



Dissertação

Mestrado em Engenharia Civil – Construção Civil

***Simulação do Desempenho Energético com Base na
Metodologia BIM: Caso de Estudo do Edifício da
ESSLei***

Larissa Sibille Henschel

Leiria, Setembro de 2018



Dissertação

Mestrado em Engenharia Civil – Construção Civil

***Simulação do Desempenho Energético com Base na
Metodologia BIM: Caso de Estudo do Edifício da
ESSLei***

Larissa Sibille Henschel

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação da Doutora Luisa Maria Silva Gonçalves, Professora da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação do Mestre Hermano Joaquim dos Santos Bernardo, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria.

Leiria, Setembro de 2018

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

Agradeço aos professores e orientadores Luísa Gonçalves e Hermano Bernardo, por lançarem o desafio e por todo o apoio e paciência durante o período de estudo e partilha de conhecimento, que foram importantes para o desenvolvimento da presente dissertação e resolução das dificuldades encontradas durante o processo.

Ao Eng. Cláudio P. Carvalho, por disponibilizar a arquitetura do edifício para a continuação dos estudos da Escola Superior de Saúde do Instituto Politécnico de Leiria, neste caso para o estudo energético.

Aos familiares, que mesmo de longe, me apoiaram e motivaram. Ao meu noivo e família, que estiveram presentes ao longo deste período e me deram incentivo e acreditaram na minha capacidade.

Aos amigos que estiveram próximos, pelas palavras motivacionais e compreensão e, a todos os que direta ou indiretamente estiveram envolvidos durante este período, o meu muito obrigada.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

O setor da construção contribui de forma significativa para o consumo total de energia e, este é um dos motivos que faz com que cada vez mais sejam exigidas medidas de eficiência energética nas edificações. Existem inúmeros programas que proporcionam a simulação do desempenho energético de edifícios e, com seu uso, é possível comparar diferentes alternativas de projeto a fim de decidir pela melhor delas.

Building Information Modelling (BIM) é uma metodologia que é cada vez mais utilizada nas empresas de construção em virtude das facilidades que proporciona, porém as suas funcionalidades ainda não estão exploradas na sua totalidade pelos profissionais. Assim, no que diz respeito ao estudo do consumo de energia de edifícios, existe a necessidade de se conhecer melhor a interação e o potencial quer das ferramentas de simulação energética neste ambiente, quer das informações integradas no modelo.

A presente dissertação apresenta um estudo energético de um dos edifícios do Instituto Politécnico de Leiria desenvolvido em ambiente BIM. A partir do modelo 3D desenvolvido, foram feitas configurações para a criação e validação do modelo energético para a posterior realização de simulações energéticas através do Energy Analysis do Autodesk Revit, que usa o mecanismo do Autodesk Green Building Studio.

Foi ainda analisada a interoperabilidade entre os *softwares*, assim como a eficiência e fiabilidade dos resultados da simulação, através da comparação dos resultados obtidos com o real consumo de energia do edifício, o qual é conhecido a partir de dados de uma auditoria energética. Os resultados também foram comparados com os obtidos com um estudo efectuado por Santos (2012), onde foi utilizado o *software* EnergyPlus. Assim, foi possível concluir que o uso do Energy Analysis juntamente com o Green Building Studio proporciona uma interface amigável e um uso facilitado, contudo com algumas limitações nomeadamente na alteração dos padrões predefinidos. A simulação também apresenta uma grande gama de resultados, como por exemplo o potencial de economia de energia, cargas de aquecimento e arrefecimento, e rosa dos ventos, dados que foram também explorados ao longo do estudo.

Palavras-chave: *Building Information Modelling*, Green Building Studio, Análise energética, Eficiência energética, Modelo energético de edifícios.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abstract

The construction sector has a significant contribution to the overall energy consumption, and this is one of the reasons why increasingly more sustainable construction techniques are sought after for the development of energy efficient buildings. Several simulation software can predict energy performance consumption of buildings, and with them, it is possible to study adequate design alternatives.

Building Information Modelling (BIM) is a methodology with an increasingly use in building sector due to the several benefits it can provide, but often its functionalities are not explored by the professionals in its totality. Thus, regarding the study of the energy consumption of buildings, there is a need for a better understanding of the interaction between different energy simulation tools in BIM environment and, consequently, for a better use of the information integrated in the model.

The current thesis presents an energy study of one of the buildings from the Polytechnic Institute of Leiria developed in BIM environment. From a 3D model developed, introducing of configurations was made to create and validate the energy model to later perform the energy simulation using Energy Analysis for Autodesk Revit, which uses the mechanism of Autodesk Green Building Studio.

The interoperability between the software tools was also analysed, as well as the efficiency and reliability of the simulation, by comparing the results obtained with the actual consumption of the building, which is known from a previous energy audit. The results were also compared with the ones obtained by Santos (2012), which used EnergyPlus software. After that, it was possible to conclude that the use of Energy Analysis together with Green Building Studio provide an user-friendly interface and a facilitated usage, however with some limitation in customizing the predefined patterns. The simulation also provides a considerable number of output data, such as the energy saving potential, heating and cooling loads, and wind roses, data that was also explored in the study.

Keywords: Building Information Modelling, Green Building Studio, Energy analysis, Energy efficiency, Buildings energy model.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de figuras

Figura 1 – Resultados de uma avaliação inicial de ferramentas de simulação energética ..	10
Figura 2 – Interoperabilidade dos softwares com a plataforma GBS.....	13
Figura 3 – Simulação energética a partir de a) massas conceituais, b) elementos de construção, ou c) ambos	15
Figura 4 – Modelo energético da construção residencial	16
Figura 5 – Fachadas (a) Noroeste, (b) Nordeste, (c) Sudeste e (d) Sudoeste	19
Figura 6 – Localização de Leiria no mapa da divisão de zonas climáticas de Portugal de inverno e verão, respetivamente	20
Figura 7 – Aparência e características da parede exterior tipo 1 criada no Autodesk Revit25	
Figura 8 – Localização do edifício e regiões com dados climáticos mais próximas.....	27
Figura 9 – Dados climáticos mensais para a região climática considerada.....	27
Figura 10 – Orientação real do edifício	28
Figura 11 – Exemplo da definição da ocupação específica para um dos espaços da Zona - 1.2	31
Figura 12 – Exemplo da definição da potência de iluminação específica e potência de equipamento específica para um dos espaços da Zona -1.2	31
Figura 13 – Perfil de ocupação de escolas ou universidades em dias úteis.....	34
Figura 14 – Perfil de ocupação de escolas ou universidade aos sábados	35
Figura 15 – Perfil de ocupação de escolas ou universidade aos domingos e feriados	35
Figura 16 – Perfil de utilização: % ocupação	36
Figura 17 – Perfil de utilização: % iluminação	37
Figura 18 – Perfil de utilização: % equipamentos.....	37
Figura 19 – Esquema simplificado do sistema de AVAC	38
Figura 20 – Folha de cálculo para o caudal de ar novo de cada uma das zonas térmicas ...	42
Figura 21 - Exemplo da inserção do caudal de ar novo na Zona 2.1.....	43
Figura 22 – Configurações energéticas consideradas na criação do modelo energético.....	45
Figura 23 – Janela de configuração para ‘construção de edifício’ da seção do ‘modelo de energia’	46
Figura 24 – Guia de análise energética.....	48
Figura 25 – Modelo energético.....	49

Figura 26 – Comparação entre os consumos energéticos anuais totais.....	52
Figura 27 – Comparação da desagregação dos consumos de energia elétrica a partir das simulações	53
Figura 28 – Comparação do consumo mensal de energia da ESSLei entre dados da auditoria e da simulação no Autodesk Revit	54
Figura 30 – Cargas mensais de aquecimento da ESSLei	57
Figura 31 – Cargas mensais de arrefecimento da ESSLei.....	58
Figura 32 – Rosa dos ventos anual para a velocidade dos ventos	60
Figura 33 – Rosa dos ventos anual para a frequência dos ventos.....	61
Figura 34 – Rosas dos ventos mensais para a frequência dos ventos.....	62
Figura 35 – Orientação do edifício da ESSLei	63
Figura A. 1 – Identificação da envolvente do piso -1	70
Figura A. 2 – Identificação da envolvente do piso 0	70
Figura A. 3 – Identificação da envolvente do piso 1	71
Figura A. 4 – Identificação da envolvente do piso 2	71
Figura B. 1 – Zonas térmicas do piso -1	78
Figura B. 2 – Zonas térmicas do piso 0	78
Figura B. 3 – Zonas térmicas do piso 1	79
Figura B. 4 – Zonas térmicas do piso 2	79
Figura B. 5 – Zonas térmicas da cobertura.....	79

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de tabelas

Tabela 1 – Características do edifício.....	18
Tabela 2 – Características e coeficientes de transmissão térmico das paredes exteriores...	22
Tabela 3 – Características e coeficientes de transmissão térmico dos pavimentos e coberturas.....	23
Tabela 4 – Características e coeficientes de transmissão térmica dos envidraçados.....	24
Tabela 5 – Discriminação dos tipos de espaços de cada uma das zonas térmicas	29
Tabela 6 – Cargas reais.....	30
Tabela 7 – Perfil de utilização real da ESSLei para a ocupação	32
Tabela 8 – Perfil de utilização real da ESSLei para a iluminação.....	33
Tabela 9 – Perfil de utilização real da ESSLei para os equipamentos	33
Tabela 10 – Características do sistema de AVAC da ESSLei.....	39
Tabela 11 – Distribuição das UTA’s nas zonas térmicas	39
Tabela 12 – Valores das bombas e ventiladores AVAC	41
Tabela 13 – Valores calculados para os caudais de ar novo de cada uma das zonas térmicas	43
Tabela 14 – Consumo de energia e sua desagregação por sector, conforme dados recolhidos da auditoria energética	51
Tabela 15 – Comparação dos consumos energéticos anuais e seus desvios em relação à auditoria.....	51
Tabela 16 – IEE de cada uma das formas de simulação.....	54
Tabela A. 1 – Caracterização da envolvente do edifício da ESSLei	72

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de siglas

AECO – Arquitetura, Engenharia e Construção

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

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

BIM – *Building Information Modelling*

COP – *Coefficient of Performance*

EER – *Energy Efficiency Ratio*

eQUEST – *Quick Energy Simulation Tool*

ESSLei – Escola Superior de Saúde

GBS – *Green Building Studio*

gbXML – *Green Building Extensible Markup Language*

IES – *Integrated Environmental Solutions*

INESC – Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores

IPL – Instituto Politécnico de Leiria

LBNL – *Lawrence Berkeley National Laboratory*

LED – *Light Emitting Diode*

LEED – *Leadership in Energy and Environmental Design*

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MEP – *Mechanical, Electrical and Plumbing*

NUTS – Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos

USDOE – *United States Department of Energy*

UTA – Unidade de Tratamento de Ar

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice

AGRADECIMENTOS	IV
RESUMO	VI
ABSTRACT	VIII
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE SIGLAS	XV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objectivos	2
1.3. Estrutura da dissertação	3
2. MODELAÇÃO E SIMULAÇÃO ENERGÉTICA	4
2.1. Simulação energética em ambiente BIM	11
2.2. Estudo preliminar da modelação energética em ambiente BIM	14
3. ESTUDO DE CASO: ESCOLA SUPERIOR DE SAÚDE DE LEIRIA	17
3.1. Caracterização do edifício e dados climáticos	18
3.2. Modelação em BIM	20
3.3. Modelação energética em ambiente BIM	25
3.3.1. Localização e orientação	26
3.3.2. Cargas reais e zonas térmicas	28
3.3.3. Perfil de utilização	31
3.3.4. Caracterização do sistema de AVAC	38
3.3.5. Caudais de ar novo	41
3.3.6. Configurações de energia para a criação do modelo energético	44
3.4. Simulações energéticas e validação do modelo	49
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1. Comparação dos dados da auditoria com os resultados da simulação	50
4.2. Emissões de CO₂	55
4.3. Cargas de aquecimento e arrefecimento	56
4.4. Influência e distribuição dos ventos	59
5. CONCLUSÃO	63

BIBLIOGRAFIA

66

ANEXOS

70

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Os edifícios contribuem com uma percentagem muito significativa para o consumo de energia total. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2017), a operação dos edifícios juntamente com o setor da indústria de Arquitetura, Engenharia e Construção (AECO) são responsáveis por 36% do consumo da energia final global e aproximadamente 40% do total direto e indireto das emissões de CO₂. Este número tem registado um aumento contínuo e é por isso que existe uma maior preocupação em adoptar procedimentos sustentáveis neste sector.

