



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

Estudo da eficiência energética de casas rotativas- aplicação ao projeto de uma moradia prevista para Coimbra

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente
na Especialidade de Território e Gestão do Ambiente

Autor

Fernanda Daniela Cunha Dionísio

Orientadores

PROFESSOR DOUTOR: NUNO ALBINO SIMÕES (DEC – FCTUC)

PROFESSOR CONVIDADO: FILIPE BANDEIRA (DEC – FCTUC)

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Colaboração Institucional



ITeCons

Instituto de Investigação e Desenvolvimento
Tecnológico em Ciências da Construção

Coimbra, Julho de 2013

AGRADECIMENTOS

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas que, direta ou indiretamente contribuíram para a sua realização e às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento, assim, desejo agradecer a todos aqueles que com o seu saber e a sua colaboração dispuseram do seu tempo para me apoiar.

Ao Professor Doutor Nuno Simões e ao Professor Filipe Bandeira (orientadores) por me terem dado a possibilidade de realizar este trabalho, pela total disponibilidade, interesse, excelente orientação e pela paciência demonstrada em todas as fases desta dissertação.

Ao ITeCons, pela colaboração institucional.

Um agradecimento muito especial ao meu namorado Márcio pela força, dedicação, motivação, compreensão e por todo o apoio.

Aos meus pais e à minha irmã expesso a minha gratidão pelo apoio e pela presença incondicional em todas as etapas. Agradeço principalmente à minha mãe, ao meu tio Armindo, à minha irmã e ao meu namorado o facto de nunca me terem permitido desistir.

Aos meus familiares e amigos por todo o apoio, amizade e carinho demonstrado durante o meu percurso académico.

Um sincero muito OBRIGADA a todos!

RESUMO

A eficiência energética de edifícios tem sido alvo de uma crescente valorização, conduzindo a diferentes iniciativas. Desde a otimização de soluções construtivas à adoção de equipamentos de climatização mais eficientes, passando pela promoção de energias renováveis. Tem-se verificado uma gradual preocupação em explorar e implementar técnicas passivas de aquecimento e arrefecimento, valorizando-se o clima e meio ambiente em benefício do comportamento térmico e desempenho energético dos edifícios.

O presente trabalho enquadra-se nesta preocupação de identificação de medidas de promoção da eficiência energética. Prevê-se, em particular, levar a cabo um estudo que contribua para avaliar o efeito que a rotação de uma casa poderá ter no seu desempenho energético. Para além das características dos vãos envidraçados e de uma orientação adequada dos mesmos, analisa-se em detalhe qual a influência que a eventual rotação da casa e conseqüente alteração das orientações têm no aumento dos ganhos solares na estação de aquecimento e na redução desses mesmos ganhos na estação de arrefecimento.

Numa primeira abordagem, neste estudo determinaram-se os ganhos solares para um vão envidraçado de área unitária admitindo que podia ser fixo ou móvel. O estudo foi realizado em regime sazonal, mas também em regime horário. O modelo de cálculo foi ajustado de seguida para se avaliarem os ganhos solares para um conjunto de três janelas também de área unitária, estando as janelas dispostas em octantes contíguos.

Numa fase seguinte realizou-se o estudo das vantagens em termos de ganhos solares de uma casa rotativa projetada para Coimbra, comparativamente à situação em que a mesma estivesse fixa, mantendo todas as restantes características. Adicionalmente, avalia-se ainda qual o efeito do uso de dispositivos de proteção solar e do tipo de vidro. Por último, fez-se o balanço energético da casa, de acordo com as regras de cálculo preconizadas nas normas europeias cujos princípios são também os aplicados na regulamentação nacional, em particular no Regulamento das Características e Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE).

Palavras-chave: Eficiência Energética, Casa Rotativa, Ganhos Solares, RCCTE, Regime Sazonal e Horário

ABSTRACT

The energy efficiency of buildings has been a target of a growing appreciation, leading to many different initiatives. Since the optimization of constructive solutions, implementation of more efficient HVAC equipment, adopting the promotion of renewable energies. There has been a gradual concern to exploring and implement passive techniques of heating and cooling into buildings, in order to valuing the climate and the environment through a best thermal and energy performance of buildings.

This work falls into this concern of identification of measures to promote energy efficiency. It is expected, in particular, carry out a study, that will contribute to evaluate the effect of rotation of a house on the energy performance behavior .Beside the characteristics of glazing and proper orientation of the same, will be analyzed in detail the influence that the rotation of the house and consequent amendment of the guidelines have in the increase of the solar gains in the heating season and in the reduce of those gains in the cooling station.

For this study, in a first approach were determined the solar gains for a glazing of unit area, assuming that could be fixed or mobile. The study was conducted on a seasonal regime, but also in time regime. The calculation model was then adjusted to evaluate solar gain for a set of three windows also of unit area, being the windows were arranged in contiguous octants.

In a next step was performed a study of the advantages in terms of solar gains of a rotating house projected for Coimbra, compared to the situation in which it was fixed, while keeping all other characteristics. Additionally, was evaluated also the effect of the use of solar shading and type of glass. Finally, it was made an energy balance of the house, according to the calculation rules advocated by the European standards, following the principles applied in the national legislation, in particular Regulation Characteristics and Thermal Behavior of Buildings.

Keywords Energy efficiency, Rotating house, Solar gains, Regulation Characteristics and Thermal Behavior of Buildings, Seasonal and Time Regime

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento e motivação	1
1.2. Objetivos do trabalho	4
1.3. Estrutura do trabalho	5
2. ESTADO DA ARTE	6
2.1. Medidas para melhorar a eficiência energética nos edifícios	6
2.2. Exemplo de edifícios rotativos existentes	11
2.2.1. Casa Rotativa Villa Girasole	11
2.2.2. Casa Rotativa Domespace House	11
2.2.3. Heliotrope Rotating House	13
2.2.4. Everingham Rotating House	13
2.2.5. Suíte Vollard	14
2.2.6. Casa Rotativa Around the Sea	15
2.2.7. Projeto “casas em movimento”	15
3. DESCRIÇÃO DAS METODOLOGIAS APLICADAS	17
3.1 Metodologia de determinação dos ganhos solares	18
3.1.1. Ganhos solares brutos através dos vãos envidraçados na estação de arrefecimento	18
3.1.2. Ganhos solares brutos através dos vãos envidraçados na estação de aquecimento	19
3.2 Fator solar de vãos envidraçados	21
3.3 Metodologia de determinação dos ganhos solares para as janelas rotativas	21
3.4 Metodologia para determinação das necessidades energéticas de edifícios	23
3.5 Classificação energética de edifícios	26
4. GANHOS SOLARES DE VÃOS ENVIDRAÇADOS FIXOS E ROTATIVOS... ..	28
4.1 Determinação dos ganhos solares de um vão envidraçado fixo e rotativo de área unitária	28
4.1.1. Ganhos solares na estação de arrefecimento	30
4.1.2. Ganhos solares na estação de aquecimento	32
4.2 Determinação dos ganhos solares para um conjunto de três janelas com diferentes orientações e área unitária	35
4.2.1 Ganhos solares na estação de arrefecimento	35
4.2.2 Ganhos solares na estação de aquecimento	38
5. CASO DE ESTUDO DE UMA MORADIA ROTATIVA	40
5.1 Descrição da casa rotativa prevista para Coimbra	40
5.1.1 Identificação e caracterização das soluções construtivas	43
5.2 Ganhos solares da casa rotativa e o seu benefício relativamente a uma casa fixa com as mesmas características	44
5.2.1 Ganhos solares na estação de arrefecimento	45
5.2.2 Ganhos solares na estação de aquecimento	48
5.3 Avaliação dos efeitos do tipo de vidro e dos dispositivos de proteções solares na casa rotativa	50

5.3.1	Avaliação do efeito do tipo de vidro na casa rotativa.....	50
5.3.2	Avaliação do efeito dos dispositivos de proteções solares 100% ativas na casa rotativa	51
5.4	Avaliação do balanço energético da casa.....	54
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
7.	BIBLIOGRAFIA	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Consumo de eletricidade per capita em Portugal Continental, em 2001	1
Figura 2.1.1 Incidência do sol nos vãos envidraçados no Inverno	10
Figura 2.1.2 Incidência do sol nos vãos envidraçados no Verão	10
Figura 2.2.1 Casa Rotativa Villa Girasole, situada em Marcellise, no norte de Itália	11
Figura 2.2.2 Casa Rotativa Domespace House, projeto do designer e arquiteto Patrick Marsilli	12
Figura 2.2.3 Heliotrope Rotating House, situada em Freiburg	13
Figura 2.2.4 Everingham Rotating House, situada na Austrália	14
Figura 2.2.5 Prédio Rotativo Suite Vollard, situado no Brasil	14
Figura 2.2.6 Casa Rotativa Around The Sea, situada no Canadá	15
Figura 2.2.7 Protótipo do projeto “casas em movimento”, conceito criado pelo arquiteto Manuel Vieira Lopes	16
Figura 2.2.8 Protótipo à escala real do projeto “casas em movimento”, conceito criado pelo arquiteto Manuel Vieira Lopes	16
Figura 5.1. Planta do rés-do-chão, do piso 1, do piso 2 e da cobertura da casa prevista para Coimbra, na orientação fixa inicial	41
Figura 5.2. Alçados da casa rotativa prevista para Coimbra	41

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 Ganhos solares mensais em kW de um vão envidraçado fixo com área unitária nas diferentes orientações na estação de arrefecimento	29
Gráfico 4.2 Ganhos solares mensais em kW de um vão envidraçado fixo com área unitária nas diferentes orientações na estação de aquecimento	29
Gráfico 4.3 Ganhos solares acumulados de um vão envidraçado de área unitária nas diferentes orientações na estação de arrefecimento (kW)	31
Gráfico 4.4 Ganhos solares acumulados de um vão envidraçado de área unitária nas diferentes orientações na estação de aquecimento (kW)	33
Gráfico 5.1 Ganhos solares acumulados para cada conjunto de orientações fixas dos vãos envidraçados (kW) da casa prevista para Coimbra na estação de arrefecimento .	45
Gráfico 5.2 Ganhos solares acumulados para o conjunto das diferentes orientações dos vãos envidraçados da casa prevista para Coimbra na estação de aquecimento, em regime horário (kW)	48

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 Classes energéticas dos edifícios e valores limite das respetivas classes (Fonte: ADENE, 2010)	27
Tabela 4.1 Características do vão envidraçado utilizado no estudo dos ganhos solares	28
Tabela 4.2 Ganhos solares acumulados em todas as orientações na estação de arrefecimento de uma janela fixa de área unitária (kW)	30
Tabela 4.3 Ganhos solares acumulados da janela de área unitária na estação de arrefecimento em regime horário (kW)	31
Tabela 4.4 Ganhos solares mínimos acumulados da janela rotativa de área unitária na estação de arrefecimento (kW)	32
Tabela 4.5 Acréscimo dos ganhos solares da janela fixa relativamente à janela rotativa nas diferentes orientações (%) na estação de arrefecimento	32
Tabela 4.6 Ganhos solares acumulados em todas as orientações na estação de aquecimento de uma janela fixa de área unitária (kW)	33
Tabela 4.7 Ganhos solares acumulados da janela de área unitária na estação de aquecimento em regime horário (kW)	34
Tabela 4.8 Ganhos solares máximos acumulados da janela rotativa de área unitária na estação de aquecimento em regime horário (kW)	34
Tabela 4.9 Défice dos ganhos solares acumulados da janela fixa relativamente à janela rotativa de área unitária nas diferentes orientações (%) na estação de aquecimento	35
Tabela 4.10 Ganhos solares acumulados para um conjunto de três janelas fixas de área unitária, dispostas em octantes contíguos na estação de arrefecimento (kW)	35
Tabela 4.11 Ganhos solares acumulados para um conjunto de três janelas de área unitária, dispostas em octantes contíguos na estação de arrefecimento, em regime horário (kW)	36
Tabela 4.12 Ganhos solares máximos até às 10h e depois mínimos (situação 1) e ganhos solares mínimos acumulados (situação 2) das janelas rotativas de área unitária, dispostas em octantes contíguos na estação de arrefecimento (kW)	37
Tabela 4.13 Comparação dos ganhos solares acumulados entre as três janelas rotativas e as três janelas fixas de área unitária, dispostas em octantes contíguos nos diferentes conjuntos de orientações, na estação de arrefecimento, na situação 1 (%)	37

Tabela 4.14 Comparação dos ganhos solares acumulados entre três janelas rotativas e as três janelas fixas de área unitária, dispostas em octantes contíguos nos diferentes conjuntos de orientações na estação de arrefecimento, na situação 2 (%)	38
Tabela 4.15 Ganhos solares acumulados para um conjunto de três janelas fixas de área unitária, dispostas em octantes contíguos na estação de aquecimento (kW)	38
Tabela 4.16 Ganhos solares acumulados para um conjunto de três janelas de área unitária, dispostas em octantes contíguos na estação de aquecimento, em regime horário (kW).....	39
Tabela 4.17 Ganhos solares máximos acumulados das três janelas rotativas de área unitária, dispostas em octantes contíguos na estação de aquecimento (kW)	39
Tabela 4.18 Défice dos ganhos solares acumulados (%) para um conjunto de três janelas fixas relativamente às janelas rotativas, de área unitária, em octantes contíguos, na estação de aquecimento	39
Tabela 5.1 Área dos vãos envidraçados de cada piso da casa prevista para Coimbra, nas diferentes orientações (m ²).....	42
Tabela 5.2 Área total dos vãos envidraçados da casa prevista para Coimbra, nas diferentes orientações (m ²).....	42
Tabela 5.3 Área útil de pavimento da casa prevista para Coimbra (m ²).....	42
Tabela 5.4 Área total das paredes exteriores da casa prevista para Coimbra (m ²).....	43
Tabela 5.5 Característica dos elementos construtivos da casa prevista para Coimbra.....	43
Tabela 5.6 Característica das paredes exteriores da casa prevista para Coimbra.....	43
Tabela 5.7 Conjunto de orientações possíveis para as janelas da casa prevista para Coimbra	44
Tabela 5.8 Ganhos solares mensais acumulados para cada conjunto de orientações fixas dos vãos envidraçados da casa prevista para Coimbra (kW)	45
Tabela 5.9 Ganhos solares acumulados para as combinações das diferentes orientações dos vãos envidraçados da casa prevista para Coimbra na estação de arrefecimento, em regime horário (kW).....	46
Tabela 5.10 Ganhos solares máximos até às 10h e depois mínimos (situação 1) e ganhos solares mínimos acumulados (situação 2) das janelas rotativas da casa prevista para Coimbra, na estação de arrefecimento (kW).....	47
Tabela 5.11 Comparação dos ganhos solares acumulados entre as janelas rotativas e as janelas fixas da casa prevista para Coimbra nos diferentes conjuntos de orientações na estação de arrefecimento, na situação 1 (%)	47
Tabela 5.12 Comparação dos ganhos solares acumulados entre as janelas rotativas e as janelas fixas da casa prevista para Coimbra nos diferentes conjuntos de orientações na estação de arrefecimento, na situação 2 (%)	48

Tabela 5.13	Ganhos solares acumulados para cada conjunto de orientações fixas dos vãos envidraçados (kW) da casa prevista para Coimbra na estação de aquecimento ...	48
Tabela 5.14	Ganhos solares acumulados para cada conjunto de orientações dos vãos envidraçados (kW) da casa prevista para Coimbra na estação de aquecimento , em regime horário	49
Tabela 5.15	Ganhos solares máximos acumulados das janelas móveis da casa prevista para Coimbra, na estação de aquecimento (kW).....	50
Tabela 5.16	Défice dos ganhos solares acumulados para o conjunto de orientações das janelas fixas relativamente às janelas rotativas na estação de aquecimento (%) ..	50
Tabela 5.17	Avaliação do efeito do tipo de vidro na casa rotativa prevista para Coimbra na estação de arrefecimento e de aquecimento	51
Tabela 5.18	Avaliação do efeito dos dispositivos de proteções solares na casa rotativa prevista para Coimbra na estação de arrefecimento (kW)	52
Tabela 5.19	Ganhos solares com proteções solares nos vãos envidraçados da casa fixa e dos vãos envidraçados da casa rotativa prevista para Coimbra, na estação de arrefecimento.....	53
Tabela 5.20	Coefficiente global de transferência de calor da casa rotativa (pelas paredes exteriores, cobertura em contacto com o exterior e dos vãos envidraçados) multiplicado pela área de cada elemento.....	54
Tabela 5.21	Coefficiente global de transferência de calor por transmissão (envolvente exterior, envolvente interior e de elementos em contacto com o solo)	55
Tabela 5.22	Coefficiente de transferência de calor por ventilação na estação de arrefecimento e de aquecimento (W/°C).....	55
Tabela 5.23	Ganhos internos e ganhos térmicos brutos na estação de arrefecimento e de aquecimento.....	56
Tabela 5.24	Coefficiente global de transferência de calor na estação de arrefecimento e de aquecimento (W/°C)	56
Tabela 5.25	Parâmetros av e ai na estação de arrefecimento e de aquecimento	59
Tabela 5.26	Ganhos térmicos brutos da casa rotativa e necessidades nominais anuais na estação de arrefecimento e de aquecimento (kWh).....	60
Tabela 5.27	Síntese do balanço energético da casa rotativa, e da casa fixa com a combinação de orientações 8, 5 e 1	63
Tabela 5.28	Classe energética da casa rotativa e da casa fixa com a combinação de orientações 8, 5 e 1 devido ao aumento da eficiência nominal da bomba de calor	64

ACRÓNIMOS

ADENE – Agência para a Energia;

AQS – Águas Quentes Sanitárias;

CE – Certificado Energético;

CO₂ – Dióxido de Carbono;

DCR - Declaração de conformidade Regulamentar;

E – Este;

ENE 2020 – Estratégia Nacional de Energia;

EUA – Estados Unidos da América;

GEE – Gases de Efeito de Estufa;

ITeCons – Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção;

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia;

NE – Nordeste;

NW – Noroeste;

N – Norte;

PNAC – Plano Nacional para as Alterações Climáticas;

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios;

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios;

S – Sul;

SCE – Sistema Nacional de Certificação Energética e Qualidade do ar Interior nos Edifícios;

SE – Sudeste;

SW – Sudoeste;

UE – União Europeia;

W – Oeste;

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento e motivação

Nos últimos anos o Homem tornou-se fortemente dependente do consumo de energia, já que este se tem revelado necessário para o desenvolvimento social e económico a nível mundial, no entanto, este nem sempre é feito de modo eficiente. Este consumo tem sofrido um acréscimo ao longo dos anos e deve-se em parte ao estilo de vida que atualmente se verifica. Com a utilização crescente dos recursos energéticos e consequentes alterações climáticas devido à emissão de gases de efeito de estufa (GEE) para a atmosfera surge a necessidade de mudar o nosso comportamento face às questões sociais, económicas e ambientais[1]. A Europa e em especial Portugal dependem dos países de fora da União Europeia (UE) para satisfazer as suas necessidades de combustíveis fósseis. Na UE alguns países, como a França, República Checa e Suécia são exportadores líquidos de energia, enquanto outros países, como a Itália, Países Baixos, Áustria e Finlândia são importadores líquidos de energia[2]. A figura 1 mostra o mapa do consumo de eletricidade per capita, em 2001, para cada um dos 278 municípios de Portugal continental[3].

