



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

Avaliação da Energia Operacional e Impactes Ambientais em Edifícios

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Construções

Autor

Eduardo José Escaroupa Roque

Orientador

Professor Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos

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

Coimbra, 9 de Outubro

AGRADECIMENTOS

O curto espaço desta secção direcionada aos agradecimentos, não me permite, seguramente, expressar toda a dimensão da minha gratidão a todas as pessoas que ao longo da minha formação de Engenharia Civil me ajudaram, direta ou indiretamente, a cumprir os meus objetivos, ultrapassando os obstáculos que foram surgindo ao longo deste percurso. Desta forma, deixo apenas algumas palavras, poucas, mas com um sentimento sincero de imensa gratidão e reconhecimento.

As primeiras palavras de agradecimento, que nunca serão excessivas, são para os meus pais, por ao longo de todo o meu percurso académico, terem sido modelos de trabalho, dedicação, persistência e por me mostrarem que o trabalho, perseverança, esforço e coragem são medidas essenciais para o sucesso e realização pessoal. Sem exigir nada em troca sempre me apoiaram na corrida pelos meus sonhos, sacrificando-se muitas vezes para que nada me faltasse e para que tivesse à minha disposição todas as ferramentas necessárias para triunfar quer academicamente quer na vida. Tenho que lhes agradecer pela pessoa que sou hoje e por tudo o que consegui alcançar. Obrigado.

Evidentemente, uma palavra de grande admiração e gratidão para com o Exm^o. Senhor Professor Doutor Paulo Santos que se revelou um excelente orientador, guiando-me em todas as fases da elaboração desta dissertação de forma extremamente interessada, gentil e prestável. Tenho a agradecer o tempo disponibilizado comigo, por me sentir constantemente apoiado e orientado no sentido correto, bem como pelos ensinamentos transmitidos e por estimular o meu desejo de querer saber sempre mais.

À Inês, por toda a paciência que teve comigo durante não só a realização desta dissertação mas durante o curso. Por ser porto de abrigo em alturas mais tempestuosas, transmitindo sempre uma sensação de calma e confiança em como iria atingir os meus objetivos. Obrigado por acreditares sempre em mim, por sentir a tua alegria com os meus sucessos e o teu apoio incondicional quando as coisas correm menos bem. Obrigado Migó.

Agradeço também aos meus professores os ensinamentos e lições transmitidos ao longo destes anos . O companheirismo, experiências partilhadas e amizade dos meus colegas que me acompanharam nesta etapa e que guardarei com saudade.

*“O maior inimigo do conhecimento não é a ignorância,
mas a ilusão do conhecimento”*

Stephen Hawking

RESUMO

Nos países ditos mais desenvolvidos, o consumo de energia nos edifícios é muito significativo, mesmo comparando com outros sectores de atividade altamente dependentes de energia, como os transportes ou a indústria. A nível Europeu, isto conduziu à intensificação da pressão a nível regulamentar e legislativo afim de melhorar o desempenho energético e reduzir os impactes ambientais no sector da construção, sem comprometer o conforto, custos monetários, estética ou funcionalidade.

As fases iniciais do projeto de qualquer edifício incluem um variado número de decisões que têm uma forte influência no comportamento térmico, desempenho energético e ambiental do edifício durante toda a sua vida útil. É de extrema importância que os projetistas tenham ao seu dispor ferramentas que lhes permitam estimar este desempenho energético e ambiental logo no início do projeto, por forma a terem consciência do impacto das suas decisões ao longo da vida útil do empreendimento e assim optarem por soluções informadas, que optimizem este desempenho.

Esta dissertação apresenta dois principais objetivos. Numa primeira fase a revisão do estado da arte relativamente ao comportamento térmico, desempenho energético e ambiental de edifícios, focada nos aspetos legais/ normativos e nas ferramentas de avaliação e cálculo nesta área. Posteriormente apresentar-se-á um estudo paramétrico afim de analisar e quantificar a influência nos consumos energéticos e desempenho ambiental de diversos fatores diretamente relacionados com o desempenho dos edifícios nestas duas vertentes.

O estudo paramétrico é realizado recorrendo a uma ferramenta numérica de cálculo simplificado desenvolvida no âmbito de um projeto Europeu de investigação (SB_Steel: *Sustainable Building Project in Steel*). Através desta ferramenta é possível estimar, em fases iniciais do desenvolvimento do projeto dos edifícios, os consumos energéticos direcionados à climatização e aquecimento de água sanitária, registados durante a fase operacional dos edifícios. Além do desempenho energético, este software permite também quantificar de forma aproximada os impactes ambientais do edifício durante o seu ciclo de vida.

ABSTRACT

In higher income countries, energy consumption in buildings is very significant, even compared to other highly energy dependent activities sectors such as transports or industry. At European level, this led to intensified regulation and legislative pressure in order to improve energy performance and reduce environmental impacts in the construction sector without compromising comfort, monetary costs, aesthetics or functionality of the final product

The initial stages of development of any enterprise include a varied number of decisions that have a strong influence on the thermal behavior, energy and environmental performance of the building throughout its lifetime. It is extremely important that designers have at their disposal tools that allow them to estimate this energy and environmental performance early in the design, in order to be aware of the impact of their decisions during the entire building life span and choose informed solutions, which optimize this performance.

This thesis has two main objectives. Initially reviewing the state of the art regarding the thermal behavior, energy and environmental performance of buildings, focused on the legal / regulation aspects and in the evaluation and calculation tools in this area. Later it will present a parametric study in order to analyze and quantify the influence on energy consumption and environmental performance of several factors directly related to the efficiency of buildings in these two aspects.

The parametric study is carried out using a simplified calculation numerical tool developed under a European project. Through this tool it can be predicted in early stages of development of buildings, energy consumption aimed at cooling, heating and domestic hot water production, during the operational phase of buildings. In addition to the energy performance, this software also allows a roughly quantification of the environmental impacts of the building during its life cycle.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Motivação e Objetivos	3
1.3	Estrutura da Dissertação.....	4
2	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	6
2.1	Sistema Construtivo em Portugal.....	6
2.2	Energia Operacional e Energia Incorporada	7
2.3	Fases de Projeto dos Empreendimentos	8
3	REVISÃO LEGAL/ NORMATIVA.....	10
3.1	Desempenho Energético.....	10
3.1.1	Diretiva 2002/91/CE – Diretiva Sobre o Desempenho Energético de Edifícios .	10
3.1.2	ISO 13790 – “Energy Performance of Buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling”.....	12
3.1.3	Diretiva 2010/31/EU – Diretiva Sobre o Desempenho Energético de Edifícios .	12
3.1.4	Enquadramento Legislativo Nacional	13
3.2	Desempenho Ambiental	14
3.2.1	Sustentabilidade na Construção Civil	15
3.2.2	Avaliação do Ciclo de Vida	16
4	REVISÃO DO ESTADO DA ARTE.....	18
4.1	Desempenho Energético.....	18
4.1.1	Simulação Dinâmica	18
4.1.2	Abordagens Simplificadas	20
4.1.3	Abordagens em Fases Iniciais de Projeto.....	20
4.2	Desempenho Ambiental	21
4.2.1	Análise do Ciclo de Vida	21
4.2.2	ACV no Sector da Construção	23
4.2.3	ACV em Fases Iniciais de Projeto	24
5	FERRAMENTA DE CÁLCULO SB_STEEL.....	26
5.1	Avaliação dos Impactes Ambientais	27
5.2	Avaliação da Energia Operacional.....	29
5.3	Limitações da Avaliação por Macro-componentes.....	30
6	ESTUDO PARAMÉTRICO	31
6.1	Caso de Estudo.....	31
6.2	Objetivos	34
6.2.1	Parâmetros e Cenários.....	35
6.3	Variáveis Climáticas	41

6.3.1	Caracterização climática de Coimbra.....	41
6.4	Resultados do Estudo Paramétrico.....	44
6.4.1	Estação de Aquecimento.....	44
6.4.2	Estação de Arrefecimento.....	51
6.4.3	Necessidades Energéticas Anuais.....	57
6.4.4	Combinação ótima de cenários versus Pior combinação de cenários.....	62
6.4.5	Impactes Ambientais.....	63
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
7.1	Conclusões.....	67
7.2	Trabalhos Futuros.....	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Influência da decisões de projeto no ciclo de vida e impactes ambientais 3 (Gervásio <i>et al.</i> 2014)..... 3	3
Figura 2.1 – Ciclo de vida de um edifício (Gervásio <i>et al.</i> 2010)..... 8	8
Figura 3.1 – Normalização relativa aos trabalhos no sector da construção, (adaptado de buildingtestexpo@, 2015). 15	15
Figura 3.2 – Esboço geral das relações entre normas (Finkbeiner <i>et al.</i> 2006). 17	17
Figura 4.1 – Metodologia de ACV “Cradle to cradle” (sustainable-steel@, 2015). 22	22
Figura 4.2 – Ferramentas específicas de ACV em edifícios (Bribián <i>et al.</i> 2009)..... 23	23
Figura 5.1 – Assemblagem de macro-componentes relativas a uma laje de cobertura (Gervásio <i>et al.</i> 2014). 27	27
Figura 5.2 – Módulos relativos às diferentes fases do ciclo de vida do edifício (PrEN 15978). 28	28
Figura 5.3 – Parâmetros representantes dos impactes ambientais (Gervásio <i>et al.</i> 2014). 29	29
Figura 6.1 – Mapa da Europa - Classificação de Koppen-Geiger (Kottek <i>et al.</i> 2006). 42	42
Figura 6.2 – Temperatura média e radiação solar incidente média, mensais, cidade de Coimbra (EnergyPlus@, 2015b)..... 43	43
Figura 6.3 – Perdas energéticas por transmissão através dos elementos opacos, estação de aquecimento. 45	45
Figura 6.4 – Ganhos energéticos por radiação solar através dos elementos opacos, estação de aquecimento. 45	45
Figura 6.5 – Perdas energéticas por ventilação, estação de aquecimento. 47	47
Figura 6.6 – Perdas energéticas por transmissão através dos envidraçados, estação de aquecimento. 48	48
Figura 6.7 – Ganhos energéticos por radiação solar através dos envidraçados, estação de aquecimento. 48	48
Figura 6.8 – Perdas energéticas por transmissão através dos envidraçados, estação de aquecimento. 50	50
Figura 6.9 – Ganhos energéticos por radiação solar através dos envidraçados, estação de aquecimento. 50	50
Figura 6.10 – Perdas energéticas através do piso térreo, estação de aquecimento. 50	50

Figura 6.11 – Perdas energéticas por transmissão através dos elementos opacos, estação de arrefecimento.....	52
Figura 6.12 – Ganhos energéticos por transmissão através dos elementos opacos, estação de arrefecimento.....	52
Figura 6.13 – Perdas energéticas por ventilação, estação de arrefecimento.	53
Figura 6.14 – Perdas energéticas por transmissão através dos envidraçados, estação de arrefecimento.....	54
Figura 6.15 – Ganhos energéticos por radiação solar através dos envidraçados, estação de arrefecimento.....	54
Figura 6.16 – Perdas energéticas por transmissão através dos envidraçados, estação de arrefecimento.....	56
Figura 6.17 – Ganhos energéticos por radiação solar através dos envidraçados, estação de arrefecimento.....	56
Figura 6.18 – Perdas energéticas por ventilação através do piso térreo, estação de arrefecimento.....	57
Figura 6.19 – Necessidades energéticas anuais orientadas à climatização, Parâmetro 1: Isolamento Térmico.	59
Figura 6.20 – Necessidades energéticas anuais orientadas à climatização, Parâmetro 2: Ventilação.	59
Figura 6.21 – Necessidades energéticas anuais orientadas à climatização, Parâmetro 3: Envidraçados.....	60
Figura 6.22 – Necessidades energéticas anuais orientadas à climatização, Parâmetro 4: “ <i>Set-Point</i> ”.	60
Figura 6.23 – Necessidades energéticas anuais orientadas à climatização, Parâmetro 5: Dispositivos de proteção solar.	61
Figura 6.24 – Necessidades energéticas anuais orientadas à climatização, Parâmetro 6: Tipo de piso térreo.	61
Figura 6.25 – Necessidades energéticas anuais orientadas à climatização. Comparação entre a situação de referência, combinação mais favorável de cenários e combinação menos favorável.....	63
Figura 6.26 – Contribuição de cada módulo por categoria ambiental, Cenário 0.....	64
Figura 6.27 – Contribuição de cada módulo por categoria ambiental, Cenário 1.....	64
Figura 6.28 – Contribuição de cada módulo por categoria ambiental, Cenário 2.....	65

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 6.1 – Tipo de dispositivos de proteção solar, pavimento térreo e envidraçados do edifício em estudo (cenário de referência).....	32
Quadro 6.2 – Taxa horária de renovação de ar do edifício em estudo (cenário de referência), estação de aquecimento e estação de arrefecimento.	32
Quadro 6.3 – “ <i>Set-point</i> ” dos aparelhos mecânicos de climatização do edifício em estudo (cenário de referência), estação de aquecimento e estação de arrefecimento.	32
Quadro 6.4 – Coeficientes de transmissão térmica superficiais dos principais elementos construtivos do edifício em estudo (cenário de referência).	33
Quadro 6.5 – Quadro resumo dos diferentes cenários e parâmetros em análise.	35
Quadro 6.6 – Cenários em estudo relativamente à ventilação.	37
Quadro 6.7 – Cenários em estudo ao relativamente ao valor do “ <i>set-point</i> ” dos aparelhos mecânicos de climatização.	38
Quadro 6.8 – Cenários em estudo relativamente ao tipo de piso térreo.	39
Quadro 6.9 – Cenários em estudo relativamente ao isolamento térmico dos elementos opacos da envolvente.	40
Quadro 6.10 – Cenários em estudo relativamente aos dispositivos de proteção solar.	40
Quadro 6.11 – Cenários em estudo relativamente aos envidraçados.	40
Quadro 6.12 – Cenários mais favoráveis vs cenários menos favoráveis.	62
Quadro 6.13 – Resultados da análise dos impactes ambientais, Cenários 0,1 e 2.	65

ABREVIATURAS

ACV – Análise do Ciclo de Vida

BIM - *Building Information Modeling*

CE – Comunidade Europeia

CEN – Comité Europeu de Normalização

CPD - *Construction Products Directive*

CPR - *Construction Products Regulation*

EEESD – *Energy End-Use Efficiency and Energy Services*

EPBD – *Energy Performance in Buildings Directive*

LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia

LSF – *Light Steel Framing*

NZEB - *Nearly Zero Energy Buildings*

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

RECS – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços

REH – Regulamento do Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios

SCE – Sistema de Certificação Energética dos Edifícios

UE – União Europeia

SIMBOLOGIA

$g_{v\perp}$ – Fator solar do vidro para uma incidência solar normal à superfície do vidro

g_{Tvc} – Fator solar de vãos envidraçados com vidro corrente e dispositivos de proteção solar.

R_{ph} – Taxa de renovação horária do ar interior

U – Coeficiente de transmissão térmica superficial

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Numa época pautada por preocupações crescentes no que toca aos impactes ambientais relativos à atividade humana, mas também por uma procura crescente de energia e recursos naturais que satisfaçam as necessidades atuais de desenvolvimento e conforto, é necessário ferramentas e métodos que promovam um desenvolvimento sustentável e energeticamente eficiente.

O sector da construção é um dos mais influentes na economia mundial mas também caracterizado pelo seu grande impacto ambiental, traduzido por um conjunto de fatores como o uso abusivo de recursos naturais, produção acelerada de resíduos ou emissões nocivas. Em termos de resíduos relativos ao processo de construção e demolição, este sector contribui com 30-50% da totalidade de resíduos gerados nos países de rendimentos mais elevados (Santos *et al.* apud Gervásio *et al.* 2010). O sector da construção é também a maior fonte de gases com efeito de estufa, contabilizando 40% da totalidade mundial de emissões deste tipo (Santos *et al.* 2011).

No que toca ao consumo de energia, de entre os países pertencentes à União Europeia (UE), os consumos energéticos dos edifícios, durante a fase de utilização, somam cerca de 40% da energia final consumida na UE, na qual os edifícios residenciais representam 63% desta grande parcela (Balaras *et al.* 2007).

Desta forma, a optimização energética e ambiental neste sector constitui uma necessidade urgente por forma a ir ao encontro quer de metas internacionais como o Protocolo de Kyoto, para redução das emissões de gases que agravam o efeito de estufa quer á diretiva europeia 2010/31/EU - “*Energy Performance in Buildings Directive*” (EPBD) (Diretiva sobre o Desempenho Energético de Edifícios) (2010).

Por forma a contrariar esta tendência progressiva é imperativo que os aspectos relativos ao desempenho ambiental e energético neste campo sejam considerados logo em fases iniciais do projeto e desenvolvimento de qualquer empreendimento.

Esforços neste sentido já estão a ser tomados globalmente. Tomando Portugal como exemplo, segundo a mais recente legislação para os edifícios, o desempenho energético dos mesmos e a qualidade do ar interior assume uma posição de relevo. Os edifícios novos estão sujeitos a um conjunto de requisitos com o objetivo de promover o seu desempenho térmico, como reduzir os consumos energéticos ou promover o uso de sistemas técnicos de produção de energia limpa, do qual a obrigatoriedade de instalação de painéis solares para aquecimento de água sanitária (sempre que haja exposição solar adequada) é um exemplo. O certificado de desempenho energético de edifícios, medida representativa da sua eficiência energética, tornou-se obrigatório para edifícios novos ou existentes alvo de venda ou arrendamento

Com o objectivo de promover a eficiência energética e sustentabilidade torna-se fundamental quantificar as necessidades energéticas dos edifícios, principalmente na sua fase operacional uma vez que esta representa 80-85% (Sharma *et al.* 2011) da energia consumida durante o ciclo de vida dos mesmos. Para esta grande percentagem, os principais contributos advêm da climatização, 55 % a 74%, dependendo da região climática (Santos *et al.* 2011) e produção de água quente sanitária. Torna-se portanto injuntivo a existência de metodologias que permitam contabilizar estas necessidades energéticas, comparar com critérios de avaliação e apurar a eficiência das soluções construtivas.

É exatamente em fases iniciais da concepção dos empreendimentos que existe maior flexibilidade de soluções e opções construtivas, flexibilidade esta que pode e deve ser aproveitada por forma a favorecer a eficiência energética e consequentemente ecológica do produto final com custos minimizados, como ilustrado na Figura 1.1. Assim sendo, é vital que haja ao dispor dos projetistas ferramentas de avaliação e apoio às decisões em fases iniciais da concepção, por forma a optimizarem as suas soluções à luz desta flexibilidade.

No que toca a esta avaliação das soluções construtivas, do ponto de vista ambiental e energético, em fases iniciais de projeto, existe uma lacuna nas ferramentas atualmente disponíveis, as quais providenciam resultados pouco satisfatórios perante a falta de informação característica destas fases.

Os instrumentos de cálculo atualmente mais utilizados, direcionados à quantificação dos impactes ambientais e energia operacional de um dado empreendimento, apesar do seu elevado nível de fiabilidade requerem uma grande quantidade de informação relativa às soluções construtivas adotadas, propriedades térmicas dos elementos construtivos, geometria dos edifícios, etc. Informação esta que em fases iniciais do projeto da generalidade dos empreendimentos simplesmente não existe ou rareia.

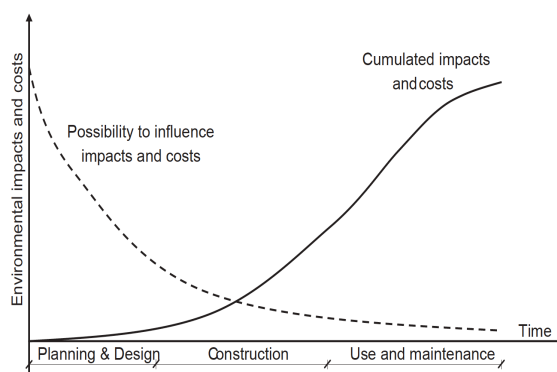


Figura 1.1 – Influência da decisões de projeto no ciclo de vida e impactos ambientais (Gervásio *et al.* 2014).

É nesta temática, enquadrada no projeto de investigação Europeu SB_Steel, que surge uma nova metodologia de cálculo, direcionada à avaliação da energia operacional e impactos ambientais do ciclo de vida dos empreendimentos em fases iniciais do seu projeto, marcada pela grande escassez de informações construtivas acima referidas.

Esta metodologia oferece a possibilidade de quantificação aproximada do desempenho energético e ambiental dos edifícios em fases iniciais de projeto, de forma simples e sucinta, favorecendo a otimização das soluções construtivas uma vez que a comparação entre diversas soluções é realizada de forma não morosa ou complexa para o utilizador. Esta ferramenta será alvo de posterior análise e utensílio de cálculo no âmbito desta dissertação.

1.2 Motivação e Objetivos

Como dito anteriormente, nos países industrializados o consumo de energia em edifícios assume proporções elevadas. Deste consumo energético orientado aos edifícios, destaca-se a energia consumida durante a sua fase operacional. De um forma geral, o objetivo desta dissertação recai no estudo desta parcela de energia, numa ótica do desempenho energético e ambiental dos edifícios.

Este objetivo é traduzido numa revisão do “estado da arte” relativamente a esta temática e num estudo paramétrico utilizando uma ferramenta de cálculo simplificado desenvolvida no âmbito de um projeto de investigação Europeu.

Atualmente, questões relacionadas com o desempenho energético e sustentabilidade são alvo de grande atenção e preocupação por parte da União Europeia e Comunidades Internacionais, resultando isto num grande número de medidas que visam a sua regulamentação e imposição de exigentes requisitos neste campo.

Inclui-se na revisão do “estado da arte” o ponto da situação legal/ normativa na esfera de ação desta temática, a nível Europeu e nacional. Esta revisão abarca também uma breve revisão das ferramentas de cálculo disponíveis relativas à avaliação do desempenho energético e ambiental de edifícios, desde as que apresentam uma menor precisão até ao extremo oposto cujos resultados primam pela fiabilidade e rigor.

A acertada concepção dos edifícios na fase de projeto é fundamental para minimizar a parcela da energia operacional durante o ciclo de vida dos mesmos. Neste âmbito, é realizado um estudo paramétrico, abrangendo alguns parâmetros que mais influenciam este desempenho energético. Tem-se como objetivo primordial deste estudo a análise da influência de diversos parâmetros, cenários e soluções construtivas no desempenho energético e ambiental de um caso de estudo.

Como caso de estudo foi adotado um edifício já alvo de análises relativas a desempenho energético e ambiental por parte de outros autores, sofrendo apenas algumas adaptações para bem do estudo paramétrico

Devido à grande dimensão da esfera de influência desta temática, os objetivos desta dissertação têm especial incidência em edifícios residenciais de pequena dimensão, uni ou multifamiliar. No que toca à parte estrutural, por motivos a seguir expostos, optou-se por dar primazia aos edifícios caracterizados por estruturas leves constituídas por perfis metálicos enformados a frio (*Light Steel Framing* - LSF).

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação desdobra-se em 7 capítulos, fazendo-se de seguida uma breve exposição do conteúdo de cada um.

O primeiro capítulo, de carácter introdutório, tem como objetivo fazer o enquadramento do leitor no âmbito da dissertação, abordando os aspetos da atualidade Europeia no que toca ao consumo de energia e consequentes impactos ambientais assim como apresentar os principais objetivos deste trabalho e a sua organização.

O Capítulo 2, também em jeito de enquadramento, pretende expor alguns conceitos essenciais para a compreensão desta dissertação, nomeadamente a distinção entre “energia incorporada” e “energia operacional” seguindo-se a descrição das várias fases que constituem um projeto e respetiva contextualização na dissertação.

O Capítulo 3, surge com o propósito de fazer o ponto da situação legal/ normativa no âmbito da eficiência energética e sustentabilidade no sector da construção. São aqui expostas vários

documentos normativos e legais, quer internacionais quer Europeus e resultados da sua consequente transposição para o enquadramento legislativo nacional.

O seguinte capítulo expõe a revisão do “estado da arte” relativamente a uma parcela das diversas ferramentas disponíveis que permitem efetuar a avaliação do desempenho energético e ambiental dos edifícios. Neste capítulo é realizada uma análise comparativa entre os diferentes tipos de cálculos e metodologias seguidas pelos diferentes softwares em detrimento da análise de cada uma destas ferramentas individualmente.

O Capítulo 5 é responsável pelo enquadramento da ferramenta de cálculo simplificado à qual se recorrerá por forma a concretizar um dos objetivos desta dissertação. Será exposto o campo de ação desta ferramenta, assim como o seu processo de funcionamento e potencialidades.

O Capítulo 6 representa um dos principais capítulos desta dissertação, aqui é exposto um estudo paramétrico com o objetivo de analisar a influência de vários parâmetros considerados mais relevantes na quantidade de energia que irá ser consumida na fase operacional do edifício em estudo, assim como os impactes ambientais resultantes dos mesmos.

O Capítulo 7 sintetiza as principais conclusões a reter desta dissertação. São também aqui expostas algumas ideias para possíveis trabalhos futuros neste âmbito ou no seguimento desta dissertação.

Por fim, expõe-se a bibliografia consultada para a realização desta dissertação.

2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

2.1 Sistema Construtivo em Portugal

No que toca ao cenário construtivo em Portugal, o tipo de construção mais utilizado é caracterizado pelas estruturas em betão armado com paredes interiores e exteriores em betão ou alvenaria cerâmica. Este tipo de construção define-se pelo uso de mão de obra intensiva e soluções de baixa tecnologia, resultando em longos períodos de construção.