Devido ao ramo da construção ser o maior responsável pelo alto consumo de energia, o que contribui de forma negativa para o meio ambiente e o aquecimento global, o sector da AECO necessita cada vez mais de meios alternativos que possam tornar os edifícios energeticamente mais eficientes (Abanda & Byers, 2016).

Assim, torna-se importante o estudo e desenvolvimento de novas tecnologias que possam auxiliar a tornar as construções mais sustentáveis, quer no desenvolvimento de projetos de novas construções, mas também na reabilitação das existentes, incluindo a intervenção ou monitorização ao nível da manutenção do edificado. É importante pensar e analisar, ainda na fase de projeto, quais os gastos de energia relacionados com o edifício em fase de operação, para desta forma evitar que depois se tenham altos gastos de energia, nomeadamente ao nível do consumo de sistemas de arrefecimento e aquecimento.

Para tal, é importante ter-se conhecimento de ferramentas de análise de energia de edifícios, assim como saber quais os parâmetros a aplicar que contribuem para o consumo excessivo de energia, de forma a auxiliar nas opções a adoptar ou alterações a efectuar na fase de projeto que sejam amigáveis do ambiente, como sejam os sistemas de captação solar ou, por exemplo, os painéis fotovoltaicos.

Com o propósito de entender melhor os fatores que interferem na eficiência energética de um edifício, percebe-se a necessidade de um estudo dos componentes do edifício considerando seu comportamento térmico. Isso pode ser feito a partir de um modelo virtual

com características realísticas e através das devidas configurações de energia, a fim de se obter resultados fiáveis. Uma das formas de saber o consumo de energia de uma edificação é através da utilização de simuladores de energia e, a partir dos dados obtidos, é possível estudar quais as mudanças que podem ser realizadas de forma a tornar a edificação mais eficiente do ponto de vista energético.

A criação de um modelo de simulação de energia, tem como objectivo proporcionar previsões precisas sobre o consumo de energia e conforto térmico dos ambientes de um edifício (Bernardo *et al*, 2017). A metodologia BIM, entretanto, tem vindo a tornar-se cada vez mais utilizada pelas empresas do ramo da construção, pois integra o trabalho dos diversos profissionais envolvidos no projeto de um edifício num mesmo modelo. Portanto, devido a esta evolução na utilização de modelos de construção em BIM, a que acresce a grande preocupação ambiental, torna-se importante efectuar análises comparativas de resultados obtidos a partir das diferentes ferramentas e a sua possível integração. Desta forma, o estudo da fiabilidade dos resultados obtidos com os simuladores energéticos em ambiente BIM, pode trazer grandes benefícios na credibilidade dos resultados adquiridos e na rapidez de análise.

1.2. Objectivos

O presente estudo tem o objectivo de explorar as potencialidades das ferramentas computacionais de simulação do consumo energético implementadas em ambiente BIM, para simular o desempenho energético ao nível do edifício e analisar a fiabilidade dos resultados obtidos.

Para tal, foi realizada uma simulação do desempenho energético do edifício da Escola Superior de Saúde (ESSLei) do Instituto Politécnico de Leiria (IPL) a partir de um modelo do edifício desenvolvido em BIM, de forma a avaliar como realizar a simulação energética neste ambiente e quais os parâmetros que devem ser considerados na calibração do modelo.

O modelo arquitectónico, em BIM, foi inicialmente desenvolvido em estudo anterior, por Carvalho (2016), e foi adaptado para o presente estudo em função da necessidade da consideração de seu comportamento térmico, assim como de outros parâmetros que tem

influência no consumo energético. Para o desenvolvimento do modelo em BIM foi utilizado o *software* Autodesk Revit versão 2016 e, como este *software* possui integrado um *plugin* de análise energética chamado Energy Analysis, o qual conecta diretamente com a frequência do Green Building Studio (GBS), esta forma de simulação energética foi optada. A cada simulação realizada, o resultado obtido foi comparado com o consumo anual total de energia do edifício, conhecido a partir de dados de uma auditoria energética, o que permitiu a calibração do modelo à realidade e sua validação.

Através da simulação energética será possível obter o conhecimento do consumo de energia assim como avaliar as emissões de gases de efeito estufa produzidos devido a este consumo.

Portanto, os objectivos específicos podem ser mencionados como:

- A partir de um edifício de serviços previamente modelado através da metodologia BIM, pretende-se explorar as possibilidades de utilização do modelo existente para simular o seu desempenho energético;
- Realização de alterações que se revelem necessárias no modelo existente e modelação energética, através da definição de parâmetros e de configurações de energia, de forma a se obter um modelo térmico com características o mais próximo possível do real;
- Simulação energética e validação do modelo em BIM, tomando como referência os dados de uma auditoria energética;
- Análise dos resultados e comparação com os resultados de estudo realizado por Santos (2012), onde foi feita uma simulação energética do mesmo edifício através do *software* EnergyPlus, porém não em ambiente BIM;
- Avaliar as capacidades e limitações de uma simulação energética realizada a partir de um modelo desenvolvido em Autodesk Revit, baseado na metodologia BIM.

1.3. Estrutura da dissertação

O estudo encontra-se estruturado em 5 capítulos em conformidade com os objectivos referidos anteriormente.

No presente capítulo é feita uma introdução ao tema da dissertação, o seu enquadramento e objectivos do estudo, expõem-se ainda a forma como o tema será abordado e como o estudo será conduzido.

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica do tema, apresentando a funcionalidade de uma simulação energética de edifícios, quais os parâmetros considerados essenciais, assim como sua relação e interação com a metodologia BIM. No fim do capítulo, de forma a finalizar a parte de estudo do tema, é apresentado um exemplo de um estudo preliminar realizado sobre modelação e análise energética em ambiente BIM.

O Capítulo 3 apresenta o estudo de caso da presente dissertação, com a caracterização do edifício estudado, as etapas da adaptação da arquitectura do modelo em BIM, a modelação energética a partir da inserção dos parâmetros energéticos conhecidos, assim como a simulação energética.

O Capítulo 4 aborda a discussão dos resultados obtidos das simulações energéticas realizadas ao longo do presente estudo, a partir do modelo desenvolvido em BIM, assim como uma comparação com os dados de uma auditoria energética e os resultados de uma simulação realizada em estudo anterior, de Santos (2012), do mesmo edifício. Além disso, serão discutidos os demais dados obtidos a partir da simulação, tais como emissões de gases de efeito estufa produzidos, as cargas reais de aquecimento e arrefecimento do edifício, e a distribuição dos ventos.

No Capítulo 5, por fim, são apresentadas as conclusões do estudo quanto aos resultados obtidos, as vantagens e limitações encontradas na realização de simulações energéticas em ambiente BIM e, propostas para trabalhos futuros.

2. Modelação e simulação energética

Em virtude dos elevados gastos de energia no setor da construção civil e da grande preocupação com a sua redução, atualmente existem, disponíveis no mercado, diversos programas que proporcionam a simulação energética de edifícios.

A modelação, simulação e análise energética prévia e sua aplicação no desenvolvimento de projetos, permitem avaliar o impacto que a alteração planeada terá na edificação,

proporcionando aos proprietários das construções um custo reduzido durante todo o ciclo de vida da construção pois acabam por ter menores custos iniciais, com alterações, na operação ou mesmo com manutenção (Reeves *et al.*, 2015). Além disso, pode contribuir para providenciar aos ocupantes do edifício uma maior satisfação com o conforto dos ambientes internos, melhor qualidade do ar interior, que é um fator importante para o seu bem-estar.

No caso de ambientes escolares, segundo Bernardo *et al.* (2017), é importante ter um alto fluxo de ar interior, de forma a remover o ar contaminado em consequência da elevada taxa de ocupação e dos componentes do edifício. Garantir o conforto ambiental neste caso, costuma aumentar o gasto com energia, uma vez que muitas vezes se faz um uso mais intenso dos sistemas de climatização para proporcionar este conforto. Em contrapartida, existem muitos fatores que podem auxiliar na melhoria das condições dos ambientes de uma edificação sem um gasto intenso de energia, através de alterações que proporcionem um maior aproveitamento da ventilação natural, por exemplo.

A criação de um modelo energético para sua utilização em ferramentas de análise energética auxilia os projetistas na criação de construções sustentáveis. Através da realização de simulações, é possível estudar a escolha de materiais de construção ideais e sua disposição no projeto de forma a minimizar o consumo de energia e os impactos ambientais (Reeves *et al.*, 2015). Além disso, ainda é possível obter uma perspectiva em relação às avaliações de certificação energética pelo sistema de classificação *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED), que é o sistema de classificação de edifícios verdes mais utilizada a nível mundial, criada pelo *U.S. Green Building Council* (U.S.GBC, n.d.).

A simulação de energia de uma construção mede o uso de energia esperado, tanto de eletricidade como de combustível, tomando como base a geometria da construção, o clima na sua localização, o tipo de construção, as propriedades da envolvente, os sistemas de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (AVAC) e de iluminação existentes, considerando as interdependências da construção como um sistema completo (AutoDesk®, 2016).

Existem vários fatores que podem influenciar no consumo de energia e estes podem ser manipulados de forma a reduzir este consumo. Um dos fatores importantes na análise energética com grande impacto no consumo de energia é a orientação da construção, e a

sua localização. Uma boa orientação pode proporcionar uma alta economia durante todo o ciclo de vida da construção (Abanda & Byers, 2016).

Os componentes da envolvente do edifício, tais como paredes externas, telhados, janelas, entre outros, são também fatores importantes na análise energética, podendo ser fatores críticos na determinação da quantidade de energia que será requerida internamente (Abanda & Byers, 2016). Este aspeto pode muitas vezes ser melhorado pela alteração de materiais da envolvente, como com a implementação de isolamentos.

O perfil de ocupação do edifício é outro fator que tem certo impacto no consumo de energia, uma vez que este aspeto vai determinar o quanto se usa cada um dos espaços da edificação e seus sistemas de aquecimento (Abanda & Byers, 2016).

O uso dos sistemas de aquecimento e iluminação são considerados os maiores fatores de influência para a análise energética, e este uso pode ser minimizado pela correta orientação do edifício assim como pelo desenvolvimento de um projeto que proporcione uma geometria que faça bom uso da luz solar durante o dia (Abanda & Byers, 2016).

O modelo energético pode ser utilizado em várias das fases do ciclo de vida de uma construção com o objectivo de melhorar o desempenho energético, segundo Reeves *et al.* (2015), podendo ser:

- Na fase de projeto, onde os profissionais podem realizar simulações com o modelo energético para análise do desempenho de energia de diversas opções de projeto, com o objectivo de seleccionar o mais eficiente;
- Na fase de construção, onde o modelo energético é utilizado para comparar diferentes alternativas que foram criadas para alterações na construção;
- Na fase de operação, onde pode ser utilizado para avaliar o atual desempenho do edifício.

A maioria das decisões relacionadas com a eficiência energética são feitas nas fases iniciais de projeto, onde se avalia principalmente a localização, orientação, área a construir e fachadas. É possível, neste caso, realizar simulações energéticas a partir da criação de um modelo idealizado da construção, para uma previsão do futuro consumo energético do edifício (Reeves *et al.*, 2015).

Nas fases mais avançadas, são desenvolvidos projetos alternativos para serem comparados com o projeto inicial e, nesta etapa, já são incluídas características quanto aos materiais utilizados e sistema de AVAC existente. Depois disso, podem ser realizadas análises mais detalhadas, que tem o objectivo de avaliar o efeito do uso de diferentes sistemas e subsistemas, tais como janelas, isolamentos, entre outros. Por fim, certifica-se de que o projeto final escolhido proporciona resultados dentro dos requisitos de custos de energia desejados (Reeves *et al.*, 2015).

O modelo e as simulações energéticas realizadas na fase de operação do edifício podem ser úteis para avaliar o seu atual desempenho energético assim como identificar sistemas que não estão a funcionar adequadamente (como por exemplo o sistema de AVAC), o que faz aumentar os gastos de energia desnecessariamente (Reeves *et al.*, 2015).