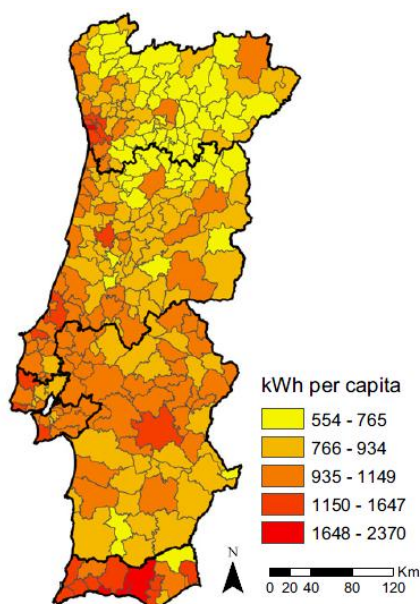


Figura 1 Consumo de eletricidade per capita em Portugal Continental, em 2001 [3]

Compete aos governos, empresas e aos cidadãos, cada um na sua dimensão e responsabilidade alterar os comportamentos de forma a procurar e adotar padrões eficientes de consumo de energia. A primeira grande intervenção deu-se em Dezembro de 1997 com o Protocolo de Quioto, estabelecido entre 100 países. Os países que assinaram o Protocolo comprometeram-se a tomar medidas necessárias para limitar a produção de GEE. Este acordo internacional fixou o compromisso de redução de pelo menos 5% das emissões de dióxido de carbono (CO₂) equivalente entre 2008 e 2012, em relação às emissões de 1990 [4]. O Protocolo de Quioto foi estabelecido em 1997, no entanto só entrou em vigor em Fevereiro de 2005, inicialmente estava previsto até 2012, no entanto foi prolongado até 2020 [5]. A nível nacional para garantir o cumprimento dos compromissos assumidos no contexto das políticas europeias de combate às alterações climáticas surge o Plano Nacional para as Alterações Climáticas (PNAC) e para reduzir a dependência energética face ao exterior e aumentar a eficiência energética adotaram-se linhas estratégicas para o setor da energia, a Estratégia Nacional de Energia (ENE 2020) que tem como princípios a aposta nas energias renováveis e a promoção integrada da eficiência energética [6].

O setor dos edifícios é responsável por cerca de 17 % no consumo energético nacional, representando o terceiro maior setor de consumo, sendo o setor da indústria e o dos transportes os que têm maiores consumos [7]. De acordo com a Agência para a Energia (ADENE), com pequenas intervenções nos edifícios, como por exemplo, substituindo equipamentos de baixa eficiência energética por outros mais eficientes é possível poupar até 30-35% de energia, mantendo as mesmas condições de conforto [7].

Nos últimos anos têm-se registado melhorias significativas na construção e na reabilitação das habitações, estes avanços devem-se principalmente à transposição da Diretiva nº 2002/91/CE do Parlamento Europeu, de 16 de Dezembro de 2002, relativa ao desempenho energético dos edifícios, para o Decreto-Lei nº 78/2006 de 4 de Abril (Sistema Nacional de Certificação Energética e Qualidade do Ar Interior nos Edifícios – SCE), Decreto-Lei nº 79/2006 (Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios – RSECE)

e do Decreto-Lei nº 80/2006 (Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios – RCCTE) [8]. No âmbito do SCE foi estabelecido que a partir de Janeiro de 2009 se estabelece a obrigatoriedade de apresentação do Certificado Energético dos Edifícios [9]. O RSECE define um conjunto de requisitos aplicáveis a edifícios de serviços e de habitação dotados de sistemas de climatização. O regulamento impõe limites máximos ao consumo de energia em todo o edifício, abrange aspetos relacionados com a envolvente do edifício e estabelece valores mínimos de renovação do ar interior [9]. No RCCTE são estabelecidos requisitos de qualidade ao nível das características da envolvente, limitando as perdas térmicas e controlando os ganhos solares excessivos. Este regulamento impõe limites nos consumos energéticos e obriga à instalação de painéis solares térmicos [9].

Uma das formas de contribuir na utilização racional de energia nos edifícios, sem pôr em causa o seu conforto térmico, é fazer uma escolha adequada do tipo de vidro, da orientação dos vãos envidraçados e do uso de proteções solares nos sistemas envidraçados. O presente trabalho assenta na avaliação de alternativas à construção corrente, com o estudo de uma estratégia passiva de aquecimento e de arrefecimento. Esta consiste na consideração da rotatividade dos edifícios. Também se pretende adequar metodologias de cálculo para avaliar o balanço energético de edifícios rotativos, em particular dos ganhos solares. Por último, pretende-se contribuir com a avaliação dos benefícios dos edifícios residenciais serem rotativos.

1.2. Objetivos do trabalho

Um dos objetivos principais desta dissertação é avaliar a eficiência energética que se pode obter caso se opte por uma casa rotativa. Numa primeira fase realizou-se uma pesquisa bibliográfica dos edifícios rotativos existentes e das metodologias de cálculo disponíveis para avaliar o balanço energético da casa, em particular dos ganhos solares. Com estas metodologias determinaram-se ganhos solares para um vão envidraçado fixo e móvel, em regime sazonal e em regime horário, com consequente comparação nas diferentes situações. Outro objetivo deste trabalho consiste em determinar os ganhos solares para um conjunto de três janelas com diferentes orientações e igual área e a comparação de resultados em regime horário e sazonal. De seguida, adotou-se para caso de estudo uma casa rotativa prevista para Coimbra. Por conseguinte, determinam-se os ganhos solares para o caso da casa rotativa em estudo com consequente avaliação dos benefícios desta comparativamente a uma casa fixa com as mesmas características. Também se avaliam os efeitos do tipo de vidro e dos dispositivos de proteção solar na casa. Com estas metodologias é possível concretizar o objetivo principal desta dissertação, que consiste em avaliar o balanço energético da casa rotativa com consequente comparação do balanço energético da casa fixa, sendo este efetuado com a ajuda da folha de cálculo de aplicação do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), fornecida pelo Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção (ITeCons).

1.3. Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em seis capítulos. Neste capítulo foi apresentado o enquadramento, a motivação e os objetivos a atingir nesta dissertação. No capítulo 2 é efetuado o estado da arte, onde são apresentados estudos sobre algumas medidas para melhorar a eficiência energética nos edifícios e onde são apresentados alguns edifícios rotativos existentes. No capítulo 3 definiu-se a metodologia para determinar os ganhos solares brutos para vãos envidraçados fixos ou móveis. Neste capítulo também é apresentada a metodologia sobre as necessidades energéticas de edifícios e a classificação energética dos mesmos. No capítulo 4 são apresentados os ganhos solares na estação de aquecimento e de arrefecimento para uma janela fixa e para uma janela móvel e para um conjunto de três janelas de área unitária orientadas em octantes contíguos, com a respetiva comparação dos resultados. No capítulo 5 é exposto o caso de estudo, onde são apresentados os ganhos solares da casa rotativa e o seu benefício relativamente a uma casa fixa. Também é feita a avaliação dos efeitos do tipo de vidro e dos dispositivos de proteções solares na casa. Por último, é exposta a avaliação do balanço energético da casa rotativa e para efeitos de comparação é feito o balanço energético da casa fixa. Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas considerações finais do estudo desenvolvido nesta dissertação.

2. ESTADO DA ARTE

Na bibliografia são escassas as informações relativas à eficiência energética de casas rotativas. Desse modo será feita uma revisão bibliográfica de medidas para melhorar a eficiência energética em edifícios comuns, dando ênfase à importância que a orientação dos vãos envidraçados tem no conforto térmico dos edifícios e de seguida são apresentados alguns edifícios rotativos existentes. Por último faz-se uma breve referência aos trabalhos desenvolvidos em Portugal.

2.1. Medidas para melhorar a eficiência energética nos edifícios

Na Europa, o setor residencial é responsável por 40% do consumo final de energia [9]. Andalaro *et al.* (2010) observaram que a maioria dos países ainda estão a meio do caminho para atingir um nível alto de desempenho energético. Pinheiro e Ferreira (2011) [10] estudaram o desempenho energético dos edifícios em Portugal.

Estudos feitos no Sudeste Asiático têm mostrado que a utilização de luz natural pode reduzir até 20% o consumo global de energia nos edifícios [11].

Pinheiro e Ferreira [10] concluíram que a entrada em vigor da Diretiva 2002/91/CE contribuiu para a redução parcial do consumo de energia e para um melhor desempenho energético dos edifícios.

Segundo Kim *et al.* (2012) [12] a aplicação de dispositivos de sombreamento externos nos edifícios é mais vantajosa em comparação com sistemas de sombreamento interno. Os dispositivos externos contribuem para um melhor desempenho energético e proporcionam maior conforto aos ocupantes [12]. Littlefair (2011) [13] realizou um estudo sobre os critérios propostos na literatura e estabelecidos em padrões diferentes para garantir níveis adequados de insolação nos edifícios residenciais. Os efeitos da orientação das janelas de um edifício e do impacto de obstruções externas que o rodeiam têm sido estudados por Littlefair (2009) [14]. A utilização de dispositivos de sombreamento reduz

significativamente os ganhos solares, no entanto, estes têm a desvantagem de reduzir a iluminação natural no edifício. Os dispositivos mais adequados são as persianas venezianas. O uso de dispositivos de sombreamento permite reduzir as necessidades de arrefecimento do edifício em 11%. [12]

A envolvente do espaço interior do edifício deve ser constituída por materiais compactos (betão, tijolo maciço) com grande capacidade de armazenamento térmico e as superfícies devem ter um elevado poder de absorção da radiação solar (tons escuros). O dimensionamento dos vãos deve considerar o fator de iluminação natural, de forma a evitar altos custos de iluminação artificial [15].

Segundo Singh e Garg (2009) [16] o desempenho energético de uma janela depende das propriedades da janela, das condições climáticas do local e da sua orientação e concluíram que para o mesmo edifício, durante um ano, os ganhos energéticos variam devido às diferentes orientações das fachadas envidraçadas .

Fresnel demonstrou que o ângulo com que incide a radiação varia drasticamente dependendo da posição da janela. Werner e Roos [17] fizeram um estudo para avaliar de que forma é que o ângulo de incidência da radiação solar influencia o valor estimado da energia absorvida pelas janelas.

Janelas de vidro triplo foram sugeridas por Askar *et al.* (2001) [18] para reduzir os ganhos solares e os ganhos de calor a partir do ambiente circundante, permitindo luz adequada no interior do edifício. Os parâmetros óticos, o valor do coeficiente de transmissão térmica e a emissividade de diferentes tipos de materiais para os vidros foram estudados por Clarke *et al.* (1998) [19] para o controle de ganhos solares de modo a ter eficiência energética nos vidros. Littlefair *et al.* [13] adotaram um método para avaliar o coeficiente de transmissão térmica do vidro em condições de céu nublado.

A orientação dos vãos envidraçados tem uma grande relevância para o conforto térmico do edifício. O Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) [20] definiu algumas linhas de orientação dos vãos envidraçados:

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 correta será a de captar a radiação solar disponível. A orientação a Sul é aquela que propicia maiores ganhos solares. O percurso do sol no Inverno é vantajoso para esta orientação, uma vez que o seu percurso se efetua para azimutes muito próximos do Sul geográfico.

- No Verão torna-se necessário minimizar os ganhos solares, uma vez que o sol percorre Nordeste até Noroeste e aparece em todas as orientações, sendo que é a superfície horizontal a que recebe maior nível de radiação. Para uma fachada orientada a Sul, os ganhos solares são facilmente atenuáveis se existir uma pala de sombreamento sobre o vidro.

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

- No Inverno, um vão com esta orientação recebe pouca radiação, uma vez que 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. 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 ação solar são semelhantes aos destes, diferindo apenas no período do

dia em que ocorrem. No período da tarde, conjugam-se dois efeitos muito negativos, devido a maiores temperaturas do ar no exterior. 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. 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 em termos de radiação solar, sendo a mais fria:

- No Inverno não recebe nenhuma radiação direta, porém recebe radiação difusa a partir da abóbada celeste;

- No Verão recebe uma pequena fração de radiação direta do sol no início da manhã e ao fim da tarde.

De modo a permitir um ajustamento da orientação dos vãos envidraçados em relação à posição do sol em termos sazonais e horários têm sido propostas pelos profissionais da construção diferentes soluções de edifícios rotativos.

A Figura 2.1.1 mostra o percurso do sol durante o dia, no Inverno. No período da manhã e princípio da tarde, o percurso do sol é próximo da perpendicular aos envidraçados verticais, de uma fachada orientada a Sul, possibilitando maiores ganhos solares. Como o sol nasce próximo da orientação Sudeste, sobre a qual incide durante poucas horas do período da manhã, uma fachada orientada a Nascente tem poucos ganhos solares. [20]

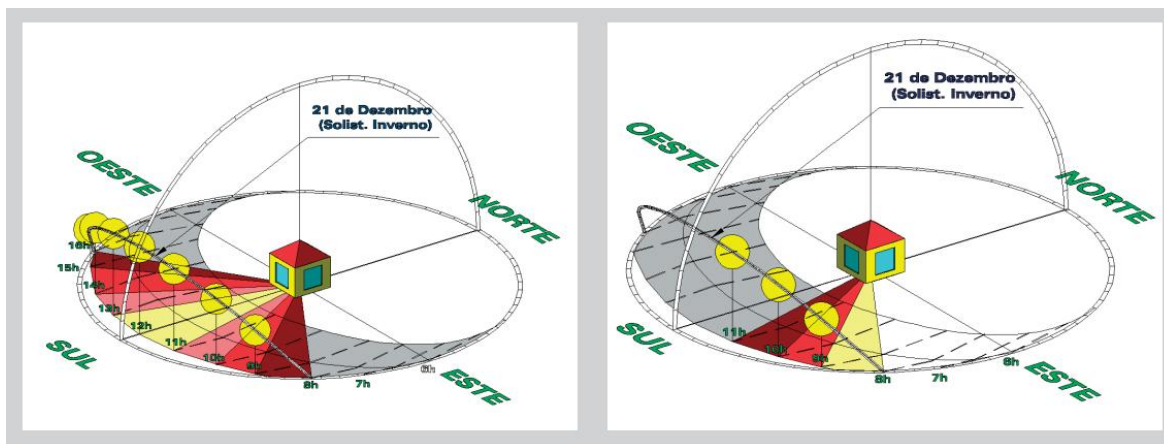


Figura 2.1.1 Incidência do sol nos vãos envidraçados no Inverno [20]

A figura 2.1.2 mostra a incidência do sol nas diferentes orientações dos vãos envidraçados no Verão. A altura do sol no Verão é maior e a sua incidência, em envidraçados verticais orientados a Sul, faz-se com grandes ângulos, o que reduz os ganhos solares.

No Verão, numa fachada orientada a Nascente, a incidência dos raios solares ocorre, durante longas horas da manhã e exerce-se segundo ângulos próximos da perpendicular aos envidraçados verticais, fator que promove uma maior captação de energia solar que, nesta estação, é indesejável. [20]

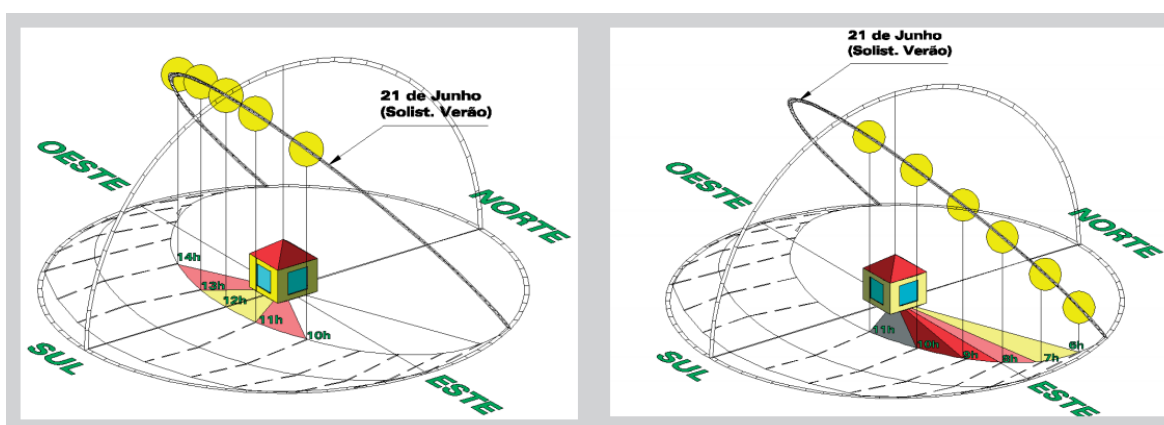


Figura 2.1.2 Incidência do sol nos vãos envidraçados no Verão [20]

2.2. Exemplo de edifícios rotativos existentes

O conceito de casas rotativas é recente em Portugal, embora se conheçam edifícios datados de 1929.

2.2.1. Casa Rotativa Villa Girasole

Em 1929, Angelo Invernizzi projetou a *Villa Girasole* com a ajuda de Romolo Carapacchi, ambos engenheiros. A estrutura da casa está representada na Figura 2.2.1. A construção da casa começou em 1931 em Marcellise, no norte de Itália e ficou concluída em 1935. A casa possui dois andares, tem a forma de “L” e assenta numa base de mais de 44 metros circulares, com uma torre de 42 metros de altura no centro. Para a rotação da casa são usados 15 carrinhos que andam ao longo de três pistas circulares. São usados dois motores a diesel para fazerem deslizar os 5000 m³ de construção a uma velocidade de 4 mm por segundo. A casa leva 9 horas e 20 minutos para dar uma volta completa. [21]



Figura 2.2.1 Casa Rotativa Villa Girasole, situada em Marcellise, no norte de Itália [21]

2.2.2. Casa Rotativa Domespace House

No final de 1980, o designer e arquiteto Patrick Marsilli criou as chamadas “*casas Domespace*”. O sistema criado por Marsilli permite a rotação completa da estrutura da

casa. A casa assenta num pilar central e é esse pilar que graças a um sistema de roldanas faz a casa girar. A velocidade a que a casa gira pode ser programada e feita sem praticamente se notar. As casas são parecidas com um objeto voador não identificado, tal como mostra a Figura 2.2.2. [22]



Figura 2.2.2 Casa Rotativa Domespace House, projeto do designer e arquiteto Patrick Marsilli [22]

O desenho circular é centrado em torno de uma coluna central de madeira e com a ajuda de um pequeno motor na base, a casa inteira pode girar. A casa possui um motor elétrico que permite a sua rotação. A rotação da casa é lenta e suave o suficiente de modo a ser quase impercetível - o usuário pode escolher entre um e dez centímetros por segundo. A energia necessária para rodar a casa é a mesma que é necessária para a aspirar. O telhado da casa pode ser equipado com painéis solares que podem girar automaticamente para seguir o percurso do sol de modo a gerar mais energia ao longo do dia. [22]

As casas são constituídas principalmente por madeira, são construídas de modo a resistir a um sismo até oito graus na escala de Richter e a sua forma aerodinâmica permite-lhe resistir a ventos até 281,6 Km/h (furacão de categoria 5). O teto é coberto de telhas de cedro vermelho, que não necessitam de qualquer tratamento especial e o interior da casa é isolado com cortiça em bruto, o qual é inserido entre as vigas [23].