O sector da construção em Portugal representa uma importante fatia na economia nacional, na ocupação da população trabalhadora e no conjunto das empresas de pequena a grande dimensão. Este sector foi gravemente afetado pela atual crise económica, conduzindo a um maior interesse na inovação dos processos construtivos, em soluções que envolvam custos monetários inferiores e que possibilitem encurtar o período de edificação dos edifícios. À luz das metas Europeias para a sustentabilidade e eficiência energética de edifícios, a escolha de métodos e soluções construtivas que apresentem vantagens claras nestas áreas tendem também a ser progressivamente maior alvo de interesse.

Consequentemente, alternativas industrializadas têm assumido em papel de relevo. A construção em aço leve (LSF) tem-se tornado cada vez mais popular no âmbito de edifícios de pequena e média dimensão, oferecendo algumas vantagens em relação à construção tradicional (economia, funcionalidade, sustentabilidade, etc). Como consequência deste aumento de popularidade, o número de empresas especializadas neste tipo de construção tem vindo a aumentar, conduzindo a preços mais competitivos (Santos *et al.* 2011).

A construção em aço leve, pela sua versatilidade de soluções construtivas, tem o potencial de atingir patamares essenciais no desempenho energético e ecológico, como o de edifícios com necessidades quase zero de energia (*Nearly Zero Energy Buildings* - NZEB).

Este tipo de construção, apesar de apresentar grandes vantagens e um enorme potencial na busca pela sustentabilidade apresenta também algumas desvantagens relativamente ao seu comportamento térmico, derivadas essencialmente da alta condutibilidade térmica do aço e da baixa inércia térmica que resulta do reduzido peso deste tipo de estruturas. Torna-se portanto

essencial promover um adequado projeto e concepção deste tipo de edificações, por forma a atingir um alto nível de sustentabilidade e eficiência energética. Estes fins atingem-se essencialmente através de uma escolha fundamentada e eficiente das soluções construtivas a adotar, permitindo assim atingir objetivos que conduzam à optimização energética neste tipo de estruturas, como a minimização das pontes térmicas ou aumento da sua inércia térmica.

2.2 Energia Operacional e Energia Incorporada

O consumo de energia e consequentes impactes ambientais é um dos maiores problemas com que a Europa se depara atualmente, devido à sua grande dependência energética e impactos económicos associados a este consumo. O sector da construção, em particular, pela sua grande influência nesta pegada ambiental e energética, tem sido alvo recente de vasta regulamentação e exigentes requisitos.

O desempenho energético e ambiental têm evidentemente uma relação direta entre si. Toda a energia associada a qualquer empreendimento, desde a necessária à extração das matérias primas dos materiais de construção até à exigida para o desmantelamento final da estrutura e tratamento dos resíduos, provoca elevados impactes ambientais, sendo que é a fase operacional dos mesmos que assume o papel principal nesta pegada.

No que toca à avaliação da totalidade da energia associada a um produto e em particular a um edifício, é possível distinguir dois “tipos” de energia: Energia incorporada (*Embodied Energy*) e Energia operacional (*Operational Energy*).

Entende-se por energia incorporada de um edifício ao somatório da energia incorporada nos materiais que o constituem. Nas várias etapas que constituem o ciclo de vida dos materiais de construção, desde a extração das matérias primas que lhes dão origem até à exigida para o seu tratamento final, é consumida energia. Considera-se que a energia necessária a estas várias etapas, excluindo a fase operacional do edifício, se encontra incorporada nos próprios materiais. O conceito de energia incorporada é fundamental na análise de ciclo de vida dos edifícios. A Figura 2.1 retrata uma representação esquemática destas duas definições.

Por sua vez, energia operacional diz respeito à energia necessária para satisfazer a necessidades energéticas do edifício na sua fase de utilização, (climatização, iluminação, aquecimento de água, sistemas mecânicos, etc).

A parcela de energia incorporada é pouco relevante quando comparada com a energia consumida durante a fase operacional, correspondendo apenas de 10 a 15% desta, em edifícios com baixa eficiência energética (Torgal e Jalali, 2011). Porém, à medida que a

eficiência energética dos edifícios aumenta, diminuindo a energia operacional, a parcela da energia incorporada vai assumindo uma posição de relevo.

Uma vez que a fase operacional dos edifícios é responsável pela maior parte da energia consumida durante o ciclo de vidas dos mesmos, têm sido desenvolvidos esforços substanciais (políticos e técnicos) por forma desenvolver soluções e métodos que conduzissem à concepção de edifícios de baixos consumos energéticos.



Figura 2.1 – Ciclo de vida de um edifício (Gervásio *et al.* 2010).

À medida que a legislação e normalização relativa à eficiência energética vão progredindo, definindo desempenhos energéticos mínimos às edificações, exigências ao nível dos materiais de construção e energia incorporada tornar-se-ão imperativas. Neste aspeto, a construção com materiais de forte componente sustentável assumem um papel de relevo, do qual o aço, que devido à sua completa reciclabilidade surge como forte opção.

2.3 Fases de Projeto dos Empreendimentos

Como referido anteriormente, é em fases iniciais da concepção de qualquer edifício, no desenrolar do seu projeto, que existe uma maior influência sobre os seus futuros impactos ambientais e desempenho energético, com custos monetários mais reduzidos. A concepção do projeto de um empreendimento compreende várias etapas: *Project Start-Up*, *Concept Design*, *Preliminary Design* e *Developed Design* (Gervásio *et al.* 2014).

A primeira fase, *Project Start-UP*, é desenvolvida através da consulta dos interesses por parte dos investidores, os requisitos do empreendimento são identificados e um projeto sumário é avançado.

A fase seguinte, *Concept Design*, desenvolve um conceito inicial do edifício. Esta fase define a configuração geral do edifício, produzem-se peças esquemáticas e esboços que providenciam uma configuração inicial do projeto. Nesta fase, a quantidade de informação é baixa e qualquer avaliação é realizada principalmente baseada em suposições.

A terceira fase é a *Preliminary Design*, onde informação esquemática é desenvolvida e refinada, permitindo a estimativa das principais quantidades do edifício na fase de projeto. Esta fase faz a transição da segunda fase para a *Developed Design*, o nível de informação aqui presente é mais elevado do que no anterior permitindo uma avaliação mais exata da solução, por exemplo do seu desempenho energético e impactes ambientais.

Por fim, surge a *Developed Design*, contendo toda a informação necessária à execução do edifício e todos os dados necessários à avaliação da sustentabilidade e necessidades energéticas.

Em Portugal, relativamente a esta terminologia das fases de execução de um projeto, considera-se que o faseamento acima descrito corresponde respetivamente a: Programa Preliminar; Programa Base; Estudo Prévio e Anteprojeto; Projeto de Execução. Nesta dissertação será utilizada a nomenclatura inglesa em detrimento da portuguesa por uma questão de rigor. Embora o que se encerra nas diferentes fases agora expostas seja equivalente nas duas nomenclaturas, não é exatamente igual. Como a ferramenta de cálculo utilizada recorre à nomenclatura inglesa, assentando nos pressupostos agora referidos relativos a cada fase, decidiu-se optar por esta terminologia

No decorrer desta dissertação, as referências temporais relativas ao desenvolvimento do projeto dos empreendimentos encerram-se na segunda e terceira fases agora expostas, onde as informações necessárias às avaliações propostas ainda escasseiam.

3 REVISÃO LEGAL/ NORMATIVA

3.1 Desempenho Energético

De acordo com o documento *Green Paper “Towards a European Strategy for Energy Supply”* (2000), apresentado pela Comissão Europeia no ano de 2000, três problemas principais são apontados à Europa, no âmbito da energia: a dependência da UE relativamente a fontes externas de energia; o aumento da emissão de gases com efeito de estufa, dificultando o cumprimento do Protocolo de Kyoto; a influência limitada da UE no mercado energético internacional (Van der Veken *et al.* 2004).

Dado o panorama energético Europeu, torna-se evidente a necessidade de economia, optimização e uso racional da energia. Tendo em conta que uma grande parcela de energia é dedicada ao sector da construção, essencialmente durante a fase operacional dos empreendimentos, este é um sector onde se reúnem vastos e esforços e medidas por forma a promover a poupança energética.

Esta preocupação no âmbito da eficiência energética e consequentemente desempenho ambiental dos edifícios tem mobilizados esforços por parte da UE na regulamentação destes aspectos, traduzidos por um conjunto de documentos e diretivas do Parlamento e Conselho Europeu, apoiadas por um vasto leque de Normas Europeias.

3.1.1 Diretiva 2002/91/CE – Diretiva Sobre o Desempenho Energético de Edifícios

Remontando ao ano de 2010, no que toca aos sectores da eficiência energética, uso da energia e construção, a política energética europeia é regulada por duas diretivas (Tronchin and Fabbri, 2010): 2002/91/CE – “*Energy Performance in Buildings*” (EPBD) (Desempenho Energético dos Edifícios) do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro (2002) e 2006/32/CE – “*Energy End-Use Efficiency and Energy Services*” (EEESD) (Eficiência na utilização final de energia e serviços energéticos) do Parlamento Europeu e do Conselho, de 5 de Abril (2006)

De entre as duas diretivas agora referidas, destaca-se a primeira como principal ferramenta legislativa no campo da eficiência energética no sector da construção, obrigando os Estados

Membros a desenvolver, a nível nacional, regulamentações relativas ao desempenho energético dos edifícios, tendo sido uns mais ambiciosos do que outros nesta tarefa. Esta diretiva expõe e requer um diverso conjunto de medidas que têm como objectivo promover o uso prudente e racional dos recursos energéticos, reduzindo o impacto ambiental associado o uso da energia nos edifícios.

A redução da pegada ambiental associada ao sector da construção passa essencialmente pelo aumento e promoção da eficiência energética dos edifícios, novos ou já existentes. A EPDB exigia requisitos mínimos para edifícios novos, grandes renovações com mais de 1000 m² de área útil e relativamente a alguns elementos construtivos da envolvente.

Esta diretiva é também responsável pela promoção da obrigatoriedade de implementação, por parte dos diversos Estados Membros da EU, de um sistema de certificação energética, por forma a constituir uma ferramenta informativa acerca do desempenho energético dos edifícios, privados e públicos, aquando a sua construção, venda ou arrendamento (ITeCons@, 2015a).

Por sua vez, a EEESD, consiste em promover a relação custo-eficácia da melhoria da eficiência na utilização final de energia nos Estados Membros.

No âmbito da diretiva Europeia EPBD, uma extensa campanha de pesquisa internacional foi levada a cabo com o objectivo de elaborar e definir uma metodologia de cálculo relativa à avaliação do desempenho energético dos produtos da construção, normalizada, comum aos diferentes países da UE (CEN/TR 15615, 2006). Esta ação fortalece assim a importância e necessidade da avaliação do desempenho energético dos edifícios, conforto e sustentabilidade.

Por forma a aumentar a eficiência energética, a EPDB opera em diversos campos. Foram desenvolvidos e compilados um conjunto de documentos normativos que têm como função o suporte desta diretiva, providenciando os métodos e metodologias de cálculo normalizadas que permitem prever o desempenho energético global do edifício.

Uma das medidas para atingir os objetivos anteriormente expostos é a aplicação de requisitos mínimos de desempenho energético a construções ou a edificações já existentes sujeitas a grandes renovações (artigos 4, 5 e 6 da EPDB) (CEN/TR 15615, 2006). Outras medidas são a certificação energética de edifícios (artigo 7) e inspeção de caldeiras e sistemas de ar condicionado (artigos 8 e 9).

Nesta metodologia de cálculo, direcionada à avaliação do desempenho energético de edifícios, figuram um conjunto de normas, Europeias e Internacionais, correspondendo muitas delas a aspectos específicos do cálculo. De toda a panóplia de documentos normativos que servem de suporte à EPDB, destaca-se para o âmbito desta dissertação a norma internacional

ISO 13790 (2008), sendo uma das normas que integra a uniformização do método de cálculo relativo ao desempenho energético através da Norma EN 15217.

Apesar de tudo, a utilização da metodologia de cálculo patente nestas normas assume que informações relativas às opções construtivas, processo de construção, materiais utilizados e tipo de ocupação são conhecidos (Gervásio *et al.* 2014). O que não se verifica em fases iniciais do projeto dos edifícios.

3.1.2 ISO 13790 – “Energy Performance of Buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling”

A norma internacional ISO 13790 (2008) - “ Energy Performance of Buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling” (Desempenho Energético de Edifícios – Cálculo das necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento), fornece um método de cálculo, em regime quase-permanente, que permite avaliar o desempenho energético das edificações, quantificando o uso anual de energia dedicado ao aquecimento e arrefecimento de edifícios residenciais, não residenciais ou apenas uma parte dele.

A referida norma abrange todos os aspetos relativos ao cálculo do balanço térmico de um edifício, providenciando também fatores de correlação para levar em conta na análise o comportamento dinâmico dos processos de transferência de calor. Esta contabilização é efetuada por meio de um balanço energético entre fatores, factores estes que por sua vez também são alvo de normas específicas e que servem de apoio à ISO 13790. O balanço energético considera por um lado as perdas de calor por transmissão e ventilação e pelo outro, ganhos energéticos internos e solares. O cálculo é efectuado em interação com a massa térmica, factores externos e comportamento dos ocupantes.

A ISO 13790 (2008) permite diferentes níveis de complexidade de cálculo, fornecendo indicações para: cálculo simplificado horário ou sazonal; cálculo horário simplificado; cálculo detalhado. Possibilita também a avaliação da transferência de calor e ganhos solares de elementos especiais, assim como *Trombe Walls* (Paredes Trombe).

3.1.3 Diretiva 2010/31/EU – Diretiva Sobre o Desempenho Energético de Edifícios

A versão de 2002 da EPBD não traduziu toda a ambição europeia relativa à eficiência energética de edifícios. Em 2010, esta diretiva sofreu uma reformulação, introduzindo novos princípios, decisivos para elevar os requisitos exigidos a níveis mais eficazes, surgindo assim a segunda EPDB.

A Diretiva 2010/31/EU (2010), revoga a diretiva 2002/91/CE (2002) e vem reformular as medidas necessárias na redução da dependência da UE e no controlo das emissões de gases com efeito de estufa. Nela são estabelecidos novos objectivos para melhorar o desempenho

energético dos edifícios. É fornecido um quadro geral, comum aos países da UE, para o cálculo do desempenho energético sendo também introduzidos alguns novos conceitos, como os de edifícios de necessidades energéticas quase zero (NZEBS). É expressamente indicado nesta diretiva que a metodologia de cálculo do desempenho energético dos edifícios, no Estados Membros, tem que seguir a normalização Europeia (ITeCons@, 2015a). Esta nova metodologia cria também uma ligação entre a eficiência energética e objectivos de rentabilidade económica (BPIE, 2010).

Passados oito anos após a primeira EPDB, os requisitos sofreram um aumento significativo de exigência, a pressão da Europa na busca por edifícios mais eficientes está-se a intensificar. Os Estados Membros foram obrigados a adotar níveis mais ambiciosos no que toca à eficiência energética dos edifícios, traduzidos na sua regulamentação nacional. Os diversos países perderam assim parcialmente a liberdade no estabelecimento dos seus próprios requisitos regulamentares (OrdemdosEngenheiros@, 2015).

Segundo a atual diretiva, o mais tardar até 31 de Dezembro de 2020, todos os edifícios novos têm de ter um balanço energético quase nulo entre as suas necessidades energéticas (que já devem ser baixas) e as que são satisfeitas pelas energias renováveis, produzidas através de dispositivos associados aos edifícios.

Este aumento de exigência por parte da UE, patente na reformulação da EPDB, é traduzida num conjunto alargado de medidas, entre as quais: i) introdução e generalização das energias renováveis nos edifícios a um ritmo mais acelerado; ii) os requisitos exigidos deixam de ser aplicáveis apenas à envolvente, os sistemas técnicos passam também a ser alvo de exigências; iii) o conceito de grande renovação desaparece, há que aproveitar todas as oportunidades de aumento da eficiência energética, quer seja na envolvente quer seja nos sistemas técnicos.

3.1.4 Enquadramento Legislativo Nacional

A transposição da Diretiva Europeia 2002/91/CE para o quadro regulamentar nacional aprovou o Sistema das Características do Comportamento Térmico e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE) e conduziu à revogação do Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios, de 7 de Maio (RSECE - Decreto-Lei nº 188/98) e do Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, de 6 de Fevereiro (RCCTE – Decreto-Lei nº 40/90) através da publicação do Decreto-Lei nº 78/06, Decreto-Lei 79/06 e Decreto-Lei nº 80/06, todos de 4 de Abril. (ITeCons@, 2015a).

Refira-se que o RCCTE, aprovado pelo Decreto-Lei nº 40/90, foi o primeiro instrumento legal que em Portugal, impôs requisitos ao projeto de novos edifícios e grandes remodelações por forma a promover as condições de conforto e eficiência energética.

Como consequência das novas exigências expressas na diretiva 2010/31/EU (2010), os Estados Membros procederam a uma nova revisão regulamentar que a nível nacional, no âmbito dos edifícios residenciais, resultou na revisão do Decreto-Lei nº 80/06, que dita o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) (ITeCons@, 2015a).

A revisão regulamentar resultou no Decreto-Lei 118/ 2013 de 20 de Agosto, que revoga o SCE (Decreto-Lei 78/06), RCCTE (Decreto-Lei nº 80/06) e RSECE (Decreto-Lei 79/06). O novo regulamento inclui num único diploma a aprovação do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS).

Ao nível dos edifícios de habitação, abrangidos pelo REH, esta legislação acartou várias mudanças, exigindo requisitos mais apertados que implicam o melhoramento e optimização das soluções construtivas (fibran@, 2015).

Os critérios de conforto nos edifícios (Diretiva Europeia 2010/31/EU; Decreto-Lei 118/ 2013; ISO 13790 (2008)), apontam em assegurar temperaturas interiores mínimas no Inverno e temperaturas máximas interiores no Verão (Santos *et al.* 2011). De acordo com o atual regulamento português de desempenho energético dos edifícios de habitação, REH, estas temperaturas tomam o valor de 18°C e 25°C, respetivamente.

Portugal tem direcionado esforços no sentido de fazer acompanhar a regulamentação e quadro legislativo nacional relativamente às Diretivas e exigências da União Europeia, exigindo elevados investimentos quer no sector público quer no sector privado. Depois do primeiro choque relativo à primeira EPDB e alterações regulamentares que acartou, com a génese da segunda EPDB, Portugal tem agora metas mais exigentes pela frente. Devido à situação económica nacional, este investimento em tecnologias e recursos para promover a eficiência energética dos edifícios pode estar parcialmente comprometido

3.2 Desempenho Ambiental

Qualquer desenvolvimento sustentável necessita de ferramentas e métodos quer de minimização de impactes ambientais provenientes das atividades humanas quer de avaliação e quantização desses mesmos impactes. Estes danos ambientais podem manifestar-se das mais variadas formas, como o uso do solo, consumo de recursos, emissões para o meio ambiente, etc. (Sharma *et al.* 2011). De entre as manifestações destes impactes, destacam-se para o âmbito desta dissertação as associadas ao sector da construção civil.

3.2.1 Sustentabilidade na Construção Civil

Os movimentos pela procura da sustentabilidade, no sector construção civil, tornaram-se incontornáveis, surgindo a necessidade de criação de ferramentas e metodologias que reforçassem esta posição e que servissem de guião nessa área.

Foi nesse sentido e por forma a criar uma abordagem comum a nível Europeu, que Comité Europeu de Normalização (CEN) desenvolveu um conjunto de ferramentas orientadas à avaliação do desempenho ecológico de edifícios. A estrutura normativa, no que toca a esta avaliação, é concedida por um conjunto de normas provenientes do CEN-TC 350, abordando o aspecto ambiental, económico e social (Santos *et al.* 2014), como esquematizado na Figura 3.1. O desenvolvimento desta estrutura normativa tem em consideração as diversas políticas e diretivas Europeias relativas aos edifícios, produtos e trabalhos de construção.

Framework level	EN 15643-1 Sustainability Assessment of Buildings (and Civil Engineering Works) - General Framework		
	EN 15643-2 Framework for Environmental Performance of Buildings	EN 15643-3 Framework for Social Performance of Buildings	EN 15643-4 Framework for Economic Performance of Buildings
	prEN 15643-5 Framework for Assessment of Sustainability Performance of Civil Engineering Works		
Works level	EN 15978 Assessment of Environmental Performance	EN 16309 Assessment of Social Performance	prEN 16672 Assessment of Economic Performance
Product level	EN 15804 Environmental Product Declarations	(see Note below)	(see Note below)
	EPD of Build. Products (ISO 21930)	Note: At present, technical information related to some aspects of social and economic performance are included under the provisions of EN 15804 to form part of EPD	
	EN 15942 Comm. Form. B-to-B		
18.6.2014 Ari Ilonkka CEN/TR 15941			

Figura 3.1 – Normalização relativa aos trabalhos no sector da construção, (adaptado de buildingtestexpo@, 2015).

Como pode ser observado na Figura 3.1, a normalização nesta área funciona em três níveis (conceito/enquadramento, edifício e materiais) e em três tipos de desempenho (ambiental, social e económico).

Dos três pilares do desenvolvimento sustentável, o aspecto ambiental é claramente o mais desenvolvido em termos normativos e regulamentares, os restantes registam um atraso de elaboração, principalmente a componente social. Destaca-se a componente ambiental para o âmbito desta dissertação.

Para além destas normas, o CEN-TC 350 é também responsável por um vasto conjunto de outras medidas e ferramentas no sector da construção, das quais se podem referir: i)

elaboração de regulamentação relativa aos materiais de construção; ii) orientações no âmbito dos desperdícios do sector da construção e Eco-design; iii) roadmaps relativas ao uso eficiente dos recursos; iv) políticas no âmbito da emissão de gases carbónicos (buildingtestexpo@, 2015).

Destaca-se para o âmbito desta dissertação a norma Europeia EN 15978 (2009) alusiva á apreciação da sustentabilidade de edificações novas ou já existentes e EN 15804 (2011) respeitante à declaração ambiental dos materiais de construção.

3.2.2 Avaliação do Ciclo de Vida

Atualmente, no que toca à Análise do Ciclo de Vida (ACV) o guião geral é ditado por duas normas internacionais, ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006) (Gervásio *et al.* 2014). Estas normas focam-se essencialmente no processo de realização de uma ACV, fornecendo orientações e requisitos acerca das diferentes fases que a integram (pre-sustainability@, 2015). De acordo como estes documentos normativos, a ACV deve incluir a definição do objetivo e âmbito, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados. Estas fases estão inter-relacionadas, sendo por vezes necessário um processo iterativo a fim de cumprir os objetivos e âmbito de estudo.

É de salientar que enquanto a normalização Europeia exposta na subsecção anterior está focada na avaliação de edifícios e de outros trabalhos de construção, as normas agora em análise têm uma aplicação geral, não se limitando ao sector da construção.

O desenvolvimento das normas internacionais relativas a ACV (ISO 14040:1997, ISO 1441:1999, ISO 14042:2000 e ISO 14043:2000), atualmente revogadas, permitiram um enorme avanço na consolidação dos procedimentos e métodos da avaliação dos impactos ambientais, sendo também de vital importância para a aceitação desta análise pelas entidades interessadas e comunidades internacionais (Finkbeiner *et al.* 2006).

No intervalo de tempo compreendido entre 2001 e 2006, estas normas foram revistas tecnicamente, concretizando medidas de melhoria em áreas identificadas como alvo de aperfeiçoamento. Os documentos então em vigor eram em parte inconsistentes, contendo fragmentos não claros e ambíguos (Finkbeiner *et al.* 2006).

Como objetivo primordial desta revisão esteve a melhoria da interpretação, acessibilidade, leitura dos referidos documentos e remoção de inconsistências e erros.

As imperfeições da normalização inicial despontaram o pedido, por parte das várias entidades interessadas, de medidas que melhorassem a interpretação e aplicabilidade destes

documentos. Como produto desta revisão, surgiu a compilação de apenas dois documentos, sendo o conteúdo da normalização então em vigor transferido para duas novas normas, ISO 14040 (2006) e ISO 14044 (2006), através de um processo de fusão, reorganização e revisão técnica das anteriores, sendo as quatro anteriores revogadas. O esboço desta relação entre documentos normativos está exposto na Figura 3.2.

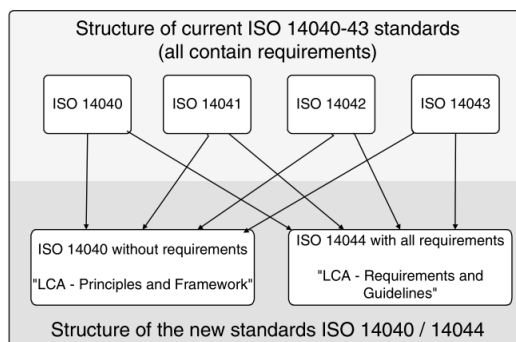


Figura 3.2 – Esboço geral das relações entre normas (Finkbeiner *et al.* 2006).

Posto isto, a nova ISO 14040 (2006) torna-se o documento normativo responsável pelo enquadramento e princípios da avaliação ACV, enquanto a ISO 14044 (2006) contém todos os requisitos técnicos e linhas de orientação (Figura 3.2).