Na realização de simulações energéticas de uma edificação existente, é importante que seja desenvolvido um modelo mais detalhado (Reeves *et al.*, 2015). Deve-se considerar os parâmetros realísticos da edificação, e estas informações devem ser bem recolhidas e aplicadas nas ferramentas de análise, para diminuir assim os erros (Bernardo *et al.*, 2017).

São muitas as informações da construção que devem ser consideradas no estudo de uma edificação existente. O comportamento e perfil de ocupação do edifício é um dos principais fatores que tem influência no uso de energia de um edifício (Lopes *et al.*, 2017). Este perfil de ocupação é tipicamente representado através da configuração de ocupantes, da temperatura interna dos espaços/ambientes, cronograma de eletrodomésticos existentes, iluminação e sistemas de AVAC (Reeves *et al.*, 2015).

No caso de edifícios que possuem alta taxa de ocupação ou uso de equipamentos, a simulação de consumo de energia normalmente depende da consideração das horas e intensidade de operação do edifício, além de características como orientação, quantidade e tipo de envidraçados, e condições de sombreamento (AutoDesk®, 2018).

Num estudo realizado por Knight *et al.* (2007 *apud* Reeves *et al.*, 2015), num edifício educacional no Reino Unido, o qual continham mais de 300 espaços no modelo de energia, foi concluído que o levantamento dos ocupantes do edifício e outras avaliações relacionadas à ocupação são consideradas informações úteis de forma a melhorar a precisão do modelo de energia criado para uma construção já em operação.

Quando se utiliza o modelo energético na previsão do consumo atual de energia durante a operação de um edifício, é importante que seja feita a sua calibração, e as maneiras mais comuns de realizá-la são (Mustafaraj *et al.*, 2014):

- Calibração manual iterativa: Baseada na experiência do usuário, a qual consiste no ajuste dos dados de entrada e outros parâmetros, através de tentativas e erros;
- Métodos gráficos e estatísticos: Baseado em representações gráficas específicas e comparações de resultados;
- Métodos de calibração automatizados: Baseado em testes especiais e procedimentos analíticos envolvendo testes intrusivos e medidas.

Segundo Mustafaraj *et al.* (2014) não é possível identificar uma solução única para a calibração do modelo. Ter a sensibilidade de como adaptar o problema para cada situação pode ser de importância primordial. Outro ponto importante na calibração, comentado pelo mesmo autor, é que ela exige uma correspondência dinâmica ao longo de um ano entre valores calculados e medidos, e não apenas um momento único que se refere apenas a um tipo de situação.

Dependendo do tipo de edificação, sistema e dados, dois níveis de calibração podem ser considerados (Mustafaraj *et al.*, 2014). O primeiro nível corresponde às informações e instalações da edificação como foram construídas, e considera os planos, esquemas e dados dos componentes da construção que estão disponíveis. Os dados recolhidos neste estágio da calibração são os dados que são esperados se obter de uma auditoria, por exemplo: recolha de todos os dados acessíveis da construção, manuais de manutenção, projetos, descrição completa da geometria, um histórico do clima da região, número máximo de ocupantes, potência dos principais sistemas de AVAC, composição da fachada detalhada, projeto elétrico, levantamentos da iluminação instalada, a densidade de carga dos equipamentos, entre outras características. O segundo nível requer um uso intensivo da modelação energética e monitorização da informação recolhida, como por exemplo: consumo de eletricidade da bomba de calor e boiler, temperatura da água quente e taxas de fluxo, consumo dos componentes primários e secundários do sistema de AVAC (que serão conferidos nos respetivos manuais), entre outros. Em suma, o segundo nível de calibração é um processo iterativo que serve para identificar os parâmetros mais críticos (que possuem maior influência), que depois de identificados estes valores são refinados.

No processo de calibração do modelo, é importante que todos os parâmetros conhecidos do edifício sejam devidamente ajustados no programa de simulação energética (Bernardo *et al.*, 2017). Os programas mais comuns, segundo Ilter & Ergen (2015), que estão atualmente no mercado, são o Green Building Studio (GBS), Integrated Environmental Solutions (IES) e o Quick Energy Simulation Tool (eQUEST), sendo que o GBS e o eQUEST são *softwares freeware*.

Muitas vezes as ferramentas de simulação energética podem não ser muito econômicas numa fase inicial de análise, porém, existem algumas ferramentas que permitem que a previsão de energia da construção seja feita *online*, o que pode em muitos casos ser uma boa opção (Mustafaraj *et al.*, 2014).

O GBS é uma plataforma *online* que proporciona a análise de uma edificação completa, dando resultados quanto às emissões de CO₂, ajuda o utilizador a fazer análises para a certificação LEED *Daylight Credit* 8.1, proporciona ainda resultados quanto a avaliação e o custo de energia considerando o ciclo de vida da construção e, além disso, é uma das ferramentas que proporciona uma boa usabilidade com uma interface amigável. O GBS tem uma das interfaces mais simples, enquanto o IES uma das mais complexas. Entretanto as desvantagens do GBS é não poder examinar os efeitos da radiação solar e realizar análises termodinâmicas como o IES (Ilter & Ergen, 2015).

Em estudo realizado por Reeves *et al.* (2015), onde foi feita uma avaliação e comparação entre diferentes ferramentas de simulação energética, o GBS apresentou resultados satisfatórios em grande parte dos aspetos avaliados, sendo colocado como um dos melhores *plugins* de análise, como mostra a Figura 1. O GBS foi classificado como melhor ferramenta no aspeto velocidade, entretanto também apresentou uma limitação, que é a incapacidade de contabilizar o consumo de energia e a emissão de gases de efeito estufa relacionados com as atividades materiais durante a fase de construção, como o transporte de materiais e processamento. Porém, esta ferramenta possivelmente é a mais apropriada para o caso do utilizador precisar comparar várias simulações de diferentes projetos.

O GBS não tem uma grande disponibilidade de dados de entrada no programa, o que faz com que ele realize a simulação mais rapidamente, porém torna-se menos adequado para utilizadores com maior experiência. Ele não é tão eficiente para projetos de alta dimensão, possuindo limitações neste aspeto e, por ser uma plataforma *online*, exige ligação à internet e ainda acesso com *password* (Ilter & Ergen, 2015). Em contrapartida, possui a vantagem

de ser uma plataforma com interface amigável, com pequenas exigências de preparação para a simulação e verificação automática de falhas. Possui ainda uma boa interoperabilidade com o Autodesk Revit e recebimento das informações do modelo através de um arquivo no formato *green building extensible markup language* (gbXML).

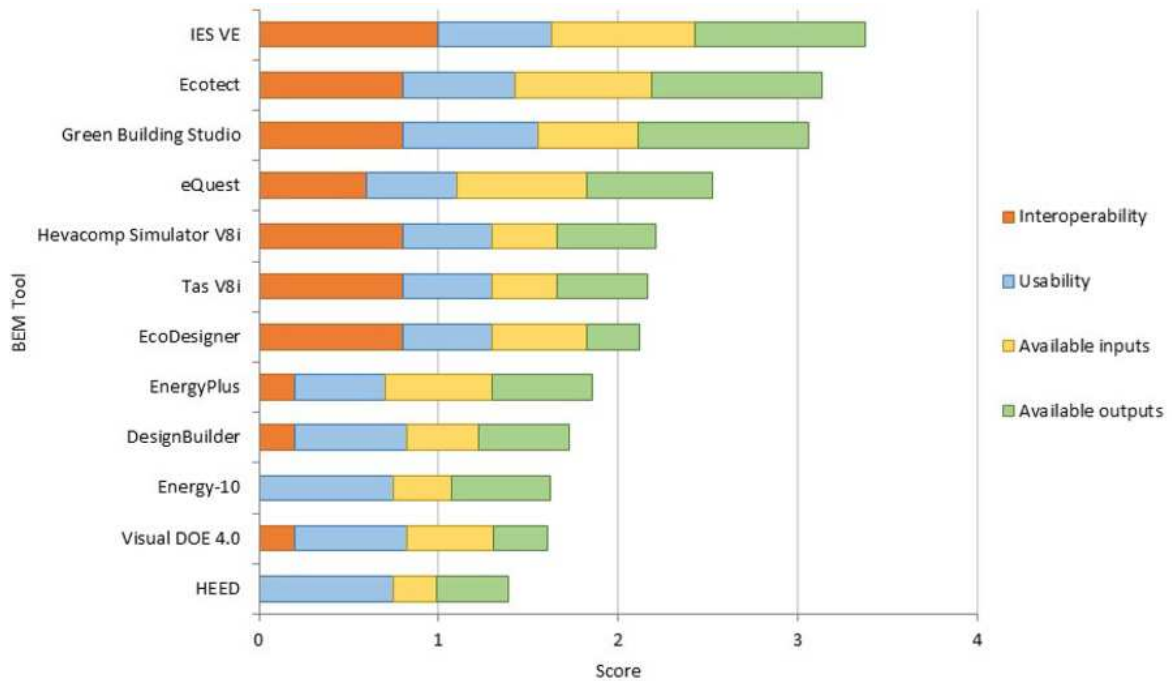


Figura 1 – Resultados de uma avaliação inicial de ferramentas de simulação energética (Reeves *et al.*, 2015)

O programa de simulação eQUEST suporta arquivos no formato gbXML e DWG, entretanto não é capaz de importar o arquivo gbXML diretamente do Autodesk Revit, necessitando do GBS para o processo de importação, o que se torna uma grande desvantagem do programa no aspeto interoperabilidade. O IES, entretanto, aceita além da extensão gbXML os formatos IFC, DXF e DWG (Ilter & Ergen, 2015).

Os resultados e informação obtidos a partir de uma simulação energética proporcionam o acesso às alterações ou decisões da implementação de tecnologias que possam tornar a construção energeticamente mais eficiente, como incluir, por exemplo, a instalação de painéis fotovoltaicos (Mustafaraj *et al.*, 2014).

2.1. Simulação energética em ambiente BIM

O BIM é uma metodologia que permite a partilha de informação e comunicação entre todos os intervenientes e durante todas as fases do ciclo de vida de uma construção. Ele apoia-se num modelo digital 3D, o qual inclui dados geométricos e não geométricos, tais como informações geográficas, componentes construtivas, dados de fabricantes de materiais, cronograma de construção, processos de fabricação, entre outros (Ilter & Ergen, 2015).

A metodologia BIM tem-se desenvolvido como uma solução de elevado potencial que pode proporcionar benefícios em diversos aspetos na indústria de AECO. O BIM engloba um conjunto de políticas, processos e tecnologias integradas em uma metodologia para desenvolver e administrar o projeto de edifícios produzindo um arquivo digital de documentos de alta qualidade (Abanda & Byers, 2016). Esta concentração de informação de forma centralizada torna os projetos complexos mais fáceis de serem geridos.

No método tradicional de projeto o trabalho dos arquitetos, engenheiros, empreiteiros, entre outros profissionais envolvidos na construção, decorre de forma isolada. Em contrapartida, a metodologia BIM proporciona uma colaboração dos *stakeholders* mais facilitada, uma vez que compartilha informações de todas as partes através do modelo, o que constitui uma vantagem relativamente ao método tradicional, permitindo detectar erros numa fase inicial de projeto (Reeves *et al.*, 2015).

Desta forma, em virtude da grande preocupação atual com a utilização de métodos sustentáveis, e pela metodologia BIM estar sendo cada vez mais utilizada, é importante analisar e avaliar quais as vantagens que podem ser obtidas quando se faz uma análise energética neste ambiente, com o objectivo de criar um projeto sustentável. Fazendo-se o uso das vantagens do BIM e das informações que nele estão integradas, a gestão de diversas variáveis de desempenho energético, tempo, custo e da interoperabilidade contribuem para que o trabalho se torne mais simplificado (Ilter & Ergen, 2015).

Antes de realizar uma simulação energética, segundo estudo realizado por Mustafaraj *et al.* (2014), deve-se em primeiro lugar realizar uma modelação da edificação em 3D, com as suas características arquitectónicas e, adicionar as informações referentes ao perfil de ocupação e sistema de AVAC utilizado. Depois, deve-se seguir para a calibração do

modelo, a qual tem o objectivo de o aproximar o máximo possível do real e, assim, diminuir os erros, para enfim realizar a simulação.

Quando desenvolvido um projeto em ambiente BIM, cada elemento adicionado contém as suas propriedades físicas as quais afetam diretamente o uso de energia de uma edificação, através de seu coeficiente de transferência de calor e resistência térmica (Le, 2014). Por este motivo, é extremamente importante que o modelo criado tenha estas informações, além das arquitetônicas, e que seja feita uma correta escolha dos materiais. Assim, é possível obter um modelo com propriedades térmicas que proporcione resultados mais reais, e que permita após a análise energética o estudo de diferentes alternativas de projeto, para apoio à decisão.