2.2.3. Heliotrope Rotating House

Em 1994 o arquiteto Rolf Disch construiu a sua própria casa, representada na Figura 2.2.3. A parte da frente da casa tem vidros triplos e na varanda há tubos para aquecer a água. No telhado há painéis solares fotovoltaicos, que geram quatro a seis vezes a energia necessária para a casa. Além destes sistemas a casa tem compostagem de resíduos no local, e um sistema de purificação de águas para tratamento de esgotos e captação de águas pluviais. Esta casa foi o primeiro edifício no mundo a criar mais energia do que consome. [24]



Figura 2.2.3 Heliotrope Rotating House, situada em Freiburg [24]

2.2.4. Everingham Rotating House

Outro exemplo desta arquitetura é a Everingham Rotating House, apresentada na Figura 2.2.4. Foi criada por Luke Everingham e está situada na Austrália.

A casa tem estrutura octogonal, é constituída em grande parte por vidro e aço, e é alimentada por dois motores elétricos " não muito maiores do que um motor de uma máquina de lavar", a sua rotação é controlada por meio de uma tela *touch screen* na sala de estar. A varanda da casa faz 360 graus e tem 3m de largura. O tempo para concluir a rotação da casa pode variar entre 30 e 120 minutos. A estrutura inteira pesa cerca de 50 toneladas. A casa começou a ser construída em Dezembro de 2003 e foi concluída em Março de 2006. [25]



Figura 2.2.4 Everingham Rotating House, situada na Austrália [25]

2.2.5. Suíte Vollard

O edifício está representado na Figura 2.2.5, é um edifício com 11 apartamentos, cada um com 287m². Está localizado na região Sul do Brasil, em Curitiba. Foi projetado pelo arquiteto Bruno de Franco, tendo sido concluído no final de 2004. Foi considerado o primeiro edifício de apartamentos giratório do mundo. Os andares são circulares e rodam de forma independente entre si. Cada apartamento pode girar individualmente e demora em média 60 minutos para completar uma volta (360 graus), para isso é utilizado um motor que consome 370kW/h de energia elétrica.

Cada apartamento está dividido internamente em 4 quadrantes com uma porta cada, ligados ao eixo central fixo onde fica a lareira, casa de banho e a cozinha. [26]



Figura 2.2.5 Prédio Rotativo Suite Vollard, situado no Brasil [26]

2.2.6. Casa Rotativa Around the Sea

Casa situada em Prince Edward Island, no Canadá. A casa foi projetada por Luke Everingham e está representada na Figura 2.2.6. Prevê-se que a sua construção esteja concluída em 2013. Na casa são utilizados dois motores de 700 W cada, que alimentam 24 rodas para girar a casa. A velocidade do movimento é definida como 80 m/h, e tudo pode ser controlado através do *iPhone* do proprietário. A casa terá dois andares e cada um tem 2.500 m². [27]



Figura 2.2.6 Casa Rotativa Around The Sea, situada no Canadá [27]

2.2.7. Projeto “casas em movimento”

O projeto “casas em movimento” surgiu em 2008 e é um conceito do arquiteto Manuel Vieira Lopes. Uma das preocupações do arquiteto foi entender os painéis solares como parte integrante da casa, de modo a terem um sistema mecânico que os fizesse posicionar para ficarem sempre perpendiculares ao sol, para obterem o máximo de energia. O projeto está apresentado na figura 2.2.7 e 2.2.8. Outra preocupação foi desenhar uma moradia modular que pudesse evoluir com a família. A casa também tem um sistema mecânico que a faz girar consoante as horas do dia e de acordo com a posição do sol. O protótipo para a escala real foi criado em Madrid. [28]

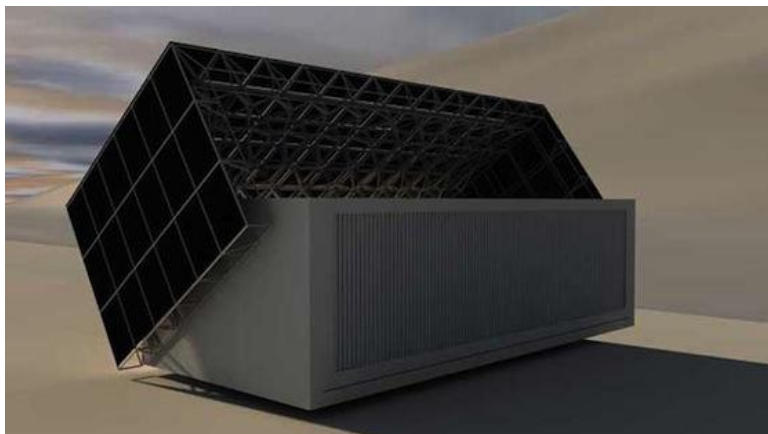


Figura 2.2.7 Protótipo do projeto “casas em movimento”, conceito criado pelo arquiteto Manuel Vieira Lopes [28]



Figura 2.2.8 Protótipo à escala real do projeto “casas em movimento”, conceito criado pelo arquiteto Manuel Vieira Lopes [28]

3. DESCRIÇÃO DAS METODOLOGIAS APLICADAS

Neste capítulo é apresentada a metodologia aplicada nesta dissertação para determinar os ganhos solares em regime sazonal e em regime horário. Considera-se regime sazonal quando se determinam os ganhos solares para uma orientação fixa do edifício. Para o regime horário, foram considerados ganhos solares mínimos ou máximos em cada hora, desde o nascer até ao pôr-do-sol, na estação de arrefecimento e na estação de aquecimento, respetivamente. A estação de arrefecimento inclui os meses do ano em que é necessário arrefecer o edifício e a estação de aquecimento inclui os meses do ano em que é necessário aquecer o edifício. Também se apresenta a metodologia para determinar as necessidades nominais globais de energia primária e para a classificação energética dos edifícios. Neste capítulo é apresentada uma metodologia dos ganhos solares para os vãos envidraçados de uma casa fixa e para vãos envidraçados de uma casa rotativa. Uma casa rotativa é uma casa que roda sobre si mesma, de modo que, na estação de arrefecimento se minimizem os ganhos solares e na estação de aquecimento se aproveite ao máximo a energia do sol.

Para ser possível efetuar o estudo dos ganhos solares foi necessário obter dados horários da radiação solar global que chega a cada orientação durante o ano e das respetivas temperaturas. As temperaturas foram imprescindíveis para ser possível definir os meses pertencentes à estação de arrefecimento e de aquecimento. Os dados relativos à radiação solar e à temperatura foram obtidos a partir do *SolTerm* [29]. O *SolTerm* é um programa que permite analisar o desempenho de sistemas solares térmicos e fotovoltaicos, tendo por base um armazenamento de dados relativos às condições climáticas e técnicas verificadas em Portugal. Os dados utilizados são médias mensais de longo prazo, relativos ao período de 1961 a 1990, para uma longitude 8.42° W, latitude 40.20° N e uma altitude de 100m. É também apresentada a metodologia para o balanço energético global do edifício. Para se determinar o balanço energético global do edifício é necessário determinar as necessidades nominais específicas de energia primária. As necessidades nominais globais de energia primária é o parâmetro que exprime a quantidade de energia primária correspondente à soma ponderada das necessidades nominais de aquecimento (N_{ic}), de arrefecimento (N_{vc}) e

de preparação de águas quentes sanitárias (N_{ac}), tendo em consideração os sistemas adotados ou, na ausência da sua definição, sistemas convencionais de referência, e os padrões correntes de utilização desses sistemas. [30]

Por último, é apresentada a metodologia para a classificação energética dos edifícios, que depende das necessidades anuais globais de energia primária para climatização e águas quentes (N_{tc}) e do valor máximo admissível das necessidades anuais nominais de energia primária (N_t).

3.1 Metodologia de determinação dos ganhos solares

3.1.1. Ganhos solares brutos através dos vãos envidraçados na estação de arrefecimento

3.1.1.1. Regime horário

Os ganhos solares em regime horário (Hor) na estação de arrefecimento (índice v), Q_{sol,v_i}^{Hor} , resultantes da radiação solar incidente nos vãos envidraçados podem estimar-se de acordo com a seguinte equação:

$$Q_{sol,v_i}^{Hor} = \sum_{ji} \left[I_{sol,ji}^{Hor} \sum_n F_{s,v_{nj}} A_{s,v_{nj}} \right] \quad [\text{kW}] \quad (3.1)$$

Em que:

$I_{sol,ji}^{Hor}$ - Intensidade de radiação global vertical (radiação direta e difusa) incidente na orientação j , durante a hora i na estação de arrefecimento [kWh/m^2];

$A_{s,v_{nj}}$ - Área efetiva coletora de radiação solar da superfície do elemento n com a orientação j , [m^2];

j - índice correspondente a cada uma das orientações dos vãos envidraçados por octante;

n - índice correspondente a cada um dos elementos;

$F_{s,v_{nj}}$ - Fator de obstrução da superfície do elemento n , com a orientação j , calculado conforme definido no Despacho RCCTE.02 [31].

A área efetiva coletora de radiação solar de cada vão envidraçado n com orientação j , deve ser calculada através da seguinte expressão, aplicável a espaços (não) úteis:

$$A_{s,v_{nj}} = A_w \cdot F_g \cdot g_v \quad (3.2)$$

Em que:

A_w - Área total do vão envidraçado, incluindo o vidro e o caixilho, [m^2];

F_g - Fração envidraçada do vão envidraçado, conforme Despacho RCCTE.02 [31];

g_v - Fator solar do vão envidraçado, conforme o Despacho RCCTE.02 [31].

3.1.1.2. Regime sazonal

Os ganhos solares na estação de arrefecimento (Arrefecim.) resultantes da radiação solar incidente nos vãos envidraçados calculam-se de acordo com a seguinte equação:

$$Q_{sol,v}^{Arrefecim.} = \sum_j \left[I_{sol,j}^{Arrefecim.} \sum_n F_{s,v_{nj}} A_{s,v_{nj}} \right] \quad [\text{kW}] \quad (3.3)$$

Em que:

$I_{sol,j}^{Arrefecim.}$ - Intensidade de radiação global vertical (radiação direta e difusa) incidente na orientação j durante toda a estação de arrefecimento [kWh/m^2]. Os restantes parâmetros foram mencionados anteriormente.

3.1.2. Ganhos solares brutos através dos vãos envidraçados na estação de aquecimento

3.1.2.1. Regime horário

O cálculo dos ganhos solares brutos através dos vãos envidraçados, Q_{sol,i_i}^{Hor} , em regime horário (Hor) na estação de aquecimento (índice i) foi efetuado de acordo com a

metodologia abaixo indicada e na qual os ganhos solares são calculados de acordo com a seguinte equação:

$$Q_{sol,i}^{Hor} = \sum_{ji} \left[I_{sol\ ji}^{Hor} \sum_n F_{s,i_{nj}} A_{s,i_{nj}} \right] \quad [kW] \quad (3.4)$$

Em que:

$I_{sol\ ji}^{Hor}$ - Intensidade de radiação global vertical (radiação direta e difusa) incidente na orientação j durante a hora i na estação de aquecimento [kWh/m^2];

$A_{s,i_{nj}}$ - Área efetiva coletora de radiação solar da superfície do elemento n com a orientação j, [m^2];

j- índice correspondente a cada uma das orientações dos vãos envidraçados por octante;

n- índice correspondente a cada um dos elementos;

$F_{s,i_{nj}}$ - Fator de obstrução da superfície do elemento n, com a orientação j, calculado conforme definido no Despacho RCCTE.02 [31].

A área efetiva coletora de radiação solar de cada vão envidraçado n com orientação j, aplicável a espaços (não) úteis pode ser determinada através da equação 3.2.

3.1.2.2. Regime sazonal

Os ganhos solares na estação de aquecimento (Aquecim.) resultantes da radiação solar incidente nos vãos envidraçados calculam-se de acordo com a seguinte equação:

$$Q_{sol,i}^{Aquecim.} = \sum_j \left[I_{sol\ j}^{Aquecim.} \sum_n F_{s,i_{nj}} A_{s,i_{nj}} \right] \quad [kW] \quad (3.5)$$

Em que:

$I_{sol\ j}^{Aquecim.}$ - Intensidade de radiação global vertical (radiação direta e difusa) incidente na orientação j durante a estação de aquecimento [kWh/m^2]. Os restantes parâmetros foram mencionados anteriormente.

3.2 Fator solar de vãos envidraçados

De acordo com o RCCTE [30], o fator solar de um vão envidraçado é o quociente entre a energia solar transmitida para o interior do edifício através de um vão envidraçado com o respetivo dispositivo de proteção e a energia da radiação solar que nele incide. Os fatores solares para os vidros variam entre 0,10 (vidro duplo de cor azul de controlo solar) e 0,90 para vidro simples incolor. Em termos de regulamentação portuguesa existem valores tabelados para o fator solar do vidro para uma incidência solar normal ao vão e valores correntes do fator solar de vãos envidraçados com vidro corrente e dispositivos de proteção solar.

De acordo com o RCCTE [30], o fator solar global, g_T , de um vão envidraçado com as proteções solares totalmente ativadas, calcula-se através da seguinte formulação geral:

Para vidro simples:

$$g_T = g_{\perp,vi} \prod_i \frac{g_{Tvc}}{0.85} \quad (3.6)$$

Para vidro duplo:

$$g_T = g_{\perp,vi} \prod_i \frac{g_{Tvc}}{0.75} \quad (3.7)$$

$g_{\perp,vi}$ – Fator solar do vidro para uma incidência solar normal à superfície do vidro, conforme informação do fabricante;

g_{Tvc} – Fator solar do vão envidraçado com vidro corrente e um dispositivo de proteção solar, permanente, ou móvel totalmente ativado, para uma incidência solar normal à superfície do vidro conforme Despacho RCCTE.02 [31].

3.3 Metodologia de determinação dos ganhos solares para as janelas rotativas

Durante a estação de aquecimento a temperatura exterior é baixa, havendo perdas térmicas do interior para o exterior do edifício. Para que os ganhos energéticos sejam maximizados,

se a casa acompanhar o movimento do sol ao longo do dia, pode-se tirar o máximo proveito desta fonte de energia e contribuir assim para o aumento da temperatura interior minimizando ou evitando os sistemas ativos de climatização (com consequente consumo de energia, aumento da fatura energética e aumento das emissões de gases de efeito de estufa). Na estação de arrefecimento é necessário minimizar os ganhos solares para minimizar o aumento da temperatura no interior do edifício. Para isso a orientação da casa também é um fator determinante, sendo importante recorrer à ventilação natural e ao controle da radiação solar direta das superfícies envidraçadas de modo a fazer o arrefecimento no edifício.

Existem outros aspetos que irão influenciar o arrefecimento natural da habitação, como por exemplo, o tipo de vidro existente, o desempenho energético dos caixilhos, o tipo e utilização de proteção dos vãos envidraçados, a existência de vegetação e a utilização de cores claras nas superfícies uma vez que estas absorvem menos radiação.

Para determinar os ganhos solares das janelas rotativas considerou-se que a rotação das janelas é feita para o conjunto das diferentes orientações. Para se definir as orientações das janelas rotativas considerou-se que as janelas rodam sempre para os pontos cardeais seguintes com maior ou menor radiação, em função do efeito desejado. Por exemplo, supondo que se tem apenas uma janela rotativa, a sua posição é Norte, depois Noroeste, seguindo-se Oeste e assim sucessivamente.

No caso de se ter um conjunto de janelas, por exemplo, admitindo que se têm 3 janelas orientadas em octantes contíguos, então a rotação deste conjunto é feita de forma idêntica. Deste modo, caso se possua uma janela orientada a Norte, outra a Noroeste e uma terceira a Oeste, quando ocorrer rotação teríamos janelas a Noroeste, a Oeste e a Sudoeste, quando a rotação é anti-horária. Na rotação do edifício assumiu-se que esta não deveria ocorrer de modo a saltar octantes, ou seja, a rotação é gradual e sempre de modo a que cada janela mude um único octante de cada vez. Depois de definir o conjunto de orientações para os vãos envidraçados, o objetivo é ver qual é o conjunto que tem ganhos solares mínimos na estação de arrefecimento e ganhos solares máximos na estação de aquecimento, o mesmo acontece para o regime horário.

3.4 Metodologia para determinação das necessidades energéticas de edifícios

Segundo o Despacho RCCTE 01 [32], as necessidades nominais de energia primária de um edifício de habitação resultam da soma das necessidades nominais específicas de energia primária relacionadas com a eficiência dos sistemas usados na habitação: aquecimento (N_{ic}), arrefecimento (N_{vc}), produção de AQS (Q_a/A_p) e ventilação mecânica (W_{vm}/A_p), deduzidas de eventuais contribuições de fontes de energia renovável ($E_{ren,p}/A_p$) e de acordo com a seguinte expressão:

$$\begin{aligned} N_{tc} = & \sum_j \left(\sum_k \frac{f_{i,k} \cdot N_{ic}}{\eta_k} \right) \cdot F_{pu,j} \\ & + \sum_j \left(\sum_k \frac{f_{v,k} \cdot \delta \cdot N_{vc}}{\eta_k} \right) \cdot F_{pu,j} + \sum_j \left(\sum_k \frac{f_{a,k} \cdot Q_a/A_p}{\eta_k} \right) \cdot F_{pu,j} \\ & + \sum_j \frac{W_{vm,j}}{A_p} \cdot F_{pu,j} - \sum_p \frac{E_{ren,p}}{A_p} \cdot F_{pu,p} \quad \left[\frac{kWh_{Ep}}{m^2} \cdot ano \right] \end{aligned} \quad (3.8)$$

Em que:

N_{ic} - Necessidades de energia útil para aquecimento, supridas pelo sistema k [kWh/(m².ano)];

$f_{i,k}$ - Fração das necessidades de energia útil para aquecimento supridas pelo sistema k ;

N_{vc} - Necessidades de energia útil para arrefecimento, supridas pelo sistema k [kWh/(m².ano)];

$f_{v,k}$ - Fração das necessidades de energia útil para arrefecimento supridas pelo sistema k ;

Q_a - Necessidades de energia útil para produção de AQS supridas pelo sistema k [kWh/(m².ano)];

$f_{a,k}$ - Fração das necessidades de energia útil para produção de AQS supridas pelo sistema k ;

η_k – Eficiência do sistema k . Toma o valor 1 no caso de sistemas para aproveitamento de fontes de energia renovável, à exceção de sistemas de queima de biomassa sólida em que deve ser usada a eficiência do sistema de queima;

j - Todas as fontes de energia incluindo as de origem renovável;

p - Fontes de origem renovável;

$E_{ren,p}$ - Energia produzida a partir de fontes de origem renovável p , [kWh/ano], incluindo apenas energia consumida;

W_{vm} - Energia elétrica necessária ao funcionamento dos ventiladores, [kWh/ano];

A_p - Área útil de pavimento [m^2];

$F_{pu,j}$ e $F_{pu,p}$ - Fator de conversão de energia útil para energia primária, de acordo com Despacho GERAL.02 [33] [kWh_{EP}/kWh];

δ - Igual a 1, exceto para o uso de arrefecimento (N_{vc}) que pode tomar o valor 0 sempre que o fator de utilização de ganhos seja superior ao respetivo fator de referência, o que equivale às condições em que o risco de sobreaquecimento se encontra minimizado.