Como resultado da revisão, os objectivos pretendidos, acima referidos, foram atingidos. Relativamente ao conteúdo técnico, as duas novas normas, ISO 14040 e ISO 14044, reconfirmam a validade técnica das suas antecessoras, permanecendo o núcleo central do conteúdo inalterado. As adições resultantes da revisão surgiram em seguimento com os requisitos expostos nas revogadas e servem principalmente como clarificação do conteúdo técnico destas (Finkbeiner *et al.* 2006). A publicação das novas normas internacionais para ACV ocorreu em 2006.

Finalizando, conclui-se que a procura pela sustentabilidade na construção civil e pela avaliação e gestão dos impactes ambientais dos produtos durante o seu ciclo de vida é cada vez mais um tema de destaque e alvo de atenção progressiva por parte da comunidade internacional. As recentes medidas normativas e legislativas, quer europeias quer internacionais, são medida representativa desta preocupação global. Apesar destes desenvolvimentos na avaliação dos impactes ambientais no sector da construção e desenvolvimento sustentável, são aspetos ainda pouco relevantes quer a nível regulamentar quer no âmbito do quadro legislativo das Comunidades Europeias.

4 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

4.1 Desempenho Energético

Dado o panorama geral no campo da eficiência energética e procura pela poupança de energia, as metodologias de avaliação do desempenho energético dos produtos da construção tornam-se fundamentais, quer se trate da optimização dos consumos energéticos na concepção de algo novo quer seja na avaliação de um produto já existente por forma a ser melhorado ou fornecer esta informação a quem o adquire ou é proprietário.

No que toca ao sector da construção e imobiliário, por forma a mobilizar interesse, evolução e investimento no sentido da eficiência energética, é fundamental que existam ferramentas que providenciem informação credível, elucidativa e com grau de precisão satisfatório acerca do desempenho energético quer de edifícios novos quer já existentes.

Relativamente à previsão do comportamento térmico dos edifícios existem duas principais abordagens: cálculo dinâmico e métodos em regime quase-permanentes (Santos *et al.* 2014).

4.1.1 Simulação Dinâmica

A simulação dinâmica, caracterizada por processos morosos e necessidade de grande quantidade de informação acerca do edificado, prima pela fiabilidade, rigor dos resultados obtidos e pela forma precisa como simulam as condições reais do caso de estudo. Os softwares de simulação dinâmica constituem ferramentas que permitem caracterizar o comportamento térmico e desempenho energético dos edifícios do forma mais rigorosa e fiável. Possibilitam obter uma análise detalhada deste desempenho térmico e uma distribuição dos consumos para cada componente consumidor de energia.

No âmbito do cálculo dinâmico, existem várias ferramentas, acreditadas, dedicadas a esta simulação energética de edifícios. Podem-se referir como softwares de simulação dinâmica multizona os seguintes: i) Energy Plus (EnergyPlus@, 2015a); ii) Trnsys (Trnsys@, 2015) iii) ESP-r (Van der Veken *et al.* 2004); iv) IDA-ICE (EQUA@, 2015).

Por sua vez, como ferramenta de simulação dinâmica monozona pode referir-se o software STE do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) (LNEG@, 2015) e a ferramenta “Cálculo Dinâmico Simplificado (Monozona)” do ITeCons (Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção) (ITeCons@, 2015b). De referir que o cálculo efetuado por estes dois softwares é aplicável a pequenos edifícios de comércio e serviços, previsto no RECS. A sua aplicabilidade limita-se também a edifícios ou frações em que se possa considerar a existência de apenas uma zona térmica.

O EnergyPlus tem sido extensivamente validado sendo classificado como a ferramenta de simulação dinâmica de referência (Crawley *et al.* apud Santos *et al.* 2008). Apesar do grande potencial desta ferramenta, apresenta uma interface complexa, pouco intuitiva e “non user-friendly”. Por forma a ultrapassar esta barreira, é amplamente utilizada a interface gráfica do software DesignBuilder (DesignBuilder@, 2015), ferramenta de modelação de edifícios que utiliza o EnergyPlus como motor de cálculo para a simulação dinâmica.

A maioria dos softwares de simulação energética cai no âmbito do cálculo dinâmico, fornecendo resultados mais precisos, tendo em conta diferentes mecanismos de transferência de calor (Crawley *et al.* 2001). A precisão destas metodologias recai também na forma holística como abordam o edifício, contabilizando um conjunto alargado de fatores que influenciam o seu desempenho energético, como as condições climáticas em que está inserido, horário de ocupação, orientação geográfica ou soluções construtivas detalhadas (partição interna de espaços, propriedades térmicas dos materiais, envidraçados, elementos de sombreamento, etc) (Santos *et al.* 2010).

Refira-se que geralmente não se aplica a simulação dinâmica a edifícios residenciais comuns ou a edificações de pequena dimensão. No âmbito dos edifícios residenciais, o REH permite obter um comportamento bastante aproximado do comportamento real destes. No que toca aos edifícios de serviços ou comércio, geralmente podem ser analisados pelas ferramentas monozona acima referidas sempre que reúnam as condições para tal. Nestes casos dá-se preferência a métodos expeditos e simplificados.

A redução da energia operacional consumida pelos edifícios, mantendo o conforto térmico, é essencial na vertente da sustentabilidade do edifício. Esta redução pode ser alcançada através de um adequado design e adequadas técnicas e opções construtivas. A melhor forma de avaliar e comparar soluções construtivas, do ponto de vista do seu desempenho energético e ambiental, é realizando simulações dinâmicas do edifício, utilizando os dados climáticos do local de implantação. Este tipo de simulação permite obter um solução otimizada entre energia incorporada e energia operacional, conduzindo a um grande benefício económico e energético.

4.1.2 Abordagens Simplificadas

Além das simulações dinâmicas, existem métodos mais simplificados, geralmente assentes em aproximações em regime quase-permanente (Santos *et al.* 2014). Estas abordagens simplificadas são geralmente baseadas num conjunto de equações algébricas, sendo um cálculo mais explícito e normativo. Como exemplo desta metodologia simplificada destaca-se o cálculo mensal presente na norma ISO 13790 (2008), obtendo a partir dele as necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento através de um processo normalizado.

A abordagem simplificada, através da norma ISO 13790 (2008) apresenta vantagens e desvantagens em relação ao cálculo dinâmico, sendo que o contrário também se verifica. Relativamente às vantagens do processo simplificado pode-se referir-se: i) simplicidade e necessidade de um menor número de inputs à sua marcha de cálculo; ii) desambiguo e transparente no que toca ao processo de cálculo; iii) facilidade na identificação e correlação entre inputs e outputs do cálculo (Kim *et al.* 2013).

Apesar disto, este tipo de abordagem é considerada insuficiente para descrever o comportamento dinâmico de sistemas complexos e muitos projetistas recorrem a ferramentas de cálculo dinâmico, para além destas (Kim *et al.* 2013).

Por sua vez, relativamente ao cálculo dinâmico pode-se destacar as seguintes vantagens sobre as abordagens simplificadas: i) simulações em regime transiente com parâmetros variáveis no tempo; ii) grande capacidade de modelação do objecto de estudo; iii) avaliação de maior precisão e desempenho integrado (energia, conforto, luz solar, etc) (Kim *et al.* 2013). Porém, o cálculo dinâmico apresenta como desvantagens em relação aos métodos mais expeditos a complexidade do processo de avaliação, interfaces gráficas não intuitivas e o facto de requererem um conjunto alargado de informações relativas à edificação já concluída.

Aproximações simplificadas em regime quase-permanente são vantajosas para análises comparativas ou estudos de edifícios de pequena dimensão e complexidade, mas não simulam as condições reais a que o edifício está sujeito ou os processos dinâmicos de transferência de calor. Por exemplo, a inércia térmica do edifício e a ventilação não são adequadamente consideradas na análise (Gervásio *et al.* 2010).

4.1.3 Abordagens em Fases Iniciais de Projeto

Como visto anteriormente, no campo da avaliação das necessidades energéticas em fases iniciais do projeto dos edifícios, existem algumas metodologias aproximadas, usualmente baseadas em regimes quase-permanentes. Algumas ferramentas foram desenvolvidas por Nielsen (2005), Petersen e Svendsen (2010) e Carlos e Nepomuceno (2012). Estas abordagens tratam-se de aproximações com algumas desvantagens e lacunas relevantes quer ao nível dos resultados quer no processo de cálculo e introdução de informação (Santos *et al.* 2014).

Pode-se destacar também neste campo de ação a ferramenta criada no âmbito do projeto de investigação Europeu SB_Steel: *Sustainable Building Project in Steel*, que vai ser alvo de análise mais detalhada no capítulo seguinte.

Concluindo, no que toca às principais abordagens relativamente à simulação energética e consequente avaliação do desempenho energético de edifícios existe uma vasta panóplia de ferramentas de cálculo, desde a complexidade e fiabilidade do cálculo dinâmico até as abordagens simplificadas assentes em regimes quase-permanentes, apresentando cada via vantagens e desvantagens. Relativamente a metodologias de cálculo aplicáveis em fases iniciais de projeto de edifícios, sem existência de dados suficientes relativos ao processo construtivo ou materiais empregues, deteta-se uma deficiência de métodos de avaliação, agravado pela baixa margem de precisão dos mesmos. É neste campo de ação que recai o âmbito desta dissertação.

4.2 Desempenho Ambiental

Por forma a promover a sustentabilidade no sector da construção, a avaliação dos impactos ambientais correspondentes à totalidade do ciclo de vida das edificações é essencial. É necessário compreender e analisar a relação entre as opções construtivas e o impacto energético, ambiental e económico que elas acarretam a curto, médio e longo prazo.

Todas as fases do ciclo de vida de um edifício estão inter-relacionadas: a título de exemplo, num clima mais frio, quanto menos se investir na fase de construção, por exemplo, aplicando fraco isolamento térmico, o investimento necessário na fase de uso e manutenção irá aumentar. Ou seja, embora a energia incorporada tome valores menos elevados conduzindo a menores impactos ambientais, a energia na fase operacional e consequente desempenho ecológico do edifício nesta fase, irão registar valores mais desfavoráveis. Daqui se conclui a importância das ACV, como forma de otimizar este rácio entre os diferentes estágios da vida das edificações do ponto de vista da sustentabilidade e desempenho ecológico.

As opções construtivas que se tomam na fase de projeto acarretam diferentes impactos futuros, energéticos e ambientais, que têm de ser analisados e geridos. A ACV dos empreendimentos, realizada em fases iniciais da concepção de um edifício, permite otimizar as soluções construtivas uma vez que explora estas relações entre as diferentes fases.

4.2.1 Análise do Ciclo de Vida

A ACV é uma abordagem de avaliação do desempenho ambiental de produtos ou atividades, na totalidade do seu ciclo de vida, desde a extração de matérias primas até ao desmantelamento, tratamento e depósito dos resíduos finais, incluindo fases intermédias como

o transporte de materiais e equipamento. O agora descrito corresponde a uma ACV completa, sendo considerada uma análise “*Cradle to grave*” (Berço à cova) (Cabeza *et al.* 2014). Existem várias variantes de uma ACV, diferenciadas relativamente ao período e processos em análise. Para além da análise “*Cradle to grave*”, destaca-se para o âmbito desta dissertação a vertente “*Cradle to cradle*” (Berço ao berço). Esta última análise corresponde a um tipo específico de avaliação “*Cradle to grave*”, onde os resultados do desmantelamento dos produtos são integrados num processo de reciclagem e reintroduzidos no processo de fabrico de produtos idênticos, ou não. A Figura 4.1 ilustra a metodologia de uma análise “*Cradle to cradle*” de produtos cujo matéria prima é o aço.

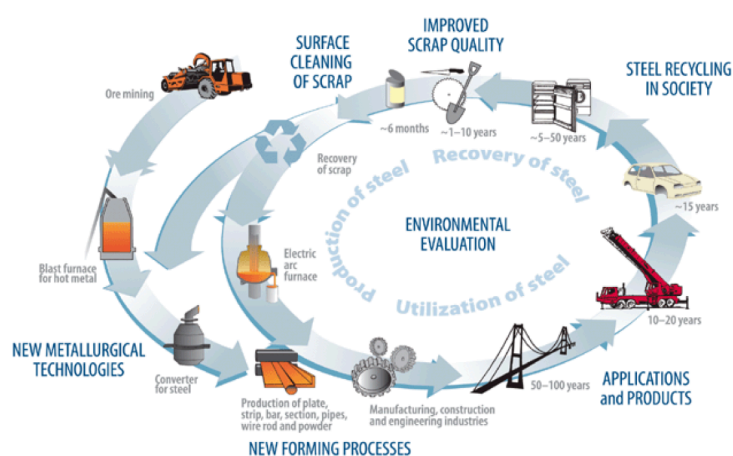


Figura 4.1 – Metodologia de ACV “*Cradle to cradle*” (sustainable-steel@, 2015).

Este tipo de análise possibilita avaliar e implementar soluções de melhoria ambiental. Identifica e quantifica a utilização de materiais, as necessidades energéticas, emissões para atmosfera, água e solo ao longo do ciclo de vida do produto ou atividade. Esta abordagem permite identificar os processos e fases mais críticas na totalidade do ciclo de vida do produto, atividade ou sistema, permitindo assim melhores escolhas em toda a cadeia dos mesmos e a longo prazo.

A ACV, foi essencialmente desenvolvida por forma a conceber produtos de baixo impacto ambiental (Bribián *et al.* 2009). Como produtos, os edifícios têm um ciclo de vida razoavelmente grande, comportam mudanças ao longo do tempo, servem propósitos múltiplos, estão integrados numa vizinhança onde existe uma interação mútua, os materiais de construção são geralmente compósitos, o consumo de energia e recursos depende muito do comportamento dos seus utilizadores e dos serviços, etc. Estas particularidades fazem com que realizar uma ACV nestes produtos não seja uma tarefa tão linear ou simples.

A avaliação dos impactos ambientais representa uma mais valia no suporte aos processos de decisão durante as fases de projeto, principalmente quando se tem como objectivo pensar os

impactes ambientais associados ao ciclo de vida das edificações. Isto acontece principalmente em grandes empreendimentos, em que a pegada ambiental é acentuada (Malmqvist *et al.* 2011).

Nesta dissertação, o critério para avaliação do ciclo de vida são as necessidades energéticas dos edifícios, sendo quantificadas dois tipos de energia: a energia incorporada e a energia operacional.

4.2.2 ACV no Sector da Construção

Neste âmbito, por forma a realizar uma ACV, devido à grande quantidade de informação necessária, é recomendado a utilização de softwares apropriados. Este estudo de um edifício pode ser feito com uma ferramenta de ACV generalista, mas por forma a otimizar tempo e resultados, foram desenvolvidas ferramentas dedicadas a esta análise no âmbito do sector da construção (Bribián *et al.* 2009). Algumas destas ferramentas são apresentadas na Figura 4.2.

ECO-QUANTUM	www.ecoquantum.nl
LEGEP	www.legep.de
EQUER	www.izuba.fr
ATHENA	www.athenaSMI.ca
OGIP	www.ogip.ch/
ECO-SOFT	www.ibo.at/de/ecosoft.htm
ENVEST 2.0	envestv2.bre.co.uk
BECOST	www.vtt.fi/rte/esitteet/ymparisto/lcahouse.html
BEES	www.bfrl.nist.gov/oa/software/bees.html
GREENCALC	www.greencalc.com
ECOEFFECT	www.ecoeffect.se
ECO-QUANTUM	www.ecoquantum.nl
LEGEP	www.legep.de
EQUER	www.izuba.fr

Figura 4.2 – Ferramentas específicas de ACV em edifícios (Bribián *et al.* 2009).

Em relação a estes softwares, é feita uma distinção entre ferramentas de ACV desenvolvidas com o objetivo de avaliar os materiais e elementos construtivos de um edifício (BEES, por exemplo) e metodologias para avaliar o edifício como um todo (Athena, Invest, EcoQuantum, por exemplo). Estas últimas são geralmente mais complexas, pela forma holística como fazem a análise, analisando o desempenho global resultante da interação entre os vários componentes individuais, assim como a interação com os seus ocupantes e o ambiente circundante. A seleção da ferramenta mais adequada depende dos objetivos ambientais específicos do projeto.

De acordo com Bribián *et al.* (2009), a aplicação de ACV no geral e em particular no sector da construção acarreta grandes vantagens mas também desvantagens que dificultam a sua aplicação.

Como vantagens, podem-se destacar: i) benefício em termos de marketing no mercado imobiliário; ii) rotulagem ambiental de edifícios; iii) cumprimento, avaliação e desenvolvimento de metas ambientais para edifícios; iv) atribuição de benefícios económicos orientados a esforços no sentido da sustentabilidade; v) optimização de soluções construtivas.

De acordo com os mesmo autores, esta análise apresenta como barreiras: i) avaliação de alta complexidade e custo monetário; ii) baixa ligação com certificados energéticos; iii) dificuldade em compreender e aplicar os resultados da ACV, requerendo uma ampla gama de conhecimentos específicos; iv) demasiadas ferramentas apresentando resultados diferentes, pondo em causa a precisão da análise; v) pobre cooperação entre entidades que desenvolvem e utilizam as ferramentas de cálculo; vi) alguns pressupostos tidos nesta avaliação podem ser subjetivas dando aso a resultados diferenciados de utilizador para utilizador.

Metodologias ACV que integram no seu processo a cooperação de diversas ferramentas de cálculo com a modelação do próprio edifício através de softwares BIM apresentam um maior potencial na apreciação da sustentabilidade dos edifícios (Gervásio *et al.* 2014). Este trabalho conjunto esbarra porém em algumas dificuldades como a pobre inter-operacionalidade entre ferramentas, necessidade de um formato de dados comum e a necessidade de um vasto conjunto de informações relativas ao edifício em estudo (Gervásio *et al.* 2014). É uma abordagem caracterizada por consumir uma enorme quantidade de tempo e recursos uma vez que existe a necessidade de modelar o edifício e garantir o funcionamento integrado das várias ferramentas, que por sua vez exigem já exigem uma vasta panóplia de informação e conhecimentos técnicos específicos para as operar.

4.2.3 ACV em Fases Iniciais de Projeto

No que toca à avaliação da sustentabilidade em fases iniciais do projeto de edifícios, existem entraves relevantes que dificultam substancialmente esta análise. Uma ACV, baseia-se em informações relativas ao inventário dos materiais de construção e opções construtivas utilizadas no empreendimento em estudo. Este tipo de informações, em fases iniciais de projeto não está completamente definida ou pode nem existir criando uma carência de informação necessária à operação das diversas ferramentas de cálculo, conduzindo assim a resultados pouco satisfatórios.

Aproximações simplificadas no âmbito deste tipo de avaliação, em fases iniciais de projeto, evitando uma ACV completa, foram desenvolvidas por Luttrupp e Lagerstedt (apud Gervásio *et al.* 2006) e Ostad-Ahmad-Ghorabi (apud Gervásio *et al.* 2008) baseadas em regras básicas e na metodologia de decisão relativa ao Ecodesign, respetivamente.

Embora as metodologias simplificadas sejam menos complexas e exigentes para o utilizador, uma avaliação coesa e conclusiva requer uma análise de ciclo de vida completa via software de ACV (Gervásio *et al.* 2014).

Concluindo, a avaliação da sustentabilidade de edifícios é composta por métodos de análise bastante morosos e complexos, especialmente uma ACV completa, requerem conhecimentos específicos por forma a lidar com a complexidade destas metodologias e fornecem resultados insatisfatórios quando a informação que requerem é escassa.

Dado este panorama, é de vital necessidade a existência de ferramentas que possibilitem uma análise simples e eficiente quer das necessidades energéticas dos edifícios quer dos seus impactes ambientais, em fases iniciais do seu desenvolvimento, onde o leque de opções construtivas ronda o seu máximo tendo em vista a optimização das soluções construtivas.

Apesar dos esforços desenvolvidos pela União Europeia no sentido de promover a eficiência energética, nomeadamente através da diretiva 2010/31/EU (2010), as exigências em relação à avaliação da sustentabilidade dos edifícios e sua integração na certificação energética ainda são diminutas. Esta falha de conexão pode conduzir ao uso de materiais e processos construtivos que permitam de facto uma grande eficiência energética na fase operacional mas com um impacto ambiental acentuado em virtude da possível utilização de materiais e processos de construção com uma vertente pouco ecológica. Por forma a realizar uma avaliação completa e integrada do desempenho ambiental e energético dos empreendimentos, este tipo de análise não deve ser negligenciado.

Uma forma de ultrapassar esta problemática será, por exemplo, através de análises multicritério, onde tanto os impactes ambientais resultantes da fase operacional como os associados à energia incorporada são equacionados. Através deste estudo é possível encontrar soluções e elementos construtivos que minimizem os impactes ambientais durante a totalidade do ciclo de vida dos empreendimentos e não só durante a sua fase operacional.

5 FERRAMENTA DE CÁLCULO SB_STEEL

Por forma a cumprir os objectivos desta dissertação, será utilizada uma nova ferramenta numérica, datada de 2013, que permite efetuar uma estimativa da energia operacional e impactes ambientais do ciclo de vida de uma edificação, em fases iniciais do seu projeto, onde a informação necessária a tais avaliações é escassa. Esta ferramenta, que se encontra disponível gratuitamente online, surge enquadrada com o projeto Europeu SB_Steel: *Sustainable Building Project in Steel*.

Este software permite estimar a energia necessária à climatização de edifícios e produção de água quente sanitária, tendo em consideração os parâmetros que mais influenciam o comportamento térmico e eficiência energética dos edifícios: i) a geometria do edifício e sua orientação; ii) o clima; iii) o tipo de utilização do edifício; iv) as características da sua envolvente; v) sistemas mecânicos existentes; vi) ventilação; vii) dispositivos de proteção solar.

Embora tenha sido desenvolvida na esfera de influência dos edifícios em aço, pode ser utilizada para qualquer tipo de edifício (Gervásio *et al.* 2014).

O âmbito de aplicação desta metodologia recai na *Concept Design* e *Preliminary Design*, podendo o utilizador optar em qual delas pretende realizar a análise. Relativamente aos dados de entrada necessários, alguns deles variam consoante a fase escolhida para realizar a análise (e consequentemente da quantidade de informação disponível). Na *Preliminary Design*, comparativamente à *Concept Design*, são requeridas informações mais detalhadas relativas à geometria do edifício. Os resultados obtidos nestas duas fases apresentam uma boa concordância entre si, embora sejam mais precisos na *Preliminary Design* (Gervásio *et al.* 2014), como seria expectável.

Por forma a ultrapassar a limitação da falta de informação característica das fases iniciais de concepção e atingir os objetivos pretendidos, esta nova metodologia recorre à utilização de macro-componentes, que consistem num conjunto de soluções construtivas pré-definidas dos principais elementos construtivos de um edifício.

As macro-componentes contêm as informações necessárias quer à análise do desempenho energético do globalidade do edifício quer os dados indispensáveis à realização de uma ACV.

A informação providenciada por cada macro-componente é ilustrada na Figura 5.1. Neste caso, uma assemblagem de macro-componentes para uma laje de cobertura é definida pelas seguintes macro-componentes: i) uma macro-componente para o acabamento do teto (C2050), ii) uma macro-componente para sistema estrutural da cobertura (B1020.1) e iii) uma macro-componente para o revestimento da cobertura (B1020.2).

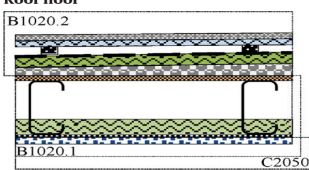
	Macro-component reference	Material layers	Thickness [mm] Density [kg/m ²]	U-value [W/m ² K]	κ_m [J/m ² K]
	B1020.20 Roof deck, slabs and sheathing	Cement slab XPS slab Air cavity Waterproof film XPS	30 mm 30 mm 30 mm 1.63 kg/m ² 0 mm	0.373 ^a	13.435
	B1020.10 Roof structural frame	Concrete screed OSB	40 mm 18 mm		
	C2050 Ceiling finishes	Air cavity Rock wool Light weight steel Gypsum board	80 mm 120 mm 17 kg/m ² 15 mm		
		Painting	0.125 kg/m ²		

Figura 5.1 – Assemblagem de macro-componentes relativas a uma laje de cobertura (Gervásio *et al.* 2014).

A avaliação efetuada através desta ferramenta fornece uma abordagem que integra características de metodologias mais complexas como a modelação de edifícios ou ACV, quer para a caracterização do perfil ambiental do edifício quer para a quantificação das suas necessidades energéticas (Gervásio *et al.* 2014), sem que as mesmas tenham de ser realizadas diretamente pelo utilizador. Tudo isto através de um interface simples e intuitiva.

5.1 Avaliação dos Impactes Ambientais

Nesta metodologia, a avaliação da sustentabilidade é levada a cabo de acordo com as normas Europeias EN 15804 (2011) e EN 15978 (2009).

O método de cálculo presente nesta ferramenta proporciona uma avaliação baseada num sistema modular exposto na norma EN 15978 (2009), traduzindo o impacto ambiental das várias etapas do ciclo de vida da edificação.

Como é possível constatar na Figura 5.2, a fase de produção dos materiais inclui os módulos A1 a A3, a fase de construção inclui os módulos A4 a A5, a fase operacional B1 a B7 (onde o módulo B6 corresponde à energia operacional), os módulos relativos ao fim de vida C1 a C4, por fim, o módulo D, que inclui os benefícios da reciclagem e reutilização dos materiais. Este módulo vai para além dos limites do sistema (sustainable-steel@, 2015), sendo vantajoso

inclui-lo dependendo do empreendimento em causa. Caso se esteja a analisar os impactes do ciclo de vida de um edifício em aço, devido a total reciclabilidade deste material, é de todo vantajoso que este módulo seja considerado, contribuindo para reduzir a totalidade dos impactes ambientais, uma vez que nesta soma é contabilizado como uma parcela negativa.