Um modelo de energia criado em BIM proporciona vários benefícios segundo Reeves *et al.* (2015), pois a informação já contida nele auxilia a automatizar o processo, além de criar um modelo mais fiável, proporcionar uma melhor análise do custo que será gasto em energia no caso de novas construções, e uma mais ampla monitorização do desempenho de edifícios atuais durante a fase de operação. Assim, o modelo de energia criado neste ambiente torna o exercício de simulações do desempenho energético mais simples durante o desenvolvimento do projeto, na fase de construção, operação e manutenção.

De entre as ferramentas de simulação do consumo energético de edifícios existentes, algumas podem ser utilizadas independentemente de um *software* BIM, enquanto outras são integradas no BIM. É importante entender esta interoperabilidade (possibilidade de comunicação e troca de informação) na decisão de qual combinação de *software* utilizar para a análise de energia em cada caso (Abanda & Byers, 2016).

A Figura 2 mostra as formas de comunicação entre os *softwares* que permitem o desenvolvimento de modelos em ambiente BIM com o GBS, ferramenta a qual utiliza o mecanismo de simulação DOE-2 no cálculo do desempenho energético. O GBS é capaz de receber arquivos no formato gbXML para análises energéticas, podendo este ser proveniente de um modelo criado em Autodesk Revit, Autodesk Vasari ou de um programa de terceiro. A partir do GBS ainda é possível exportar o arquivo em diferentes formatos para sua utilização em outros *softwares* de análise energética, como o eQUEST, EnergyPlus, ou ainda outro.

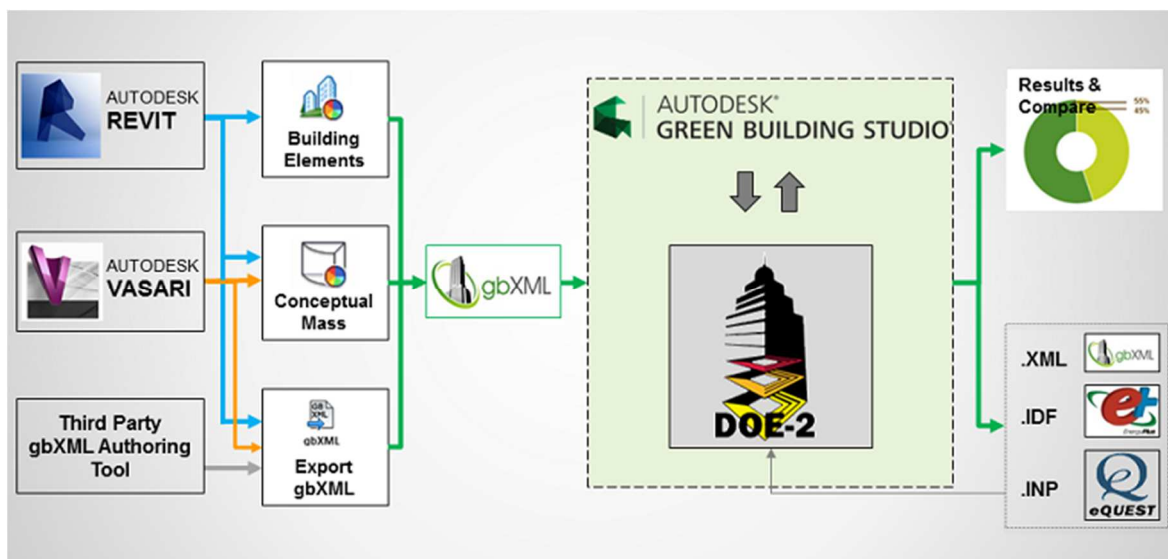


Figura 2 – Interoperabilidade dos *softwares* com a plataforma GBS (AutoDesk®, n.d.)

O mecanismo DOE-2, utilizado pelo GBS, foi desenvolvido por James J. Hirsch & Associates em colaboração com o Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), o qual foi desenvolvido principalmente com o financiamento do Departamento de Energia dos Estados Unidos da America (*United States Department of Energy – USDOE*). Ele faz uso da descrição da geometria do edifício, características construtivas, perfis de utilização assim como condições do uso dos sistemas de iluminação, equipamentos, entre outros, para realizar uma simulação energética de um edifício completo e prever seu consumo de energia (Hirsch, 2016).

No caso da criação do modelo do edifício em Autodesk Revit, é possível realizar a simulação através do *plugin* Energy Analysis disponível no *software*. Nesta forma de simulação, o modelo analítico de energia é automaticamente empacotado num arquivo no formato gbXML e enviado para o GBS e, portanto, utiliza o mecanismo de análise desta ferramenta. Assim, são transferidas tanto a geometria do edifício como as informações do modelo BIM para serem utilizadas na análise. Os resultados obtidos podem ser visualizados ainda no Autodesk Revit mas são também salvos na plataforma *online* GBS, onde é possível obter resultados mais detalhados. Esta conexão direta traz uma facilidade na utilização do Autodesk Revit e do GBS em conjunto no processo de análise energética (Abanda & Byers, 2016).

No Autodesk Revit é possível ainda integrar um *plugin* de análise do DesignBuilder, *software* específico para simulação energética o qual permite uma maior definição e ajuste de parâmetros energéticos em comparação com o GBS. Entretanto, de acordo com Sun

(2016), este *plugin* transfere apenas as informações geométricas do modelo em BIM para o modelo energético, sendo que as informações quanto aos sistemas e parâmetros definidos não são transferidos com o modelo.

São muitas as ferramentas para a simulação energética de edifícios, além das já mencionadas ao longo deste trabalho, entretanto são pouco utilizadas pelos profissionais do ramo da construção civil devido sua complexidade de utilização e a grande quantidade de dados de entrada (Lamberts *et al.* 2010 *apud* Queiróz *et al.*, 2015). Sendo assim, o *plugin* Energy Analysis do Autodesk Revit surge como uma mais-valia para os profissionais da área.

De acordo com Ilter & Ergen (2015), ainda há muito a ser explorado no que diz respeito ao potencial do BIM e sua interação com outras ferramentas, existindo ainda barreiras para o seu uso integrado de forma a contribuir para o desenvolvimento de edifícios sustentáveis.

2.2. Estudo preliminar da modelação energética em ambiente BIM

Para avaliar e testar aspetos do desenvolvimento do modelo em ambiente BIM, nomeadamente introdução de informações arquitetónicas, correta escolha dos materiais, propriedades térmicas e introdução de parâmetros no modelo, foi decidido desenvolver um modelo simplificado antes de trabalhar no modelo do edifício do estudo de caso desta dissertação, pois devido ao seu tamanho e conteúdo, possuiria uma gama de resultados mais complexa. Esta fase preliminar serviu também para analisar as potencialidades das ferramentas escolhidas para o desenvolvimento do modelo em ambiente BIM do estudo de caso.

Assim, foi criado um modelo de um edifício residencial em BIM através do *software* Autodesk Revit 2016, onde foram inseridos dados como localização, número de ocupantes, tipo de construção, alguns tipos de equipamentos elétricos, lâmpadas e tipo de sistema de AVAC. Foi também definido um perfil de ocupação típico para residências, onde existe uma maior ocupação e utilização de equipamentos nos finais de semana em relação aos dias úteis. Depois, foram feitas as configurações de energia necessárias para a posterior

realização da simulação energética através do Energy Analysis do Autodesk Revit, que conecta a potência do projeto com a potência de análise do GBS.

O Autodesk Revit foi escolhido por ser uma plataforma composta por várias ferramentas (Revit Architecture, Revit Structure, Revit MEP, etc.) que proporciona a criação de modelos em BIM o qual possui a melhor interoperabilidade com programas de simulação energética (Iltter & Ergen, 2015) e, de acordo com a AutoDesk® (n.d.), no desenvolvimento de projetos em ambiente BIM as opções de energia desejadas são inseridas nas configurações de energia do *software* através da função de análise de energia disponível.

Existem diferentes formas de preparar o modelo energético no Autodesk Revit para posterior simulação energética e, é importante saber, qual é a forma mais adequada para cada caso. A simulação pode ser realizada por massas conceituais em fases iniciais de projeto, ou então com elementos de construção em fases mais avançadas, ou ainda através de um modelo que contém tanto massas conceituais como elementos de construção, podendo ser útil para uma avaliação da extensão do edifício (AutoDesk®, 2018). A Figura 3 ilustra estas três formas mencionadas.

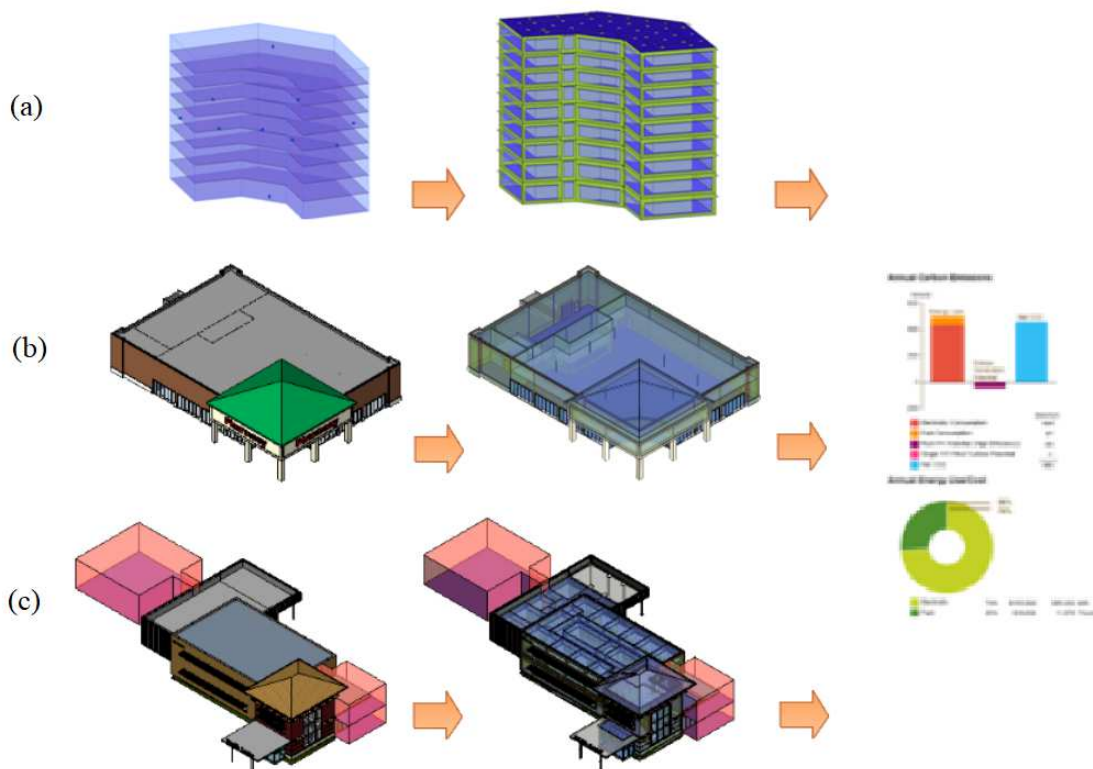


Figura 3 – Simulação energética a partir de a) massas conceituais, b) elementos de construção, ou c) ambos (adaptado de AutoDesk®, 2018)

Para o caso de projetos maiores e mais complexos, é importante ainda ter conhecimento de que a simulação energética realizada tanto a partir do Energy Analysis do Autodesk Revit como pelo GBS, onde é utilizado o mecanismo DOE-2, tem limitações para a quantidade de superfícies, aberturas e espaços que é capaz de suportar, podendo ocorrer erros na simulação caso ultrapasse os limites (AutoDesk®, 2018).

Assim, após a introdução dos dados e um conhecimento inicial do procedimento de realização da simulação energética, foi criado o modelo energético para a residência que serviu como exemplo, através dos elementos de construção. Na Figura 4 é possível observar o modelo energético criado a partir do Autodesk Revit a ser utilizado na simulação, o qual inclui os espaços analíticos e superfícies analíticas. Os espaços analíticos são criados a partir das salas definidas no modelo, enquanto que as superfícies analíticas são baseadas nos espaços analíticos.