O valor das necessidades nominais anuais de energia para arrefecimento do edifício, N_{vc} , é calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$N_{vc} = (1 - \eta_v)Q_{g,v}/A_p \quad \left[\frac{kWh}{m^2} \cdot ano \right] \quad (3.9)$$

Em que:

η_v - Fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de arrefecimento conforme Despacho RCCTE.02 [31];

$Q_{g,v}$ - Ganhos térmicos brutos na estação de arrefecimento, [kWh];

A_p - Área útil de pavimento do edifício, medida pelo interior, [m^2].

Os ganhos térmicos brutos contemplam os ganhos térmicos associados a fontes internas de calor e os ganhos térmicos associados ao aproveitamento da radiação solar pelos vãos envidraçados.

O valor das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento do edifício, N_{ic} , é calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$N_{ic} = (Q_{tr,i} + Q_{ve,i} - Q_{gu,i})/A_p \quad \left[\frac{kWh}{m^2} \cdot ano \right] \quad (3.10)$$

Em que:

$Q_{tr,i}$ - Transferência de calor por transmissão na estação de aquecimento através da envolvente dos edifícios, [kWh];

$Q_{ve,i}$ - Transferência de calor por ventilação na estação de aquecimento, [kWh];

$Q_{gu,i}$ - Ganhos de calor úteis na estação de aquecimento resultantes dos ganhos solares através dos envidraçados, da iluminação, dos equipamentos e dos ocupantes, [kWh];

A_p - Área útil de pavimento do edifício medida pelo interior [m²].

A expressão que permite a obtenção dos ganhos térmicos úteis na estação de aquecimento é a seguinte:

$$Q_{gu,i} = \eta_i \cdot Q_{g,i} \quad [kWh] \quad (3.11)$$

Em que:

η_i - Fator de utilização dos ganhos térmicos na estação de aquecimento conforme Despacho RCCTE.02 [31];

$Q_{g,i}$ - Ganhos térmicos brutos na estação de aquecimento, [kWh].

3.5 Classificação energética de edifícios

O Certificado Energético e da Qualidade do Ar Interior, para cada edifício ou fração autónoma, é a face visível da aplicação do RCCTE e do RSECE. O Certificado Energético (CE) e da Qualidade do Ar Interior após Declaração de conformidade Regulamentar (DCR) inclui a classificação do imóvel em termos do seu desempenho energético, determinada com base em pressupostos nominais (condições típicas ou convencionadas de funcionamento). A classificação do edifício segue uma escala pré-definida de 9 classes (A+, A, B, B-, C, D, E, F e G), em que a classe A+ corresponde a um edifício com melhor desempenho energético e a classe G corresponde a um edifício de pior desempenho energético. Nos edifícios novos (com pedido de licença de construção após entrada em vigor do SCE), as classes energéticas variam apenas entre as classes A+ e B-. Os edifícios existentes podem ter qualquer classe. A classificação energética de edifícios de habitação (com e sem sistemas de climatização) é calculada a partir da equação 3.12, apresentando-se na tabela 3.1 a escala utilizada na classificação energética dos mesmos. [9]

$$R = \frac{N_{tc}}{N_t} \quad (3.12)$$

Em que:

R - Classe energética de edifícios de habitação e pequenos edifícios de serviços sem sistemas de climatização ou com sistemas de climatização inferior a 25 kW de potência instalada;

N_{tc} - Representa as necessidades anuais globais estimadas de energia primária para climatização e águas quentes $\left(\frac{kWh_{EP}}{m^2} \cdot \text{ano}\right)$;

N_t - Valor máximo admissível das necessidades globais anuais nominais de energia primária $\left(\frac{kWh_{EP}}{m^2} \cdot \text{ano}\right)$.

Tabela 3.1 Classes energéticas dos edifícios e valores limite das respetivas classes (Fonte: ADENE, 2010) [9]

		Classe energética	R
Edifícios existentes	Edifícios novos	A+	$R < 0,25$
		A	$0,25 \leq R < 0,50$
		B	$0,50 \leq R < 0,75$
		B-	$0,75 \leq R < 1,00$
		C	$1,00 \leq R < 1,50$
		D	$1,50 \leq R < 2,00$
		E	$2,00 \leq R < 2,50$
		F	$2,50 \leq R < 3,00$
		G	$R \geq 3,00$

4. GANHOS SOLARES DE VÃOS ENVIDRAÇADOS FIXOS E ROTATIVOS

Para ser possível verificar se uma casa rotativa é mais eficiente, é necessário compará-la com uma casa fixa, que tenha as mesmas características da casa rotativa em estudo mas que esteja fixa. Neste capítulo começa-se por apresentar os ganhos solares de um vão envidraçado fixo e rotativo de área unitária, em regime sazonal e horário com consequente comparação. De seguida, é efetuada uma análise sobre os ganhos solares de uma casa fixa com três janelas dispostas em octantes contíguos, também de área unitária, com consequente comparação destes com os ganhos solares de uma casa rotativa com as mesmas características.

4.1 Determinação dos ganhos solares de um vão envidraçado fixo e rotativo de área unitária

Para se determinarem os ganhos solares, considerou-se um vão envidraçado com as características definidas na tabela 4.1. Para o estudo foi necessário definir os meses do ano correspondentes à estação de aquecimento e à estação de arrefecimento.

Tabela 4.1 Características do vão envidraçado utilizado no estudo dos ganhos solares

Fator solar do vidro ($g_{\perp,vi}$)	0,7
Área (m ²)	1
Fator de obstrução (Fs)	1
Fração envidraçada (Fg)	0,7

O gráfico 4.1 e o gráfico 4.2 mostram os ganhos solares mensais de um vão envidraçado fixo com área unitária nas diferentes orientações, na estação de arrefecimento e de aquecimento, respetivamente. Através da análise dos gráficos 4.1 e 4.2 é possível verificar que os ganhos solares têm tendências diferentes ao longo do ano e variam para as

diferentes orientações das janelas. Esta tendência é provocada pela variação da posição do sol durante o dia e por alturas diferentes ao longo do ano, estando mais alto no Verão e mais baixo no Inverno. Para definir os meses da estação de arrefecimento e de aquecimento, os meses de Abril, Maio e Outubro eram problemáticos devido às temperaturas verificadas durante estes meses. Considerou-se que para temperaturas médias exteriores inferiores a 18° C é necessário maximizar os ganhos solares, o que é verificado na estação de aquecimento, e para temperaturas exteriores superiores a 18°C é necessário minimizar os ganhos solares, sendo esta situação importante para a estação de arrefecimento. Deste modo definiu-se que os meses da estação de arrefecimento são Junho, Julho, Agosto e Setembro e que os meses da estação de aquecimento são os restantes.

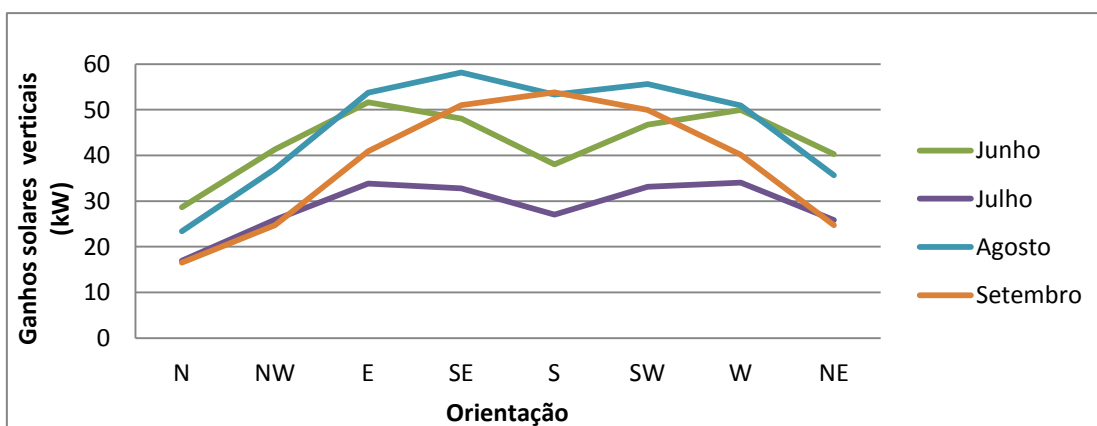


Gráfico 4.1 Ganhos solares mensais em kW de um vão envidraçado fixo com área unitária nas diferentes orientações na estação de arrefecimento

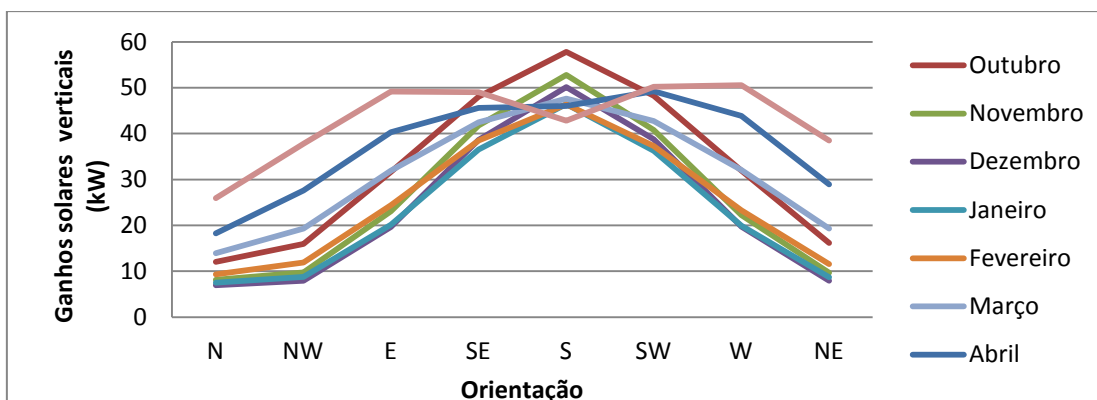


Gráfico 4.2 Ganhos solares mensais em kW de um vão envidraçado fixo com área unitária nas diferentes orientações na estação de aquecimento

4.1.1. Ganhos solares na estação de arrefecimento

Na estação de arrefecimento, o sol encontra-se mais alto e a radiação solar incide nas janelas com um ângulo diferente da estação de aquecimento. Por outro lado, nesta estação o sol nasce mais cedo e põe-se mais tarde. Na tabela 4.2 são apresentados os ganhos solares totais da janela fixa na estação de arrefecimento nas diferentes orientações. Através da análise dos resultados obtidos é possível verificar que a orientação que tem mais ganhos solares é a Sudeste e a que tem menos ganhos é a Norte, desse modo, nesta estação e com estas condições o ideal seria ter uma janela orientada a Norte, uma vez que é a orientação que tem menores ganhos solares, sendo estes de 97,76 kW.

Tabela 4.2 Ganhos solares acumulados em todas as orientações na estação de arrefecimento de uma janela fixa de área unitária (kW)

Orientação							
N	NW	E	SE	S	SW	W	NE
97,76	146,88	202,67	211,16	189,12	206,69	197,76	144,39

Os ganhos solares calculados são ganhos totais em cada uma das orientações, ou seja, foram determinados para um regime sazonal. O gráfico 4.3 apresenta a variação dos ganhos solares na estação de arrefecimento em regime horário. Através da análise do gráfico 4.3 é perceptível que entre as 5 h e as 10 h os ganhos solares são máximos a Este. Até às 12h a orientação que tem mais ganhos é a Sudeste, sendo Sul a orientação com mais ganhos entre as 12 h e as 13h; das 13 h até às 15h é a Sudoeste e depois das 15 h é a Oeste. Deste modo estas orientações devem ser evitadas nas horas referidas e isso só é possível através de uma janela fixa orientada a Norte, a Nordeste ou Noroeste.

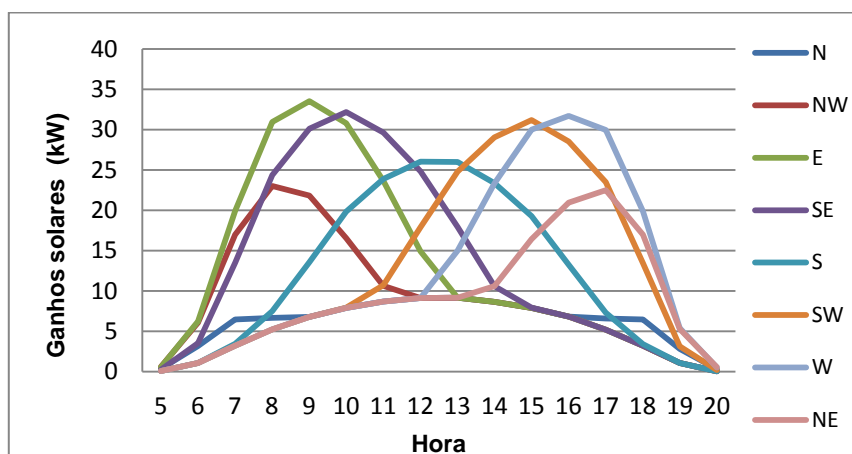


Gráfico 4.3 Ganhos solares acumulados de um vão envidraçado de área unitária nas diferentes orientações na estação de arrefecimento (kW)

Para uma janela fixa, os ganhos solares são mínimos a Norte, no entanto, em regime horário esta situação não se verifica em todas as horas em que há radiação solar. Por exemplo, através da análise da tabela 4.3 é possível verificar que até às 9h o acumulado de ganhos a Norte é superior ao acumulado dos ganhos a Sudoeste, Oeste ou Nordeste.

Tabela 4.3 Ganhos solares acumulados da janela de área unitária na estação de arrefecimento em regime horário (kW)

Hora	Orientação							
	N	NW	E	SE	S	SW	W	NE
5	0,33	0,60	0,56	0,23	0,05	0,05	0,05	0,05
6	3,16	6,08	6,23	3,51	1,07	1,07	1,07	1,07
7	6,46	17,00	19,94	13,51	3,43	3,21	3,21	3,21
8	6,64	23,03	30,95	24,35	7,49	5,24	5,24	5,24
9	6,76	21,82	33,54	30,11	13,56	6,76	6,76	6,76
10	7,90	16,56	30,81	32,17	19,83	7,94	7,90	7,90
11	8,67	10,62	23,67	29,66	23,90	10,70	8,67	8,67
12	9,10	9,10	14,93	24,83	26,05	17,90	9,10	9,10
13	9,16	9,16	9,16	17,92	26,01	24,79	14,98	9,16
14	8,64	8,64	8,64	10,59	23,39	29,07	23,34	10,58
15	7,91	7,91	7,91	7,95	19,28	31,18	30,01	16,44
16	6,84	6,84	6,84	6,84	13,25	28,52	31,71	20,95
17	6,59	5,20	5,20	5,20	7,29	23,48	29,95	22,48
18	6,47	3,20	3,20	3,20	3,42	13,43	19,87	16,97
19	2,82	1,05	1,05	1,05	1,05	3,14	5,39	5,26
20	0,30	0,05	0,05	0,05	0,05	0,20	0,50	0,54
Total	97,76	146,88	202,67	211,16	189,12	206,69	197,76	144,39

Quando a janela está fixa a melhor orientação é a Norte. Quando a janela está móvel é possível obter valores mais baixos nos ganhos solares do que a Norte. Assim, os ganhos solares com a janela rotativa passam a ser de 84,1 kW tal como mostra a tabela 4.4. Este valor foi obtido tendo em conta que a janela rotativa está orientada de modo a obter ganhos solares mínimos em cada hora do dia (valores da tabela 4.3 a negrito).

Tabela 4.4 Ganhos solares mínimos acumulados da janela rotativa de área unitária na estação de arrefecimento (kW)

Ganhos solares mínimos com a janela rotativa (kW)	84,1
---	------

Para uma janela fixa, a orientação Norte é mais favorável, no entanto, esta capta mais 16,28 % de ganhos solares quando comparada com a janela rotativa. A orientação da janela fixa que tem mais ganhos solares nesta estação é a Sudeste, captando mais 151 % do que a janela rotativa, como mostra a tabela 4.5.

Tabela 4.5 Acréscimo dos ganhos solares da janela fixa relativamente à janela rotativa nas diferentes orientações (%) na estação de arrefecimento

Orientação							
N	NW	E	SE	S	SW	W	NE
16,28	74,70	141,07	151,17	124,95	145,86	135,24	71,74

4.1.2. Ganhos solares na estação de aquecimento

Na tabela 4.6 são apresentados os ganhos solares na estação de aquecimento para uma janela fixa em cada orientação e no gráfico 4.4 é possível ver os ganhos solares nas diferentes orientações ao longo do dia. Na estação de aquecimento quando se tem uma janela de 1m² os ganhos solares são máximos para Sul e mínimos para Norte. Os ganhos solares atingem um valor máximo a Sul entre as 12 e as 13h, tal como é possível verificar

através do gráfico 4.4. Para uma janela fixa, nesta estação a melhor orientação é aquela que tem mais ganhos solares ao longo do dia, ou seja, a Sul e a pior orientação é a Norte.

Tabela 4.6 Ganhos solares acumulados em todas as orientações na estação de aquecimento de uma janela fixa de área unitária (kW)

Orientação							
N	NW	E	SE	S	SW	W	NE
102,16	139,19	240,43	340,91	390,41	343,98	243,86	140,85

Os ganhos solares são máximos a Sul para uma janela fixa, no entanto, em regime horário esta situação não se verifica em todas as horas em que há radiação solar. Por exemplo, até às 9h o acumulado de ganhos a Sul é inferior ao acumulado dos ganhos a Noroeste, a Este, ou a Sudeste, como é possível observar através da tabela 4.7. Através da análise do gráfico 4.4 e da tabela 4.7 (valores a negrito), é perceptível que para obter ganhos solares máximos em todas as horas ao longo do dia, as melhores orientações são Noroeste até às 6h, a Este até às 8 h, a Sudeste até às 11h, a Sul até às 14 h, a Sudoeste até às 17 h e depois a Oeste.