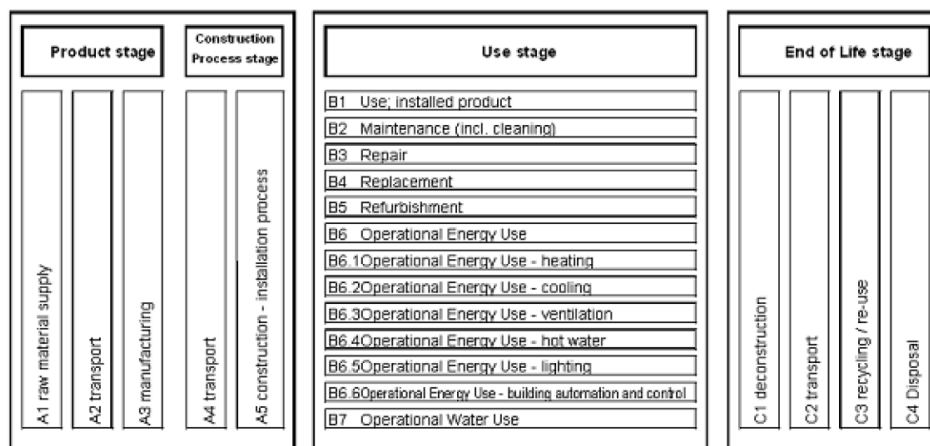


Figura 5.2 – Módulos relativos às diferentes fases do ciclo de vida do edifício (PrEN 15978).

Como referido anteriormente, esta metodologia de cálculo baseia-se numa abordagem por macro-componentes, que por sua vez já incluem informações sobre o ciclo de vida das soluções construtivas que representam. O perfil do ciclo de vida de cada macro-componente compreende informação relativa a uma análise “Cradle-to-grave” mais reciclagem (módulos A a D) (Gervásio *et al.* 2014). Durante a utilização desta ferramenta, à medida que as várias macro-componentes são selecionados, uma ACV do edifício vai decorrendo simultaneamente permitindo assim ao utilizador dispensar uma análise completa deste género que já se concluiu morosa e complexa. As categorias ambientais selecionadas para descrever os impactes ambientais dos edifícios estão indicadas na Figura 5.3 e correspondem às categorias ambientais recomendadas nas normas Europeias relativas à avaliação do desempenho ambiental de edifícios (EN 15804 e EN 15978).

Numa análise levada a cabo por Gervásio *et al.* (2014) foi avaliado o grau de precisão dos resultados obtidos utilizando macro-componentes quando comparada com uma ACV completa. O objecto de estudo é um edifício residencial de dois andares, unifamiliar, localizado em Coimbra, tendo uma vida útil prevista 50 anos. A conclusão deste estudo mostra uma boa concordância entre as duas metodologias sendo o grau de imprecisão desta ferramenta simplificada manifestamente baixo, na maioria das categorias ambientais é mesmo negligenciável.

Impact category	Characterization factor	Unit
Global Warming	Global warming potential (GWP)	kg CO ₂ eq.
Ozone Depletion	Depletion potential of the stratospheric ozone layer (ODP)	kg R11 Eq.
Acidification for soil and water	Acidification potential of soil and water (AP)	Kg SO ₂ eq.
Eutrophication	Eutrophication potential (EP)	kg (PO ₄) ⁻³ eq.
Photochemical ozone creation	Formation potential of tropospheric ozone (POPC)	kg C ₂ H ₄ eq.
Depletion of abiotic resource – elements	Abiotic depletion potential (ADP – E) for non-fossil resources	kg Sb eq.
Depletion of abiotic resources – fossil fuels	Abiotic depletion potential (ADP – F) for fossil resources	MJ

Figura 5.3 – Parâmetros representantes dos impactos ambientais (Gervásio *et al.* 2014).

5.2 Avaliação da Energia Operacional

A estimativa da energia operacional é avaliada em dois módulos, respeitantes às necessidades energéticas orientadas à climatização (aquecimento e arrefecimento) e produção de água quente sanitária, sendo que estas parcelas constituem a principal fração da energia consumida na fase operacional dos edifícios. O algoritmo implementado nesta ferramenta para previsão da energia operacional do edifício é baseado no método mensal em regime quase-permanente descrito na norma ISO 13790.

Por forma a determinar a contribuição de cada termo envolvido nos cálculos térmicos, foi implementado no algoritmo da ferramenta as indicações e métodos de cálculo considerados em várias normas para o aquecimento e arrefecimento de espaços, sendo a ISO 13790 a mais utilizada para este efeito.

Sob a orientação das normas ISO 13790 (2008) e EN 15316-3-1 (2008) desenvolveu-se o algoritmo que permite calcular as necessidades energéticas dos edifícios dedicadas à climatização e produção de água quente sanitária, respetivamente (Santos *et al.* 2014).

Mesmo efetuando a análise na *Concept Design*, onde a informação mais rareia, comparativamente a métodos dinâmicos avançados esta aproximação apresenta muito bons resultados, com erros inferiores a 10% (Santos *et al.* 2014). De salvaguardar que esta baixa margem de erro resulta do facto do algoritmo da presente ferramenta ter sido previamente calibrado com as características do edifício em estudo, através de fatores de calibração contemplados na ISO 13790 (2008). Espera-se portanto uma margem de erro superior aquando a utilização desta metodologia sem antes proceder à calibração da mesma para um caso de estudo genérico, através de fatores corretivos que dependem da zona climática e tipo de utilização e características do edifício.

Dado que o objetivo é permitir comparar diferentes soluções e opções construtivas em fases iniciais de projeto, esta metodologia fornece uma maneira simples e sucinta de classificação e comparação das diversas alternativas, permitindo começar desde cedo a promover a eficiência energética e ecológica no empreendimento.

5.3 Limitações da Avaliação por Macro-componentes

A avaliação por macro-componentes, tratando-se de uma metodologia aproximada, apresenta limitações e simplificações, das quais se podem nomear: i) os módulos A5, B1 e B7 não são abrangidos. O módulo B7, quantificação do consumo de água, não é considerado uma vez que não depende das opções construtivas. Tanto o módulo A5 como o B1, se revelam de importância negligenciável para a quantificação em causa devido à sua pequena ordem grandeza (Gervásio *et al.* 2014) ii) ausência de macro-componentes representativas das fundações do edifício, facto que poderá ser justificado na medida em que no processo de comparação de diversas soluções construtivas, as fundações podem ser comuns, sendo irrelevantes para a comparação; iii) bases de dados de macro-componentes limitadas e de código fechado, sendo impossível para o utilizador introduzir novas macro-componentes mais adequadas às suas soluções, por outro lado, esta possibilidade conduziria a uma ferramenta mais complexa, perdendo em simplicidade; iv) impossibilidade de calibração do algoritmo para o edifício em estudo, uma vez que estes fatores corretivos não fazem parte dos dados de entrada da ferramenta.

Apesar das limitações da ferramenta, simplificações introduzidas e do facto de estar a efetuar um estudo caracterizado por uma grande ausência de informação relativamente ao empreendimento, é mostrado por (Gervásio *et al.* 2014) e (Santos *et al.* 2014) que as orientações fornecidas pela metodologia são adequadas e revelam uma boa concordância com métodos mais avançados e precisos de análise.

Devido à lacuna relativa às ferramentas de avaliação das soluções construtivas dos edifícios em fases iniciais de projeto, o mesmo era guiado pela experiência dos profissionais envolvidos (Gervásio *et al.* 2014). Através desta metodologia simplificada, o utilizador pode quantificar, embora de forma aproximada, quer as necessidades de energia operacional quer os impactes ambientais do edifício em fases iniciais do seu projeto, evitando diretamente métodos mais rigorosos e com fracos resultados nestas fases iniciais.

Este tipo de informação, obtida em fases iniciais do projeto do empreendimento, permite apoiar tomadas de decisão envolvidas no seu projeto, com o objetivo de favorecer a eficiência energética e sustentabilidade do produto final.

6 ESTUDO PARAMÉTRICO

6.1 Caso de Estudo

Uma vez que o campo de ação da ferramenta numérica utilizada no âmbito desta dissertação se encerra em fases iniciais do projeto de edifícios, advém daqui uma acrescida dificuldade em encontrar um caso de estudo real para ser alvo de análise. Por forma a ultrapassar esta limitação, entre outras, foi adaptado para caso de estudo um edifício residencial uni-familiar localizado em Aveiro, já alvo de estudos anteriores do ponto de vista do desempenho energético como o levado a cabo por (Gervásio *et al.* 2010). Sobre este recaíram algumas alterações ao nível das soluções construtivas para bem do estudo paramétrico assim como na sua localização.

O objeto de estudo considerado consta assim numa moradia uni-familiar, de dois andares acima do solo e com uma vida útil de 50 anos. Considerou-se o empreendimento localizado em Coimbra.

Optou-se por realizar o estudo na *Concept Design*, onde se considera que ainda não estão disponíveis informações consistentes sobre o edifício. Nesta fase, a ferramenta numérica apenas permite que se adote uma geometria em planta quadrangular ou retangular, assim sendo, tomou-se como geometria do edifício uma forma paralelepípedica de dimensões 12m x 14m x 7m, resultando numa área bruta de 336 m². A fachada principal, representando uma das duas maiores dimensões, encontra-se orientada a Sul.

Relativamente à área de envidraçados, um dos dados de entrada do software, considerou-se o mesmo rácio Área Envidraçada – Área de Parede do edifício adaptado, sendo também estes os valores por defeito que figuram no software. O referido rácio traduz-se em: 20% na fachada orientada a Norte; 25% a Sul; 10% a Este; 8% a Oeste.

O Quadro 6.1 expõe os dispositivos de proteção solar, piso térreo e envidraçados considerados no edifício a estudar.

Quadro 6.1 – Tipo de dispositivos de proteção solar, piso térreo e envidraçados do edifício em estudo (cenário de referência).

Dispositivos de proteção solar	
Portada de madeira	
Cor clara	$g_{\text{inc}} = 0,03$
Piso térreo	
Laje apoiada no solo	
Envidraçados	
Duplo	
$U = 2,9 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$	$g_{\perp,vi} = 0,78$

Relativamente ao valor da taxa de renovação horária, abordada no Quadro 6.2, foram considerados para a estação de aquecimento e arrefecimento os valores mínimos contemplados no regulamento português de desempenho energético dos edifícios de habitação (REH) (Decreto-Lei 118/ 2013), para cada estação.

Quadro 6.2 – Taxa horária de renovação de ar do edifício em estudo (cenário de referência), estação de aquecimento e estação de arrefecimento.

	Renovações horárias (Rph)
Estação de aquecimento	0,4
Estação de arrefecimento	0,6

O edifício em estudo é dotado de aparelhos mecânicos de climatização, dos quais o valor do “set-point” na estação de aquecimento e arrefecimento consta no Quadro 6.3. A escolha destes valores foi apoiada no mesmo regulamento, sendo adotadas as temperaturas interiores de conforto nele expostas, para a estação de aquecimento e arrefecimento.

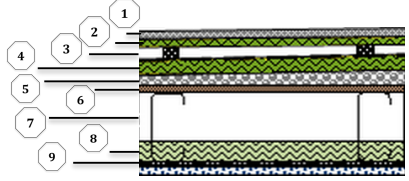
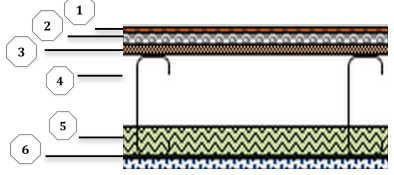
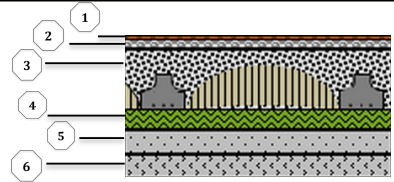
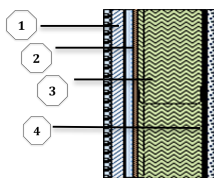
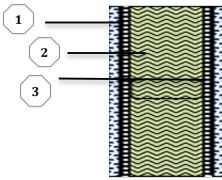
Quadro 6.3 – “Set-point” dos aparelhos mecânicos de climatização do edifício em estudo (cenário de referência), estação de aquecimento e estação de arrefecimento.

	Set point (°C)
Estação de aquecimento	18
Estação de arrefecimento	25

Foi ao nível da escolha das macro-componentes representantes dos principais elementos construtivos do edifício, expostas no Quadro 6.4, que o cenário de referência adotado mais se afasta daquele que lhe deu origem. Afim de fazer a ponte com o REH (Decreto-Lei 118/ 2013), procedeu-se a uma escolha de macro-componentes que conduzissem a um valor do coeficiente de transmissão térmica superficial (U) igual ou idêntico aos valores de referência

do mesmo regulamento. Estes valores são: $0,30 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ e $0,35 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, respetivamente para elementos horizontais e verticais opacos em contacto com o exterior. Relativamente a elementos em contacto com o solo, o regulamento tem como valor de transmissão térmica superficial de referência $0,50 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

Quadro 6.4 – Coeficientes de transmissão térmica superficiais dos principais elementos construtivos do edifício em estudo (cenário de referência).

Componente construtivo	Material	Espessura (mm)	U ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)
Cobertura 	1 - Laje de betão 2 - XPS 3 - Ar 4 - XPS 5 - Camada de regularização 6 - OSB 7 - Ar 8 - Lã de rocha (LR) 9 - Gesso cartonado	1 - 30 6 - 11 2 - 50 7 - 90 3 - 50 8 - 110 4 - 0 5 - 0	0,30
Pavimento interior 	1 - Parquet 2 - Camada de regularização 3 - OSB 4 - Ar 5 - Lã de rocha 6 - Gesso cartonado	1 - 10 6 - 15 2 - 100 3 - 18 4 - 90 5 - 110	0,49
Piso térreo 	1 - Parquet 2 - Camada de regularização 3 - Laje de betão com vigotas pré fabricadas 4 - XPS 5 - Areia 6 - Gravelha	1 - 10 6 - 350 2 - 15 3 - 180 4 - 50 5 - 30	0,49
Parede exterior 	1 - EPS 2 - OSB Ar 3 - Lã de rocha 4 - Gesso cartonado	1 - 30 2 - 15 40 3 - 110 4 - 15	0,35
Parede interior 	1 - Gesso cartonado Ar 2 - Lã de rocha 3 - Gesso cartonado	1 - 15 20 2 - 70 3 - 15	0,79

No que toca aos restantes dados de entrada relevantes pode-se referir que: i) estrutura do edifício é caracterizada pelo uso de perfis metálicos enformados a frio, construção em LSF; ii) a ventilação processa-se de forma natural; iii) não se considerou o contributo de energias renováveis; iv) o edifício apresenta cor clara; v) caixilharias das janelas em PVC.

Os Quadros 6.1 a 6.4 listam assim as características do edifício em estudo, considerado como caso de referência (cenário 0), correspondentes aos parâmetros em análise no estudo paramétrico.

6.2 Objetivos

O caso de estudo aqui presente serve para exemplificar a metodologia de cálculo e objetivos contemplados na ferramenta numérica exposta no capítulo anterior, apresentando os dados de entrada necessários à sua operação assim como os dados de saída considerados mais relevantes no âmbito desta dissertação.

Por forma a analisar a influência de certos parâmetros no desempenho energético do edifício em estudo, durante a estação de aquecimento e arrefecimento, foi levado a cabo um estudo paramétrico, considerando um conjunto de parâmetros e cenários mais relevantes para o efeito.

Foram selecionados os seguintes aspetos: i) transferência de calor através dos envidraçados; ii) transferência de calor através dos elementos opacos (piso térreo, cobertura e paredes); iii) ventilação. Consequentemente, os seguintes parâmetros foram considerados: i) isolamento térmico (elementos opacos); ii) ventilação; iii) envidraçados; iv) “*set-point*” de aquecimento e arrefecimento de aparelhos mecânicos de climatização; v) dispositivos de proteção solar; vi) tipo de piso térreo.

Antes de se passar à apresentação dos valores para os diferentes parâmetros em análise convém clarificar que este estudo foi realizado no âmbito da região climática onde Coimbra se insere pelo que as conclusões dele retiradas encontram-se também nesta esfera de influência. O efeito que os diversos parâmetros em análise têm no comportamento térmico dos edifícios varia não só de zona climática para zona climática mas também dentro da mesma. Por exemplo, o efeito benéfico de uma alta taxa de isolamento térmico num edifício localizado numa zona climática mais fria torna-se numa desvantagem se aplicado num edifício que se encontre numa zona climática com características opostas. Além disso, mesmo para edifícios contíguos, as soluções construtivas que optimizam o desempenho energético podem diferir completamente de um para o outro, basta que para isso tenham diferentes áreas envidraçadas, por exemplo.

Concluindo, escolher soluções construtivas e elementos que optimizem a eficácia energética de um edifício não é uma tarefa linear, cada edifício é um caso que necessita de análise individual afim de estudar a influência e as inter-relações entre todos os fatores envolvidos no seu desempenho energético.

6.2.1 Parâmetros e Cenários

O seguinte exposto tem como objetivo a apresentação dos parâmetros e cenários em estudo bem como uma sucinta justificação da sua escolha. O Quadro 6.5 apresenta de forma resumida todos os cenários e parâmetros alvos de análise assim como a sua breve descrição, em que o cenário 0 corresponde ao cenário de referência (Quadros 6.1 a 6.4).

Quadro 6.5 – Quadro resumo dos diferentes cenários e parâmetros em análise.

Parâmetros	Cenários	Descrição
Referência	Cenário 0	Cenário de Referência: Edifício em estudo
1- Isolamento térmico	Cenário 0 Cenário 1 Cenário 2 Cenário 3 Cenário 4 Cenário 5 Cenário 6 Cenário 7 Cenário 8	Isolamento térmico do edifício em estudo Diminuição generalizada do isolamento térmico Aumento generalizado do isolamento térmico Diminuição apenas do isolamento térmico da cobertura Aumento apenas do isolamento térmico da cobertura Diminuição apenas do isolamento térmico do pavimento térreo Aumento apenas do isolamento térmico do pavimento térreo Diminuição apenas do isolamento térmico das paredes exteriores Aumento apenas do isolamento térmico das paredes exteriores
2- Ventilação	Cenário 0 Cenário 9 Cenário 10	0,4 Rph - Estação de aquecimento/ 0,6 Rph - Estação de arrefecimento 0,8 Rph - Estação de aquecimento/ 1,2 Rph - Estação de arrefecimento 1,2 Rph - Estação de aquecimento/ 1,8 Rph - Estação de arrefecimento
3- Envidraçados	Cenário 0 Cenário 11 Cenário 12 Cenário 13 Cenário 14 Cenário 15 Cenário 16	Vidro duplo Vidro simples Vidro duplo de baixa emissividade 1 Vidro duplo de baixa emissividade 2 Vidro duplo de baixa emissividade 3 Vidro triplo Vidro triplo de baixa emissividade
4- Set point	Cenário 0 Cenário 17	18 °C - Estação de aquecimento/ 25 °C - Estação de arrefecimento 20 °C - Estação de aquecimento/ 25 °C - Estação de arrefecimento
5- Dispositivos de proteção solar	Cenário 0 Cenário 18 Cenário 19 Cenário 20 Cenário 21 Cenário 22 Cenário 23 Cenário 24	Proteção exterior opaca (menor g_{Tve}) Proteção exterior não opaca (menor g_{Tve}) Proteção interior opaca (menor g_{Tve}) Proteção interior não opaca (menor g_{Tve}) Proteção exterior opaca (maior g_{Tve}) Proteção exterior não opaca (maior g_{Tve}) Proteção interior opaca (maior g_{Tve}) Proteção interior não opaca (maior g_{Tve})
6- Tipo de piso térreo	Cenário 0 Cenário 25 Cenário 26	Laje apoiada no solo Laje suspensa Cave

Parâmetro 1 - Isolamento térmico dos elementos opacos da envolvente exterior

A envolvente exterior é a fronteira que separa o espaço interior, normalmente climatizado, de ambientes exteriores. As propriedades térmicas dos elementos opacos desta envolvente são de extrema importância no desempenho térmico global do edifício uma vez que, tanto na estação

de aquecimento como na de arrefecimento as trocas de calor entre o exterior do edifício e o seu interior, através destes elementos, condicionam fortemente o desempenho energético do mesmo.

No Quadro 6.9 estão expostos os diferentes cenários adotados relativamente a este parâmetro. Note-se que o REH (Decreto-Lei 118/ 2013) não estabelece limites mínimos para o valor de U destes elementos mas impõe limites máximos, os quais, para a zona climática onde a cidade de Coimbra se insere, tomam os valores de $1,0 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. e $1,60 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. para os elementos horizontais e verticais, respetivamente.

Posto isto, no cenário 1, correspondente a uma diminuição generalizada do isolamento térmico dos elementos exteriores opacos, teve-se como objetivo atingir estes valores. Objetivo este que se atingiu com sucesso para a cobertura (elemento horizontal) mas não para as paredes exteriores (elementos verticais), o qual ficou aquém mesmo para quantidades reduzidas de isolamento térmico. Por sua vez no cenário 2 foi simulado um aumento generalizado da quantidade de isolamento térmico destes elementos. O Quadro 6.9 expõe as alterações, em relação ao cenário de referência, das diferentes soluções construtivas simuladas por cada cenário, relativos a este parâmetro. Neste quadro apenas estão presentes as quantidades modificadas em relação ao cenário 0, sendo que as restantes se mantêm iguais.

Os cenários 3 a 8 surgem com a finalidade de auscultar isoladamente a importância da variação da taxa de isolamento térmico de cada elemento opaco da envolvente. Para isso, nestes cenários é analisado de forma isolada o que no cenário 1 e 2 foi analisado em simultâneo.

Por forma a avaliar a importância de cada elemento construtivo no desempenho térmico do edifício, o Quadro 6.9 também apresenta o valor aproximado de U para cada elemento e cenário. Este valor é fornecido diretamente pela ferramenta de cálculo utilizada, como se pode observar na Figura 5.1.

Repare-se, ainda no Quadro 6.9, na variação do valor de U para as várias taxas de isolamento térmico, a qual é significativamente mais sensível à retirada de isolamento térmico do que ao seu aumento. Tomando o pavimento térreo com exemplo, verifica-se que quando se diminui em 50 mm (cenário 5) o valor do isolamento térmico em relação ao cenário de referência (cenário 0), o valor de U sofre um aumento de $1.3 \text{ W/ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$; por sua vez, um aumento de igual espessura (cenário 6) conduz a uma redução no valor de U de apenas $0.20 \text{ W/ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Conclui-se que devido a este decréscimo assintótico do valor de U , mesmo para climas mais frios, uma grande quantidade de isolamento térmico nos elementos opacos pode não ser a melhor opção numa análise custo-benefício. É expectável que os valores das perdas e ganhos

energéticos do edifício sejam igualmente mais sensíveis à diminuição da taxa de isolamento térmico do que ao seu aumento

Na abordagem deste parâmetro e dos seguintes não será apresentado o cenário de referência (cenário 0) uma vez que esta informação já consta nos Quadros 6.1 a 6.4.

Parâmetro 2 – Taxa horária de renovação de ar (*Rph*)

As renovações de ar, voluntárias e/ ou involuntárias, têm um peso importante nas necessidades de aquecimento e arrefecimento dos edifícios. Se por uma lado a renovação do ar interior aumenta as necessidades de aquecimento na estação de aquecimento, por outro tem um efeito completamente contrário na estação de arrefecimento, contribuindo para reduzir as necessidades energéticas direcionadas ao arrefecimento dos espaços. Há também a necessidade de assegurar caudais de ar que garantam a qualidade do ar interior e diminuam o risco de aparecimento de patologias nos edifícios.

Como se pode observar no Quadro 6.6 o efeito da renovação de ar é simulado através de dois cenários, os quais consistem numa duplicação (cenário 9) e triplicação (cenário 10) da taxa horária de renovação de ar simulada pelo cenário 0.

Quadro 6.6 – Cenários em estudo relativamente à ventilação.

	Cenário 9		Cenário 10	
	Estação de Aquecimento	Estação de Arrefecimento	Estação de Aquecimento	Estação de Arrefecimento
Rph	0,8	1,2	1,2	1,8

Parâmetro 3 – Envidraçados

Como habitual parte mais fraca da envolvente relativamente ao comportamento térmico do edifício, uma grande quantidade de calor é ganho ou perdido através dos envidraçados. Estes elementos, principalmente quando orientados a Sul e Oeste (hemisfério Norte) desempenham um papel determinante na eficiência energética do edifício, podendo conduzir ao sobreaquecimento na estação de arrefecimento. Podem também ser responsáveis por perdas asoerbantes de calor na estação de aquecimento, traduzidas numa grande necessidade energética orientada para a climatização.

Assim sendo, é de extrema importância definir logo em fases iniciais do projeto dos edifícios aspetos como a dimensão e orientação das aberturas envidraçadas, sombreamento ou seleção de envidraçados com adequadas propriedades térmicas e óticas, de forma fundamentada e cuidada.

No Quadro 6.11 estão presentes os cenários alvo de análise relativamente a este parâmetro, simulando uma grande variação das propriedades térmicas e óticas. Através da análise dos resultados derivados destes cenários pode concluir-se qual a influência dos diversos tipos de envidraçados no desempenho energético do edifício.