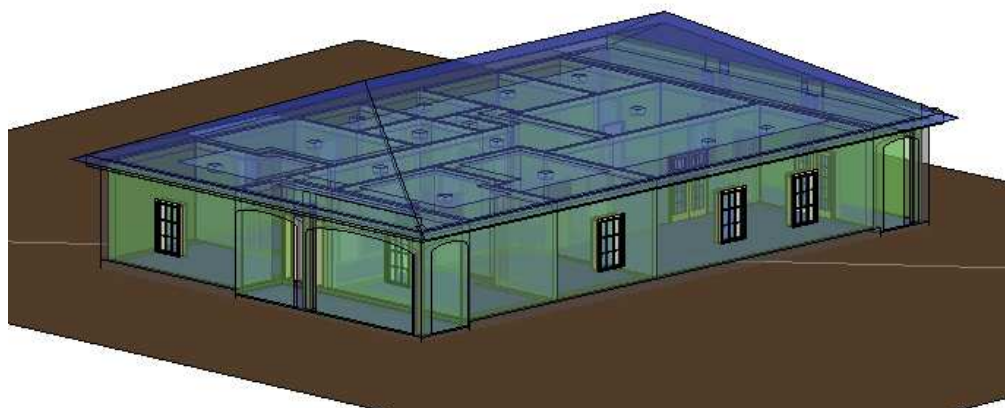


Figura 4 – Modelo energético da construção residencial

Com o estudo preliminar foi possível constatar que é também possível exportar o modelo do Autodesk Revit em formato gbXML ou IFC, o que pode ser útil caso o utilizador queira realizar a análise energética num programa terceiro. Entretanto, para o presente estudo foi optado por utilizar a função Energy Analysis do Autodesk Revit, uma vez que se conecta diretamente com o GBS, facilitando sua utilização.

Após realização do exemplo prático apresentado, juntamente com o estudo realizado em bibliografia apropriada, já vista no presente capítulo, foi possível compreender os principais parâmetros que devem ser considerados na análise energética de uma construção modelada em BIM, auxiliando assim na realização de uma correta manipulação de dados e análise de resultados.

3. Estudo de caso: Escola Superior de Saúde de Leiria

O estudo de caso da presente dissertação foi realizado num dos edifícios do Campus 2 do Instituto Politécnico de Leiria. Ao longo deste capítulo, será apresentado como foi feita a modelação do edifício em BIM, os parâmetros e considerações relacionados à modelação energética assim como a realização da simulação energética.

O intuito da utilização do *software* Autodesk Revit e do simulador de energia GBS está relacionada com o aumento da utilização do BIM nos projetos de engenharia civil e, por estas duas ferramentas trabalharem de forma já integrada. O *software* Autodesk Revit permite a criação de projetos através da metodologia BIM e, como já mencionado na revisão bibliográfica e confirmado através do presente estudo, é possível realizar a simulação energética através da função Energy Analysis disponível no Autodesk Revit. Esta forma de simulação utiliza o mecanismo de análise do GBS e, permite que os resultados obtidos sejam visualizados diretamente no Autodesk Revit, mas também ficam automaticamente salvos na plataforma *online* GBS.

Nas últimas décadas tem-se realizado diversos estudos com outros simuladores, mas sem interligação com o ambiente BIM, tornando-se assim importante estudar as potencialidades do funcionamento e da fiabilidade de simulações energéticas neste ambiente. Dado o modelo desenvolvido em ambiente BIM possuir as informações e características da construção, pode-se ganhar rapidez na análise energética e na comparação de diferentes alternativas de projeto, não sendo necessário inserir as características da construção no programa de simulação energética novamente, como ocorre usualmente.

Ao longo do capítulo será dada maior ênfase na explicação das principais considerações feitas na adaptação e criação do modelo energético para a simulação, uma vez que não é objectivo desta dissertação uma demonstração técnica do uso das ferramentas em questão.

A simulação energética e seu estudo podem ser realizados em qualquer uma das fases de uma construção, mas sabe-se que a fiabilidade dos resultados obtidos dependem diretamente da precisão dos dados de entrada no programa de simulação. Em virtude disto, buscou-se sempre caracterizar e modelar o edifício da forma mais próxima possível do real, a partir dos dados e informações conhecidas, sendo que o real consumo anual de energia do edifício, conhecido através de dados de uma auditoria energética, foi utilizado

como referência para a calibração do modelo. As monitorizações da auditoria foram realizadas na edificação entre os dias 11 e 18 de Junho de 2010, período em que o edifício está em funcionamento.

Posteriormente, será também feita uma comparação dos resultados com os obtidos por Santos (2012) através de simulações realizadas com o uso do EnergyPlus. Para permitir a comparação de resultados, procurou-se utilizar os mesmo parâmetros, os quais refletem o comportamento real da edificação.

3.1. Caracterização do edifício e dados climáticos

O estudo de caso foi realizado no edifício da Escola Superior de Saúde (ESSLei), situado no Campus 2 do Instituto Politécnico de Leiria (IPL), localizado na região central de Portugal. Na Tabela 1 são apresentadas suas características quanto à designação, localização e área construída. A edificação apresenta uma área bruta de aproximadamente 5.000 m².

Tabela 1 – Características do edifício (adaptado de Santos, 2012 e INESC Coimbra, 2009)

Características do Edifício	
Designação do edifício	ESSLei
Tipologia	Escola de Ensino Superior
Região	Centro
Distrito	Leiria
Conselho	Leiria
Freguesia	Parceiros
Coordenadas GPS	39°43'58,75"N; 8°49'14,32"W
Orientação da fachada principal	Noroeste
Distância ao mar	17,8 km
Altitude	55,18 m
Ano de construção	2006
Área construída	1.754,6 m ²

A ESSLei apresenta uma geometria retangular, com um total de 4 pisos. A entrada principal do edifício é considerada como piso 0, acessível a partir de escadas e rampas, possui um piso -1 que está ainda acima do nível do solo, e ainda os níveis 1 e 2, além da cobertura que é acessível para manutenção. A fachada principal está orientada à Noroeste

e, em relação ao sombreamento, foi constatado que não existem construções próximas que obstruam a exposição solar do edifício. Estas características podem ser observadas na Figura 5, que mostra as fachadas do edifício.



Figura 5 – Fachadas (a) Noroeste, (b) Nordeste, (c) Sudeste e (d) Sudoeste

O horário de funcionamento do edifício é das 07h30 às 24h00 nos dias úteis, das 08h30 às 20h00 aos sábados e não opera nos domingos e feriados. O edifício é classificado como estabelecimento de ensino superior, possuindo de forma geral, salas de aula, laboratórios, salas de estudo, gabinetes, auditório e bar.

De acordo com o Despacho (extrato) n° 15793-F/2013 (Cabral, 2013a), Portugal é dividido em três zonas climáticas de inverno (I1, I2 e I3) e três zonas climáticas de verão (V1, V2 e V3). O zoneamento climático do país é baseado na Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos (NUTS) de nível III e, sendo que Leiria faz parte da região NUTS III do Pinhal Litoral, encontra-se na zona climática de inverno I2 e de verão V1, como pode ser observado na Figura 6.

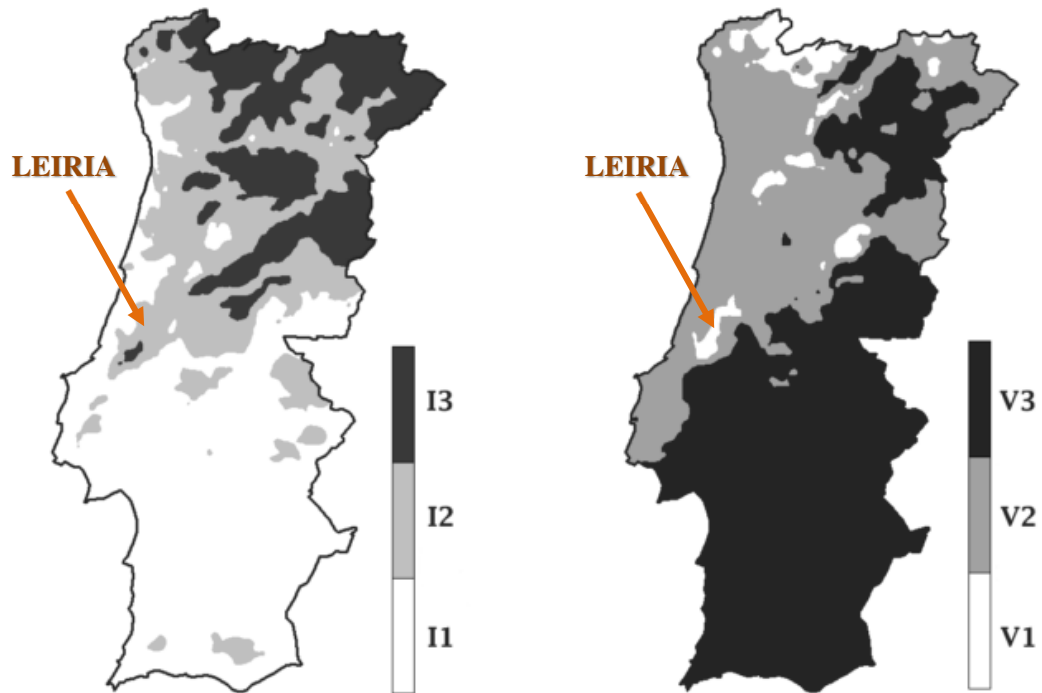


Figura 6 – Localização de Leiria no mapa da divisão de zonas climáticas de Portugal de inverno e verão, respetivamente (adaptado de Cabral, 2013a)

As zonas climáticas de inverno são definidas pelo número de Graus-Dias (GD), na base de 18°C, que representa o somatório das diferenças positivas entre a temperatura interior de projecto e a temperatura do ambiente exterior média ao longo do período de aquecimento. A zona climática I2, referente à localização do edifício estudado, apresenta um valor de GD entre 1.300 e 1.800, que são valores intermediários considerando as três zonas climáticas de inverno. No caso das zonas climáticas de verão, elas são definidas pela média exterior correspondente à estação de arrefecimento ($\Theta_{ext,v}$), sendo que a zona climática V1 apresenta um $\Theta_{ext,v} \leq 20^\circ\text{C}$, menores valores dentre as três zonas climáticas de verão existentes (Cabral, 2013a).

3.2. Modelação em BIM

O modelo arquitectónico da edificação estudada, a ESSLei do Instituto Politécnico de Leiria, foi inicialmente desenvolvido em ambiente BIM em estudo anterior, por Carvalho (2016), com recurso ao Autodesk Revit Architecture, a partir de projetos do edifício disponíveis em arquivos no formato DXF.

Como a presente dissertação tem um objectivo diferenciado do estudo realizado por Carvalho (2016), que abordava a interligação entre o conceito de BIM e a gestão de manutenção em edifícios, foi necessário realizar uma revisão e adaptação do modelo inserindo características construtivas em falta, julgadas importantes num estudo energético.

O *software* utilizado no presente estudo, para a modelação e inserção de características construtivas e elétricas foi o Autodesk Revit MEP (*Mechanical, Electrical and Plumbing*). Este foi escolhido por ser um dos *softwares* mais populares para este tipo de uso na indústria da AECO, e pela versão MEP disponibilizar configurações elétricas.

Assim, foram feitas alterações na estrutura dos materiais para que seus coeficientes de transmissão térmica transmitissem a realidade do edifício, para depois inserir os dados referentes ao uso de iluminação, equipamentos elétricos e demais configurações energéticas que teriam influência na criação do modelo energético utilizado para a simulação.

Ao nível da modelação estrutural, foram realizadas alterações na envolvente da edificação, por ser a parte estrutural que está em contacto direto com o ambiente externo e, conseqüentemente, de grande influência na simulação energética. A envolvente opaca foi alterada através da inserção das camadas de materiais existentes nas paredes externas, manipulando-as de maneira que possuíssem a espessura e o coeficiente de transmissão térmico (U) real. Na criação da envolvente envidraçada, foi considerada sua área, espessura e os coeficientes de transmissão térmica (U) reais existentes. O mesmo foi feito para a estrutura dos pavimentos e coberturas de cada um dos pisos.

No processo de adaptação do modelo, foi levado em consideração a espessura e os coeficientes térmicos a partir de dados obtidos de auditorias realizadas pelo Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores (INESC) de Coimbra, os quais são apresentados num relatório de caracterização da envolvente (INESC Coimbra, 2009). Portanto, a partir destes dados foi possível a adaptação dos componentes da construção no modelo em BIM de forma a aproximá-lo do caso real.