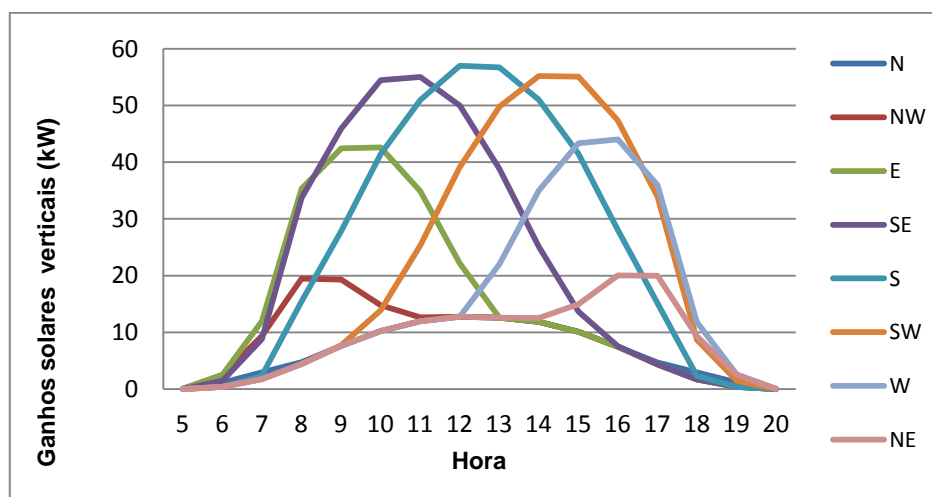


Gráfico 4.4 Ganhos solares acumulados de um vão envidraçado de área unitária nas diferentes orientações na estação de aquecimento (kW)

Tabela 4.7 Ganhos solares acumulados da janela de área unitária na estação de aquecimento em regime horário (kW)

Hora	Orientação							
	N	NW	E	SE	S	SW	W	NE
5	0,04	0,08	0,07	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
6	1,13	2,42	2,57	1,48	0,37	0,37	0,37	0,37
7	2,94	9,39	11,99	8,81	2,35	1,74	1,73	1,73
8	4,75	19,44	35,34	33,67	15,45	4,43	4,41	4,41
9	7,62	19,31	42,42	45,94	27,85	7,71	7,62	7,62
10	10,23	14,76	42,60	54,46	41,41	13,86	10,25	10,23
11	11,95	12,65	34,85	54,98	50,97	25,31	11,98	11,95
12	12,73	12,73	22,19	49,97	56,96	39,08	12,75	12,73
13	12,56	12,56	12,56	38,79	56,73	49,78	22,02	12,57
14	11,82	11,82	11,82	25,13	50,99	55,16	34,96	12,50
15	10,11	10,11	10,11	13,66	41,45	55,09	43,32	14,94
16	7,47	7,47	7,47	7,55	28,07	47,36	44,03	20,01
17	4,67	4,34	4,34	4,34	15,13	33,92	35,96	19,98
18	2,94	1,71	1,71	1,71	2,31	8,67	11,82	9,28
19	1,17	0,38	0,38	0,38	0,38	1,47	2,58	2,46
20	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,06	0,06
Total	102,16	139,19	240,43	340,91	390,41	343,98	243,86	140,85

Quando se substitui uma janela fixa orientada a Sul por uma janela rotativa, nesta situação os ganhos solares passam a ter um total de 527,1 kW (valores da tabela 4.7 a negrito), tal como é apresentado na tabela 4.8, ou seja, devido à janela rotativa há um aumento de 136,7 kW nos ganhos solares.

Tabela 4.8 Ganhos solares máximos acumulados da janela rotativa de área unitária na estação de aquecimento em regime horário (kW)

Ganhos solares máximos com a janela rotativa (kW)	527,1
---	-------

Na tabela 4.9 é possível ver a comparação entre os ganhos solares de uma janela fixa nas diferentes orientações, com uma janela rotativa que acompanha o movimento do sol de modo a obter o máximo dos ganhos solares. Tal como já tinha sido referido, para uma janela fixa, a orientação Sul é aquela que tem mais ganhos solares na estação de aquecimento. No entanto, a janela fixa orientada a Sul só capta 74,1% dos ganhos solares

comparativamente a uma janela rotativa, ou seja, capta menos 25,93%. A orientação Norte é a mais desfavorável, captando apenas 19,4% dos ganhos solares obtidos pela janela rotativa, ou seja, capta menos 80,62% dos ganhos solares quando comparada com a janela rotativa.

Tabela 4.9 Défice dos ganhos solares acumulados da janela fixa relativamente à janela rotativa de área unitária nas diferentes orientações (%) na estação de aquecimento

Orientação							
N	NW	E	SE	S	SW	W	NE
-80,62	-73,59	-54,39	-35,32	-25,93	-34,74	-53,73	-73,28

4.2 Determinação dos ganhos solares para um conjunto de três janelas com diferentes orientações e área unitária

De seguida estudam-se os ganhos solares tendo em conta três janelas com as mesmas características da janela referida no subcapítulo anterior. As janelas são todas iguais e estão dispostas em octantes contíguos.

4.2.1 Ganhos solares na estação de arrefecimento

Considerando três janelas com área unitária, posicionadas entre si em octantes contíguos, os ganhos solares das três janelas são apresentados na tabela 4.10, onde é possível verificar que a orientação das janelas fixas com mais ganhos são a Oeste, Sudoeste e a Sul, com 611,2 kW e as orientações com menos ganhos são a Nordeste, Norte e Noroeste, com 389 kW. Assim, as orientações mais vantajosas para uma casa fixa com três janelas com estas características são a Nordeste, Norte e Noroeste.

Tabela 4.10 Ganhos solares acumulados para um conjunto de três janelas fixas de área unitária, dispostas em octantes contíguos na estação de arrefecimento (kW)

Orientação							
N, NW, W	NW, W, SW	W, SW, S	SW, S, SE	S, SE, E	SE, E, NE	E, NE, N	NE, N, NW
442,4	551,3	611,2	607,0	602,9	558,2	444,8	389,0

Na estação de arrefecimento, o objetivo é minimizar os ganhos solares. No entanto, para as janelas rotativas foram consideradas duas situações. Na situação 1 foi considerado que até às 10h a casa vai rodar de modo a obter ganhos solares máximos, dado que até esta hora pode haver dias em que as temperaturas no exterior podem ser relativamente baixas. Ainda

para a situação 1 foi considerado que depois das 10 h o objetivo é de minimizar os ganhos solares, uma vez que há temperaturas médias mais elevadas nestas horas. Esta situação pode-se aplicar à casa nos dias em que as temperaturas exteriores são mais baixas. A outra situação foi considerar que a casa vai rodar de modo a minimizar os ganhos solares ao longo do dia, ou seja, desde o nascer ao pôr-do-sol (situação 2). Na tabela 4.11 são apresentados os ganhos solares acumulados para as três janelas nas diferentes orientações, em regime horário. Para a situação 1, em que são considerados ganhos máximos até às 10h, os valores dos ganhos solares horários estão apresentados na tabela 4.11 a negrito e sublinhado. Os valores dos ganhos solares até às 10h para a situação 2 encontram-se a negrito na tabela 4.11. Depois das 10h, são consideradas as mesmas orientações para a situação 1 e para a situação 2 (valores a negrito). Através da análise da tabela é possível verificar que na situação 1 das 5 h para as 6h e das 9h para as 10 h a rotação da casa é feita de modo a saltar mais do que um octante. O mesmo acontece na situação 1 e 2 das 10h para as 11h e das 15h para as 16h.

Tabela 4.11 Ganhos solares acumulados para um conjunto de três janelas de área unitária, dispostas em octantes contíguos na estação de arrefecimento, em regime horário (kW)

Hora	N, NW, W	NW, W, SW	W, SW, S	SW, S, SE	S, SE, E	SE, E, NE	E, NE, N	NE, N, NW
5	<u>0,98</u>	0,71	0,16	0,33	0,84	0,84	0,94	0,98
6	10,31	8,23	3,21	5,65	<u>10,81</u>	10,81	10,46	10,31
7	26,67	23,42	9,64	20,15	<u>36,87</u>	36,66	29,61	26,67
8	34,92	33,52	15,73	37,08	<u>62,79</u>	60,54	42,83	34,92
9	35,35	35,35	20,29	50,43	<u>77,21</u>	70,41	47,06	35,35
10	32,37	32,40	23,78	59,93	82,81	70,89	46,62	32,37
11	27,95	29,99	30,07	64,27	77,23	62,00	41,00	27,95
12	27,31	36,11	44,91	68,79	65,81	48,86	33,14	27,31
13	33,31	48,93	64,56	68,72	53,09	36,24	27,49	27,49
14	40,63	61,05	81,48	63,04	42,62	29,81	27,86	27,86
15	45,83	69,09	92,36	58,41	35,14	32,30	32,25	32,25
16	45,39	67,07	88,75	48,61	26,93	34,63	34,63	34,63
17	41,75	58,64	76,91	35,97	17,70	32,89	34,28	34,28
18	29,53	36,50	46,73	20,05	9,82	23,36	26,63	26,63
19	9,26	9,58	11,67	5,24	3,15	7,36	9,13	9,13
20	0,84	0,75	0,90	0,30	0,15	0,64	0,88	0,88
Total	442,40	551,33	611,15	606,97	602,95	558,22	444,82	389,02

Na tabela 4.12 são apresentados os ganhos solares nas duas situações, para as janelas rotativas. Na situação 1, os ganhos são de 413,1 kW, mais 139,6 kW do que na situação 2 que tem ganhos de 273,4 kW.

Tabela 4.12 Ganhos solares máximos até às 10h e depois mínimos (situação 1) e ganhos solares mínimos acumulados (situação 2) das janelas rotativas de área unitária, dispostas em octantes contíguos na estação de arrefecimento (kW)

Ganhos solares das janelas rotativas (kW)	
Ganhos solares máximos até às 10h e depois ganhos mínimos (situação 1)	413,1
Ganhos solares mínimos (situação 2)	273,4

Na tabela 4.13 e na tabela 4.14 é apresentada a comparação dos ganhos solares para as janelas fixas e para as janelas rotativas na situação 1 e na situação 2, respetivamente. As janelas que têm menores ganhos solares na situação 1 é com as orientações a NE, N, WW, tendo menos 5,82% dos ganhos solares em relação aos ganhos solares das janelas rotativas, assim, nesta situação a rotação da casa é desfavorável para a estação de arrefecimento.

Tabela 4.13 Comparação dos ganhos solares acumulados entre as três janelas rotativas e as três janelas fixas de área unitária, dispostas em octantes contíguos nos diferentes conjuntos de orientações, na estação de arrefecimento, na situação 1 (%)

Acréscimo ou redução de ganhos solares							
N, NW, W	NW, W, SW	W, SW, S	SW, S, SE	S, SE, E	SE, E, NE	E, NE, N	NE, N, NW
7,11	33,48	47,96	46,95	45,97	35,15	7,69	-5,82

Na situação 2, na qual se pretende minimizar os ganhos solares desde o nascer do sol até ao pôr-do-sol, a orientação melhor das janelas também é a NE, N e NW, no entanto, neste caso as janelas com estas orientações ganham mais 42,28% do que as janelas da casa rotativa, tal como se pode verificar através da tabela 4.14.

Tabela 4.14 Comparação dos ganhos solares acumulados entre três janelas rotativas e as três janelas fixas de área unitária, dispostas em octantes contíguos nos diferentes conjuntos de orientações na estação de arrefecimento, na situação 2 (%)

Redução de ganhos solares							
N, NW, W	NW, W, SW	W, SW, S	SW, S, SE	S, SE, E	SE, E, NE	E, NE, N	NE, N, NW
61,80	101,65	123,53	122,00	120,52	104,17	62,69	42,28

4.2.2 Ganhos solares na estação de aquecimento

Na tabela 4.15 são apresentados os ganhos solares das três janelas fixas na estação de aquecimento nas diferentes orientações. As orientações das janelas com mais ganhos solares são Sudoeste, Sul e Sudeste com ganhos solares de 1074,2 kW. A orientação mais desfavorável é a orientação que era melhor na estação de arrefecimento, ou seja, a Nordeste, Norte e Noroeste.

Tabela 4.15 Ganhos solares acumulados para um conjunto de três janelas fixas de área unitária, dispostas em octantes contíguos na estação de aquecimento (kW)

Orientação							
N, NW, W	NW, W, SW	W, SW, S	SW, S, SE	S, SE, E	SE, E, NE	E, NE, N	NE, N, NW
484,6	726,2	930,8	1074,2	970,8	721,4	482,8	381,6

A tabela 4.16 mostra os ganhos solares acumulados para as três janelas de área unitária, dispostas em octantes contíguos, em regime horário na estação de aquecimento. Para obter ganhos solares máximos em todas as horas ao longo do dia, o melhor conjunto de orientações é E, NE, N até às 6h, SE, E, NE até às 7h, S, SE, E das 7h até às 12h, SW, S, SE das 12h até às 14h e W, SW, S das 14h até às 20h.

Tabela 4.16 Ganhos solares acumulados para um conjunto de três janelas de área unitária, dispostas em octantes contíguos na estação de aquecimento, em regime horário (kW)

Hora	N, NW, W	NW, W, SW	W, SW, S	SW, S, SE	S, SE, E	SE, E, NE	E, NE, N	NE, N, NW
5	0,12	0,09	0,01	0,04	0,11	0,11	0,12	0,12
6	3,93	3,17	1,11	2,22	4,42	4,42	4,07	3,93
7	14,00	12,79	5,12	12,77	23,01	22,41	16,57	14,00
8	28,50	28,17	13,14	53,36	84,27	73,27	44,38	28,50
9	34,49	34,57	22,96	81,39	116,10	95,89	57,59	34,49
10	35,08	38,66	37,71	109,45	138,24	107,12	62,92	35,08
11	36,44	49,75	62,36	131,02	140,61	101,64	58,64	36,44
12	38,14	64,45	90,77	145,89	129,03	84,83	47,60	38,14
13	47,12	84,32	121,52	145,26	108,06	63,90	37,67	37,67
14	58,60	101,93	145,26	131,26	87,94	49,45	36,14	36,14
15	63,55	108,53	153,51	110,20	65,22	38,72	35,17	35,17
16	58,96	98,85	138,74	82,98	43,09	35,03	34,95	34,95
17	44,96	74,22	103,80	53,38	23,80	28,65	28,98	28,98
18	16,47	22,20	29,16	12,69	5,72	12,70	13,93	13,93
19	4,13	4,44	5,53	2,23	1,14	3,22	4,00	4,00
20	0,09	0,08	0,10	0,03	0,01	0,07	0,09	0,09
Total	484,57	726,21	930,81	1074,17	970,75	721,42	482,83	381,64

A tabela 4.17 mostra os ganhos solares das janelas rotativas (valores a negrito da tabela 4.16), com as quais é possível ter ganhos solares de 1374 kW na estação de aquecimento, mais 299,8 kW do que com as janelas fixas na orientação mais favorável para esta estação.

Tabela 4.17 Ganhos solares máximos acumulados das três janelas rotativas de área unitária, dispostas em octantes contíguos na estação de aquecimento (kW)

Ganhos solares das janelas rotativas na estação de aquecimento (kW)	1374
---	------

A tabela 4.18 mostra os benefícios das janelas rotativas em relação às janelas fixas. A orientação que tem mais ganhos solares com as janelas fixas é com estas orientadas a SW, S, SE, no entanto, estas têm menos 21,82% de ganhos solares do que as janelas rotativas.

Tabela 4.18 Défice dos ganhos solares acumulados (%) para um conjunto de três janelas fixas relativamente às janelas rotativas, de área unitária, em octantes contíguos, na estação de aquecimento

Redução de ganhos solares							
N, NW, W	NW, W, SW	W, SW, S	SW, S, SE	S, SE, E	SE, E, NE	E, NE, N	NE, N, NW
-64,73	-47,14	-32,26	-21,82	-29,35	-47,50	-64,86	-72,22

5. CASO DE ESTUDO DE UMA MORADIA ROTATIVA

A Casa Rotativa de Coimbra é uma casa que foi projetada de modo a que as suas necessidades energéticas sejam reduzidas e que seja elevado o aproveitamento solar. A ideia desta casa rotativa venceu o concurso de inovação da SAMSUNG SIM 2011. O projeto é da autoria de Pedro Bandeira, responsável pela arquitetura e de Filipe Bandeira, responsável pela engenharia.

Neste capítulo faz-se uma análise dos ganhos solares para a casa rotativa prevista para Coimbra com conseqüente comparação dos ganhos solares de uma casa fixa com as mesmas características. Por conseguinte, é analisado o efeito do tipo de vidro e dos dispositivos de sombreamento nos ganhos solares da casa rotativa. Por último faz-se a avaliação do balanço energético da casa.

5.1 Descrição da casa rotativa prevista para Coimbra

O edifício em estudo é um edifício residencial, constituído por três pisos. A planta do edifício encontra-se representada na Figura 5.1 e os alçados na Figura 5.2. O edifício tem por base a forma hexagonal (rés-do-chão) e no piso 1 tem no centro a forma triangular e cada lado do triângulo tem anexado um trapézio. O piso 2 tem a forma de uma pirâmide triangular na parte central da casa. O rés-do-chão tem quatro divisões, o piso 1 tem cinco compartimentos e o piso 2 tem um. O rés-do-chão tem um quarto, uma casa de banho, um átrio de entrada e um ginásio. O piso 1 tem uma cozinha, um quarto, uma casa de banho, uma sala e um escritório. O piso 2 é um espaço de leitura ou de pintura. Os pisos estão todos ligados por escadas interiores. A construção da casa está prevista para Coimbra.

