glass – Suporte técnico: Condensação sobre os vidros.
- [26] A. Gustavsen [et al.] – State-of-the-Art, Highly insulating window frames: Research and market review. SINTEF Building and Infrastructure, 2007. ISBN- 978-82-536-0970-6
- [27] E Source Companies – Building shell: Windows. 2007
- [28] J. Carmody – High performance windows and façades. EcoBuild, 2007
- [29] I. Salamoni, R. Ruther – Sistema fotovoltaico integrado à edificação e interligado à rede eléctrica: Eficiência energética e sustentabilidade. Tese de mestrado, Santa Catarina, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 2003
- [30] L. Tirone – Caixilharias de qualidade. 2009
- [31] J. Garrido – Sistemas energéticos para o sector edifícios em Portugal: Sustentabilidade e potencial de inovação. Tese de mestrado, Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2008
- [32] F. Chaves – Inovação na indústria da caixilharia. Tese de mestrado, Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2004
- [33] S. Verdelho – Caixilharia de alumínio. Tese de mestrado, Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005
- [34] P. Faria [et al.] – Fachadas em vidro. Trabalho realizado para a cadeira de Tecnologia da Construção de Edifícios, Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2006
- [35] F. Figueiredo – Vidro e silicone: Materiais à base de silício. Vidro Plano, Vol. 108, 2008

[36] C.N.D. Amorim – Iluminação natural e eficiência energética: Parte II, sistemas inovadores para a luz natural. Vol. 4, 2002

[37] J. Lopes – Tipologias e materiais nas caixilharias. Tese de mestrado, Porto, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005

[38] Casa *Belyea Faigin* por *Johnston Architect* (última visita em 14/9/2009). Disponível em:
<http://www.architecturesdesign.com/search/Belyea+Faigin+por+Johnston+Architects+>

[39] Conforto visual (última visita em 14/9/2009). Disponível em:
http://www.construcaosustentavel.pt/index.php?option=com_content&view=article&id=60:conforto-visual&catid=39:valorizacao-ambiental&Itemid=66

[40] Energia solar (última visita em 14/9/2009). Disponível em:
<http://www.dgge.pt/>

[41] Permeabilidade ao ar (última visita em 14/9/2009). Disponível em:
<http://www.caixemira.com/modules/content/index.php?id=22>

[42] Rótulo *NFRC* (última visita em 14/9/2009). Disponível em:
<http://www.nfrc.org/label.aspx>

[43] História do vidro (última visita em 14/9/2009). Disponível em:
<http://www.divinalvidros.com.br/educacional.htm>

[44] Introdução ao vidro (última visita em 14/9/2009). Disponível em:
<http://sa.pt.sunguardglass.com/IntroToAdvancedArchitecturalGlass/IntroducaoVidrodeControleSolareEficienciaEnergetica/index.htm>

[45] *Efficient Windows Collaborative* (última visita em 14/9/2009). Disponível em:
<http://www.efficientwindows.org/index.cfm>

[46] *Windows for high performance commercial buildings* (última visita em 14/9/2009). Disponível em:
<http://www.commercialwindows.umn.edu/>

[47] *Residential glazing* (última visita em 14/9/2009). Disponível em:
<http://oee.nrcan-rncan.gc.ca/residential/personal/windows-doors/glazing.cfm?attr=4>

[48] Películas de baixa emissividade (última visita em 14/9/2009). Disponível em:
<http://www.usp.br/fau/deptecnologia/docs/bancovidros/low.htm>

[49] Desempenho do vidro *low-E* (última visita em 14/9/2009). Disponível em:
<http://pt.saint-gobain-glass.com/b2c/default.asp?nav1=func&nav2=thermal-protection&nav3=flash&id=1556>

- [50] Gás e espessura da câmara (última visita em 14/9/2009). Disponível em:
[http://ureabreathtest.org/content/upload/AssetMgmt/technical%20data/IP%20U-factor%20\(colour\).pdf](http://ureabreathtest.org/content/upload/AssetMgmt/technical%20data/IP%20U-factor%20(colour).pdf)
- [51] Selagem do vidro multi-vítreo (última visita em 14/9/2009). Disponível em:
http://www.tecnovidro.com.br/tecnovidro/frontsite/produtoDetalhado.php?id_produto=25
- [52] *Emerging technologies* (última visita em 14/9/2009). Disponível em:
<http://www.greenspec.co.uk/html/materials/glass.html>
- [53] *Windows of the future* (última visita em 14/9/2009). Disponível em:
http://www.consumerenergycenter.org/home/windows/windows_future.html
- [54] *Dynamic Shading Window System* (última visita em 14/9/2009). Disponível em:
<http://www.rpi.edu/news/features/2003/fall/feature1-3.html>
- [55] Caixilharias de qualidade (última visita em 14/9/2009). Disponível em:
http://www.construcaosustentavel.pt/index.php?option=com_content&view=article&id=88:caixilharias-de-qualidade&catid=48:areas-envidracadas&Itemid=74
- [56] Vidro exterior agrafado (última visita em 14/9/2009). Disponível em:
http://www.oag.uk.com/sols_struct.htm
- [57] Sombreamento exterior fixo (última visita em 14/9/2009). Disponível em:
<http://www.archiexpo.com/prod/cambridge-architectural/metal-decorative-wall-panel-62232-159731.html>
- [58] Sombreamento exterior móvel (última visita em 14/9/2009). Disponível em:
<http://www.kawneer.com/kawneer/green/en/products/1600PowerShade.asp>
- [59] Sombreamento exterior (última visita em 14/9/2009). Disponível em:
<http://www.casacertificada.pt/empresas/solucao/sombreamentos-exteriores>
- [60] EN 410 – Norma de cálculo do factor de transmissão energética total do vidro.
- [61] EN 673 – Norma de cálculo dos factores de transmissão luminosa e energética do vidro
- [62] EN 12207 – Norma de classificação de janelas à permeabilidade ao ar
- [63] ETAG 002 – Guia para aprovação técnica europeia de vidros exteriores colados