Na Tabela 2 e Tabela 3 são apresentadas as características das paredes, pavimentos e coberturas, com a descrição, espessura e coeficientes de transmissão térmica (U). Em seguida, na Tabela 4, são apresentadas as características da envolvente envidraçada, também com a descrição de cada tipo juntamente com os respectivos coeficientes. No caso

dos envidraçados, entretanto, o coeficiente de transmissão térmico foi discriminado como U_w para os envidraçados sem proteção solar/occlusão noturna e U_{wdn} para os envidraçados com proteção solar/occlusão noturna, que se refere ao coeficiente médio dia-noite. No Anexo A podem ser consultados, para cada nível do projeto, o tipo e localização das paredes externas e dos envidraçados de forma mais completa.

Tabela 2 – Características e coeficientes de transmissão térmico das paredes exteriores (adaptado de INESC Coimbra, 2009)

Envolvente Opaca	Descrição	Espessura [cm]	U [W/m ² .°C]
Parede tipo 1	Parede dupla constituída por tijolo (11+15), caixa de ar, isolamento térmico tipo <i>wallmate</i> (3 cm) e revestimentos interior e exterior com reboco tradicional (1,5 cm).	37	0,54
Parede tipo 2	Parede dupla constituída por tijolo (11+15), caixa de ar, isolamento térmico tipo <i>wallmate</i> (3 cm) e revestimentos interior e exterior com reboco tradicional (1,5 cm). No interior ainda é aplicado sobre o reboco um revestimento em madeira MDF.	39	0,52
Parede tipo 3	Parede dupla (betão+tijolo), caixa de ar, isolamento térmico tipo <i>wallmate</i> (3 cm) e revestimentos interior e exterior com reboco tradicional (1,5 cm). No exterior ainda é aplicado sobre o reboco um mosaico de cor preta e no interior é aplicado alcatifa.	46	0,57
Parede tipo 4	Parede dupla (betão+tijolo), caixa de ar, isolamento térmico tipo <i>wallmate</i> (3 cm) e revestimentos interior e exterior com reboco tradicional (1,5 cm). No exterior ainda é aplicado sobre o reboco um mosaico de cor preta e no interior é aplicada madeira tipo MDF.	47	0,57
Parede enterrada	Parede dupla (betão+tijolo), caixa de ar, isolamento térmico tipo <i>wallmate</i> (3 cm), revestimento interior com reboco tradicional (1,5 cm) e revestimento exterior com tela impermeabilizadora.	45	0,58

Tabela 3 – Características e coeficientes de transmissão térmico dos pavimentos e coberturas (adaptado de INESC Coimbra, 2009)

Pavimentos e Coberturas	Descrição	Espessura [cm]	U [W/m ² .°C]	Localização
Pavimento em contato com o solo	Laje maciça de betão, regularizada com uma camada de betão leve do tipo leca, betonilha atalochada e revestimento em mosaico. Pavimento assentado sob uma camada de massame e brita.	41	1,61	Piso -1
Pavimento interior	Laje maciça de betão	45	1,57	Piso 0, 1 e 2
Pavimento sobre o exterior tipo 1	Constituído por uma laje maciça de betão, revestida exteriormente por reboco tradicional. Sobre a laje de betão é aplicada uma camada de leca, sobre este é aplicado betonilha de regularização e revestimento em mosaico.	32	1,86	Piso 0
Pavimento sobre o exterior tipo 2	Constituído por uma laje maciça de betão, revestida exteriormente por mosaico. Sobre a laje de betão é aplicada uma camada de leca, betonilha de regularização e revestimento em madeira faia.	34	1,69	Piso 1 (auditório)
Cobertura tipo 1	Constituída por uma laje maciça de betão, revestida interiormente por um teto falso em madeira tipo MDF. Sobre a laje de betão encontra-se aplicada uma camada de betão leve tipo leca, betonilha de regularização, impermeabilizante, uma tela polímera, isolamento térmico tipo roofmate, tecido poliéster e revestimento em mosaico.	95	3,18	Piso 2 (terraços) e cobertura inclinada
Cobertura tipo 2	Constituída por uma laje maciça de betão, revestida interiormente por teto falso em gesso cartonado. Sobre a laje de betão encontra-se aplicada uma camada de betão leve tipo leca, betonilha de regularização, impermeabilizante, uma tela polímera, isolamento térmico tipo roofmate, tecido poliéster e revestimento em mosaico.	96	0,67	Piso 0 (terraços) e piso 1 (terraços)
Cobertura tipo 3	Constituída por uma laje maciça de betão, revestida interiormente por teto falso em gesso cartonado. Sobre a laje de betão encontra-se aplicada uma camada de betão leve tipo leca, betonilha de regularização, impermeabilizante, uma tela polímera, isolamento térmico tipo roofmate, tecido poliéster e revestimento em lajeta de betão.	77	0,67	Cobertura plana

Tabela 4 – Características e coeficientes de transmissão térmica dos envidraçados (adaptado de INESC Coimbra, 2009)

Envolvente Envidraçada	Descrição	Uw [W/m ² .°C]	Uwdn [W/m ² .°C]
Envidraçado tipo 1	Caixilharia metálica com corte térmico; Janela giratória; Vidro duplo incolor com espessura de 6int (10) 6ext [mm]; Com proteção exterior de estores de lâminas plásticas.	-	2,98
Envidraçado tipo 2	Caixilharia metálica com corte térmico; Janela giratória; Vidro duplo incolor com espessura de 6int (10) 6ext [mm]; Sem proteção exterior e interior.	3,54	-
Envidraçado tipo 3	Caixilharia metálica com corte térmico; Janela fixa; Vidro duplo incolor com espessura de 6int (10) 6ext [mm]; Sem proteção exterior e interior.	3,54	-
Envidraçado tipo 4	Caixilharia metálica com corte térmico; Janela fixa; Vidro duplo incolor com espessura de 5int (10) 6ext; Com proteção interior de cortina transparente.	-	3,14

A título de simplificação do modelo, sem que existissem prejuízos na caracterização da envolvente, as paredes exteriores das casas de banho foram consideradas como tipo 1 conforme apresentado nas tabelas de descrição, embora tenha sido constatado em visita à edificação que elas possuem um acabamento interno diferenciado (com azulejos), porém, apresentam-se com o mesmo coeficiente de transmissão térmica e espessura da parede denominada como tipo 1. Além disso, para o caso da envolvente envidraçada onde existiam portas nas paredes cortinas (piso -1), segundo documento de caracterização da envolvente estas portas foram definidas como um tipo diferente, entretanto como trata-se de uma área pequena foi considerada como o mesmo tipo de envidraçado da parede cortina (consequentemente levou o coeficiente de transmissão térmica definido para as paredes cortina).

A criação das estruturas das envolventes externas foram ajustadas a partir do painel de propriedades do tipo de parede, onde conforme foi feita a consideração dos tipos de materiais e suas espessuras, as propriedades analíticas eram calculadas automaticamente pelo programa. Como não se tinham as características específicas dos materiais componentes da estrutura do edifício, foram utilizados os materiais padrões da biblioteca de materiais do Autodesk Revit e, a partir deles, foram feitos os ajustes para que a espessura final e os coeficiente de transmissão térmica coincidissem com o real, conhecido

através do relatório de caracterização. A Figura 7 apresenta a aparência e as características citadas da parede exterior tipo 1, para servir como exemplo.

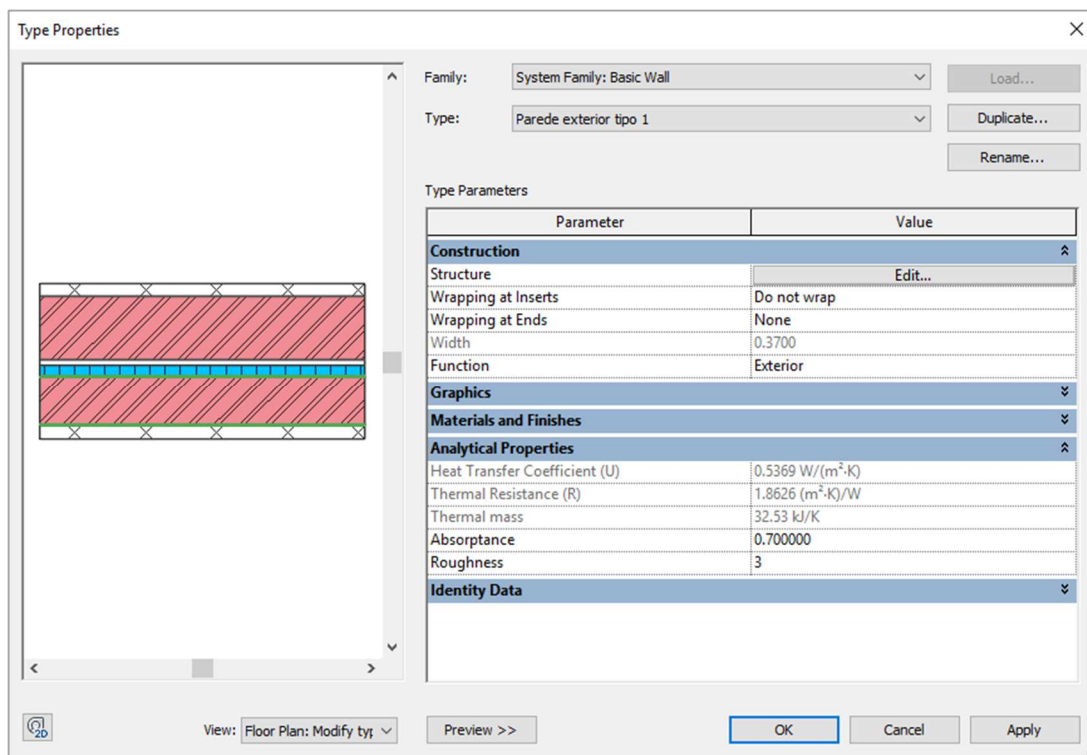


Figura 7 – Aparência e características da parede exterior tipo 1 criada no Autodesk Revit

3.3. Modelação energética em ambiente BIM

Depois de efetuadas todas as alterações nos elementos estruturais do modelo que teriam influência na análise de energia, deu-se início à fase de modelação energética, onde foram feitas as configurações relacionadas ao uso de energia do edifício para a posterior criação do modelo energético.

As modificações para o modelo energético implicaram basicamente na introdução de informações relacionada com a localização e orientação do edifício, cargas reais das zonas térmicas, definição do perfil de operação, caracterização do sistema de AVAC e configurações de energia. Estas etapas serão descritas ao longo do presente subcapítulo.

3.3.1. Localização e orientação

A definição da localização do edifício é importante na análise energética, pois mesmo pontos distantes numa mesma cidade podem possuir desvios das características climáticas, o que pode provocar erros na precisão dos resultados e, além da localização poder afetar as informações do clima, ela também tem impacto no conteúdo de carbono da eletricidade necessária a ser fornecida para o determinado projeto.

Desta forma, foi realizada numa primeira fase a alteração da localização da construção através da inserção das coordenadas GPS do edifício da ESSLei nas configurações disponíveis no Autodesk Revit. A partir desta informação, são apresentadas as regiões mais próximas com dados climáticos disponíveis para a importação dos valores referentes à temperatura e sombras.

Na Figura 8 é possível observar o quadro de configuração da localização e clima, onde a ESSLei está identificada com cor vermelha e os demais marcadores são referentes às regiões próximas com dados climáticos disponíveis pelo Internet Mapping Service. Como os dados da localização exata do edifício não estavam disponíveis, e optou-se por utilizar para o estudo os padrões do Autodesk Revit, as demais opções foram analisadas para que fosse considerada uma localização próxima com dados climáticos semelhantes. Assim, foi julgada adequada a consideração da região de Marinha Grande, que é apresentada com o marcador em laranja.