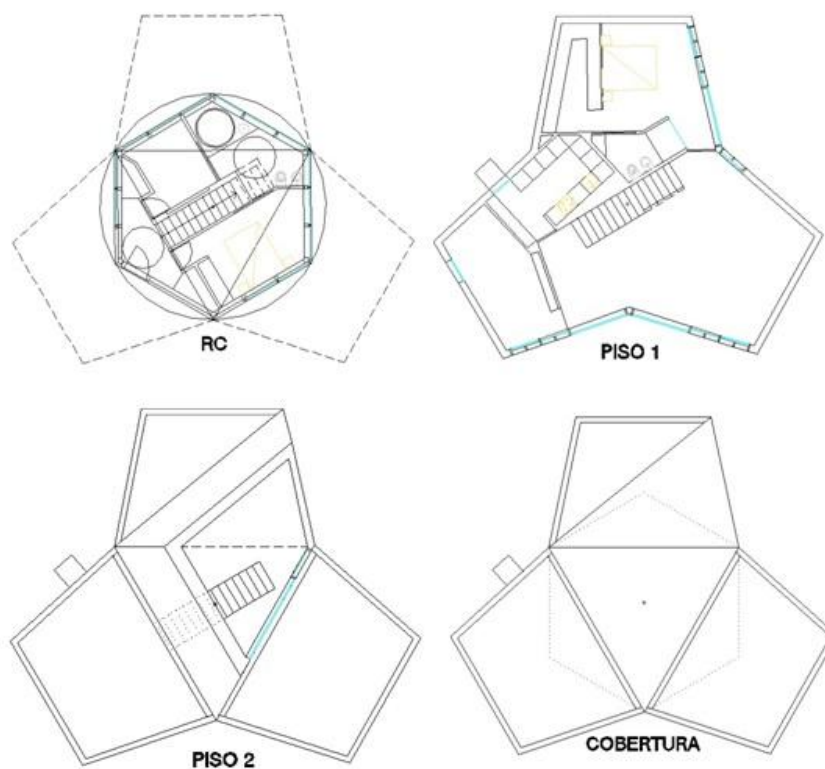


Figura 5.1 Planta do rés-do-chão, do piso 1, do piso 2 e da cobertura da casa prevista para Coimbra, na orientação fixa inicial

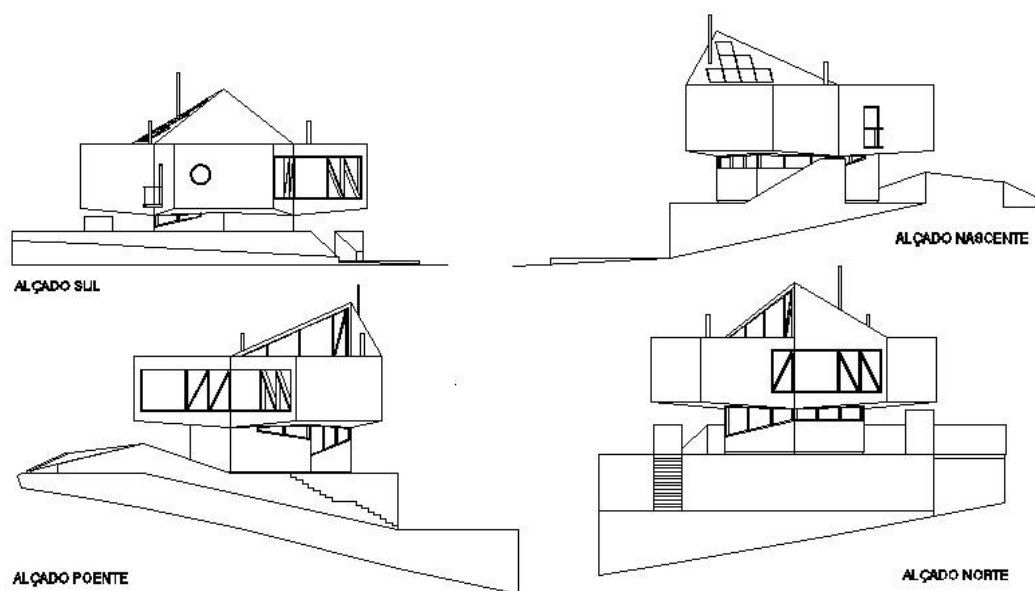


Figura 5.2. Alçados da casa rotativa prevista para Coimbra

Área dos vãos envidraçados exteriores

A tabela 5.1 mostra as áreas dos vãos envidraçados de cada piso da casa e para as respetivas orientações, considerando que a casa está fixa e orientada de acordo com a figura 5.1.

Tabela 5.1 Área dos vãos envidraçados de cada piso da casa prevista para Coimbra, nas diferentes orientações (m²)

Rés-do-chão			Piso 1			Piso 2
S	NE	W	S	SW	NE	SE
0,8	4,6	3,6	18,4	0,6	11,5	8,1

A tabela 5.2 mostra a área total dos vãos envidraçados da casa prevista para Coimbra nas respetivas orientações.

Tabela 5.2 Área total dos vãos envidraçados da casa prevista para Coimbra, nas diferentes orientações (m²)

Área total dos vãos envidraçados (m ²)				
S	SW	NE	SE	W
19,2	0,6	16,1	8,1	3,6

Área útil de pavimento

A tabela 5.3 mostra a área útil de pavimento da casa prevista para Coimbra.

Tabela 5.3 Área útil de pavimento da casa prevista para Coimbra (m²)

Rés-do-chão	Piso 1	Piso 2	Área total
36,1	96,5	18,7	151,3

Área das paredes exteriores

A tabela 5.4 mostra a área total das paredes exteriores da casa prevista para Coimbra, tendo em conta a orientação da figura 5.1. Para determinar a área das paredes exteriores, para efeitos de simplificação, considerou-se que para as paredes que têm janelas, a orientação destas é a mesma orientação que foi considerada para os vãos envidraçados.

Tabela 5.4 Área total das paredes exteriores da casa prevista para Coimbra (m²)

S	N	SE	SW	NE	NW	W	Área total
31,76	25,70	17,58	15,61	34,92	30,17	15,59	171,3

5.1.1 Identificação e caracterização das soluções construtivas

As paredes da envolvente exterior da casa são constituídas por:

- Painel de gesso cartonado com 13 mm de espessura;
- Caixa-de-ar com 80 mm;
- Painel de sanduíche constituído por duas chapas de aço de 0.6 mm, intercaladas com 80 mm de espuma de poliuretano na zona contínua mais 35 mm nas nervuras;
- Forra exterior, sobre as nervuras, com chapa de alumínio com 1 mm de espessura.

As paredes interiores são feitas com dois painéis de gesso cartonado com 13 mm, com uma caixa-de-ar de cerca de 70 mm de espessura.

As características dos elementos construtivos para a casa são apresentadas na tabela 5.5.

Tabela 5.5 Característica dos elementos construtivos da casa prevista para Coimbra

Material ou elemento	Coefficiente de condutividade térmica (W/m °C)	Espessura (mm)	Resistência térmica, (m ² °C/W)
Gesso cartonado	0,25	13	0,052
Aço	52	0,6	$1,15 \times 10^{-5}$
Espuma de poliuretano	0,020	80	4
Alumínio	230	1	$4,35 \times 10^{-6}$
Caixa-de-ar		70 / 80	0,18

As características das paredes exteriores estão na tabela 5.6. O cálculo foi efetuado com base na Norma ISO 6946 [34], adotando para resistências superficiais interiores e exteriores o valor de 0,13 e 0,04 m² °C/W, respetivamente.

Tabela 5.6 Característica das paredes exteriores da casa prevista para Coimbra

Parede exterior	
Resistência total	Coefficiente global de transferência de calor - U (W/m ² °C)
4,40	0,23

5.2 Ganhos solares da casa rotativa e o seu benefício relativamente a uma casa fixa com as mesmas características

Para determinar os ganhos solares da casa rotativa usou-se a metodologia do capítulo 3 que também foi aplicada no capítulo 4. As áreas das janelas definidas no projeto da casa rotativa encontram-se na tabela 5.2. O conjunto de orientações possíveis está representado na tabela 5.7.

Tabela 5.7 Conjunto de orientações possíveis para as janelas da casa prevista para Coimbra

Combinação de orientações							
1	2	3	4	5	6	7	8
S	SE	E	NE	N	NW	W	SW
SW	S	SE	E	NE	N	NW	NW
NE	N	NW	W	SW	S	SE	E
SE	E	NE	N	NW	W	SW	S
W	SW	S	SE	E	NE	N	NW

Na tabela 5.8 estão representados os ganhos solares mensais acumulados para o conjunto de orientações possíveis dos vãos envidraçados. Com o sombreado de cor azul estão representados os ganhos solares mais baixos e a vermelho os ganhos solares mais elevados. Através da análise da tabela é possível verificar que os ganhos solares variam significativamente para o conjunto das orientações. Para vãos envidraçados fixos, as piores orientações são as combinações 8 e 4, apresentando valores máximos e valores mínimos para os ganhos solares mensais acumulados, respetivamente. Os meses de Junho, Julho, Agosto e Setembro apresentam ganhos solares mais elevados nas combinações 7 e 8. As orientações 3, 4 e 5 são as que apresentam ganhos solares mais baixos em Janeiro, Fevereiro, Março, Abril, Setembro, Outubro, Novembro e Dezembro. Em Maio a orientação que apresenta ganhos solares mais baixos é a orientação 5. Assim, para a casa rotativa, nos meses definidos para a estação de arrefecimento e de aquecimento, as melhores orientações são a 5 para o mês de Junho, Julho e Agosto e a orientação 4 para o mês de Setembro, a orientação 8 de Janeiro até Abril e de Outubro até Dezembro.

Tabela 5.8 Ganhos solares mensais acumulados para cada conjunto de orientações fixas dos vãos envidraçados da casa prevista para Coimbra (kW)

Mês/Combinação	Combinação de orientações							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Janeiro	610	491	337	296	376	477	556	615
Fevereiro	641	536	404	353	415	519	604	658
Março	734	635	548	502	531	632	732	773
Abril	818	730	706	685	655	747	883	894
Maio	880	842	879	844	777	849	979	970
Junho	847	855	922	863	792	846	960	948
Julho	953	937	1001	951	866	936	1085	1069
Agosto	981	928	920	830	797	911	1060	1081
Setembro	867	768	690	627	636	757	889	926
Outubro	817	679	528	477	540	669	785	846
Novembro	692	557	382	331	420	538	628	696
Dezembro	644	508	331	290	384	494	577	644
Total	9484	8466	7649	7050	7188	8375	9740	10120

5.2.1 Ganhos solares na estação de arrefecimento

Para definir o conjunto de orientações com ganhos solares mais favoráveis para a estação de arrefecimento foram consideradas as duas situações mencionadas na capítulo 4, uma situação onde são considerados ganhos solares mínimos durante o dia e outra com ganhos solares máximos até às 10 h e depois mínimos. O gráfico 5.1 apresenta os ganhos solares acumulados na estação de arrefecimento para o conjunto das diferentes orientações possíveis dos vãos envidraçados. Através da análise do gráfico é possível verificar que para esta estação e para uma orientação fixa dos vãos envidraçados, o melhor conjunto de orientações é o 5, com ganhos solares de 3091 kW e o mais desfavorável é o 8, apresentando ganhos solares de 4024 kW.



Gráfico 5.1 Ganhos solares acumulados para cada conjunto de orientações fixas dos vãos envidraçados (kW) da casa prevista para Coimbra na estação de arrefecimento

Na estação de arrefecimento, os ganhos solares horários estão apresentados na tabela 5.9. Através da análise da tabela 5.9 é possível verificar que para minimizar ganhos solares durante o dia, a melhor orientação para os vãos envidraçados até às 6 h é o conjunto de vãos envidraçados definidos com combinação 1, das 7 h até às 13 h a melhor orientação é a combinação 4, até às 15 h é a combinação 3, das 15 h às 19 h é a combinação 2, das 19 h às 20h é a combinação 3 e depois a orientação com a combinação 8 (valores da tabela a negrito). Para a situação em que se pretende maximizar os ganhos solares até às 10 h (valores da tabela a negrito e sublinhado) e depois minimizar os ganhos solares até às 20h, a melhor orientação é a combinação 3 até às 10 h e depois das 10h são as combinações de orientações mencionadas anteriormente. Através da análise da tabela é possível verificar que a rotação da casa é feita para os octantes laterais, exceto das 6h para as 7h na situação 2 e das 19 h para as 20h na situação 1 e 2.

Tabela 5.9 Ganhos solares acumulados para as combinações das diferentes orientações dos vãos envidraçados da casa prevista para Coimbra na estação de arrefecimento, em regime horário (kW)

Hora	Combinação de orientações							
	1	2	3	4	5	6	7	8
5	1,69	6,17	<u>9,06</u>	2,45	6,05	5,68	2,85	5,55
6	30,35	74,32	<u>99,65</u>	34,26	64,41	63,77	43,21	66,45
7	103,23	231,17	301,62	97,17	165,90	181,64	145,25	206,38
8	192,08	364,40	450,22	148,09	219,76	269,57	245,73	323,99
9	275,42	425,71	479,38	181,03	231,40	309,09	303,11	373,34
10	344,19	444,53	434,75	204,63	226,71	314,92	331,07	376,63
11	376,26	409,59	343,05	213,11	220,68	298,04	329,29	353,67
12	382,81	353,86	264,07	211,48	255,43	302,71	324,88	357,61
13	369,61	287,72	215,17	240,56	294,76	323,44	349,83	374,58
14	346,13	227,69	206,25	296,66	317,77	332,21	382,16	396,24
15	354,25	200,44	208,55	384,17	324,16	329,83	425,02	392,95
16	333,59	174,46	198,54	427,38	292,89	291,94	420,21	340,73
17	285,26	144,30	169,61	424,13	248,37	233,54	376,09	264,20
18	190,27	103,50	113,57	305,09	166,53	146,79	243,36	150,45
19	57,64	36,80	36,09	92,22	51,56	43,46	67,21	38,67
20	5,08	2,94	2,71	8,94	4,22	3,38	5,59	2,26
Total	3648	3488	3532	3271	3091	3450	3995	4024

A tabela 5.10 mostra os ganhos solares da casa rotativa na estação de arrefecimento. Com a rotação da casa, há ganhos solares de 3051,6 kW para a situação na qual se pretende obter o máximo dos ganhos solares até às 10 h e depois das 10h ganhos solares mínimos (situação 1). Quando se consideram ganhos solares mínimos desde o nascer do sol até às 20h, os ganhos solares passam a ser de 2170 kW, ou seja há uma diminuição nos ganhos solares de 881,6 kW em apenas 5 horas por dia durante os meses da estação de arrefecimento.

Tabela 5.10 Ganhos solares máximos até às 10h e depois mínimos (situação 1) e ganhos solares mínimos acumulados (situação 2) das janelas rotativas da casa prevista para Coimbra, na estação de arrefecimento (kW)

Ganhos solares dos vãos envidraçados da casa rotativa (kW)	
Ganhos solares máximos até às 10h e depois ganhos mínimos (situação 1)	3051,6
Ganhos solares mínimos (situação 2)	2170,0

A tabela 5.11 mostra o acréscimo que há nos ganhos solares dos vãos envidraçados da casa fixa em comparação com os vãos envidraçados da casa rotativa para o conjunto de orientações possíveis. O conjunto de orientações mais desfavorável é o 7 e o 8, conforme já tinha sido referido. Na situação 1 estas orientações têm mais 31% e 32% de ganhos solares em relação à casa rotativa e na situação 2 tem mais 84 e 85%, respetivamente, tal como mostra a tabela 5.12. Para a orientação 5 há apenas um acréscimo de 1% nos ganhos solares dos vãos envidraçados fixos relativamente aos vãos envidraçados rotativos.

Tabela 5.11 Comparação dos ganhos solares acumulados entre as janelas rotativas e as janelas fixas da casa prevista para Coimbra nos diferentes conjuntos de orientações na estação de arrefecimento, na situação 1 (%)

Acréscimo de ganhos solares na situação 1							
Combinação de orientações							
1	2	3	4	5	6	7	8
20	14	16	7	1	13	31	32

Na situação 2, a orientação 5 passa a ter um aumento nos ganhos solares de 42% para a casa fixa, relativamente à casa rotativa, ou seja, um acréscimo de 41% comparativamente à situação 1.

Tabela 5.12 Comparação dos ganhos solares acumulados entre as janelas rotativas e as janelas fixas da casa prevista para Coimbra nos diferentes conjuntos de orientações na estação de arrefecimento, na situação 2 (%)

Acréscimo de ganhos solares na situação 2							
Combinação de orientações							
1	2	3	4	5	6	7	8
68	61	63	51	42	59	84	85

5.2.2 Ganhos solares na estação de aquecimento

A tabela 5.13 apresenta os ganhos solares acumulados para a estação de aquecimento. Durante a estação de arrefecimento o melhor conjunto das orientações dos vãos envidraçados era o 5, no entanto, para a estação de aquecimento a melhor combinação de orientações é aquela que tem maiores ganhos solares, ou seja, a combinação de orientações 8, apresentando ganhos solares de 6097 kW para as janelas fixas. A pior orientação apresenta ganhos solares apenas de 3779 kW, ou seja, menos 2318 kW que a combinação 8.

Tabela 5.13 Ganhos solares acumulados para cada conjunto de orientações fixas dos vãos envidraçados (kW) da casa prevista para Coimbra na estação de aquecimento

Combinação de orientações							
1	2	3	4	5	6	7	8
5836	4978	4116	3779	4098	4925	5746	6097

Para obter ganhos solares máximos na estação de aquecimento, as melhores combinações de orientações são aquelas que têm valores máximos em cada hora. O gráfico 5.2 mostra a variação dos ganhos solares acumulados em regime horário para o conjunto das diferentes orientações dos vãos envidraçados da casa prevista para Coimbra, na estação de aquecimento.

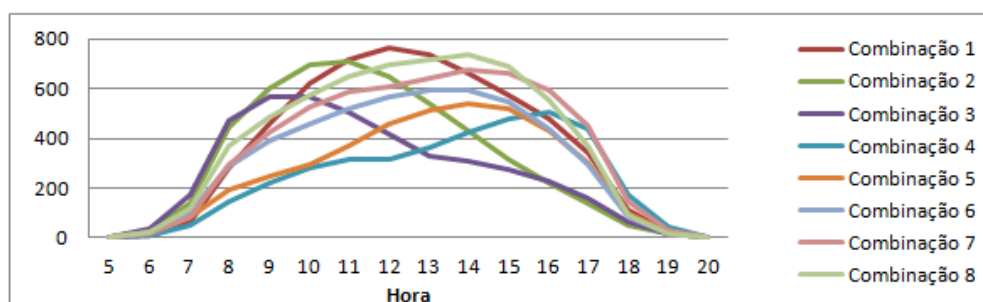


Gráfico 5.2 Ganhos solares acumulados para o conjunto das diferentes orientações dos vãos envidraçados da casa prevista para Coimbra na estação de aquecimento, em regime horário (kW)

A tabela 5.14 mostra os ganhos solares acumulados em regime horário para a combinação de orientações dos vãos envidraçados da casa prevista para Coimbra, na estação de aquecimento. De acordo com o gráfico 5.2 e com a tabela 5.14 (valores a negrito), para maximizar os ganhos solares, a casa tem de rodar de forma a ter os vãos envidraçados na combinação de orientações 3 até às 9h, das 9h às 11h na combinação 2, das 11h até às 14h na combinação 1, depois na combinação 8 até às 16h, das 16h até às 18h na combinação 7 e das 18h até às 20h na combinação 4. A rotação da casa até às 18h é constante, isto é, cada rotação da casa é feita para o ponto cardeal mais próximo, esta situação só não se verifica para a última combinação de orientações, na qual a casa passa da combinação de orientações 7 para a combinação 4.