Parâmetro 4 – “*Set-point*” de aquecimento e arrefecimento

Este parâmetro surge com o propósito de analisar uma alteração que o regulamento português do desempenho térmico dos edifícios de habitação sofreu com a transição do RCCTE (Decreto-Lei nº 80/06) para o REH (Decreto-Lei 118/ 2013). Embora a temperatura de conforto interior na estação de aquecimento seja 18°C no REH, no revogado RCCTE, tomava o valor de 20°C. Através do cenário 17, Quadro 6.7, pretende-se estudar qual a influência desta diferença nos consumos energéticos previstos durante a estação de aquecimento.

Quadro 6.7 – Cenários em estudo ao relativamente ao valor do “*set-point*” dos aparelhos mecânicos de climatização.

Cenário 17		
	Estação de Aquecimento	Estação de Arrefecimento
Set Point	20	25

Parâmetro 5 – Dispositivos de proteção solar.

Um parâmetro também de grande importância no comportamento térmico dos edifícios são os dispositivos de proteção solar, principalmente na estação de arrefecimento já que na de aquecimento estes se consideram inativos durante o dia. Através da análise dos resultados que advêm dos cenários 18 a 24, expostos no Quadro 6.10, é estudada a importância destes dispositivos no controlo do calor ganho por radiação solar.

Por forma a estudar esta importância, optou-se para representar os diferentes cenários os dispositivos aos quais correspondem o máximo e o mínimo fator solar do vão envidraçado com o dispositivo de proteção ativo (g_{Tvc}), segundo o REH (Decreto-Lei 118/ 2013), nas seguintes categorias: i) exterior opaco; ii) exterior não opaco; iii) interior opaco; iv) interior não opaco.

Parâmetro 6 – Tipo de pavimento térreo

As trocas de calor com o solo também merecem destaque na análise do desempenho térmico de um edifício. Se por um lado na estação de arrefecimento as trocas de calor com o solo mais frio apresentam efeitos benéficos, por outro, tem o efeito oposto na estação de aquecimento.

Este efeito além de ser analisado nos cenários 5 e 6 é estudado também nos cenários 25 e 26, Quadro 6.8, não do ponto de vista do isolamento térmico mas sim através dos três tipos de pisos térreos contemplados na norma ISO 13790 (2008): i) laje apoiada no solo; ii) laje suspensa; iii) cave.

Quadro 6.8 – Cenários em estudo relativamente ao tipo de piso térreo.

	Cenário 25	Cenário 26
Tipo	Laje Suspensa	Cave

Quadro 6.9 – Cenários em estudo relativamente ao isolamento térmico dos elementos opacos da envolvente.

Componente Construtivo	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4		Cenário 5		Cenário 6		Cenário 7		Cenário 8	
	Elemento	Espessura (mm)	Elemento	Espessura (mm)	Elemento	Espessura (mm)	Elemento	Espessura (mm)	Elemento	Espessura (mm)	Elemento	Espessura (mm)	Elemento	Espessura (mm)	Elemento	Espessura (mm)
Cobertura	2 - XPS	0	4 - XPS	50	2 - XPS	0	4 - XPS	50	4 - XPS	0	4 - XPS	100	4 - XPS	0	1 - EPS	60
	8 - LR	25		8 - LR		25		U = 1 (W/m ² .°C)		U = 0,21 (W/m ² .°C)		U = 1,79 (W/m ² .°C)		U = 0,29 (W/m ² .°C)		
Pliso Térreo	4 - XPS	0	4 - XPS	100	4 - XPS	0	4 - XPS	0	4 - XPS	0	4 - XPS	100	4 - XPS	0	1 - EPS	60
	U = 1,79 (W/m ² .°C)	U = 0,21 (W/m ² .°C)		U = 0,29 (W/m ² .°C)		U = 1,79 (W/m ² .°C)		U = 0,29 (W/m ² .°C)		U = 1,07 (W/m ² .°C)						
Parede exterior	1 - EPS	0	1 - EPS	60	1 - EPS	0	1 - EPS	0	1 - EPS	0	1 - EPS	0	1 - EPS	0	1 - EPS	60
	3 - LR	25		U = 1,07 (W/m ² .°C)		U = 0,27 (W/m ² .°C)		U = 1,07 (W/m ² .°C)		U = 0,27 (W/m ² .°C)						

Quadro 6.10 – Cenários em estudo relativamente aos dispositivos de proteção solar.

Tipo	Cenário 18		Cenário 19		Cenário 20		Cenário 21	
	Elemento	Espessura (mm)	Elemento	Espessura (mm)	Elemento	Espessura (mm)	Elemento	Espessura (mm)
Cor	Lona Opaca (Não Opaca)	0,04	Portada Opaca (Opaca)	0,35	Cortinas Transparentes (Não Opaca)	0,39	Persiana de Réguas Metálicas (Opaca)	0,09
	Clara		Clara		Clara		Escura	
Cenário 22	Lona Muito Transparente (Não Opaca)	0,2	Portadas Opacas (Opaca)	0,58	Cenário 24	Estores de Lâminas (Não Opaca)	0,69	
	Escura			Escura				

Quadro 6.11 – Cenários em estudo relativamente aos envidraçados.

Tipo	Cenário 11		Cenário 12		Cenário 13		Cenário 14		Cenário 15		Cenário 16	
	Elemento	Emissividade	Elemento	Emissividade	Elemento	Emissividade	Elemento	Emissividade	Elemento	Emissividade	Elemento	Emissividade
U (W/m ² .°C)	5,8	0,87	Duplo de Baixa Emissividade 1	0,72	Duplo de Baixa Emissividade 2	0,67	Duplo de Baixa Emissividade 3	0,65	Tripla	0,70	Tripla de Baixa Emissividade	0,50
	1,7		1,4		1,2		2,0		0,8		0,8	

6.3 Variáveis Climáticas

O clima é um factor chave no que toca ao desempenho térmico dos edifícios e consequentemente nos consumos energéticos dos mesmos. As variáveis climáticas que mais influenciam as trocas energéticas entre o interior do edifício e o exterior são a temperatura do ar exterior, a radiação solar e o vento.

A temperatura do ar, variável indutora das trocas de calor através da envolvente do edifício, estabelece o sentido dos fluxos de calor, sentido este que difere da estação de aquecimento para a estação de arrefecimento. No primeiro caso está-se geralmente perante perdas térmicas enquanto no Verão, o fluxo de calor tem o sentido predominante exterior-interior, resultando em ganhos térmicos. Quanto maiores forem as trocas de calor entre o exterior e o interior do edifício e consequente maior afastamento da temperatura interior da temperatura de conforto, maiores serão as necessidades energéticas direccionada à climatização.

Outra variável importante no desempenho térmico dos edifícios é a radiação solar. Esta variável tem grande influência no desempenho energético de qualquer edifício. Durante a estação de aquecimento, constitui uma fonte de energia e aquecimento essencial, diminuindo as necessidades energéticas direccionadas ao aquecimento. Na estação de arrefecimento, surge a necessidade de limitar os ganhos solares uma vez que resultam no aumento da temperatura interior dos edifícios.

Por fim, o vento, com influência na ventilação natural do edifício pode promover o conforto térmico interior ou pelo contrário agravar as necessidades energéticas direccionadas à climatização, caso resulte em perdas de calor indesejadas na estação de aquecimento ou ganhos na estação de arrefecimento. Cabe aos utilizadores dos edifícios adotar as soluções de ventilação mais adequadas a cada estação e a cada altura do dia.

6.3.1 Caracterização climática de Coimbra

Em termos genéricos, as condições climáticas da cidade de Coimbra são marcadas pela influência mediterrânea, caracterizada por um Verão em que se registam temperaturas elevadas, luminosidade forte, grande insolação e carência de chuvas, por sua vez, o Inverno apresenta-se frio e relativamente chuvoso. A proximidade ao Oceano Atlântico e consequente aragem marítima tem um efeito moderador no clima, proporcionando temperaturas mais amenas em relação a regiões mais interiores de Portugal continental (PDMC, 2013)

A temperatura média anual da cidade de Coimbra é da ordem dos 16°C. As temperaturas mínimas são registadas durante os meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro (5°C a 6,5°C de média) e as máximas nos meses de Julho a Setembro (com valores médios de 27°C a 29°C). A média anual das temperaturas máximas é de 21,6°C e das mínimas 10,4°C. (PDMC, 2013)

No que toca ao período diário de insolação (de sol descoberto), Coimbra apresenta uma média anual a rondar as 6,7 horas, sendo que é nos meses de Junho a Agosto que se regista um máximo deste valor (8,6 a 9,4 horas) e um mínimo de Novembro a Fevereiro (4,1 a 5,1 horas). (PDMC, 2013)

As diferentes condições climáticas, verificadas ao longo do ano em Coimbra, permitem individualizar dois períodos climáticos bastantes distintos, tanto do ponto de vista térmico como pluviométrico, o Verão e o Inverno. Para o presente estudo é de grande importância realçar a diferenciação destes dois períodos uma vez que o desempenho energético do objeto de estudo é bastante diferenciado nestes dois períodos.

Na metodologia de cálculo exposta no capítulo anterior é adotada a classificação climática de Koppen-Geiger (Figura 6.1). No âmbito desta classificação, a cidade de Coimbra pertence à zona climática Csb. É desde já importante referir que no cálculo efetuado pela ferramenta numérica SB_Steel os dados climáticos utilizados são os que advêm desta classificação e não os de qualquer instituto de meteorologia Português ou regulamento nacional. Será agora apresentada uma breve caracterização da zona climática Csb assim como os dados climáticos mais relevantes para o desempenho energético dos edifícios adotados pela ferramenta numérica.

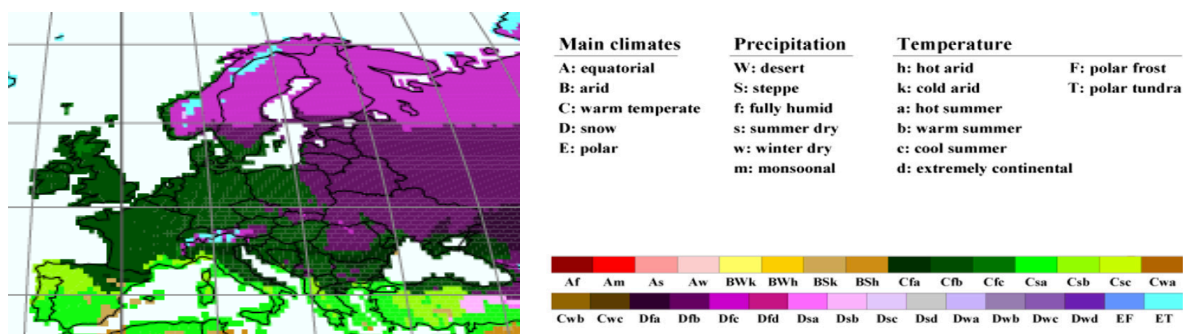


Figura 6.1 – Mapa da Europa - Classificação de Koppen-Geiger (Kottek *et al.* 2006).

Focando-se na Europa (Figura 6.1), a classificação climática depende da latitude, altitude e proximidade à costa (Gervásio *et al.* 2014).

Na classificação climática de Koppen-Geiger, cada grande zona climática é denotada por um código, constituído por letras maiúsculas e minúsculas, cuja combinação representa o tipo e subtipo de clima. A primeira letra representa a característica geral do clima (C – clima temperado ou clima temperado quente), a segunda letra denota as particularidade do regime pluviométrico (s – chuvas de Inverno) e a terceira letra representa a temperatura média mensal

do ar dos meses mais quentes (b – Verão temperado). Segundo esta classificação, Coimbra é classificada como tendo um clima temperado húmido, com Verão seco e temperado.

Na Figura 6.2 estão apresentados os valores mensais dos parâmetros mais importantes utilizados pela ferramenta de cálculo SB_Steel no cálculo do desempenho térmico dos edifícios, radiação solar incidente total e temperatura média do ar exterior.

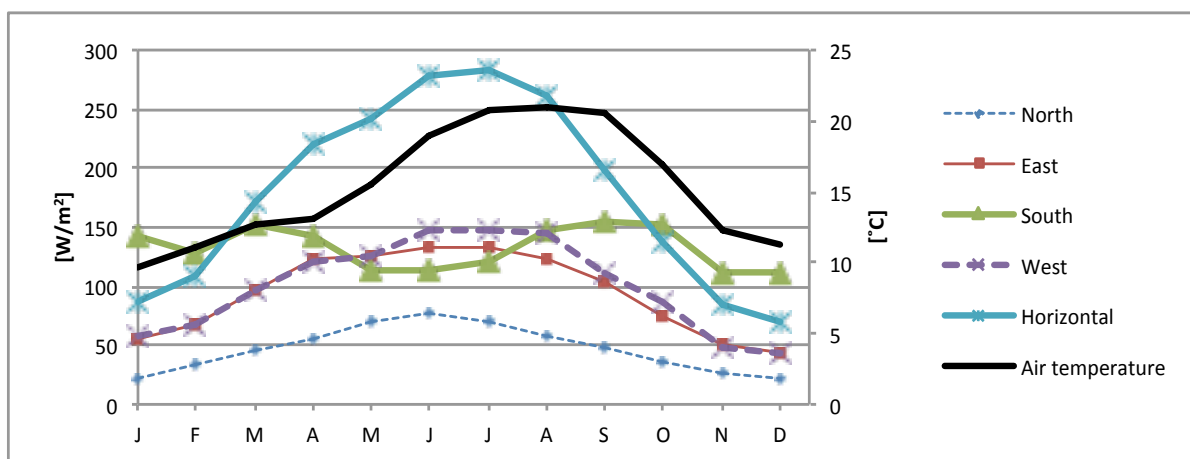


Figura 6.2 – Temperatura média e radiação solar incidente média, mensais, cidade de Coimbra (EnergyPlus@, 2015b).

Da Figura 6.2 é possível observar a clara predominância da incidência da radiação solar nas superfícies horizontais de um edifício, sendo portanto a cobertura um dos elementos opacos dos edifícios onde se poderão registar grandes ganhos de calor, principalmente nos meses compreendidos entre Março e Outubro.

Repare-se que embora os valores mensais da temperatura do ar exterior adotados pela ferramenta de cálculo SB_Steel estejam em concordância com os presentes na caracterização bioclimática presente no Plano Diretor Municipal de Coimbra, estes não coincidem, apresentando mesmo diferenças significativas.

6.4 Resultados do Estudo Paramétrico

6.4.1 Estação de Aquecimento

Nesta subsecção serão apresentados os valores das transferências de calor entre o ambiente interior climatizado e o ambiente exterior, durante a estação de aquecimento, para os diversos cenários em estudo. Através da análise da informação gráfica seguinte é possível concluir acerca da influência dos vários cenários em análise no balanço energético do caso de estudo.

Por forma a ilustrar esta influência, apresentar-se-á de seguida os valores quer das perdas energéticas do edifício por transmissão quer dos ganhos de calor provenientes da radiação solar, para os vários cenários estudados.

De referir que a duração da estação de aquecimento e arrefecimento é ditado pelo guião de cálculo exposto na norma ISO 13790 (2008) variando conforme as soluções construtivas e modos de operação simulados através dos diferentes cenários.

As necessidades energéticas relativas à produção de água quente sanitária não serão aqui abordadas uma vez que são apenas função da área interior do edifício, de acordo com a metodologia de cálculo exposta na norma ISO 13790 (2008).

Isolamento Térmico

As Figuras 6.3 e 6.4 apresentam os valores das perdas de calor por transmissão e ganhos energéticos através dos elementos opacos do edifício, respetivamente. Sabe-se que na estação de aquecimento é vantajoso reduzir as perdas energéticas e maximizar os ganhos de energia, sendo os cenários que a isso conduzam os mais favoráveis nesta estação.

Como esperado para a estação de aquecimento, dada a menor temperatura no exterior, o cenário a que corresponde uma menor taxa de isolamento térmico (cenário 1) é aquele a que correspondem maiores perdas energéticas para o exterior através de todos os três elementos, situação contrária ao cenário que simula uma maior taxa de isolamento (cenário 2).

Como referido anteriormente, o valor de U e conseqüentemente a quantidade de calor que é perdida e ganha é mais sensível à retirada de isolamento térmico do que ao seu aumento. Atente-se novamente no piso térreo, Figura 6.3, o valor de energia perdida por transmissão através deste elemento assume o valor de 991 kWh/ano para o cenário de referência (cenário 0), 1664,9 kWh/ano (+59,5 %) quando se reduz o isolamento térmico em 50 mm (cenário 1) e 710,2 kWh/ano (-28,3%) quando se acrescenta a mesma quantidade de isolamento (cenário 2).

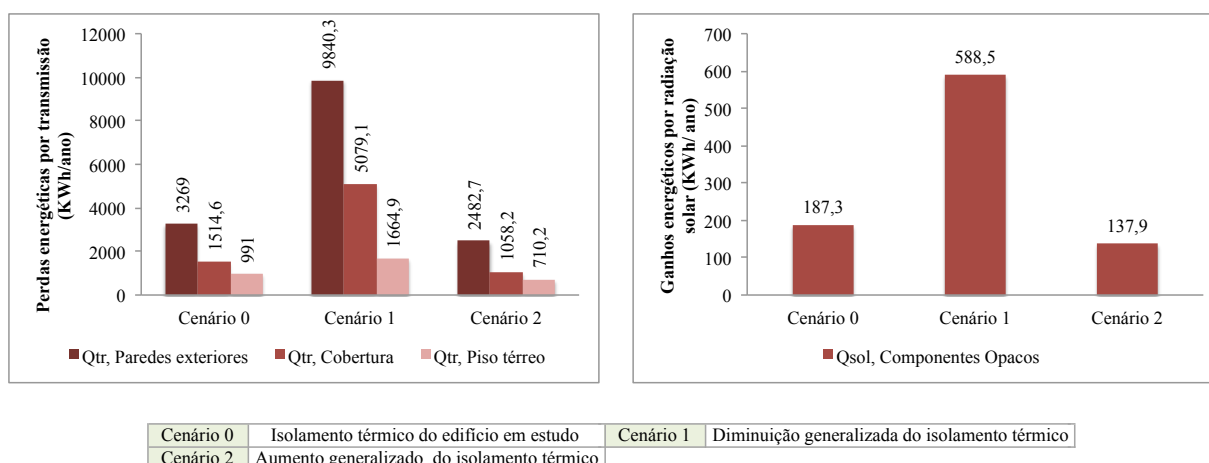


Figura 6.3 – Perdas energéticas por transmissão através dos elementos opacos, estação de aquecimento.

Figura 6.4 – Ganhos energéticos por radiação solar através dos elementos opacos, estação de aquecimento.

Como se pode constatar na Figura 6.3, é através das paredes exteriores que se registam os maiores valores de perdas de calor para o exterior. Como se pode observar no Quadro 6.4, embora não sejam os elementos construtivos com o maior valor de U , são os que geralmente apresentam maior área num edifício, resultando numa maior quantidade de calor transferido através dos mesmos.

Após as paredes exteriores, é através da cobertura que se registam valores mais altos de perdas energéticas. Sabe-se que o fluxo de ar quente dentro de um edifício segue um percurso ascendente, sendo expectável que a cobertura registre também valores significativos de perdas de calor por transmissão.

Repare-se que proporcionalmente à área opaca que o ocupa, a cobertura preenche uma área muito inferior às paredes exteriores e que o seu valor de U ($0,30 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) também é inferior ao U das paredes exteriores ($0,35 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$). Concluiu-se através da ferramenta numérica em utilização que se a cobertura fosse dotada do mesmo valor de U das paredes exteriores, a diferença entre o valor das perdas energéticas por metro quadrado através destes dois elementos, anualmente, seria quase desprezável.

Embora seja o elemento através do qual se perca menos calor, também através do piso térreo se registam perdas de energia que não devem ser negligenciadas. Estas perdas por transmissão dão-se devido ao contacto do piso térreo com o solo a uma temperatura inferior.

Na Figura 6.4 pode observar-se a totalidade dos ganhos solares através dos elementos opacos que os recebem (cobertura e paredes exteriores).

Como esperado, quanto menor for a taxa de isolamento térmico maiores serão os ganhos energéticos por radiação solar. Está-se portanto perante uma problemática no que toca a este balanço térmico: se por um lado é vantajoso diminuir as perdas energéticas, aumentando o isolamento térmico, por outro este aumento conduz a menores valores de ganhos energéticos, situação desfavorável na estação de aquecimento.

Embora exista esta antítese repara-se que os valores dos ganhos energéticos através dos elementos opacos são muito inferiores às perdas de energia através dos mesmos, pelo que na estação de aquecimento é claramente preferível ter uma maior quantidade de isolamento térmico por forma a minimizar as perdas energéticas, independentemente de isso conduzir a menores ganhos de calor. Portanto, de entre estes três cenários, o cenário 2 é claramente o mais vantajoso nesta estação.

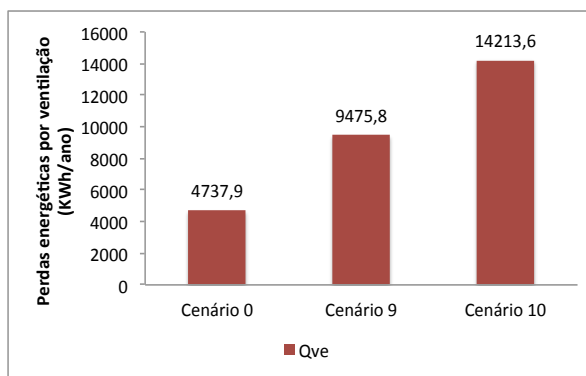
No que toca à análise dos cenários 3 a 8, estes não serão aqui ilustrados uma vez que seguem a mesma tendência dos cenários correspondentes a um aumento generalizado do isolamento térmico, quer nas perdas quer nos ganhos energéticos.

Ventilação

A Figura 6.5 mostra que à medida que se aumenta a taxa de ventilação as perdas energéticas do edifício por ventilação aumentam, como expectável.

Por forma a diminuir a energia necessária ao aquecimento do espaço interior, na estação de aquecimento há que minimizar as perdas energéticas para o exterior através da ventilação. No que toca a este parâmetro, convém portanto que a taxa de renovação de ar se mantenha o mais baixo possível, respeitando porém os limites mínimos imposto pela regulamentação em vigor ou impostos por condições/ necessidades especiais dos edifícios.

O cenário 0, traduzindo uma menor quantidade de calor perdido por ventilação, é evidentemente a situação preferível nesta estação.



Cenário 0	0,4 Rph - Estação de aquecimento	Cenário 9	0,8 Rph - Estação de aquecimento	Cenário 10	1,2 Rph - Estação de aquecimento
-----------	----------------------------------	-----------	----------------------------------	------------	----------------------------------

Figura 6.5 – Perdas energéticas por ventilação, estação de aquecimento.

Envidraçados

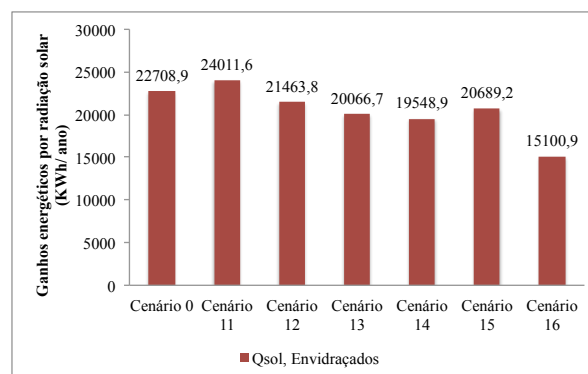
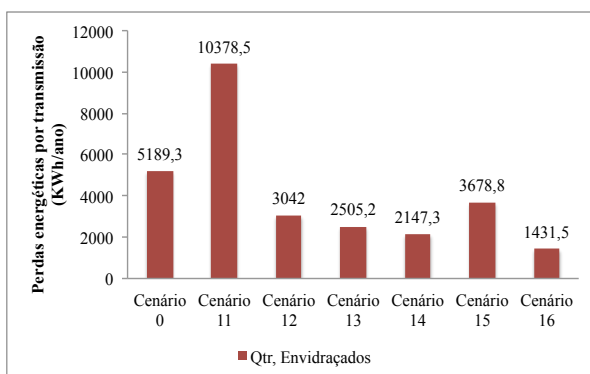
Como se referiu anteriormente, habitualmente os envidraçados constituem a parte mais fraca da envolvente exterior do ponto de vista do comportamento térmico do edifício. O seu alto valor de U , comparado com o dos elementos opacos, conduz a grandes quantidade de calor perdido através deles, pelo que o desempenho energético global do edifício é altamente dependente de uma correta escolha destes.

Salienta-se desde já a reduzida área ocupada pelos envidraçados comparativamente à área opaca da envolvente do edifício. A totalidade da área envidraçada toma o valor aproximado de $59,5 \text{ m}^2$ enquanto a parte opaca ocupa cerca de $472,5 \text{ m}^2$ da envolvente exterior (excluindo piso térreo), dos quais $304,5 \text{ m}^2$ correspondem às paredes exteriores.

Relativamente às perdas energéticas por transmissão, estas obviamente acompanham o valor de U dos envidraçados, sendo que a um maior U correspondem maiores perdas para o exterior. Assim sendo, como se pode observar na Figura 6.6, o vidro simples (cenário 11) apresenta-se como envidraçado através do qual se dão maiores perdas energéticas em contraste com o cenário 16, que simula um vidro triplo de baixa emissividade. A diferença de resultados destes dois cenários é de 8947 kWh/ano , atestando assim a importância da correta escolha destes elementos no desempenho térmico do edifício.