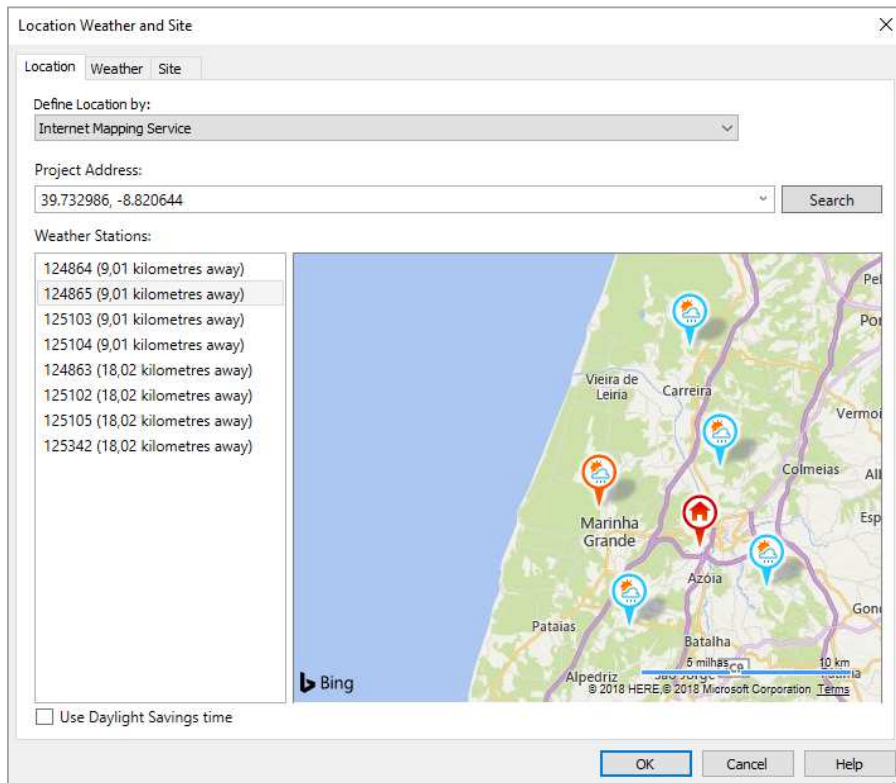


Figura 8 – Localização do edifício e regiões com dados climáticos mais próximas

A partir da região climática considerada, são automaticamente definidas pelo programa as temperaturas conforme o mês do ano, como mostra a Figura 9.

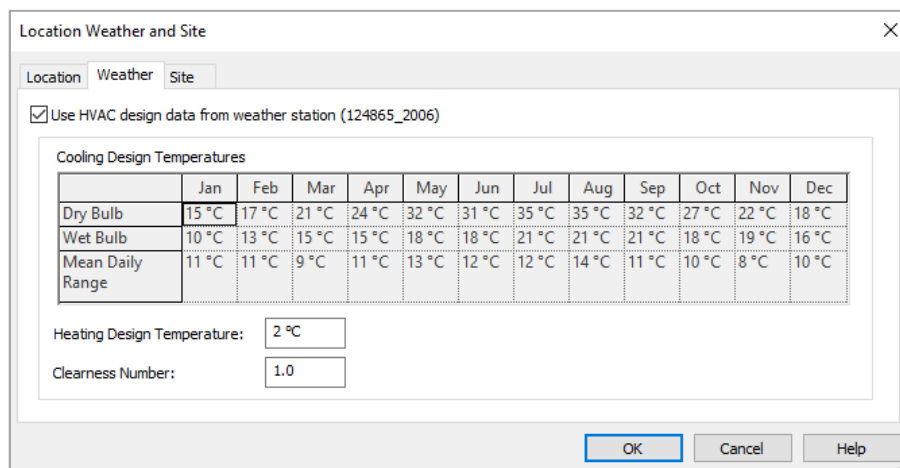


Figura 9 – Dados climáticos mensais para a região climática considerada

Além da consideração da localização e dos dados climáticos, também foi conferida a orientação do edifício. Assim, na Figura 10 pode ser observada a orientação real do edifício, com a fachada principal orientada para Noroeste, sendo que a definição desta informação integra a consideração do sombreamento na construção ao longo de todo o ano.

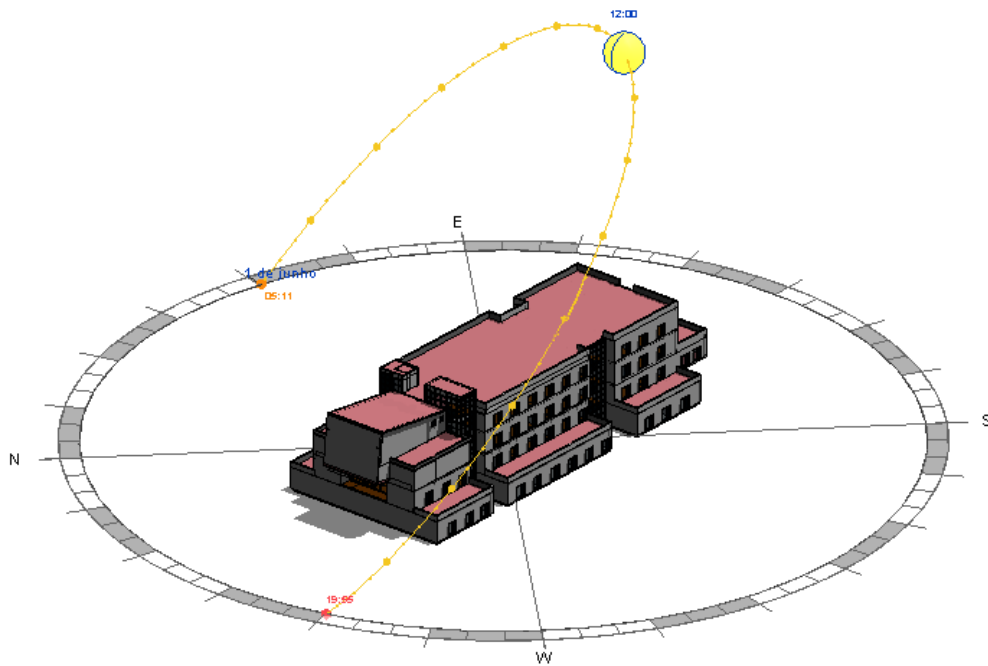


Figura 10 – Orientação real do edifício

Ainda em relação ao sombreamento do edifício, como já comentado anteriormente, não existem construções próximas ou vegetação que influenciem o sombreamento da ESSLei mas, caso houvesse, estes objetos deveriam também ser representados no modelo, por terem influência na exposição solar do edifício.

3.3.2. Cargas reais e zonas térmicas

Para que fosse possível a consideração das cargas reais de cada uma das zonas térmicas, foram definidos diferentes espaços no modelo, que foram conjugados de forma a ter uma divisão interna da edificação em zonas. Este zoneamento foi realizado da mesma forma com que foi feito em estudo de Santos (2012), para que fosse possível uma posterior comparação de resultados entre modelos similares.

A divisão do modelo em zonas é uma junção de espaços que possuem características térmicas similares e, além disso, ela é feita considerando as zonas em que o sistema de AVAC opera separadamente, por possuírem aproximadamente o mesmo tipo de necessidade de aquecimento e arrefecimento. Para se perceber melhor, na Tabela 5 são apresentados de modo geral que tipo de espaços cada uma das zonas engloba e, o

zoneamento realizado pode ser consultado em forma de planta, para cada um dos pisos, através da consulta ao Anexo B.

Tabela 5 – Discriminação dos tipos de espaços de cada uma das zonas térmicas

Piso	Zona Térmica	Ambientes
Pisos -1, 0, 1, 2 e Cobertura	Zona -1_2.1	Área de elevador, circulação e escadas
	Zona -1_2.2	Área de elevador, circulação e escadas
-1	Zona -1.1	Zonas de lazer Bar
	Zona -1.2	Laboratórios
	Zona -1.3	Instalações sanitárias
	Zona -1.4	Laboratórios Habitação adaptada
0	Zona 0.1	Zona de espera
	Zona 0.2	Entrada e circulação
	Zona 0.3	Gabinetes
	Zona 0.4	Salas de estudo e informática
	Zona 0.5	Instalações sanitárias
	Zona 0.6	Salas de aulas teóricas
1	Zona 1.1	Auditório
	Zona 1.2	Salas de aulas teóricas
	Zona 1.3	Instalações sanitárias
	Zona 1.4	Salas de aulas teóricas e apoio educativo
2	Zona 2.1	Salas de reuniões
	Zona 2.2	Gabinetes
	Zona 2.3	Instalações sanitárias
	Zona 2.4	Gabinetes administrativos

Os dados de ocupação, potência de iluminação e potência de equipamento apresentados na Tabela 6 foram os dados obtidos a partir de auditorias energéticas e foram adicionados aos espaços criados no modelo, considerando a zona térmica a qual pertence.

Os valores referentes à potência de iluminação e de equipamento específicas por zona respeitam os valores referentes à potência total instalada para iluminação e equipamentos, que são respectivamente 43,36 kW e 60,83 kW (Santos, 2012).

Tabela 6 – Cargas reais (adaptado de Santos, 2012)

Zonas Térmicas	Ocupação [Ocupantes]	Ocupação Específica [m ² /ocupante]	Potência de Iluminação [W]	Potência de Iluminação Específica [W/m ²]	Potência de Equipamentos [W]	Potência de Equipamentos Específica [W/m ²]
Zona -1_2.1	40	5,33	634	11,90	1.050	19,71
Zona -1_2.2	40	4,70	593	12,62	750	15,96
Zona -1.1	20	18,82	3.213	8,53	7.650	20,32
Zona -1.2	72	9,66	5.507	7,92	5.900	8,48
Zona -1.3	4	10,97	421	9,60	0	0,00
Zona -1.4	48	8,85	3.417	8,05	6.600	15,54
Zona 0.1	5	13,55	608	8,97	400	5,90
Zona 0.2	10	9,59	827	8,62	1.500	15,64
Zona 0.3	7	10,76	768	10,20	1.500	19,92
Zona 0.4	72	6,61	5.128	10,78	9.300	19,55
Zona 0.5	4	10,97	506	11,53	0	0,00
Zona 0.6	48	8,39	3.504	8,70	3.300	8,20
Zona 1.1	136	2,12	2.568	8,90	1.750	6,07
Zona 1.2	72	6,61	3.920	8,24	4.000	8,41
Zona 1.3	4	10,97	506	11,53	0	0,00
Zona 1.4	48	6,05	3.029	10,43	4.550	15,66
Zona 2.1	4	8,80	410	11,65	200	5,68
Zona 2.2	40	11,90	4.919	10,34	9.730	20,45
Zona 2.3	4	10,97	506	11,53	0	0,00
Zona 2.4	24	12,11	2.374	8,17	2.650	9,12

Assim, após a criação dos ‘espaços’ no modelo, foi possível definir nas propriedades de cada espaço a respetiva ocupação específica, potência de iluminação específica e potência de equipamento específica, dados que ajudarão na obtenção de uma simulação energética mais fiável. Um exemplo da introdução dos valores é apresentado na Figura 11 e Figura 12, para um dos espaços pertencentes à zona -1.2, a qual está representada na cor roxa.