Tabela 5.14 Ganhos solares acumulados para cada conjunto de orientações dos vãos envidraçados (kW) da casa prevista para Coimbra na estação de aquecimento, em regime horário

Hora	Combinação de orientações							
	1	2	3	4	5	6	7	8
5	0,17	0,77	1,17	0,26	0,73	0,70	0,33	0,69
6	11,4	29,6	40,1	12,5	24,3	24,7	16,9	26,4
7	64,3	137,2	174,9	52,6	87,2	102,5	87,4	121,3
8	281,9	443,3	472,6	143,6	191,7	289,2	295,4	367,8
9	455,2	597,8	563,9	223,1	249,5	390,9	422,6	487,0
10	619,4	699,0	565,6	284,2	297,8	459,7	526,2	577,0
11	717,9	708,5	508,1	315,1	372,4	517,6	586,1	647,8
12	760,9	651,7	415,2	319,0	455,4	564,2	607,7	695,7
13	736,4	541,5	330,9	361,5	512,8	593,6	644,6	716,9
14	662,4	427,9	307,1	426,7	540,2	592,8	674,7	735,0
15	573,4	312,9	272,1	480,6	517,8	545,4	661,4	686,5
16	475,7	219,7	227,6	508,0	430,8	440,9	593,4	553,1
17	341,7	138,9	159,5	436,6	299,4	297,0	452,8	370,1
18	109,4	54,1	62,2	171,3	95,1	86,1	144,4	94,4
19	25,7	14,9	15,0	42,8	22,3	18,8	30,9	16,8
20	0,55	0,28	0,26	1,00	0,44	0,34	0,61	0,22
Total	5836	4978	4116	3779	4098	4925	5746	6097

A tabela 5.15 mostra os ganhos solares para as orientações definidas anteriormente em cada hora (valores da tabela 5.14 a negrito), assim, os ganhos solares máximos são de 6884 kW.

Tabela 5.15 Ganhos solares máximos acumulados das janelas móveis da casa prevista para Coimbra, na estação de aquecimento (kW)

Ganhos solares da casa rotativa na estação de aquecimento (kW)	6884
--	------

A tabela 5.16 mostra o défice dos ganhos solares da casa fixa comparativamente à casa rotativa. A combinação de orientações melhor é a 8, no entanto, a casa fixa nesta posição tem menos 11% de ganhos solares em comparação com a casa rotativa. A orientação 4 é a mais desfavorável, apresentando menos 45% de ganhos solares.

Tabela 5.16 Défice dos ganhos solares acumulados para o conjunto de orientações das janelas fixas relativamente às janelas rotativas na estação de aquecimento (%)

Redução dos ganhos solares							
Combinação de orientações							
1	2	3	4	5	6	7	8
- 15	- 28	- 40	- 45	- 40	- 28	- 17	- 11

5.3 Avaliação dos efeitos do tipo de vidro e dos dispositivos de proteções solares na casa rotativa

O tipo de vidro usado nos edifícios e as proteções solares podem ter uma importância significativa nos ganhos solares do edifício. De seguida são apresentados os efeitos do tipo de vidro e dos dispositivos de proteções solares na casa rotativa.

5.3.1 Avaliação do efeito do tipo de vidro na casa rotativa

Na tabela 5.17 são apresentados os ganhos solares para janelas de vidro simples e para janelas de vidro duplo. Para efeitos de comparação, considerou-se vidro simples incolor de 5mm.

Tabela 5.17 Avaliação do efeito do tipo de vidro na casa rotativa prevista para Coimbra na estação de arrefecimento e de aquecimento

Comparação dos ganhos solares da casa rotativa na estação de arrefecimento com vidro duplo ($g=0,7$) e com vidro simples ($g=0,87$)		Vidro duplo	Vidro simples
Na estação de arrefecimento	Situação 1 (kW)	3052	3793
	Situação 2 (kW)	2170	2697
Na estação de aquecimento (kW)		6884	8556
Acréscimo de ganhos associados ao vidro simples (%)		19,54	

A casa rotativa com o vidro simples tem um aumento nos ganhos solares de 19,54 % na estação de aquecimento e de arrefecimento quando comparada com vidros duplos, ou seja, o vidro duplo ganha apenas 80,46% dos ganhos solares do vidro simples. Segundo este valor o ideal seria ter vidros duplos na estação de arrefecimento para ter menores ganhos solares e ter vidros simples na estação de aquecimento para obter maiores ganhos solares, no entanto, este facto não se verifica na realidade na estação de aquecimento uma vez que neste caso não se estão a considerar as temperaturas exteriores ao edifício e as perdas de energia em todo o edifício (pelos vãos envidraçados e pelas paredes), por isso, apesar do vidro simples parecer o melhor para a estação de aquecimento, isto pode-se verificar devido à fraca capacidade de isolamento deste vidro comparativamente ao vidro duplo.

5.3.2 Avaliação do efeito dos dispositivos de proteções solares 100% ativas na casa rotativa

Para avaliar o efeito dos dispositivos de sombreamento nos ganhos solares da casa rotativa foram consideradas proteções de cor média. O cálculo foi efetuado tendo por base as equações 3.6 e 3.7, que obriga ao cálculo do fator solar com o contributo dos dispositivos de sombreamento.

A tabela 5.18 mostra os ganhos solares da casa rotativa com vários tipos de dispositivos de sombreamento. Considerou-se para efeitos de cálculo que os dispositivos de sombreamento estão ativos a 100%.

Quando se colocam proteções solares exteriores ativas a 100% nas janelas os ganhos solares baixam significativamente, sendo mínimos com portadas de madeira e máximos

com estores de lona muito transparente, assim, para a estação de arrefecimento as portadas de madeira são a melhor proteção solar. Quando as portadas de madeira estão 100% ativas, na situação 1 os ganhos são de 305,2 kW e quando não estão ativas são de 2170 kW (tabela 5.17). Com as portadas de madeira há uma redução nos ganhos solares de 1864,8 kW (2170-305,2 kW). Na estação de aquecimento não são necessárias proteções solares uma vez que o objetivo é aproveitar o máximo benefício da energia solar, no entanto, neste caso estas proteções podem ter outra função que é a de reduzir as perdas de calor do interior para o exterior da casa.

Tabela 5.18 Avaliação do efeito dos dispositivos de proteções solares na casa rotativa prevista para Coimbra na estação de arrefecimento (kW)

Ganhos solares da casa rotativa com proteções solares exteriores ativas a 100% (kW)		Estação de arrefecimento	
		Situação 1	Situação 2
Portada de madeira		305,2	217
Persiana	Réguas de madeira	348,8	248
	Réguas metálicas ou plásticas	435,9	310
Estore veneziano	Lâminas de madeira	479,5	341
	Lâminas metálicas	610,3	434
Estore	Lona opaca	392,4	279
	Lona pouco transparente	741,1	527
	Lona muito transparente	1002,7	713

A tabela 5.19 mostra os ganhos solares dos vãos envidraçados da casa fixa para os diferentes conjuntos de orientações e os ganhos solares mínimos dos vãos envidraçados da casa rotativa, com proteções solares 100% ativas. Através da análise dos dados pode-se verificar que os ganhos solares da casa rotativa são muito semelhantes aos ganhos solares da casa fixa quando existem proteções solares, principalmente para a combinação de orientações 5.

Tabela 5.19 Ganhos solares com proteções solares nos vãos envidraçados da casa fixa e dos vãos envidraçados da casa rotativa prevista para Coimbra, na estação de arrefecimento

	Combinação de orientações								Casa rotativa
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Portada de madeira	364,8	348,8	353,2	327,1	309,1	345	399,5	402,4	305,2
Régua de madeira	416,9	398,6	403,7	373,9	353,2	394,3	456,6	459,9	348,8
Réguas metálicas ou plásticas	521,1	498,2	504,6	467,3	441,5	492,9	570,7	574,8	435,9
Lâminas de Madeira	573,2	548,1	555,1	514,1	485,7	542,1	627,8	632,3	479,5
Lâminas metálicas	729,6	697,5	706,5	654,3	618,1	690	799	804,7	610,3
Lona opaca	469	448,4	454,1	420,6	397,4	443,6	513,6	517,3	392,4
Lona pouco transparente	885,9	847	857,8	794,5	750,6	837,9	970,2	977,2	741,1
Lona muito transparente	1198,6	1145,9	1160,6	1074,9	1015,5	1133,6	1312,6	1322,1	1002,7

5.4 Avaliação do balanço energético da casa

Neste subcapítulo é apresentado o balanço energético da casa rotativa e para efeitos de comparação, no final do capítulo é feito o balanço energético da mesma casa fixa.

Os cálculos que se apresentam neste capítulo foram efetuados segundo os princípios apresentados no Despacho RCCTE 01 [32] e no Despacho RCCTE 02 [31].

Na tabela 5.20 é apresentado o valor do coeficiente global de transferência de calor através da envolvente exterior da casa (U) multiplicado pela área ($U.A$), ou seja, a transferência de calor por transmissão através da envolvente da casa, isto é, através das paredes exteriores, da cobertura em contacto com o exterior (cobertura do piso 2) e dos vãos envidraçados. As paredes são os elementos com menor transferência de calor por m^2 . Os vãos envidraçados são os elementos com maior transferência de calor. Este facto justifica a atenção especial dada à transferência de calor através destas componentes nas secções anteriores. Para o valor do coeficiente global de transferência de calor da cobertura foi considerado que o fluxo é no sentido ascendente uma vez que em Portugal a temperatura média exterior é inferior à temperatura no interior do edifício durante o ano.

Tabela 5.20 Coeficiente global de transferência de calor da casa rotativa (pelas paredes exteriores, cobertura em contacto com o exterior e dos vãos envidraçados) multiplicado pela área de cada elemento.

Coeficiente global de transferência de calor através da envolvente exterior da casa- $U.A$ ($W/^\circ C$)	142,9
---	-------

Na tabela 5.21 é apresentado o valor do coeficiente global de transferência de calor por transmissão, sendo este o somatório do coeficiente de transferência de calor através da envolvente exterior, da envolvente interior e de elementos em contacto com o solo. O valor do coeficiente de transferência de calor através da envolvente interior é nulo uma vez que não há paredes em contacto com espaços não úteis ou com edifícios adjacentes, pavimentos sobre espaços não úteis, coberturas interiores (sob espaços não úteis), vãos em contacto com espaços não úteis e com solários, marquises e jardins e também não são consideradas as pontes térmicas lineares para efeitos de simplificação. O coeficiente de

transferência de calor através de elementos em contacto com o solo também é nulo porque não há paredes nem pavimentos da casa em contacto direto com o solo, uma vez que a casa tem de estar sobre uma estrutura que permita a sua rotação.

Tabela 5.21 Coeficiente global de transferência de calor por transmissão (envolvente exterior, envolvente interior e de elementos em contacto com o solo) (W/°C)

Coeficiente global de transferência de calor por transmissão (W/°C)	224,4
---	-------

A tabela 5.22 mostra o coeficiente de transferência de calor por ventilação na estação de arrefecimento e na estação de aquecimento. Neste caso considerou-se que na casa não há sistemas de ventilação mecânica, admitindo-se ventilação natural para efeitos de cálculo. O coeficiente global de transferência de calor por ventilação na estação de arrefecimento é superior ao da estação de aquecimento, sendo estes de 83,32 W/°C e 55,55 W/°C, respetivamente.

Tabela 5.22 Coeficiente de transferência de calor por ventilação na estação de arrefecimento e de aquecimento (W/°C)

Estação de arrefecimento	Estação de aquecimento
83,32	55,55

A tabela 5.23 apresenta os ganhos térmicos brutos na estação de arrefecimento e de aquecimento. Os ganhos solares dos vãos envidraçados foram determinados no capítulo anterior. Os ganhos solares através das paredes exteriores foram determinados tendo em conta a rotação da casa na estação de arrefecimento durante o dia, rotação para a qual os ganhos solares dos vãos envidraçados são mínimos, neste caso, os ganhos solares através das paredes exteriores são de 203 kW. Na estação de arrefecimento, há 1772 kWh/ano de ganhos internos, incluindo os ganhos de calor associado ao metabolismo dos ocupantes, excluindo o sistema de aquecimento. Na estação de aquecimento os ganhos internos são de 3485 kWh/ano. Os ganhos térmicos brutos são os ganhos devido às fontes de calor situadas no espaço a aquecer e devido aos ganhos solares, sendo de 4145 kWh/ano na estação de arrefecimento e de 10369 kWh/ano na estação de aquecimento.

Tabela 5.23 Ganhos internos e ganhos térmicos brutos na estação de arrefecimento e de aquecimento

Estação de arrefecimento			Estação de aquecimento		
Ganhos internos					
Ganhos internos médios	4	W/m ²		0,72	
	x			x	
Duração da estação	2928	Horas	Ganhos internos médios	4	W/m ²
	x			x	
Área útil de pavimento	151	m ²	Duração da estação	8	Meses
	=			x	
Ganhos internos brutos	1772	kWh/ano	Área útil de pavimento	151	m ²
				=	
Ganhos solares brutos	2373	kW	Ganhos internos brutos	3485	kWh/ano
Ganhos térmicos brutos					
Ganhos internos brutos	1772	kWh/ano	Ganhos internos brutos	3485	kWh/ano
	+			+	
Ganhos solares brutos	2373	kWh/ano	Ganhos solares brutos	6884	kWh/ano
	=			=	
Ganhos térmicos brutos	4145	kWh/ano	Ganhos térmicos brutos	10369	kWh/ano

A tabela 5.24 revela o cálculo do coeficiente global de transferência de calor, sendo este a soma entre o coeficiente de transferência de calor por transmissão e por renovação do ar. Na estação de arrefecimento o coeficiente global de transferência de calor é de 308 W/°C e na estação de aquecimento é de 280 W/°C.

Tabela 5.24 Coeficiente global de transferência de calor na estação de arrefecimento e de aquecimento (W/°C)

Estação de arrefecimento			Estação de aquecimento		
Coeficiente de transferência de calor por transmissão	224	W/°C	Coeficiente de transferência de calor por transmissão	224	W/°C
	+			+	
Coeficiente de transferência de calor por renovação do ar	83	W/°C	Coeficiente de transferência de calor por renovação do ar	56	W/°C
	=			=	
Coeficiente de transferência de calor	308	W/°C	Coeficiente de transferência de calor	280	W/°C

A equação 5.1 mostra a determinação da transferência de calor por transmissão que ocorre através da envolvente na estação de arrefecimento. O coeficiente de transferência de calor

por transmissão é de 224 W/°C, a diferença de temperatura de referência e a temperatura média exterior no Verão é de 4 °C e a estação de arrefecimento tem 2928 horas, assim tem-se:

$$Q_{tr,v} = 224 \times 4 \times \frac{2928}{1000} = 2628,7(kWh/ano) \quad (5.1)$$

A equação 5.2 mostra a transferência de calor por transmissão na estação de aquecimento, sendo 1622 os graus dias de aquecimento (para 8 meses, tal como foi definido) e 224 o coeficiente de transferência de calor por transmissão, assim tem-se:

$$Q_{tr,i} = 0,024 \times 1622 \times 224 = 8736,8 (kWh/ano) \quad (5.2)$$

De acordo com a equação 5.1 e 5.2, na estação de arrefecimento há 2628,7 kWh/ano de perdas e na estação de aquecimento há 8736,8 kWh/ano.

A determinação da transferência de calor correspondente à renovação do ar no interior do edifício é efetuada do mesmo modo que a transferência de calor por transmissão através da envolvente. No entanto, neste caso, para efeitos de cálculo considera-se o coeficiente de transferência de calor por renovação do ar (tabela 5.22). Obtém-se então:

Na estação de arrefecimento:

$$Q_{ve,v} = 83,32 \times 4 \times \frac{2928}{1000} = 975,84 (kWh/ano) \quad (5.3)$$

Na estação de aquecimento:

$$Q_{ve,i} = 0,024 \times 1622 \times 55,55 = 2162,22 (kWh/ano) \quad (5.4)$$

De acordo com a equação 5.3 e 5.4, a transferência de calor por renovação do ar na estação de arrefecimento e na estação de aquecimento é 975,84 kWh/ano e de 2162,22 kWh/ano, respetivamente.

De seguida pretende-se determinar os ganhos térmicos úteis, para isso é necessário ter em conta o fator de utilização dos ganhos. Dos ganhos internos, nem todos são úteis para o aquecimento do edifício. Este facto deve-se, entre outros fatores, à inércia térmica do edifício, provocada pela capacidade de armazenamento de calor nos elementos construtivos. Considerou-se que para o presente estudo, o edifício tem uma inércia térmica média. Para se determinar o fator de utilização dos ganhos é necessário determinar alguns parâmetros para a estação de arrefecimento e para a estação de aquecimento, sendo eles o parâmetro y_v , o parâmetro y_i , o parâmetro cm que traduz a influência da classe de inércia térmica e os parâmetros a_v e a_i .

As equações 5.5 e 5.6 mostram a determinação do parâmetro y_v e y_i , sendo estes a divisão entre os ganhos térmicos brutos e a transferência de calor por transmissão e por renovação do ar, assim tem-se:

$$y_v = \frac{4145}{3604,51} = 1,15 \quad (5.5)$$

$$y_i = \frac{10369}{10899} = 0,95 \quad (5.6)$$

O parâmetro cm é obtido através da multiplicação da área útil por 1,528, assim, este tem o valor de 231,14 W/°C.

A tabela 5.25 mostra o cálculo dos parâmetros a_v e a_i para a estação de arrefecimento e de aquecimento, respetivamente:

Tabela 5.25 Parâmetros a_v e a_i na estação de arrefecimento e de aquecimento

Estação de arrefecimento		Estação de aquecimento	
	0,8		0,8
	+		+
Parâmetro c_m	231,14	Parâmetro c_m	231,14
	÷		÷
Coeficiente de transferência de calor $H_{t,v}$	308	Coeficiente de transferência de calor $H_{t,i}$	278
	=		=
Parâmetro a_v	1,55	Parâmetro a_i	1,63

Com estes parâmetros é possível obter o fator de utilização dos ganhos na estação de arrefecimento e de aquecimento, sendo este de 0,57 e de 0,63 respetivamente.

De 10368,96 kWh/ano (tabela 5.23) de ganhos térmicos brutos na estação de aquecimento, contribuem apenas 63% (fator de utilização dos ganhos) para o aquecimento do edifício, ou seja, os ganhos totais úteis na estação de aquecimento apresentam o valor:

$$Ganhos\ totais\ úteis = 10369 \times 63\% = 6579\ (kWh/ano)$$

Para determinar as necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento é usada a equação (3.9):

$$N_{vc} = (1 - 0,57) \times \frac{4145}{151} = 11,9 \left(\frac{kWh}{m^2 \cdot ano} \right) = 1803\ kWh.\ ano$$

Durante o ano são necessários 11,9 kWh/m².ano de energia útil para arrefecimento.

As necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento são obtidas através da equação (3.10), apresentando o valor:

$$N_{ic} = \frac{8736 + 2162 - 6579}{151} = 28,6 \left(\frac{kWh}{m^2 \cdot ano} \right) = 4326\ kWh.\ ano$$

Se não existissem ganhos internos no edifício na estação de aquecimento as necessidades anuais de energia útil seriam significativamente superiores, apresentando o valor:

$$Necessidades\ nominais\ anuais\ N_{ic} = \frac{8736 + 2162}{151} = 72,2 \left(\frac{kWh}{m^2} \cdot ano \right)$$

A tabela 5.26 mostra os ganhos térmicos brutos e as necessidades nominais para a casa rotativa na estação de arrefecimento e na estação de aquecimento. Na estação de arrefecimento a casa rotativa precisa de 1803 kWh de energia útil para arrefecimento, no entanto, tem ganhos térmicos brutos de 4145 kWh, mais 2342 kWh do que aqueles que a casa precisa. Na estação de aquecimento as necessidades nominais são de 4326 kWh e os ganhos térmicos brutos são de 10369 kWh, no entanto, só contribuem 63% dos ganhos térmicos brutos para aquecimento, ou seja, 6579 kWh, mas mesmo assim os ganhos totais úteis são mais do que suficientes para suprir as necessidades do edifício para aquecimento.

Tabela 5.26 Ganhos térmicos brutos da casa rotativa e necessidades nominais anuais na estação de arrefecimento e de aquecimento (kWh)

	Ganhos térmicos brutos (kWh)	Necessidades nominais anuais (kWh)
Estação de arrefecimento	4145	1803
Estação de aquecimento	10369	4326

Para calcular as necessidades nominais de energia primária para produção de águas quentes sanitárias (AQS) é necessário determinar o consumo médio diário de referência, assim, considerando que o número convencional de ocupantes de cada fração é 3 e que o fator de eficiência hídrica é de 1 tem-se:

$$Consumo\ médio\ diário\ de\ AQS = 40 \times 3 \times 1 = 120\ l$$

As necessidades de energia primária para produção de AQS podem ser determinadas através do terceiro termo da equação (3.8), tendo em conta que a eficiência do sistema é de

86% (valor aplicado quando se considera um sistema por defeito, onde a fonte de energia é o gás) assim estas tomam o valor:

$$\begin{aligned} \text{Necessidades de energia primária para produção de AQS} &= \frac{1 \times 11,79}{0,86} \times 1 \\ &= 13,71 \left(\frac{\text{kWh}_{EP}}{\text{m}^2} \cdot \text{ano} \right) \end{aligned}$$

Para preparar AQS é preciso 11,79 kWh/m².ano de energia útil, mas para ser possível ter esta energia útil é necessário ter 13,71 kWh_{EP}/m².ano de energia primária, isto deve-se às transformações que a energia primária sofre para dar origem à energia final e esta para energia útil, neste caso sob a forma de calor.

As fontes de energia renovável a instalar na casa são sistema solar térmico e possivelmente serão instalados painéis fotovoltaicos e energia eólica, no entanto, ainda só há certeza da instalação do sistema solar térmico, desse modo, para efeitos de cálculo só foi considerado este sistema no balanço energético. Considerou-se também que a contribuição anual de energia renovável do sistema solar térmico é de 1750 kWh/ano. A energia primária proveniente de fontes de energia renovável pode ser obtida através da aplicação do quinto termo da equação (3.8), assim tem-se:

$$\begin{aligned} \text{Energia primária proveniente de fontes de energia renovável} &= \frac{1750}{151} \times 1 \\ &= 11,57 \left(\frac{\text{kWh}_{EP}}{\text{m}^2} \cdot \text{ano} \right) \end{aligned}$$

As necessidades nominais de energia primária para arrefecimento são determinadas através do segundo membro da equação (3.8), considerou-se uma eficiência nominal de 2,80 e um fator de conversão de 2,5 kWh_{EP}/ano (valores de referência do sistema por defeito – eletricidade), assim obtém-se:

$$\begin{aligned} \text{Necessidades nominais de energia primária para arrefecimento} \\ = \frac{11,9 \times 1 \times 1}{2,80} \times 2,5 = 10,6 \left(\frac{\text{kWh}_{EP}}{\text{m}^2} \cdot \text{ano} \right) \end{aligned}$$

O sistema de aquecimento é uma caldeira elétrica apoiada pelo sistema solar térmico, foi tido em conta que a eficiência nominal da bomba de calor é de 3. Considerou-se que o fator de conversão é igual ao de arrefecimento. As necessidades nominais de energia primária para aquecimento são obtidas através do primeiro membro da equação (3.8), assim tem-se o valor:

$$\begin{aligned} & \text{Necessidades nominais de energia primária para aquecimento} \\ & = \frac{28,56 \times 1 \times 1}{3} \times 2,5 = 23,8 \left(\frac{\text{kWh}_{EP}}{\text{m}^2} \cdot \text{ano} \right) \end{aligned}$$

Como a eficiência nominal do sistema usado para arrefecimento e para aquecimento é superior à unidade e como esta se encontra em denominador na equação para determinar as necessidades nominais de energia primária, então as necessidades de energia útil primária são inferiores às necessidades de energia útil. Para produzir 11,9 kWh/m².ano de energia útil para arrefecimento são necessários 10,6 kWh_{EP}/m².ano de energia útil primária e para produzir 28,56 kWh/m².ano de energia útil para aquecimento são necessários 23,8 kWh_{EP}/m².ano de energia primária.

As necessidades anuais globais de energia primária (N_{tc}), são obtidas através da soma da energia primária para arrefecimento, aquecimento, preparação de AQS e para o sistema de ventilação mecânica. A esta soma é subtraída a energia primária proveniente de sistemas com recurso a energia renovável. A energia primária proveniente de sistemas de ventilação mecânica é nula porque na casa não serão instalados este tipo de sistemas. Assim, tem-se:

$$N_{tc} = 10,6 + 23,8 + 13,7 - 11,6 = 36,6 \left(\frac{\text{kWh}_{EP}}{\text{m}^2} \cdot \text{ano} \right)$$

As necessidades anuais globais de energia primária na casa são de 36,6 kWh_{EP}/m².ano.

A classe energética da casa rotativa é obtida através da equação (3.12). O valor máximo admissível das necessidades globais anuais de energia primária é de 90,54 kWh_{EP}/m².ano e foi obtido através da folha de cálculo [35] de aplicação do RCCTE, fornecida pelo ITeCons.

Assim, através da equação (3.12), a classe energética da casa rotativa toma o valor:

$$R = \frac{36,6}{90,54} = 0,40$$

De acordo com a tabela 3.1, a casa rotativa tem uma classe energética A.

Para efeitos de comparação foi feito o balanço energético da casa fixa. Foram consideradas três situações para a casa fixa, uma em que a orientação da casa fixa é para maximizar os ganhos solares na estação de aquecimento (combinação de orientações 8, tabela 5.13), outra em que a sua orientação é para minimizar os ganhos solares na estação de arrefecimento (combinação de orientações 5, gráfico 5.1) e a outra é a orientação da casa a Sul (Figura 5.1, combinação de orientações 1). A tabela 5.27 mostra a síntese dos valores obtidos para cada situação.

Tabela 5.27 Síntese do balanço energético da casa rotativa, e da casa fixa com a combinação de orientações 8, 5 e 1

	Arrefecimento			Aquecimento			Ntc/Nt
	Ganhos solares (kW)	Ganhos térmicos brutos (kW)	Necessidades nominais Nvc (kW)	Ganhos solares (kW)	Ganhos térmicos brutos (kW)	Necessidades nominais Nic (kW)	
Casa Rotativa	2170	4145	1803	6884	10369	4326	0,40
Casa fixa com ganhos máx. na estação de aquecimento	4024	6026	3292	6097	9582	4592	0,52
Casa fixa com ganhos min. na estação de arrefecimento	3091	5093	2519	4098	7583	5400	0,52
Casa fixa orientada a Sul	3648	5650	2976	5836	9321	4686	0,50

De acordo com a tabela 5.27, a casa com melhor classe energética é a casa rotativa, apresentando o valor de 0,40 para o Ntc/Nt. As casas com pior classe energética são as que têm a combinação de orientações 5 e a combinação de orientações 8, sendo o Ntc/Nt de 0,52. A casa fixa orientada a Sul apresenta um Ntc/Nt de 0,5. Assim, de acordo com a tabela 3.1, a casa rotativa apresenta uma classe energética A e as casas fixas têm uma

classe energética B. A casa rotativa é a que tem menor necessidade de energia primária para arrefecimento e para aquecimento.

Aumentando a eficiência nominal da bomba de calor para 4, passa-se a ter as classes energéticas apresentadas na tabela 5.28.

Tabela 5.28 Classe energética da casa rotativa e da casa fixa com a combinação de orientações 8, 5 e 1 devido ao aumento da eficiência nominal da bomba de calor

	Ntc/Nt
Casa Rotativa	0,34
Casa fixa com ganhos solares máximos no Inverno	0,45
Casa fixa com ganhos solares mínimos no Verão	0,43
Casa fixa orientada a Sul	0,43

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são sintetizadas as conclusões principais obtidas no decorrer desta dissertação, de acordo com os objetivos propostos inicialmente.

Após o estudo efetuado é possível concluir que os aspetos a ter em conta para melhorar a eficiência energética nos edifícios são a orientação dos vãos envidraçados, o uso de vidros duplos, a utilização de proteções solares 100% ativas na estação de arrefecimento e a rotação da casa.

Inicialmente começou-se por determinar os ganhos solares para um vão envidraçado de área unitária e verificou-se que os ganhos solares variam significativamente para a estação de arrefecimento e para a estação de aquecimento e também variam para cada uma das orientações. Na estação de arrefecimento a orientação com mais ganhos solares acumulados é a Sudeste e a que tem menores ganhos solares é a Norte. Na estação de aquecimento a orientação Sul é a que apresenta ganhos solares máximos e a orientação Norte é a que tem ganhos solares mínimos. Com a rotação do vão envidraçado em regime horário é possível ter uma diminuição dos ganhos solares na estação de arrefecimento e um aumento considerável na estação de aquecimento. Concluiu-se que a janela fixa na orientação que tem menores ganhos solares na estação de arrefecimento e maiores ganhos solares na estação de aquecimento ganha mais 16,28% que a janela rotativa na estação de arrefecimento e que ganha menos 25,93% na estação de aquecimento.

Quando se aumenta o número de janelas, os ganhos solares aumentam consideravelmente.

É importante salientar que com três janelas de área unitária dispostas em octantes contíguos, a melhor orientação para as janelas fixas tem mais 42,28% de ganhos solares que as janelas rotativas na estação de arrefecimento e menos 21,82% de ganhos solares na estação de aquecimento.

Com as características da casa prevista para Coimbra, na estação de arrefecimento, na situação em que são minimizados os ganhos solares, a casa fixa na melhor orientação tem mais 42% de ganhos solares quando comparada com a casa rotativa e a casa fixa na pior orientação tem mais 85% de ganhos relativamente à casa rotativa. Na estação de aquecimento, a casa fixa na melhor orientação tem menos 11% de ganhos solares em relação à casa rotativa e a casa fixa na pior orientação tem menos 45% de ganhos solares que a casa rotativa.

O tipo de vidro usado na casa tem um efeito significativo nos ganhos solares. O uso de vidro simples tem um aumento nos ganhos solares de 19,54% quando comparado com o vidro duplo. De acordo com este valor, significaria que o melhor vidro para a estação de arrefecimento é o duplo e para a estação de aquecimento é o vidro simples, diminuindo assim os ganhos solares em 19,54% na estação de arrefecimento e aumentando estes em 19,54% na estação de aquecimento. No entanto, isto não se verifica na estação de aquecimento, uma vez que para os cálculos não foi tido em consideração o isolamento de cada um dos vidros.

Os dispositivos de sombreamento têm um efeito determinante nos ganhos solares do edifício. Na estação de arrefecimento, quando são usados dispositivos de sombreamento exteriores, os ganhos solares da casa fixa são muito semelhantes aos ganhos solares da casa rotativa. As proteções solares mais eficientes são as portadas de madeira e as persianas de régua de madeira. As proteções solares menos eficientes são a lona muito ou pouco transparente e o estore veneziano de lâminas metálicas.

Os ganhos térmicos brutos são suficientes para suprir as necessidades de aquecimento da casa rotativa, assim, a casa não precisa de sistemas de aquecimento, uma vez que com os ganhos solares e os ganhos de calor associados ao metabolismo dos ocupantes, ao calor dissipado nos equipamentos e devido ao sistema de iluminação é possível manter uma temperatura de conforto no edifício confortável na estação de aquecimento. Na estação de

arrefecimento não é necessário um sistema de climatização na casa uma vez que os ganhos térmicos brutos são praticamente usados para as necessidades do edifício.

A casa rotativa apresenta uma classe energética superior à das casas fixas. Na estação de arrefecimento e de aquecimento, a casa rotativa é a que tem menores necessidades de energia primária. É possível melhorar a classe energética da casa rotativa e das casas fixas aumentando a eficiência da bomba de calor.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] "*Cleaner energy for sustainable future*". Vincenzo Giorgio Dovi, Ferenc Friedler, Donald Huisingh, Jiri Jaromir Klemes. 2009, *Journal of Cleaner Production*, pp. 889–895.
- [2] Energy, DG. *European Commission*. Volume 5, 2013, http://ec.europa.eu/energy/observatory/electricity/doc/qreem_2012_quarter3.pdf, Acedido em Abril de 2013.
- [3] "*Residential electricity consumption in Portugal: Findings from top-down and bottom-up models*". Daniel Wiesmann, Inês Lima Azevedo, Paulo Ferrão, John E. Fernández. 2011, *Energy Policy*, pp. 2772–2779.
- [4] "*The costs of the Kyoto Protocol in the European Union*". Laurent L. Viguiera, Mustafa H. Babiker, John M. Reilly. *Energy Policy*, 12 de Abril de 2002, pp. 459–481.
- [5] "*A survey of urban climate change experiments in 100 cities*". Vanesa Castán Broto, Harriet Bulkeley. 2012, pp. 92–102.
- [6] RE. NEW. ABLE. Novas energias, a inspirar Portugal - http://efinerg.aeportugal.pt/Areas/Projecto/Documentos/Ene2020_BOOKLET_pt.pdf, Acedido em Março de 2013.
- [7] DGEG - http://intranet.ipleiria.pt/servicos/si/Ficheiros/guia_eficiencia_energetica.pdf, Acedido em Março de 2013.
- [8] *Diretiva n.º 2002/91/CE do Parlamento Europeu, de 16 de Dezembro de 2002*.
- [9] ADENE - Agência para a energia, <http://www.adene.pt>, Acedido em Fevereiro de 2013.
- [10] "*In search of better energy performance in the Portuguese buildings- The case of Portuguese regulation*". Joaquim Ferreira, Manuel Pinheiro. *Energy Policy*, 2011, pp. 7666–7683.
- [11] "*Daylighting as a passive solar design strategy in tropical buildings: a case study of Malaysia*". A. Zain-Ahmed, K. Sopian, M.Y.H. Othman, A.A.M Sayigh, P.N. Surendran. *Energy Conversion and Management*, 2000, pp. 1725–1736.

- [12] "*Comparative advantage of an exterior shading device in thermal performance for residential buildings*". Gon Kim, Hong Soo Lim, Tae Sub Limb, Laura Schaefer, Jeong Tai Kim. *Energy and Buildings*, 2012, pp. 105–111.
- [13] "*Development of a methodology for quantifying insolation variables in windows and building openings*". J. Ramírez-Faz, R. López-Luque. *Renewable Energy*, 2011, pp. 426 - 433.
- [14] "*Heat transfer modelling on windows and glazing under the exposure of solar radiation*". Sujoy Pal, Biswanath Roy, Subhasis Neogi. *Energy and Buildings*, 2009, pp. 654–661.
- [15] Moita, Francisco. "*Energia Solar Passiva*". 2ª Edição. s.l. : Argumentum, Dezembro de 2010.
- [16] "*Energy rating of different glazings for Indian climates*". M.C. Singh, S.N. Garg. *Energy*, 2009, pp. 1986–1992.
- [17] "*Evaluation of models for the angular variation of solar absorptance in windows*". Anna Werner, Arne Roos. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, pp. 261–273.
- [18] "*Windows for buildings in Hot Arid countries*". H. Askar, S.D. Probert, W.J. Batty. *Applied Energy* 70, 2001, pp. 77–101.
- [19] "*Assessing the overall performance of advanced Glazing Systems*". J.A. Clarke, M. Janak, P. Ruyssevelt, *Solar Energy*, 1998, pp. 231–241.
- [20] Graça, Helder Gonçalves e João Mariz - <http://www.lneg.pt/download/4117/Conceitos%20Bioclim%C3%A1ticos.pdf>, Acedido em Março de 2013.
- [21] Angelo Invernizzi's Rotating House - <http://fractalenlightenment.com/737/artwork/angelo-invernizzis-rotating-house>, Acedido em Março de 2013.
- [22] Meinhold, Bridgette. Solaripedia. Julho de 2009 - http://www.solaripedia.com/13/107/solaleya_rotating_dome_homes.html, Acedido em Março de 2013.
- [23] Ridden, Paul. 15 de Outubro de 2010 - <http://www.gizmag.com/domespace-wooden-rotating-house-on-display-at-bordeaux-green-show/16663/>, Acedido em Abril de 2013.

- [24] Alter, Lloyd. 13 de Abril de 2007 - <http://www.treehugger.com/sustainable-product-design/rolf-dischs-heliotrop-house.html>, Acedido em Março de 2013.
- [25] Wilson, Darcy. 5 de Outubro de 2012 - <http://www.build.com.au/blog/build-blog/everingham-rotating-house>, Acedido em Abril de 2013.
- [26] Suíte Vollard - <http://www.metalica.com.br/suite-vollard-o-primeiro-edificio-giratorio-do-mundo>, Acedido em Março de 2013.
- [27] Aroud The Sea - Rotating House - <http://www.aroundthesea.ca/>, acedido em Março de 2013.
- [28] Lopes, Vieira. cem + nem - <http://www.casasemmovimento.com/>, acedido em Maio de 2013.
- [29] LNEG. "Solterm 5". Vol. Versão 5.1.4.
- [30] RCCTE - DL 80/2006.
- [31] "Documento de trabalho: Despacho RCCTE 02". *A publicar pela entidade supervisora do SCE responsável pela área da energia*. 2012. Vol. 02, pp. 1-33.
- [32] "Documento de trabalho: Despacho RCCTE 01". *A publicar pela entidade supervisora do SCE responsável pela área da energia*. 2012. Vol. 01, pp. 1-13.
- [33] "Documento de trabalho: Despacho GERAL 02". *A publicar pela entidade supervisora do SCE responsável pela área da energia*. 2012. Vol. 02, pp. 1-1.
- [34] ISO 6946:2007: Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance. Calculation method.
- [35] "Documento de trabalho: Folha de cálculo para aplicação do RCCTE, disponibilizada pelo ITeCons".