O vidro duplo corresponde a uma solução já amplamente generalizada em Portugal. Repare-se na Figura 6.6, cenário 0 (vidro duplo), a quantidade de energia perdida para o exterior ($5189,3 \text{ kWh/ano}$) é cerca de 53% daquela que é transferida para o exterior através das paredes exteriores, no cenário onde estas perdas são maximizadas ($9840,3 \text{ kWh/ano}$) (cenário 1) (Figura 6.3). Tendo em conta a reduzida área de envidraçados comparativamente à ocupada pelas paredes exteriores é possível concluir acerca da importância das perdas energéticas através dos envidraçados na estação de aquecimento, onde estas perdas são desfavoráveis.

Relativamente aos ganhos solares através dos envidraçados, estes acompanham o valor do fator solar do vidro para um incidência normal ao vão ($g_{v\perp}$), aumentando com o aumento deste, como se pode observar na Figura 6.7. Como as propriedades óticas dos envidraçados são mais uniformes de cenário para cenário comparativamente ao valor de U , também serão de esperar valores mais uniformes de ganhos solares ao longo dos vários cenários analisados. Como se pode ver na Figura 6.7, é através do envidraçados simples que são os maiores ganhos energéticos, em oposição ao envidraçado triplo de baixa emissividade.



Cenário 0	Vidro duplo	Cenário 11	Vidro simples	Cenário 12	Vidro duplo de baixa emissividade 1
Cenário 13	Vidro duplo de baixa emissividade 2	Cenário 14	Vidro duplo de baixa emissividade 3	Cenário 15	Vidro triplo
Cenário 16	Vidro triplo de baixa emissividade				

Figura 6.6 – Perdas energéticas por transmissão através dos envidraçados, estação de aquecimento.

Figura 6.7 – Ganhos energéticos por radiação solar através dos envidraçados, estação de aquecimento.

Como se viu anteriormente, a ventilação assume um papel de grande impacto nas perdas energéticas para o exterior, pelo que na estação de aquecimento tem que ser minimizada, situação simulada pelo cenário 0 relativamente ao Parâmetro 2 (Quadro 6.2). Repare-se então nas perdas energéticas simuladas pelo cenário 0 no âmbito do Parâmetro 2 (Figura. 6.5) e nas perdas através do envidraçado duplo (cenário 0) (Figura 6.6), durante a estação de aquecimento. Nesta estação, as perdas energéticas através do envidraçado duplo chegam a superar as perdas energéticas por ventilação.

Repare-se que neste parâmetro surge novamente uma problemática semelhante à que surgiu no parâmetro correspondente ao isolamento térmico, ou seja, se por um lado o envidraçado simples é o que regista maiores perdas de calor para o exterior (desfavorável na estação de aquecimento) é também através deste que são dadas os maiores ganhos energéticos (favoráveis nesta estação). Ao contrário do registado relativamente ao isolamento térmico, aqui a solução não é evidente, não se pode afirmar que o melhor cenário para a estação de aquecimento é o que conduz a maiores ganhos solares ou o que leva a menores perdas energéticas, há que estabelecer o rácio ideal entre estas duas quantidades. Uma alternativa para encontrar este

rácio ideal passará, por exemplo, por um processo iterativo através de ferramentas de simulação dinâmica ou simplificadas, onde se analisariam diferentes tipos de envidraçados e se concluiria qual a solução que iria otimizar o desempenho energético anual do edifício.

Por forma a atestar novamente a importância dos envidraçados nas trocas energéticas com o exterior, desta vez no que toca aos ganhos energéticos, atente-se na Figura 6.7, cenário 0. O valor dos ganhos energéticos através do envidraçado duplo (22708,9 kWh/ ano) é cerca de trinta e nove vezes superiores àqueles registados através das paredes exteriores, no cenário onde se registam ganhos superiores (588,5 kWh/ ano) (cenário 1) (Figura 6.4).

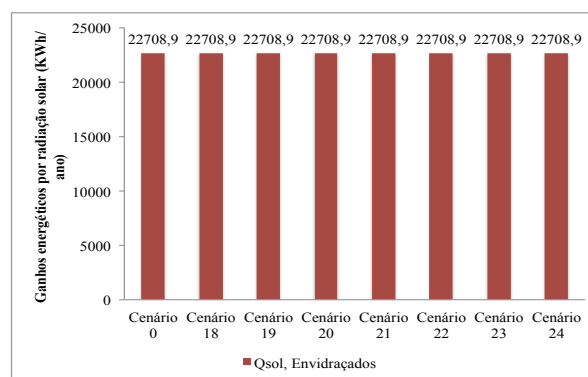
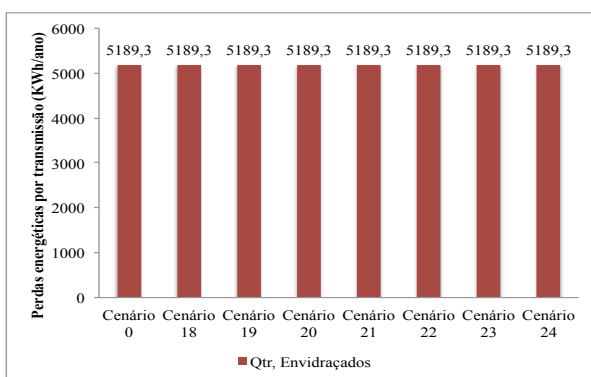
Através do verificado nesta análise, conclui-se que as perdas energéticas através dos envidraçados na estação de aquecimento tomam valores avultados, pelo que a escolha de um envidraçado com propriedades térmicas e óticas adequadas é fundamental para garantir baixas necessidades energéticas orientadas ao aquecimento do edifício.

Dispositivos de proteção solar

Pode observar-se nas Figuras 6.8 e 6.9 os valores das perdas de energia por transmissão e ganhos energéticos através dos elementos envidraçados do edifício, respetivamente. Sabe-se que na estação de aquecimento, por forma a maximizar os ganhos energéticos e minimizar as perdas, considera-se para efeitos de cálculo que os dispositivos de proteção solar se encontram tipicamente inativos durante o dia e ativos durante o período noturno.

Seria de esperar, segundo o exposto na norma ISO 13790, que aos diferentes dispositivos de proteção solar correspondessem diferentes valores de perdas energéticas por transmissão. Como se pode observar na Figura 6.8, os resultados obtidos pelo software em utilização não atestam a diferença de resultados expectada. Não foi possível investigar a origem destes resultados uma vez que não está acessível ao utilizador do software alguns valores que o mesmo utiliza na obtenção destes resultados.

Como é expectável, os ganhos energéticos por radiação solar são iguais qualquer que seja o dispositivo de proteção solar analisado, como se pode observar na Figura 6.9. Recorde-se que na estação de aquecimento estas proteções se encontram inativas durante o dia.



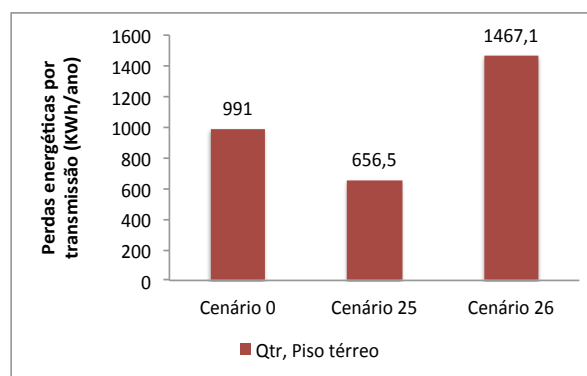
Cenário 0	Proteção exterior opaca (menor g _{Tve})	Cenário 18	Proteção exterior não opaca (menor g _{Tve})	Cenário 19	Proteção interior opaca (menor g _{Tve})
Cenário 20	Proteção interior não opaca (menor g _{Tve})	Cenário 21	Proteção exterior opaca (maior g _{Tve})	Cenário 22	Proteção exterior não opaca (maior g _{Tve})
Cenário 23	Proteção interior opaca (maior g _{Tve})	Cenário 24	Proteção interior não opaca (maior g _{Tve})		

Figura 6.8 – Perdas energéticas por transmissão através dos envidraçados, estação de aquecimento.

Figura 6.9 – Ganhos energéticos por radiação solar através dos envidraçados, estação de aquecimento.

Piso Térreo

Através da Figura 6.10 podem analisar-se os valores da energia transferida através do piso térreo para o solo. Como visto anteriormente, o piso térreo é o elemento do edifício em estudo através do qual se registam as menores perdas de calor para o exterior.



Cenário 0	Laje apoiada no solo	Cenário 25	Laje suspensa	Cenário 26	Cave
-----------	----------------------	------------	---------------	------------	------

Figura 6.10 – Perdas energéticas através do piso térreo, estação de aquecimento.

Segundo os valores obtidos, o tipo de piso térreo influencia as quantidades de energia transferida através dele mas não é, de entre os parâmetros estudados, o mais influente quando se analisam estas perdas energéticas por transmissão num edifício, pelo contrário.

Pode observa-se na Figura 6.10 o efeito do contacto do edifício com o solo, geralmente a uma temperatura inferior. Quanto maior for a área em contacto com o solo maiores também serão as perdas energéticas para o exterior, assim, como seria de esperar, é quando é simulado o efeito da cave no edifício (cenário 26) que ocorrem as maiores perdas de calor através do piso térreo, ao contrário do que se verifica quando se simula um vazio sanitário no edifício (cenário 25).

Uma vez que ocorrem menos perdas energéticas para o exterior, o cenário 25 corresponde ao melhor cenário possível para a estação de aquecimento, de entre os três analisados relativamente a este parâmetro.

6.4.2 Estação de Arrefecimento

À semelhança da subsecção anterior, serão agora apresentados os valores das transferências de calor entre o ambiente interior climatizado e o ambiente exterior relativas à estação de arrefecimento, para os diversos cenários em estudo.

A análise dos seguintes resultados tem com o objetivo estudar o efeito dos diversos cenários analisados no balanço energético desta estação, possibilitando também a comparação dos mesmos com os resultantes da estação de aquecimento.

Isolamento Térmico

As Figuras 6.11 e 6.12 apresentam os valores das perdas de energia por transmissão e ganhos energéticos através dos elementos opacos do edifício, respetivamente. Ao contrário da anterior, na estação de arrefecimento é vantajoso maximizar as perdas energéticas e minimizar os ganhos de energia, sendo os cenários que a isso conduzam os mais favoráveis nesta estação.

Mais uma vez, à semelhança da estação anterior e como se pode observar na Figura 6.11, para a estação de arrefecimento, o cenário a que corresponde uma menor taxa de isolamento térmico (cenário 1) é aquele que apresenta maiores perdas energéticas para o exterior através de todos os três elementos, situação contrária ao cenário que simula a maior taxa de isolamento (cenário 2).

Em conformidade com o que se registou na análise da estação anterior, é através das paredes exteriores que se registam maiores perdas de calor para o exterior, sendo pelo piso térreo onde estas perdas assumem um menor valor. Neste aspeto, a diferença entre as duas estações regista-se ao nível da quantidade de calor transferido.

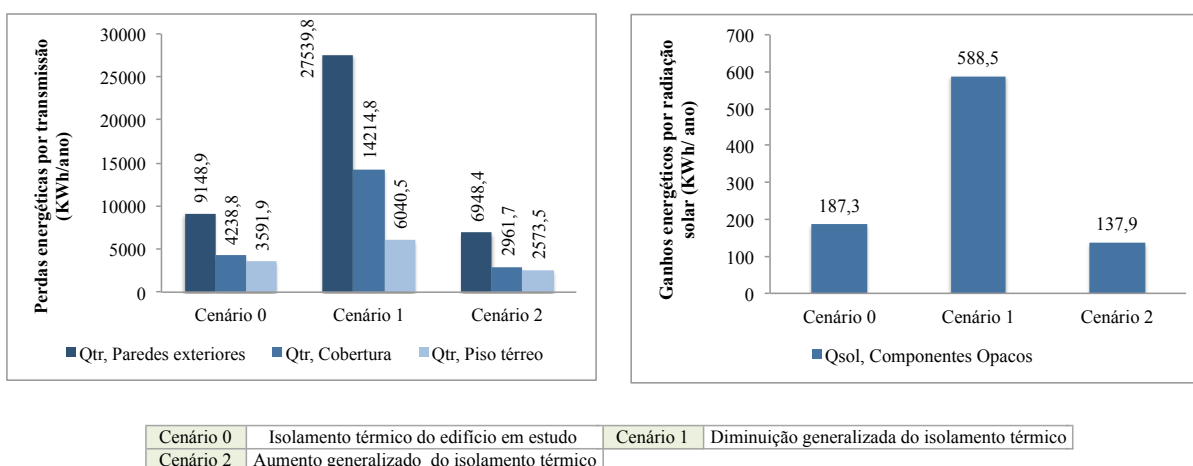


Figura 6.11 – Perdas energéticas por transmissão através dos elementos opacos, estação de arrefecimento.

Figura 6.12 – Ganhos energéticos por transmissão através dos elementos opacos, estação de arrefecimento.

Seria expectável que as perdas de calor através dos elementos opacos assumissem maiores valores na estação de aquecimento uma vez que é nesta estação, de acordo com a caracterização climática mensal da cidade de Coimbra exposta anteriormente, que o diferencial de temperaturas exterior e interior conduz a maiores perdas para o exterior, facto que não é suportado pelos gráficos apresentados (compare-se a Figura 6.3 com 6.11).

Os maiores valores de perdas energéticas por transmissão na estação de arrefecimento registam-se não só ao nível deste parâmetro como são transversais aos restantes parâmetros analisados. Este facto acontece uma vez que o cálculo desta quantidade, através da ISO 13790 (2008), é diretamente proporcional ao diferencial de temperatura interior (dado pelo valor do “*set-point*” dos aparelhos de climatização) e exterior mas também à duração da estação de aquecimento/ arrefecimento e taxa de renovação de ar horária adotada. Uma vez que a estação de arrefecimento é na generalidade dos cenários a mais longa e na sua totalidade a que apresenta maiores taxas de ventilação, é natural que surjam valores mais elevados nesta estação.

Na Figura 6.12 pode observar-se a totalidade dos ganhos solares através dos elementos opacos. Comparando com a Figura 6.4 verifica-se que tomam valores iguais quer na estação de aquecimento quer na estação de arrefecimento, facto que resulta de uma simplificação presente no algoritmo do software utilizado.

Naturalmente, na estação de arrefecimento recai-se novamente na problemática anterior: quanto menor for a taxa de isolamento térmico maiores serão as perdas de calor para o exterior, situação vantajosa, mas serão também maiores os ganhos energéticos por radiação solar, aspecto desfavorável. Mais uma vez as perdas por transmissão sobrepõem-se aos

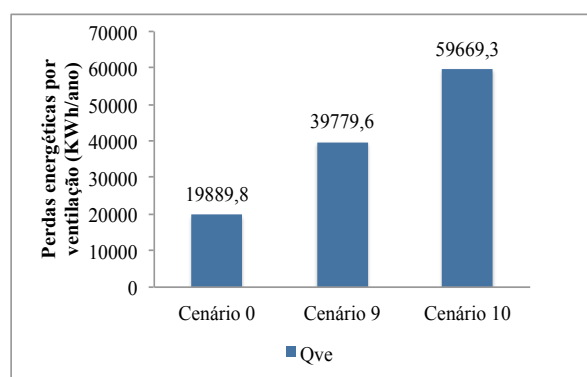
ganhos solares, sendo claramente preferível, na estação de arrefecimento, uma baixa quantidade de isolamento térmico, traduzida pelo cenário 1.

Basta comparar os resultados obtidos para a estação de aquecimento com os da estação de arrefecimento, relativamente a este parâmetro, para constatar que o projeto de um edifício no que toca à eficiência energética e comportamento térmico global é revestido de alguma complexidade. Os edifícios possuem comportamentos distintos no Verão e no Inverno pelo que escolher uma solução construtiva única que maximize o desempenho energético em ambas as estações é uma tarefa difícil. As soluções ótimas do ponto de vista térmico não coincidem em ambas as estações analisadas, pelo contrário, como se viu na análise deste parâmetro, a solução ótima na estação de aquecimento é a mais desfavorável na estação de arrefecimento e vice-versa.

Pela mesma razão exposta aquando a análise deste parâmetro relativamente à estação de aquecimento, os cenários 3 a 8 não são aqui ilustrados.

Ventilação

Ao contrário do que acontece na estação anterior, na estação de arrefecimento interessa promover o arrefecimento dos espaços interiores, aumentando as perdas energéticas para o exterior através de um alta taxa de renovação de ar. O cenário 10, simulando uma taxa de renovação de ar de 1.8 Rph, surge como preferível, como se pode observar na Figura 6.13.



Cenário 0	0,6 Rph - Estação de arrefecimento	Cenário 9	1,2 Rph - Estação de arrefecimento	Cenário 10	1,8 Rph - Estação de arrefecimento
-----------	------------------------------------	-----------	------------------------------------	------------	------------------------------------

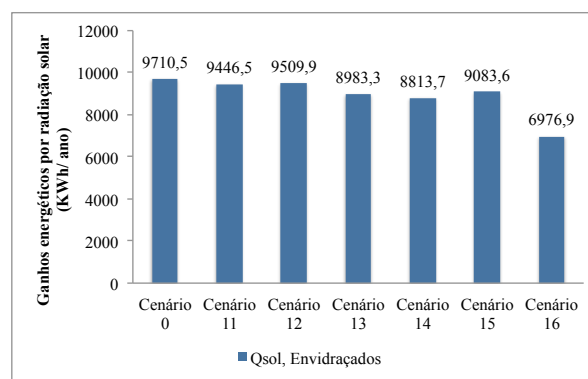
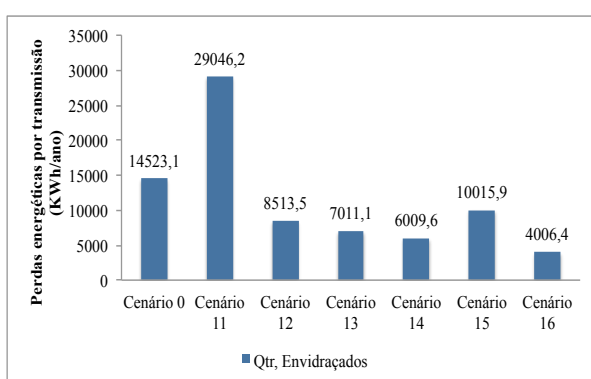
Figura 6.13 – Perdas energéticas por ventilação, estação de arrefecimento.

Na introdução deste parâmetro referiu-se que a ventilação assume um papel importante no desempenho energético dos edifícios. Se no Inverno há que limitar as perdas energéticas, reduzindo a ventilação a níveis aceitáveis, é no Verão que a renovação de ar assume um papel vital no controlo do sobreaquecimento dos edifícios e redução da energia necessária para arrefecer os espaços.

Repara-se, por exemplo, na Figura 6.13 e na Figura 6.11, inerentes à estação de arrefecimento, relativamente ao cenário 0, a ventilação conduz a uma perda de energia para o exterior no valor de 19889,8 kWh/ano enquanto através das paredes exteriores, elemento opaco onde se registam maiores perdas energéticas, apenas são transferidos 9148,9 KWH /ano (- 46 %).

Envidraçados

As Figuras 6.14 e 6.15 apresentam os valores das perdas de energia por transmissão e ganhos energéticos através dos elementos envidraçados do edifício, respetivamente.



Cenário 0	Vidro duplo	Cenário 11	Vidro simples	Cenário 12	Vidro duplo de baixa emissividade 1
Cenário 13	Vidro duplo de baixa emissividade 2	Cenário 14	Vidro duplo de baixa emissividade 3	Cenário 15	Vidro triplo
Cenário 16	Vidro triplo de baixa emissividade				

Figura 6.14 – Perdas energéticas por transmissão através dos envidraçados, estação de arrefecimento.

Figura 6.15 – Ganhos energéticos por radiação solar através dos envidraçados, estação de arrefecimento.

Refere-se desde já que se registou uma incoerência nos resultados relativos aos ganhos energéticos através dos envidraçados. Como foi referido anteriormente, a quantidade de radiação solar transferida através dos envidraçados aumenta com o aumento do valor de $g_{v_{iL}}$, portanto, seria de esperar, mesmo por senso comum, que a quantidade de calor transferido para o interior através do vidro duplo fosse inferior à que é transferida através do vidro simples, como registado na estação de aquecimento (Figura. 6.7). Como se pode observar na Figura. 6.15, isto não se verifica, tratando-se provavelmente de um erro no algoritmo do software.

À semelhança do registado na estação de aquecimento, relativamente a este parâmetro, também na estação de arrefecimento é através dos envidraçados que se dá a esmagadora maioria das trocas energéticas com o exterior, comparativamente à parte opaca da envolvente.

Novamente nesta estação, regista-se uma problemática análoga à registada na estação de aquecimento, como seria de esperar. Os envidraçados dotados de alto valor de U , que promovem mais altas perdas energéticas, conduzindo ao arrefecimento do interior do edifício, são também aqueles através dos quais se registam maiores ganhos energéticos, situação a evitar na estação de arrefecimento. Portanto, por forma a proceder à escolha do envidraçado mais adequado a esta estação, há que encontrar um compromisso ótimo entre o valor de U e de g_{vi} dos envidraçados que conduza ao menor aquecimento possível do interior do edifício.

Na estação de aquecimento também há que encontrar este compromisso ótimo, desta vez que conduza à maior quantidade de calor possível no interior do edifício. A dificuldade de encontrar um rácio ótimo, que conduza a um maior desempenho energético anual é ainda maior uma vez que se tem que contabilizar na equação tanto a estação de aquecimento como de arrefecimento.

Note-se na Figura 6.14 que as perdas energéticas através do envidraçado simples são significativamente superiores às registadas nos restantes cenários e como se pode observar na Figura 6.15, à exceção do envidraçado triplo de baixa emissividade (cenário 16), os valores dos ganhos não são muito distintos de cenário para cenário. Estes dois factos levam a que o envidraçado simples seja claramente o preferido na estação de arrefecimento. Relembre-se que o valor dos ganhos energéticos através do vidro simples deveriam ser superiores a 9710,5 kWh/ ano, mas comparando com os resultados análogos relativamente à estação de aquecimento, não muito superior, pelo que não afeta esta conclusão nem as restantes no âmbito deste parâmetro.

Como referido anteriormente, a ventilação assume na estação de arrefecimento um papel determinante no controlo do sobreaquecimento do edifício promovendo grandes transferências de calor para o exterior. Repare-se que até mesmo a mais baixa taxa de ventilação aqui analisada, referente à estação de arrefecimento (0,6 *Rph*), representa maiores perdas energéticas para o exterior do que aquelas que se registam através de todos os envidraçados aqui analisados, à exceção do envidraçado simples, compara-se a Figura 6.13 com a Figura 6.14.

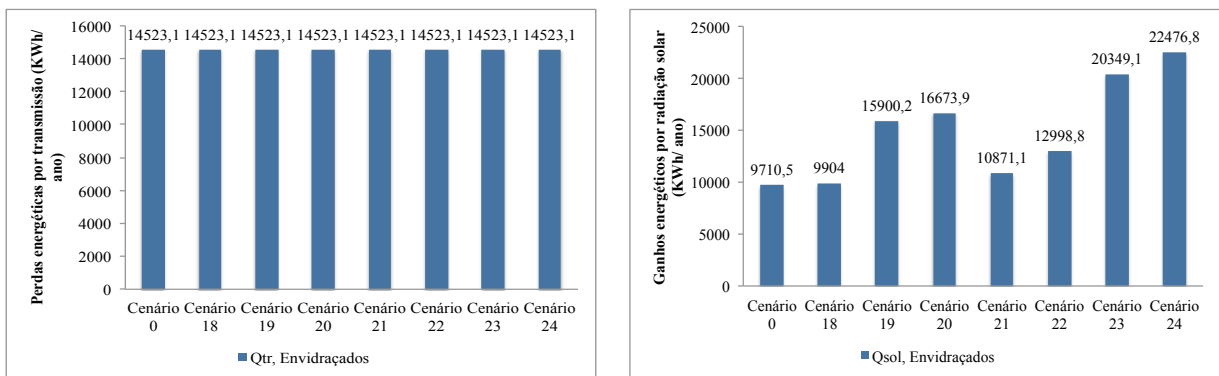
Dispositivos de proteção solar

Pelo raciocínio oposto ao explanado na estação de aquecimento, relativamente a este parâmetro, durante a estação de arrefecimento interessa evitar o sobreaquecimento do edifício, conduzindo a que nesta estação os dispositivos de proteção solar se considerem ativos durante grande parte do período diurno.

Mais uma vez, as perdas energéticas por transmissão mantêm-se constantes qualquer que seja o dispositivo de proteção solar adotado, como se pode ver na Figura 6.16.

Repare-se na Figura 6.17, a escolha dos dispositivos de proteção solar tem grande influência no controlo dos ganhos energéticos.

Como seria de esperar, dispositivos de proteção solar opacos conduzem a ganhos energéticos menores do que os não opacos. Através da análise da mesma figura observa-se que os dispositivos de proteção solar pelo exterior (cenários 0, 18, 21 e 22) conduzem a uma maior eficiência no controlo dos ganhos por radiação solar do que os colocados no interior do edifício (cenários 19, 20, 23 e 24). Registam-se menos ganhos energéticos quando o envidraçado é dotado de um dispositivo de proteção solar exterior não opaco comparativamente a um dispositivo interior opaco, compare-se por exemplo na Figura 6.17 o cenário 19 com o cenário 22.