Anexos

- Anexo I
- Anexo II
- Anexo III

Anexo I

Médias calculadas com intervalos de confiança de 95%:

- Zona climática I1/V1:

	I _{rj}	GD	1336	±4%
Norte	200	M	6	±3%
Sul	380	θ _m	20	±10%
Este	420	Nv	19	±31%
Oeste	425 ±2%			

- Zona climática I1/V2:

	I _{rj}	GD	1291	±5%
Norte	200	M	5,5	±4%
Sul	400 ±10%	θ _m	21	±19%
Este	460 ±4%	Nv	25	55%
Oeste	460 ±4%			

- Zona climática I1/V3:

	I _{rj}	GD	1316	±2%
Norte	205 ±5%	M	5,7	±2%
Sul	400	θ _m	22,5	±4%
Este	455 ±2%	Nv	29	±20%
Oeste	455 ±2%			

- Zona climática I2/V1:

	I _{rj}	GD	1742	±3%
Norte	200	M	6,8	±2%
Sul	380	θ _m	20	±10%
Este	420	Nv	19	±31%
Oeste	425 ±2%			

- Zona climática I2/V2:

	I _{rj}	GD	1807	±3%
Norte	200	M	6,7	±2%
Sul	400 ±10%	θ _m	21	±19%
Este	460 ±4%	Nv	25	55%
Oeste	460 ±4%			

- Zona climática I2/V3:

	Irj	GD	1758	±3%
Norte	205 ±5%	M	6,3	±4%
Sul	400	θm	22,5	±4%
Este	455 ±2%	Nv	29	±20%
Oeste	455 ±2%			

- Zona climática I3/V1:

	Irj	GD	2624	±7%
Norte	200	M	7,8	±2%
Sul	380	θm	20	±10%
Este	420	Nv	19	±31%
Oeste	425 ±2%			

- Zona climática I3/V2:

	Irj	GD	2461	±2%
Norte	200	M	7,4	±2%
Sul	400 ±10%	θm	21	±19%
Este	460 ±4%	Nv	25	55%
Oeste	460 ±4%			

- Zona climática I3/V3:

	Irj	GD	2396	±3%
Norte	200	M	6,7	±3%
Sul	400 ±10%	θm	22,5	±4%
Este	460 ±4%	Nv	29	±20%
Oeste	460 ±4%			

Anexo II

Custo de investimento e manutenção para cada tipo de caixilho e para cada tipo de vidro:

Caixilho	Custo inicial (€/m ²)	Manutenção decenal (€)
Alumínio sem corte térmico	218,02	30,52
Alumínio com corte térmico	355,08	49,71
Madeira	222,11	55,53
PVC	283,23	31,16
PVC isolado	466,46	31,16
PVC isolado (triplo)	566,46	31,16

Tabela 5 – Custos associados ao tipo de caixilharia (CYPE)

Vidro	Custo inicial (€/m ²)	Manutenção decenal (€)
Simples incolor	23,89	5,97
Duplo incolor	33,34	7,00
Duplo bronze	39,27	8,25
Duplo low-E ⁺	51,76	10,87
Duplo low-E	57,67	12,11
Duplo low-E ⁻	61,23	12,86
Triplo low-E ⁺	85,10	17,87
Triplo low-E ⁻	94,57	19,86

Tabela 6 – Custos associados ao tipo de vidro (CYPE)

Anexo III

Apresentação dos indicadores globais energéticos com construção de **inércia térmica fraca** com sombreamento exterior para cada tipo de janela e região:

Janela	I1/V1	I1/V2	I1/V3	I2/V1	I2/V2	I2/V3	I3/V1	I3/V2	I3/V3
S	0,06	0,06	0,06	0,08	0,08	0,08	0,09	0,08	0,09
Q	0,08	0,08	0,07	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11
L	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,11	0,12	0,11	0,12
R	0,09	0,10	0,10	0,11	0,12	0,13	0,12	0,13	0,14
G	0,10	0,10	0,11	0,12	0,13	0,13	0,13	0,14	0,14
P	0,11	0,12	0,11	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16
K	0,12	0,12	0,12	0,14	0,14	0,15	0,16	0,16	0,16
F	0,13	0,13	0,14	0,15	0,15	0,16	0,17	0,16	0,17
N	0,13	0,14	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,18	0,18
O	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,18	0,18	0,19
I	0,14	0,14	0,16	0,16	0,17	0,18	0,18	0,18	0,20
J	0,14	0,15	0,16	0,16	0,18	0,19	0,19	0,19	0,21
D	0,15	0,15	0,16	0,18	0,18	0,19	0,20	0,20	0,21
E	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,20	0,21	0,22
H	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,2	0,20	0,21	0,22
M	0,15	0,18	0,20	0,18	0,20	0,23	0,21	0,22	0,24
C	0,17	0,19	0,20	0,20	0,22	0,24	0,22	0,24	0,26
B	0,20	0,24	0,26	0,23	0,27	0,30	0,26	0,29	0,33
A	0,23	0,30	0,34	0,27	0,33	0,38	0,30	0,35	0,41

Tabela 7 – *Ranking* das relações energéticas totais (aquecimento+arrefecimento) para as 9 zonas climáticas considerando inércia térmica fraca com sombreamento exterior ($\alpha=60^\circ$) e todas as janelas como opção

Apresentação dos indicadores globais energéticos com construção de **inércia térmica média** com sombreamento exterior para cada tipo de janela e região:

Janela	I1/V1	I1/V2	I1/V3	I2/V1	I2/V2	I2/V3	I3/V1	I3/V2	I3/V3
S	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07
Q	0,06	0,05	0,05	0,08	0,07	0,07	0,09	0,09	0,08
R	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,10
L	0,07	0,07	0,07	0,09	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11
P	0,07	0,08	0,08	0,10	0,10	0,11	0,12	0,11	0,12
O	0,08	0,08	0,09	0,11	0,11	0,11	0,13	0,13	0,13
G	0,09	0,09	0,09	0,11	0,11	0,12	0,13	0,13	0,14
K	0,09	0,10	0,10	0,11	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15
J	0,10	0,11	0,12	0,13	0,13	0,15	0,15	0,15	0,16
N	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,15	0,16	0,17
F	0,11	0,11	0,13	0,13	0,14	0,15	0,15	0,16	0,17
I	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,16	0,17	0,18
M	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,17	0,18
E	0,12	0,13	0,13	0,15	0,16	0,17	0,17	0,18	0,19
H	0,12	0,13	0,13	0,15	0,16	0,17	0,18	0,18	0,19
D	0,13	0,15	0,17	0,16	0,18	0,20	0,18	0,2	0,22
C	0,14	0,16	0,17	0,17	0,19	0,20	0,20	0,21	0,23
B	0,17	0,21	0,22	0,21	0,24	0,27	0,24	0,27	0,29
A	0,22	0,27	0,31	0,26	0,31	0,35	0,29	0,34	0,38

Tabela 8 – *Ranking* das relações energéticas totais (aquecimento+arrefecimento) para as 9 zonas climáticas considerando inércia térmica média com sombreamento exterior ($\alpha=60^\circ$) e todas as janelas como opção

Apresentação dos indicadores globais energéticos com construção de **inércia térmica forte** com sombreamento exterior para cada tipo de janela e região:

Janela	I1/V1	I1/V2	I1/V3	I2/V1	I2/V2	I2/V3	I3/V1	I3/V2	I3/V3
R	0,02	0,02	0,01	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06
S	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,06
O	0,04	0,04	0,03	0,06	0,06	0,07	0,08	0,08	0,08
P	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,07	0,09	0,08	0,09
Q	0,04	0,05	0,05	0,07	0,07	0,07	0,09	0,09	0,09
J	0,05	0,06	0,06	0,08	0,08	0,09	0,10	0,10	0,11
K	0,05	0,06	0,06	0,08	0,09	0,09	0,10	0,10	0,11
L	0,06	0,07	0,07	0,09	0,09	0,09	0,11	0,11	0,12
M	0,07	0,07	0,07	0,10	0,11	0,11	0,12	0,13	0,14
N	0,07	0,08	0,08	0,10	0,11	0,12	0,13	0,13	0,14
E	0,08	0,09	0,09	0,1	0,12	0,13	0,13	0,13	0,14
F	0,08	0,09	0,09	0,11	0,12	0,13	0,13	0,14	0,15
G	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,14	0,15
H	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,14	0,15
I	0,08	0,10	0,11	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16
C	0,11	0,12	0,13	0,14	0,16	0,17	0,17	0,18	0,19
D	0,11	0,13	0,14	0,14	0,16	0,17	0,17	0,18	0,20
B	0,15	0,17	0,18	0,19	0,21	0,23	0,22	0,24	0,26
A	0,21	0,25	0,27	0,25	0,29	0,32	0,29	0,32	0,35

Tabela 9 – *Ranking* das relações energéticas totais (aquecimento+arrefecimento) para as 9 zonas climáticas considerando inércia térmica forte com sombreamento exterior ($\alpha=60^\circ$) e todas as janelas como opção