Cenário 0	Proteção exterior opaca (menor g_{Tve})	Cenário 18	Proteção exterior não opaca (menor g_{Tve})	Cenário 19	Proteção interior opaca (menor g_{Tve})
Cenário 20	Proteção interior não opaca (menor g_{Tve})	Cenário 21	Proteção exterior opaca (maior g_{Tve})	Cenário 22	Proteção exterior não opaca (maior g_{Tve})
Cenário 23	Proteção interior opaca (maior g_{Tve})	Cenário 24	Proteção interior não opaca (maior g_{Tve})		

Figura 6.16 – Perdas energéticas por transmissão através dos envidraçados, estação de arrefecimento.

Figura 6.17 – Ganhos energéticos por radiação solar através dos envidraçados, estação de arrefecimento.

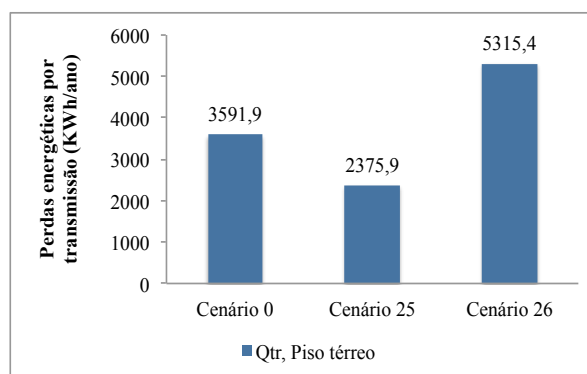
Repare-se ainda na Figura 6.17, a máxima diferença registada nos ganhos energéticos ao longo dos vários cenários, que ocorre entre o cenário 0 e o cenário 24, é de 12766,3 (kWh/ano). Este valor é cerca de vinte e duas vezes superior ao valor dos ganhos solares máximos (cenário 1) através da envolvente opaca (588,5 kWh/ano) (ver Figura 6.12). Daqui se confirma que a escolha dos dispositivos de proteção solar apresenta grande preponderância no desempenho térmico e energético durante a estação de arrefecimento pelo que a sua escolha tem grande influência no desempenho energético anual do edifício.

Piso Térreo

De acordo com o que foi exposto na estação de aquecimento, relativamente a este parâmetro, quanto maior for a área do edifício em contacto com o solo maiores serão as perdas energéticas para o exterior.

Sendo o objetivo nesta estação evitar o sobreaquecimento no interior dos edifícios, há que adotar estratégias que permitam maximizar as perdas de calor para o exterior, sendo portanto desfavorável evitar o contacto com o solo, através de vazios sanitários.

Na estação de aquecimento há que aproveitar o efeito benéfico que advém das trocas de calor com o solo, surgindo o cenário 26, edifício com cave, como preferível nesta estação, como se pode concluir analisando a Figura 6.18.



Cenário 0	Laje apoiada no solo	Cenário 25	Laje suspensa	Cenário 26	Cave
-----------	----------------------	------------	---------------	------------	------

Figura 6.18 – Perdas energéticas por ventilação através do piso térreo, estação de arrefecimento.

6.4.3 Necessidades Energéticas Anuais

Como visto anteriormente, a escolha das soluções construtivas que maximizam o desempenho térmico anual de um edifício não é tarefa fácil. A diferença significativa das condições climáticas da estação de aquecimento para a de arrefecimento conduzem a que as soluções construtivas mais vantajosas numa estação sejam as que geralmente conduzem a piores resultados e maiores necessidades energéticas orientadas à climatização na outra.

Nesta subsecção serão apresentadas as necessidades de energia, útil, direcionadas à climatização do edifício em estudo em ambas as estações, ou seja, para manter a temperatura interior a 18°C e 25°C na estação de aquecimento e arrefecimento, respetivamente. Serão também apresentados os totais anuais destas necessidades energéticas, relativas a cada cenário estudado. Através da análise da informação gráfica seguinte será possível concluir quais os cenários, dentro de cada parâmetro, que minimizam estas necessidades energéticas anuais.

Antes de começar esta análise anual, é de salientar que o edifício em estudo não é dotado de medidas passivas ou estratégias bioclimáticas que controlem a quantidade de radiação solar que é transferida para o interior do edifício (principalmente através dos envidraçados, como se viu anteriormente). Dado isto, é expectável que o edifício facilmente sobreaqueça na estação

de arrefecimento conduzindo a elevados gastos energéticos por forma a arrefecer o interior de edifício até à temperatura de conforto, facto que inflacionará a soma anual de energia despendida na climatização. Por isso, é de esperar que os cenários que minimizam os gastos energéticos anuais sejam também os que conduzam a grandes perdas energéticas para o exterior ou até mesmo que maximizem estas perdas, resultando em mais baixas necessidades energéticas na estação de arrefecimento.

Relativamente ao parâmetro 1, isolamento térmico, observa-se na Figura 6.19 que o cenário onde as necessidades energéticas anuais são minimizadas corresponde ao cenário 0 que simula os valores de referência de U , relativamente aos elementos opacos da envolvente, presentes no atual regulamento nacional das características térmicas dos edifícios de habitação. Por sua vez, o cenário correspondente à maior taxa de isolamento térmico (cenário 2) é o que apresenta piores resultados, devido à enorme parcela de energia necessária à climatização durante a estação de arrefecimento.

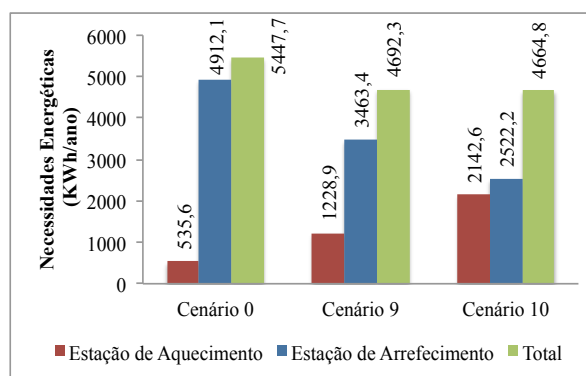
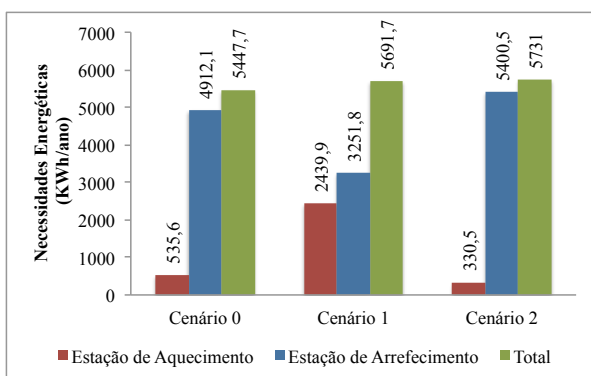
É notório na Figura 6.19 que embora estes três cenários conduzam a resultados muito diferentes na estação de aquecimento e arrefecimento, as necessidades energéticas anuais são semelhantes entre eles, sendo o cenário 1 (menor taxa de isolamento térmico) que conduz a necessidades energéticas mais uniformes entre as duas estações.

Repare-se ainda na mesma figura, em ambos os três cenários, as necessidades energéticas na estação de aquecimento são sempre menores comparativamente à estação de arrefecimento, mesmo no cenário que simula a mais baixa taxa de isolamento térmico (cenário 1), facto que atesta o referido anteriormente nesta subsecção.

Analisando a figura 6.20, relativa ao parâmetro 2, ventilação, conclui-se uma vez mais como a ventilação assume um papel determinante na eficiência energética do edifício em estudo.

Como seria de esperar, a um aumento da taxa de ventilação corresponde um aumento das necessidades energéticas da estação de aquecimento e uma diminuição das mesmas na estação de arrefecimento.

A importância da ventilação é tão grande na estação de arrefecimento, que o cenário mais vantajoso de entre os analisados relativamente a este parâmetro é o cenário 10, simulando as maiores taxas de ventilação em ambas as estações. Embora sendo o mais desfavorável na estação de aquecimento compensa largamente na estação de arrefecimento.



Cenário 0	Isolamento térmico do edifício em estudo	Cenário 1	Diminuição generalizada do isolamento térmico
Cenário 2	Aumento generalizado do isolamento térmico		

Cenário 0	0,4 Rph - Estação de aquecimento	Cenário 9	0,8 Rph - Estação de aquecimento	Cenário 10	1,2 Rph - Estação de aquecimento
Cenário 0	0,6 Rph - Estação de arrefecimento	Cenário 9	1,2 Rph - Estação de arrefecimento	Cenário 10	1,8 Rph - Estação de arrefecimento

Figura 6.19 – Necessidades energéticas anuais orientadas à climatização, Parâmetro 1: Isolamento Térmico.

Figura 6.20 – Necessidades energéticas anuais orientadas à climatização, Parâmetro 2: Ventilação.

A taxa de renovação de ar do interior dos edifícios, ao contrário dos outros parâmetros aqui analisados (excluindo o “*set-point*”), não é um parâmetro estático, podendo variar ao longo do tempo, sendo por isso possível minimizar as renovações de ar na estação de aquecimento e maximizar na estação de arrefecimento. Desta forma, garante-se a qualidade do ar interior ao longo de todo o ano e redução das necessidades energéticas na estação de arrefecimento de forma simples, eficaz e com baixos custos monetários (no caso da ventilação natural).

Na Figura 6.21 podem-se observar as necessidades energéticas anuais, relativamente ao Parâmetro 3, envidraçados. À semelhança do registado relativamente aos cenários inerentes ao isolamento térmico ou tipo de piso térreo, também aqui as necessidades energéticas anuais são muito semelhantes aos vários cenários analisados, tendo em conta a ordem de grandeza das valores obtidos. Os envidraçados que mais se destacam dos restantes no quadro das necessidades energéticas anuais é o envidraçado simples e o triplo de baixa emissividade.

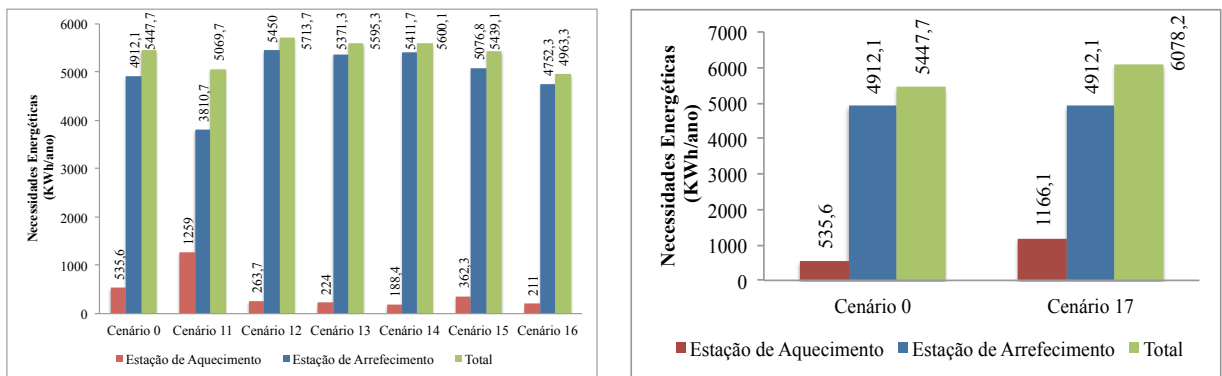
Observando a Figura 6.21, segundo o software utilizado, o vidro que minimiza as necessidades energéticas anuais dirigidas à climatização é o vidro triplo de baixa emissividade (cenário 16) que embora não seja o que minimize as necessidades energéticas na estação de aquecimento, conduz a gastos energéticos na estação de arrefecimento significativamente mais baixos dos que os restantes, à exceção do vidro simples.

Como se pode observar na mesma figura, o envidraçado simples (cenário 11) destaca-se claramente como melhor opção na estação de arrefecimento enquanto os vidros de baixa

emissividade (cenário 12, 13, 14 e 16) surgem como os mais vantajosos na estação de aquecimento.

Através da análise da Figura 6.22, relativa ao parâmetro que representa a temperatura do “set-point” dos aparelhos mecânicos de climatização, é possível observar a diferença nos gastos energéticos derivada do abaixamento da temperatura interior de conforto presente no anterior regulamento das características de comportamento térmico dos edifícios em relação ao atual.

Um abaixamento de apenas 2°C no valor do “set-point” durante a estação de aquecimento conduziu a uma redução da energia despendida no aquecimento deste edifício para menos de metade. Pode-se assim concluir que a energia despendida na climatização do edifício é deveras sensível ao valor do “set-point” dos aparelhos de climatização sendo que um pequeno abaixamento deste conduz a poupanças energéticas significativas.



Cenário 0	Vidro duplo	Cenário 11	Vidro simples	Cenário 12	Vidro duplo de baixa emissividade 1
Cenário 13	Vidro duplo de baixa emissividade 2	Cenário 14	Vidro duplo de baixa emissividade 3	Cenário 15	Vidro triplo
Cenário 16	Vidro triplo de baixa emissividade				

Cenário 0	18 °C - Estação de aquecimento	Cenário 17	20 °C - Estação de aquecimento
Cenário 0	25 °C - Estação de arrefecimento	Cenário 17	25 °C - Estação de arrefecimento

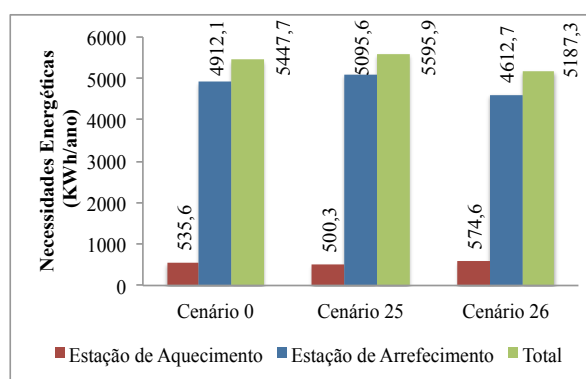
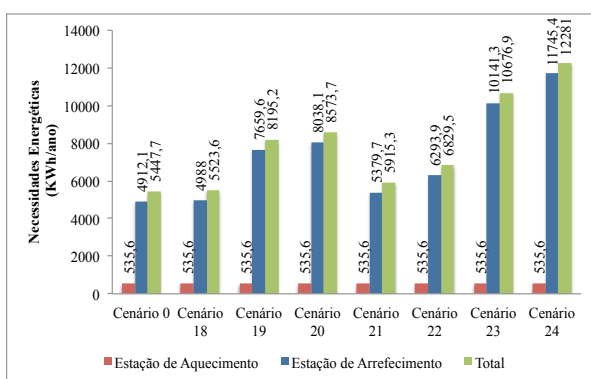
Figura 6.21 – Necessidades energéticas anuais orientadas à climatização, Parâmetro 3: Envidraçados.

Figura 6.22 – Necessidades energéticas anuais orientadas à climatização, Parâmetro 4: “Set-Point”.

Relativamente ao parâmetro 5, relativo aos dispositivos de proteção solar, viu-se anteriormente que estes tinham um papel determinante na estação de arrefecimento. Na Figura 6.23 é possível observar a grande amplitude de valores que a totalidade das necessidades energéticas anuais pode assumir em função dos dispositivo de proteção solar, ao contrário do que se registou em parâmetros como isolamento térmico, envidraçados ou tipo de piso térreo

Uma vez que as necessidades energéticas na estação de aquecimento se mantêm constantes independentemente do dispositivo de proteção adotado, o cenário que simular as mais baixas necessidades energéticas na estação de arrefecimento minimizará também a totalidade das necessidades energéticas anuais. Como se pode observar na Figura 6.23, é o cenário 0, portada de madeira, que minimiza as necessidades energéticas na estação de arrefecimento, como seria de esperar tendo em conta que apresenta o mais baixo valor de g_{Tvc} .

Como se pode reparar nesta análise anual, os cenários que simulavam maiores perdas energéticas para o exterior surgiram como preferíveis no panorama energético anual. O tipo de piso térreo (parâmetro 6) não é exceção a esta tendência. Como se pode observar na Figura 6.24, o cenário que minimiza os gastos energéticos anuais corresponde ao cenário que simula a presença de uma cave no edifício (cenário 26). Este cenário embora apresente um valor ligeiramente superior de energia consumida na estação de aquecimento, conduz a uma redução significativa no consumo energético na estação de arrefecimento comparativamente aos outros cenários deste parâmetro, compensando largamente na despesa energética anual.



Cenário 0	Proteção exterior opaca (menor g_{Tvc})	Cenário 18	Proteção exterior não opaca (menor g_{Tvc})	Cenário 19	Proteção interior opaca (menor g_{Tvc})
Cenário 20	Proteção interior não opaca (menor g_{Tvc})	Cenário 21	Proteção exterior opaca (maior g_{Tvc})	Cenário 22	Proteção exterior não opaca (maior g_{Tvc})
Cenário 23	Proteção interior opaca (maior g_{Tvc})	Cenário 24	Proteção interior não opaca (maior g_{Tvc})		

Cenário 0	Laje apoiada no solo	Cenário 25	Laje suspensa	Cenário 26	Cave
-----------	----------------------	------------	---------------	------------	------

Figura 6.23 – Necessidades energéticas anuais orientadas à climatização, Parâmetro 5: Dispositivos de proteção solar.

Figura 6.24 – Necessidades energéticas anuais orientadas à climatização, Parâmetro 6: Tipo de piso térreo.

Ao longo da análise das Figuras 6.19 a 6.24 foi notório a predominância dos gastos energéticos durante a estação de aquecimento comparativamente à estação de arrefecimento, facto que foi referido anteriormente. A ausência de medidas que permitam o controlo dos ganhos energéticos e consequentemente do sobreaquecimento do edifício conduzem a que seja necessária uma grande quantidade de energia durante a estação de arrefecimento por forma a manter a temperatura interior a 25°C. Constata-se assim a importância das medidas

passivas e estratégias bioclimáticas na redução das necessidades energéticas durante a estação de arrefecimento, com influência direta na soma dos gastos energéticos anuais.

Concluindo, como se pode ver no acima exposto, não é uma tarefa simples seleccionar as soluções construtivas que maximizem o desempenho energético do edifício ao longo de todo ano. Repare-se que nesta subsecção se seleccionou o cenário que minimizava as necessidades energéticas anuais considerando cada parâmetro isoladamente. Sabe-se que na realidade existe uma interação entre os diversos elementos construtivos pelo que esta análise não pode ser feita de forma isolada para cada componente do edifício mas sim de forma holística, considerando o comportamento térmico e energético global do edifício em estudo.

6.4.4 Combinação ótima de cenários versus Pior combinação de cenários

Nesta subsecção, irá ser feito um estudo comparativo entre uma solução que combina os cenários que maximizam a eficiência energética do edifício em estudo, que a minimizam e situação de referência. A determinação destes cenários foi feita na subsecção anterior, os quais figuram no Quadro 6.12. Repara-se que em relação à ventilação, como o objetivo é analisar a melhor ou pior situação possível e uma vez que este é um parâmetro não estático (como referido anteriormente), não faz sentido analisar apenas um cenário mas sim os valores mais ou menos favoráveis, conforme o caso, de entre os cenários estudados.

Quadro 6.12 – Cenários mais favoráveis vs cenários menos favoráveis.

Parâmetro	Cenário mais favorável	Descrição	Cenário menos favorável	Descrição
Isolamento Térmico	Cenário 0	Isolamento térmico do edifício em estudo	Cenário 2	Aumento generalizado do isolamento térmico
Ventilação	Cenário 10/ 0	0,4 Rph - Estação de aquecimento/ 1,8 Rph - Estação de arrefecimento	Cenário 10/ 0	1,2 Rph - Estação de aquecimento/ 0,6 Rph - Estação de arrefecimento
Envidraçados	Cenário 16	Vidro triplo de baixa emissividade	Cenário 12	Vidro duplo de baixa emissividade 1
"Set-Point"	Cenário 0	18 °C - Estação de aquecimento/ 25 °C - Estação de arrefecimento	Cenário 17	20 °C - Estação de aquecimento/ 25 °C - Estação de arrefecimento
Dispositivos de proteção solar	Cenário 0	Proteção exterior opaca (menor gTvc)	Cenário 24	Proteção interior não opaca (maior gTvc)
Tipo de piso térreo	Cenário 26	Cave	Cenário 25	Laje suspensa

Através deste estudo comparativo irá ser possível observar as diferenças nos consumos energéticos anuais orientados à climatização quando se seleccionam os elementos construtivos e modos de operação que maximizam o desempenho energético do edifício em detrimento daqueles que o minimizam. Estas duas situações serão também comparadas com a situação de referência. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 6.25.

Repara-se de imediato que comparativamente ao cenário de referência existe uma maior diferença nos gastos energéticos anuais para a situação que combina os cenários mais desfavoráveis do que para a situação oposta. Isto deve-se ao fato da situação de referência por si só já ser dotada de elementos construtivos ou estratégias de operação que maximizam o desempenho energético do edifício, como se pode comprovar no Quadro 6.12.

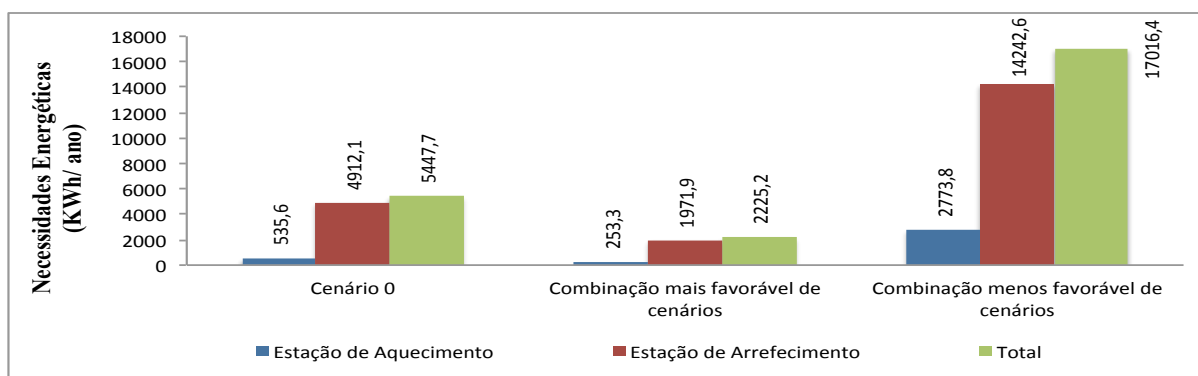


Figura 6.25 – Necessidades energéticas anuais orientadas à climatização. Comparação entre a situação de referência, combinação mais favorável de cenários e combinação menos favorável.

Da análise do gráfico anterior pode observar-se o quão dispar pode ser a eficiência energética do edifício e consequentemente os consumos energéticos anuais, em função das escolhas construtivas e modos de operação adotados. Torna-se portanto vital, em fases iniciais do projeto de qualquer edifício, realizar este tipo de análise, obtendo assim uma previsão do desempenho energético do edifício, em virtude dos elementos construtivos adotados.

A ferramenta de cálculo utilizada no âmbito desta dissertação, embora não apresente resultados tão precisos como os softwares de cálculo mais rigorosos acima expostos, revela-se valiosa em estudos comparativos entre diferentes soluções construtivas. Atuando em fases iniciais do projeto, através dela consegue-se avaliar a influência de diferentes cenários no desempenho energético final do edifício, permitindo ao projetista, desde cedo, orientar o projeto no sentido da eficiência energética e redução dos impactes ambientais.

6.4.5 Impactes Ambientais

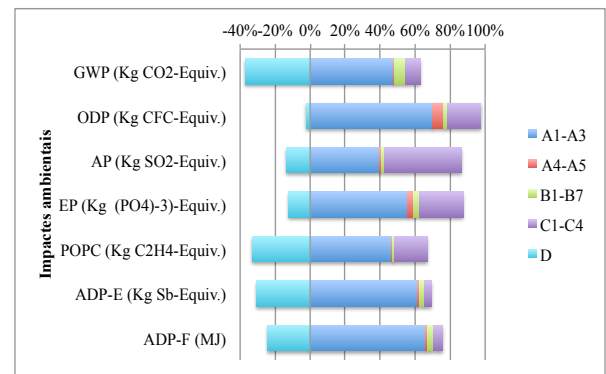
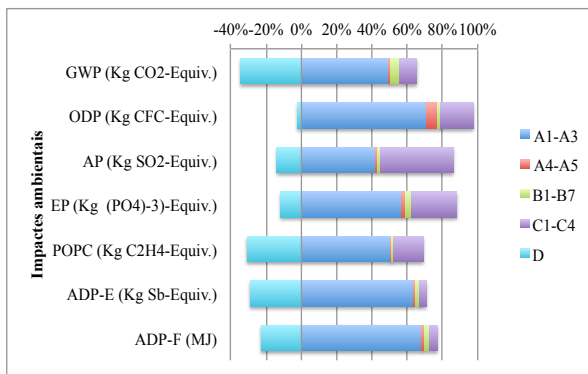
Como referido anteriormente na secção 5.1, a ferramenta numérica utilizada no âmbito deste estudo paramétrico permite também a avaliação dos impactes ambientais inerentes ao edifício durante o seu ciclo de vida.

Foi selecionado para esta avaliação, de entres os seis analisados, o parâmetro ao qual estão associados maiores impactes ambientais (Parâmetro 1 – Isolamento Térmico), quer seja pela quantidade de matérias primas que são utilizadas na sua produção, quantidades que são utilizadas num edifício, energia despendida no tratamento após vida útil, etc.

Nesta subsecção serão apresentados os impactes ambientais, associados ao ciclo de vida do edifício, relativos aos três cenários que simulam as diferentes taxas de isolamento térmico, segundo o conceito modular exposto na secção 5.1.

Os resultados obtidos na análise do desempenho ambiental resultantes das simulações traduzidas pelos três cenários agora em estudo são apresentados na Figuras 6.26 a 6.28. Estes gráficos representam a contribuição de cada módulo por categoria de impacte ambiental.

Analisando as Figuras 6.26 a 6.28 e o Quadro 6.13, verifica-se que embora os valores das diversas categorias de impactes ambientais difiram de cenário para cenário, as fases do ciclo de vida do edifício que dominam todas as categorias de impactes são transversais aos três cenários, o mesmo ocorre com as categorias menos expressivas.



Cenário 0	Isolamento térmico do edifício em estudo	Cenário 1	Diminuição generalizada do isolamento térmico
Cenário 2	Aumento generalizado do isolamento térmico		

Figura 6.26 – Contribuição de cada módulo por categoria ambiental, Cenário 0.

Figura 6.27 – Contribuição de cada módulo por categoria ambiental, Cenário 1.

A fase da produção dos materiais (módulos A1-A3) domina todas as categorias de impactes (com contribuições superiores a 40%). Daqui se conclui a importância do uso de materiais de construção sustentáveis e eficientes do ponto de vista ambiental, sem descuidar a parte funcional.

A fase correspondente à reciclagem (módulo D) apresenta também uma contribuição bastante significativa na maioria das categorias de impacto, seguida da fase de demolição e tratamento dos resíduos finais (módulos C1-C4).

Por outro lado, a fase operacional (módulos B1-B7) e fase de construção (módulos A4-A5) apresentam valores muito baixos de impactes ambientais em todas as categorias, tomando mesmo valores negligenciáveis na sua maioria. São aqui evidentes, através dos resultados dos módulos A4-A5, as vantagens do ponto de vista ambiental das estruturas pré-fabricadas no processo de edificação.

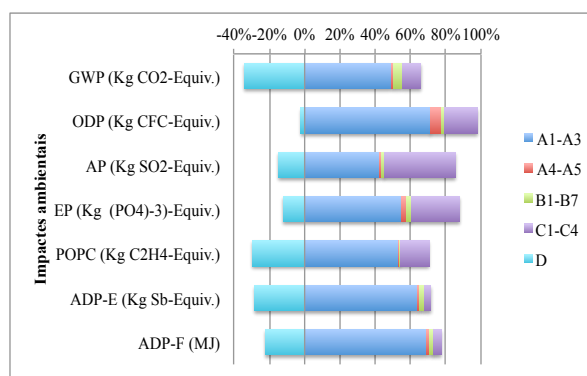


Figura 6.28 – Contribuição de cada módulo por categoria ambiental, Cenário 2.

Repare-se que nas Figuras 6.26 a 6.28 e Quadro 6.13 são obtidos valores negativos para o módulo D, indicando os créditos que são obtidos devido à reciclagem e/ ou recuperação dos materiais após a demolição do edifício.

Uma vez que a fase de produção dos materiais domina todas as categorias ambientais, é de esperar aquando à realização de uma análise multicritério entre várias soluções possíveis, que as que apresentem menos quantidades de materiais de construção ou materiais que impliquem processos de fabrico menos poluentes, sejam favorecidas na componente ambiental.

Quadro 6.13 – Resultados da análise dos impactes ambientais, Cenários 0,1 e 2.

Cenário 0	TOTAL	Cenário 1	TOTAL	Cen 1 vs Cen 0	Cenário 2	TOTAL	Cen 2 vs Cen 0
GWP (Kg CO2-Equiv.)	24459	GWP (Kg CO2-Equiv.)	18808	-23,1%	GWP (Kg CO2-Equiv.)	26921	10,1%
ODP (Kg CFC-Equiv.)	0,0020166	ODP (Kg CFC-Equiv.)	0,0018647	-7,5%	ODP (Kg CFC-Equiv.)	0,0020376	1,0%
AP (Kg SO2-Equiv.)	311,66	AP (Kg SO2-Equiv.)	293,14	-5,9%	AP (Kg SO2-Equiv.)	312,88	0,4%
EP (Kg (PO4)-3)-Equiv.)	26,444	EP (Kg (PO4)-3)-Equiv.)	23,125	-12,6%	EP (Kg (PO4)-3)-Equiv.)	27,737	4,9%
POPC (Kg C2H4-Equiv.)	16,543	POPC (Kg C2H4-Equiv.)	13,1859	-20,3%	POPC (Kg C2H4-Equiv.)	18,872	14,1%
ADP-E (Kg Sb-Equiv.)	217	ADP-E (Kg Sb-Equiv.)	188,11	-13,3%	ADP-E (Kg Sb-Equiv.)	225,22	3,8%
ADP-F (MJ)	513600	ADP-F (MJ)	426100	-17,0%	ADP-F (MJ)	565300	10,1%

Como visto anteriormente, análises multicritério revelam-se importantes na avaliação dos impactes ambientais e eficiência energética dos edifícios, permitindo minimizar o somatório da energia incorporada com a energia operacional. Desta forma, é possível minimizar os impactes ambientais associados à totalidade do ciclo de vida dos empreendimentos e não só os derivados da fase de utilização.

Das três situações analisadas na subsecção anterior, por forma a concluir qual a situação mais vantajosa durante a totalidade do ciclo de vida do edifício, do ponto de vista ambiental, será necessário analisar não só os impactes ambientais relativos à fase operacional mas sim em relação à totalidade do seu ciclo de vida.

Conclui-se da Figura 6.25 que a situação correspondente à combinação dos cenários mais favoráveis conduz ao menor consumo energético anual e conseqüentemente à mais baixa quantidade de energia operacional. Repare-se que esta situação partilha a mesma taxa de isolamento térmico do cenário de referência, uma vez que este é o elemento construtivo que habitualmente apresenta uma maior influência nos níveis de energia incorporada, espera-se que a quantidade deste “tipo” de energia seja semelhante em ambas as situações (sendo que o cenário de referência registará um valor ligeiramente inferior uma vez que é dotado de vidro duplo e piso térreo assente no solo em detrimento de vidro triplo e cave). Pelo mesmo motivo, apresentando a maior taxa de isolamento térmico, a situação que representa a combinação dos piores cenários é a que conduz à maior quantidade de energia incorporada.

Portanto, caso fosse realizado uma análise multicritério, analisando não só a energia operacional mas também a energia incorporada, a situação que combina os cenários mais favoráveis continuaria a ser a preferível de entre as três analisadas. Pelo contrário, a situação que combina os cenários mais desfavoráveis reforçaria ainda mais a sua posição como pior solução a adotar.

Neste caso de estudo, esta análise é evidente, mesmo sem recorrer a ferramentas de cálculo multicritério. Em climas mais frios, por exemplo, este estudo pode revelar-se mais trabalhoso e complexo: se por um lado é vantajoso aumentar a taxa de isolamento térmico por forma a reduzir os consumos energéticos orientados à climatização e conseqüentes impactes ambientais durante a fase operacional do edifício, por outro, esse aumento conduzirá a maiores quantidades de energia incorporada e impactes ambientais.

Concluindo, à que encontrar um compromisso ideal entre energia incorporada e energia operacional para que os empreendimentos apresentem um desempenho ambiental ótimo durante a totalidade do seu ciclo de vida e não só durante a sua vida útil.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 Conclusões

A preocupação global pelo desenvolvimento sustentável e eficiência energética está a conduzir as comunidades internacionais a adotarem estratégias e medidas rigorosas, transversais a todos os sectores de atividade, para atingir esses fins. O sector da construção, sendo um sector de atividade do qual resultam elevados impactes ambientais e consumos energéticos, tem sido alvo de crescentes e mais rigorosas medidas que controlem estes impactes, assim como o acelerado consumo de recursos naturais e energia.

Tendo em conta a estrutura desta dissertação, a primeira conclusão pertinente a retirar é que o sector da construção civil é responsável por elevados impactes ambientais e que para contrariar esta tendência crescente, o desempenho ambiental e energético dos edifícios tem que ser ponderado logo em fases iniciais de projeto, onde a flexibilidade nas opções construtivas permite otimizar estes desempenhos com custos mínimos.

De seguida, através da revisão legal/ normativa relativamente à eficiência energética e sustentabilidade no sector da construção, foi possível concluir que a pressão da Europa tem vindo a intensificar-se bastante na última década. A legislação e documentação normativa Europeia neste campo impõem cada vez requisitos e metas mais exigentes aos Estados Membros. A regulamentação nacional dos mesmos, nesta esfera de ação, tem que responder aos progressivamente mais rigorosos requisitos estabelecidos a nível Europeu e comuns aos diversos países.

Da revisão do estado da arte, relativa às ferramentas de cálculo no âmbito do desempenho energético dos edifícios, conclui-se que existem duas principais abordagens: cálculos dinâmicos e métodos simplificados (usualmente baseados em regimes quase-permanentes). Cada abordagem apresenta desvantagens e vantagens em relação à outra. Os cálculos dinâmicos são caracterizados pela sua elevada fiabilidade e pormenorização do comportamento térmico dos edifícios apresentando desvantagens ao nível da sua grande complexidade e morosidade. Os métodos mais simplificados, embora constituam abordagens mais simples e expeditas, não conduzem a resultados tão precisos, apresentando muitas vezes margens de erro grosseiras. Em ambos os casos são necessárias grandes quantidades de

informações acerca dos edifícios por forma a proceder às simulações e processos de cálculo. Perante esta falta de informação, estas abordagens conduzem a estimativas de baixa precisão.

No que toca à avaliação do desempenho ambiental dos edifícios, também existem estes dois tipos de abordagens, simplificadas ou metodologias mais complexas, como ACV completas. Neste âmbito, mais uma vez, precisão e detalhe são sinónimos de complexidade e morosidade no processo de cálculo.

No principal capítulo desta dissertação foi analisado o desempenho energético e ambiental de uma habitação uni-familiar, estruturada com perfis metálicos enformados a frio. Por forma a cumprir os objetivos propostos foi utilizada uma ferramenta numérica simplificada, desenvolvida no âmbito de um projeto Europeu SB_Steel. Este software permite estimar os consumos energéticos anuais do edifícios e os impactos ambientais associados ao seu ciclo de vida, em fases iniciais de projeto, caracterizadas pela grande ausência de informação e incertezas acerca das soluções construtivas finais.

Adotando a cidade de Coimbra como localização para o edifício alvo de análise, foi elaborado um estudo paramétrico por forma a analisar a influência dos seguintes parâmetros no seu desempenho energético e ecológico: isolamento térmico; ventilação; envidraçados; temperatura do “*set-point*” dos aparelhos mecânicos de climatização; dispositivos de proteção solar; tipo de piso térreo.

As seguintes conclusões podem ser destacadas como principais no âmbito deste estudo:

- A estimativa da eficiência energética e impactos ambientais resultantes do ciclo de vida de um edifício, em fases iniciais do seu projeto, é possível. Estão disponíveis ferramentas numéricas simplificadas para este efeito, apesar das margens de erro associadas às mesmas serem por vezes significativas, estas oferecem um método simples e expedito de comparar os efeitos e consequências de diversas soluções e opções construtivas, reduzindo o número de iterações até atingir uma solução ótima.
- A ausência de medidas passivas ou estratégias bioclimáticas que permitam o controlo dos ganhos solares, especialmente através dos envidraçados, apesar de representarem um aspeto positivo na estação de aquecimento, maximizando os ganhos energéticos, conduzem a consumos de energia avultadíssimos na estação de arrefecimento, condicionando assim a eficiência energética anual do edifício independentemente do seu desempenho na estação de aquecimento.
- Habitualmente, a parte mais fraca da envolvente, do ponto de vista térmico, são os envidraçados. Através destes elementos registam-se grandes quantidades de calor ganho e perdido para o exterior, pelo que é vital uma adequada e fundamentada escolha quer dos

envidraçados quer dos dispositivos de proteção solar a aplicar, sendo a eficiência energética do edifício altamente dependente destes.

- É possível obter uma ampla gama de valores relativos aos ganhos energéticos através dos envidraçados em função do dispositivo de proteção solar adotado. Segundo os resultados obtidos e tal como esperado, dispositivos de proteção pelo exterior do edifício revelam-se significativamente mais eficientes no controlo da radiação solar do que os localizados no interior. A correta escolha do dispositivo de proteção solar mais adequado a um determinado edifício pode ser determinante no seu desempenho energético durante a estação de aquecimento e consequentemente anual.

- A análise dos resultados no âmbito dos parâmetros relativos à ventilação e temperatura do “*set-point*” dos aparelhos mecânicos de climatização revelam como estes podem ser vitais na diminuição dos consumos energéticos dos edifícios. Ao contrário de parâmetros imutáveis ao longo do tempo (a menos que haja investimento monetário), como a taxa de isolamento térmico ou os dispositivos de proteção solar, a ventilação e temperatura do “*set-point*” dos aparelhos de climatização podem ser facilmente alteradas, conduzindo a uma poupança anual significativa de energia. A ventilação pode ser constantemente adaptada às variações climáticas diárias ou sazonais, reduzindo-se a um caudal mínimo que garanta a salubridade do ar interior durante a estação de aquecimento ou sendo maximizada na estação de arrefecimento por forma a favorecer as perdas de calor para o exterior.

- Existe uma maior facilidade por parte dos utilizadores dos edifícios em reduzir as necessidades energéticas associadas à climatização durante a estação de arrefecimento do que durante a estação de aquecimento. Através de estratégias e modos de operação, como por exemplo promover uma elevada taxa de ventilação ou limitar os ganhos energéticos pelos envidraçados (ativando dos dispositivos de proteção solar ou adotando elementos de sombreamento), consegue-se uma redução significativa das necessidades energéticas durante a estação de arrefecimento. Por outro lado, na estação de aquecimento, as estratégias existentes baseiam-se na maximização do aproveitamento dos ganhos solares, que nem sempre pode existir em quantidades substanciais. Perante isto, há que apostar em métodos e elementos construtivos que permitam um bom desempenho térmico dos edifícios na estação de aquecimento mas também em estratégias bioclimática e medidas passivas que permitam o controlo do sobreaquecimento do espaço interior na estação de arrefecimento.

- Através da análise dos impactes ambientais associados ao ciclo de vida do edifício pode observar-se as vantagens da construção utilizando perfis metálicos enformados a frio, apesar de não terem sido analisadas estruturas edificadas com outros tipos de materiais (betão armado, por exemplo) por forma a ter modelos de comparação. Estas vantagens são traduzidas nos baixos impactes ambientais visíveis no módulo correspondente à fase de

construção (A4-A5) e significativos “créditos ambientais” obtidos derivados da completa reciclagem do aço.

Em conclusão, realçar que independentemente da ferramenta de cálculo utilizada, cada edifício é um caso que necessita de avaliação individual e cuidada. Todas as soluções construtivas, todos os parâmetros aqui analisados, interagem entre si, pelo que é uma abordagem global do edifício que tem de ser analisada e testada por forma a obter um desempenho energético e ambiental ótimo.

7.2 Trabalhos Futuros

Dentro dos objetivos desta dissertação, e como o objetivo de explorar melhor os aspetos relacionados com a eficiência energética e impactes ambientais de edifícios, apresentam-se aqui algumas propostas para trabalhos futuros.

- Uma vez que a ferramenta numérica utilizada permite o estudo em duas fases diferentes de projeto (*Concept Design* e *Preliminary Design*), seria boa opção fazer uma análise comparativa entre estas duas fases, para o mesmo edifício em estudo, comparando os resultados obtidos em cada uma delas.
- Como referido, foi utilizado um software de cálculo simplificado, através do qual se obtiveram resultados que embora possam estar em concordância com resultados obtidos através de softwares mais rigorosos, não são iguais. Seria interessante efetuar um estudo comparativo entre a ferramenta de cálculo simplificado utilizada nesta dissertação e softwares de análise mais rigorosos, como os de simulação energética dinâmica (EnergyPlus, por exemplo) e ACV completos, avaliando assim a precisão dos resultados obtidos.
- No âmbito desta dissertação apenas se concluiu acerca da solução ótima, para a estação de aquecimento, arrefecimento e anual, de entre os cenários propostos. Seria uma boa opção, através de uma ferramenta de análise multicritério proceder à optimização das opções construtivas tendo em conta quer a energia operacional quer os impactes ambientais, sem se estar limitado aos cenários aqui estudados. Esta solução corresponderia à solução final em que o rácio entre energia incorporada e energia operacional seria ótimo.
- Por fim, seria interessante acrescentar também à análise a vertente económica, para um determinado período de vida de uma edificação. Através desta análise poderia estudar-se além da eficiência energética e impactes ambientais de várias soluções construtivas, os períodos de retorno financeiro de cada uma delas.

BIBLIOGRAFIA

Ameco User's Manual - Version 3.0. (2013). ArcelorMittal, Luxemburgo.

Balaras. C, Gaglia. A, Georgopoulou. E, Mirasgedis. S, Sarafidis. Y, Lalas. D (2007). "European residential buildings and empirical assessment of the Hellenic building stock, energy consumption, emissions and potential energy savings". *Building and Environment*, Vol. 42, pp. 1298–1314.

BPIE (2010). "Cost Optimality: Discussing methodology and challenges within the recast Energy Performance of Buildings Directive". The Buildings Performance Institute Europe, Bruxelas.

Bribián. I, Usón. A, Scarpellini. S (2009). "Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification". *Building and Environment*, Vol. 44, pp. 2510–2520.

BuildingTestExpo@(2015).http://www.buildingtestexpo.com/assets/files/Proceedings2014/ari_ilomaki.pdf. Building Test Expo (<http://www.buildingtestexpo.com>), Reino Unido.

Cabeza. L, Rincón. L, Vilarino. V, Pérez. G, Castell. A (2014). "Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 29, pp. 394–416.

Carlos. J.S, Nepomuceno. M.C.S, (2012) "A simple methodology to predict heating load at an early design stage of dwellings". *Energy and Buildings*, Vol. 55, pp. 198–207.

CEN/TR 15615 (2006). Explanation of the general relationship between various CEN standards and the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)". Comité Europeu de Normalização, Bruxelas.

Crawley. D.B, Lawrie. L.K, Winkelmann. F.C, Buhl. W.F, Huang. Y.J, Pedersen. C.O, Strand. R.K, Liesen. R.J, Fisher. D.E, Witte. M.J, Glazer.J (2001). "EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program". *Energy and Buildings*, Vol. 33, pp. 319–331.

DL n.79/2006. Decreto-Lei de 4 de Abril do Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações”. Diário da República – I Série – A, No. 67, pp. 2416–2468, Lisboa.

DL n.80/2006. Decreto-Lei de 4 de Abril da Direção Geral de Energia e Geologia”. Diário Da República – I Série – A, Nº. 67, pp. 2468–2513, Lisboa.

DL n.118/2013. Decreto-Lei de 20 de Agosto do Ministério da Economia e do Emprego”. Diário da República – I Série, No. 159, pp. 4988–5005, Lisboa.

DL n.78/2006. Decreto-Lei de 4 de Abril do Ministério da Economia e da Inovação”. Diário da República – I Série –A, No. 67, pp. 2–6, Lisboa.

DL n.40/1990. Decreto-Lei de 6 de Fevereiro do Ministério das Obras Públicas Transportes e Comunicações”. Diário da República –I Série, No. 31, pp. 490–504, Lisboa.

DesignBuilder@(2015).<http://www.designbuilder.co.uk/content/view/144/223/>.DesignBuilder - Simulation Made Easy (www.designbuilder.co.uk), Londres.

Diretiva Europeia 2002/91/CE. Diretiva do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de Dezembro de 2002 sobre o desempenho energético dos edifícios. Jornal Oficial das Comunidades Europeias, pp. 65–71, Bruxelas.

Diretiva Europeia 2006/32/CE. Diretiva do Parlamento e Conselho de 4 de Abril de 2006 sobre a eficiência na utilização final de energia e serviços energéticos. Jornal Oficial da União Europeia, pp. 64–85, Bruxelas.

Diretiva Europeia 2010/31/EU. Diretiva do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 sobre o desempenho energético dos edifícios. Jornal Oficial das Comunidades Europeias, pp. 13–35, Bruxelas.

EN 15316-3-1 (2007), Heating systems in buildings – Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies. Comité Europeu de Normalização, Bruxelas.

EN 15804 (2012), Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products. Comité Europeu de Normalização, Bruxelas.

EnergyPlus@(2015a).http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_about.cfm. EnergyPlus – Energy Simulation Software (www.apps1.eere.energy.gov), Washington DC.

EnergyPlus@(2015b).http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=PRT/cname=Portugal. EnergyPlus – Energy Simulation Software (www.apps1.eere.energy.gov), Washington DC.

Equa@ (2015), <http://www.equa.se/en/ida-ice>. EQUA Simulation (www.equa.se), Estocolmo.

Fibran@(2015), <http://www.fibran.com.pt/frontend/new.php?aid=400&cid=58>. Fibran (<http://www.fibran.com.pt>), Ovar.

Finkbeiner. M, Inaba. A, Tan. R, Christiansen. K, Kluppel. H (2006). “The New International Standards for Life Cycle Assessment: ISO 14040 and ISO 14044”. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 11, pp. 80–85.

Gervásio. H, Santos. P, Simões da Silva. L, Lopes. A.M.G (2010). “Influence of thermal insulation on the energy balance for cold-formed buildings”. *Advanced Steel Construction*, Vol. 6, Nº. 2, pp. 742–766.

Gervásio. H, Santos. P, Martins. R, Simões da Silva. L (2014). “A macro-component approach for the assessment of building sustainability in early stages of design”. *Building and Environment*, Vol. 73, pp. 256–270.

Green paper: “Towards a European Strategy for the Security of Energy Supply”. COM(2000)769, Comissão Europeia, Bruxelas.

ISO 13790 (2008), Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling. Comité Européen de Normalização, Bruxelas.

ISO 14040 (2006), Environmental management – Life cycle assessment - Principles and framework. Organização Internacional para a Normalização, Génova.

ISO 14044 (2006), Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and Guidelines. Organização Internacional para a Normalização, Génova.

ITeCons@ (2015a). <http://www.itecons.uc.pt/index.php?module=inst&id=7>. Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção (<http://www.itecons.uc.pt>), Coimbra.

ITeCons@ (2015b), <http://www.itecons.uc.pt/index.php?module=formacao&id=43>. Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção (<http://www.itecons.uc.pt>), Coimbra.

Kim. Y, Yoon. S, Park. C (2013). “Stochastic comparison between simplified energy calculation and dynamic simulation”. *Energy and Buildings*, Vol. 64, pp. 332–342.

Kottek. M, Grieser. J, Beck. C, Rudolf. B, Rubel. F (2006). “World map of the Köppen-Geiger climate classification updated”. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol.15, Nº. 3, pp. 259–263.

LNEG@ (2015), <http://www.lneg.pt/servicos/35/2172/>. Laboratório Nacional de Energia e Geologia (www.lneg.pt), Lisboa.

Luttropp. C, Lagerstedt. J (2006). “EcoDesign and The Ten Golden Rules: generic advice for merging environmental aspects into product development”. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 14, pp. 1396–1408.

Malmqvist. T, Glaumann. M, Scarpellini. S, Zabalza. I, Aranda. A, Llera. E, Díaz. S (2011). “Life cycle assessment in buildings: The ENSLIC simplified method and guidelines”. *Energy*, Vol. 36, pp. 1900–1907.

Nielsen. T.R (2005). “Simple tool to evaluate energy demand and indoor environment in the early stages of building design”. *Solar Energy*, Vol. 78, pp. 73–83.

OrdemDosEngenheiros@(2015).http://www.ordemengenheiros.pt/fotos/dossier_artigo/eduardo20maldonado14871638444d22ff978935a.pdf. Ordem dos Engenheiros (www.ordemdosengenheiros.pt), Lisboa.

Petersen. S, Svendsen. S (2010). “Method and simulation program informed decisions in the early stages of building design”. *Energy and Buildings*, Vol. 42, N.º. 7, pp. 1113–1119.

(PDMC, 2013) Plano Diretor Municipal de Coimbra. Estudos de Caracterização, 1ª Revisão, CM Coimbra, 2013.

Pre-Sustainability@ (2015). <http://www.pre-sustainability.com/download/Life-Cycle-Based-Sustainability-Standards-Guidelines.pdf>. Pré - Putting the metrics behind sustainability (<http://www.pre-sustainability.com/>), Amersfoort.

PrEN 15978 (2009), Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method. Comité Europeu de Normalização, Bruxelas.

Santos. P, Gervásio. H, Simões da Silva. L, Gameiro. A (2011). Influence of climate change on the energy efficiency of light-weight steel residential buildings. *Civil Engineering and Environmental Systems*, Vol. 28, pp. 325–352.

Santos. P, Simões da Silva. L, Gervásio. H, Gameiro Lopes. A (2010). “Parametric analysis of the thermal performance of light steel residential buildings in Csb climatic regions”. *Journal of Building Physics*, Vol. 35, pp. 7–53.

Santos.P , Martins. R, Gervásio. H, Simões da Silva. L (2014). “Assessment of building operational energy at early stages of design – A monthly quasi-steady-state approach”. *Energy and Buildings*, Vol. 79, pp. 58–73.

Sharma. A, Saxena. A, Sethi. M, Shree. V, Varun (2011). “Life cycle assessment of buildings: A review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, pp. 871–875.

Torgal. F, Jalali. S (2011). “Energia Incorporada em Materiais de Construção versus Operacional”. Construlink, Vol. 9, N° 27, pp. 5–12.

Trnsys@ (2015). <http://www.trnsys.com/features/>. Transient System Simulation Tool (www.trnsys.com), Madison.

Van der Veken. J, Saelens. D, Verbeeck. G, Hens. H (2004). “Comparison of Steady-State and Dynamic”. Ashare Journal, pp. 1–11.