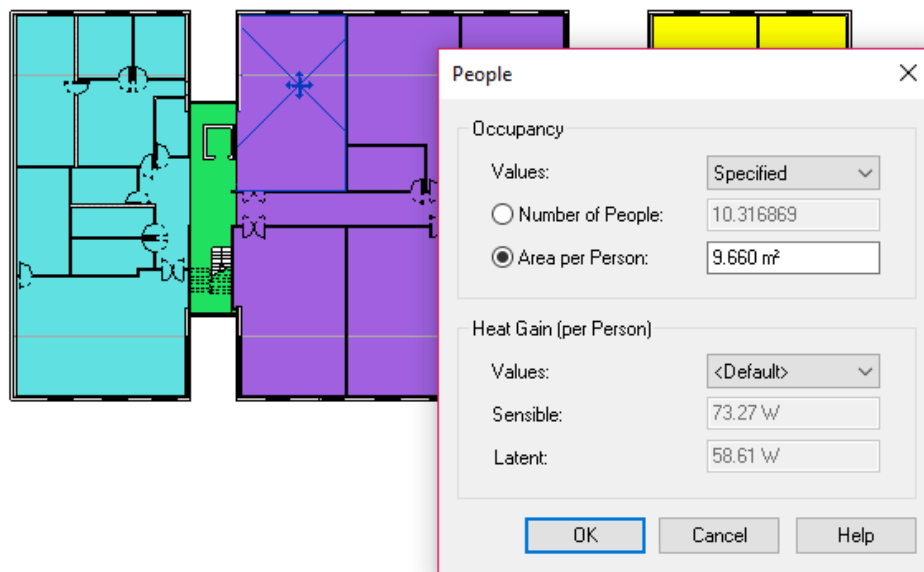


Figura 11 – Exemplo da definição da ocupação específica para um dos espaços da Zona -1.2

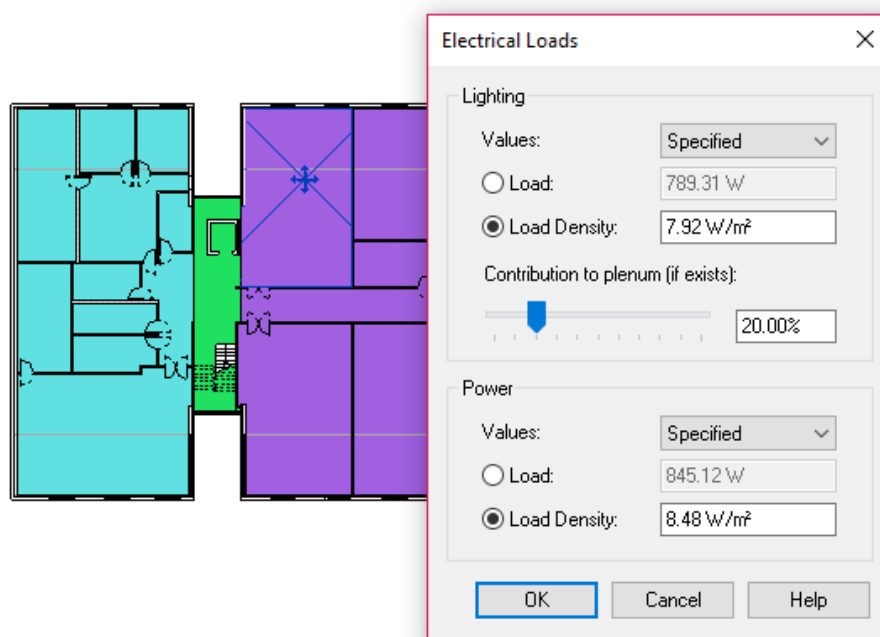


Figura 12 – Exemplo da definição da potência de iluminação específica e potência de equipamento específica para um dos espaços da Zona -1.2

3.3.3. Perfil de utilização

A definição do perfil de utilização do edifício conforme dados reais têm grande importância e influência na simulação energética, uma vez que contém informações quanto

às horas de ocupação do edifício (pessoas liberam calor e isso pode interferir na análise energética), horas de uso da iluminação e do uso dos equipamentos.

Para esta etapa, em primeiro lugar foi necessário conhecer os horários reais de operação do edifício do estudo de caso. Portanto, sabe-se que a ESSLei opera das 7h30 às 24h nos dias de semana e das 8h30 às 20h aos sábados, não operando nos domingos e feriados. O edifício também se encontra encerrado nos períodos de férias lectivas, entre 1º de agosto e 14 de setembro e entre 21 de dezembro e 1º de janeiro.

Além destas informações, tem-se também os perfis reais de utilização do edifício estudado tanto para ocupantes, como para iluminação e equipamento, com dados para todos os dias da semana (segunda a sexta, sábados, domingos e feriados). Os perfis reais são apresentados na Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9, e são julgados de grande importância para a simulação energética.

Tabela 7 – Perfil de utilização real da ESSLei para a ocupação (Santos, 2012)

Horas	% Ocupação Real		
	Segunda a Sexta	Sábados	Domingos e Feriados
0h - 1h	10	0	0
1h - 2h	5	0	0
2h - 3h	0	0	0
3h - 4h	0	0	0
4h - 5h	0	0	0
5h - 6h	0	0	0
6h - 7h	0	0	0
7h - 8h	5	0	0
8h - 9h	50	5	0
9h - 10h	100	20	0
10h - 11h	100	20	0
11h - 12h	100	20	0
12h - 13h	50	20	0
13h - 14h	50	10	0
14h - 15h	100	10	0
15h - 16h	100	20	0
16h - 17h	100	20	0
17h - 18h	100	20	0
18h - 19h	100	5	0
19h - 20h	100	0	0
20h - 21h	80	0	0
21h - 22h	80	0	0
22h - 23h	40	0	0
23h - 24h	20	0	0

Tabela 8 – Perfil de utilização real da ESSLei para a iluminação (Santos, 2012)

Horas	% Iluminação Real		
	Segunda a Sexta	Sábados	Domingos e Feriados
0h - 1h	16	16	16
1h - 2h	16	16	16
2h - 3h	16	16	16
3h - 4h	16	16	16
4h - 5h	16	16	16
5h - 6h	16	16	16
6h - 7h	16	16	16
7h - 8h	16	16	16
8h - 9h	16	16	16
9h - 10h	20	20	16
10h - 11h	20	30	16
11h - 12h	20	20	16
12h - 13h	16	16	16
13h - 14h	16	16	16
14h - 15h	20	20	16
15h - 16h	30	20	16
16h - 17h	40	30	16
17h - 18h	60	60	16
18h - 19h	80	60	16
19h - 20h	100	40	16
20h - 21h	100	20	16
21h - 22h	80	16	16
22h - 23h	80	16	16
23h - 24h	40	16	16

Tabela 9 – Perfil de utilização real da ESSLei para os equipamentos (Santos, 2012)

Horas	% Equipamentos Real		
	Segunda a Sexta	Sábados	Domingos e Feriados
0h - 1h	10	15	15
1h - 2h	5	15	15
2h - 3h	0	15	15
3h - 4h	0	15	15
4h - 5h	0	15	15
5h - 6h	0	15	15
6h - 7h	0	15	15
7h - 8h	5	15	15
8h - 9h	50	15	15
9h - 10h	100	40	15
10h - 11h	100	40	15
11h - 12h	100	40	15

Horas	% Equipamentos Real		
	Segunda a Sexta	Sábados	Domingos e Feriados
12h - 13h	50	20	15
13h - 14h	50	20	15
14h - 15h	100	40	15
15h - 16h	100	40	15
16h - 17h	100	40	15
17h - 18h	100	40	15
18h - 19h	100	15	15
19h - 20h	100	15	15
20h - 21h	80	15	15
21h - 22h	80	15	15
22h - 23h	40	15	15
23h - 24h	20	15	15

O Autodesk Revit possui vários perfis de operação de edifício que variam conforme o seu tipo, e estes são baseados em padrões da American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). Assim, com base nos horários reais de operação do edifício da ESSLei, foram feitas as definições necessárias de forma a representar o perfil de utilização do edifício o mais próximo possível do real.

Para o estudo de caso, portanto, o tipo de edifício foi definido como ‘escola ou universidade’, que operam de forma reduzida aos sábados e não operam aos domingos e feriados, conforme perfis apresentados na Figura 13, Figura 14 e Figura 15. Estes perfis representam a percentagem de ocupação do edifício a cada hora do dia e para cada dia da semana.

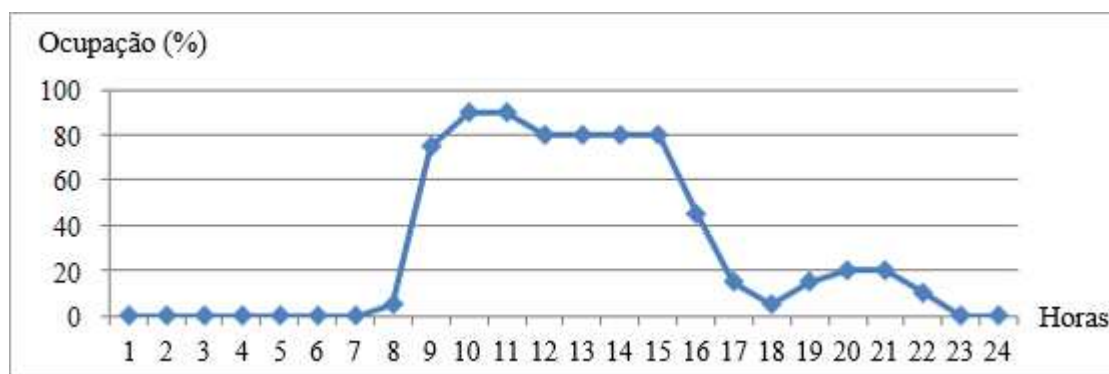


Figura 13 – Perfil de ocupação de escolas ou universidades em dias úteis (adaptado de AutoDesk®, 2018)

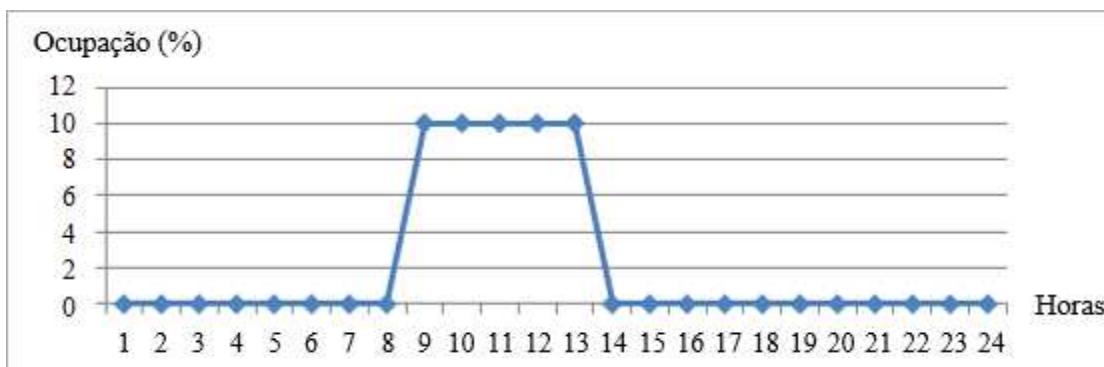


Figura 14 – Perfil de ocupação de escolas ou universidade aos sábados (adaptado de AutoDesk®, 2018)

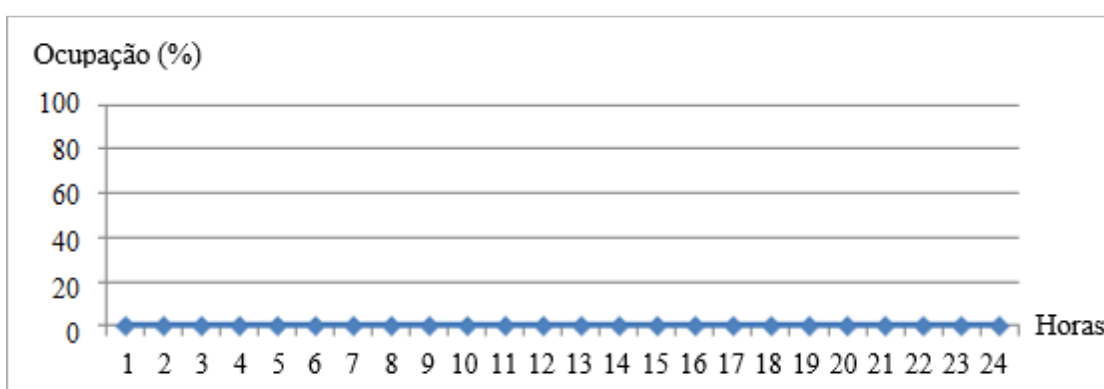


Figura 15 – Perfil de ocupação de escolas ou universidade aos domingos e feriados (adaptado de AutoDesk®, 2018)

Através da definição do tipo de construção como sendo escolar ou universitária, também são considerados os seguintes períodos de férias escolares predefinidos no *software* (AutoDesk®, 2018):

- 4 de abril a 13 de abril;
- 9 de junho a 24 de agosto;
- 16 de dezembro a 5 de janeiro.

Os períodos de interrupções letivas da ESSLei são diferentes quando comparados com os considerados pelo *software*. Entretanto para os feriados nacionais, período o qual o edifício também encontra-se encerrado, o programa leva em conta os feriados da localização da edificação conforme foi definido anteriormente, para Portugal.

Existem ainda algumas diferenças nas definições das horas de operação entre o padrão disponível no *software* e o real, uma vez que se tem dados do perfil de operação da ESSLei

separadamente para os dias de semana, sábados e domingo, ao contrário do disponível no *software*.

Sendo assim, para efetuar ajustes de forma a aproximar ao máximo o modelo do caso real, foram feitas modificações nas configurações de operação para o tipo de edifício definido (escola ou universidade), tanto para os horários de ocupação assim como para os horários de utilização de iluminação e equipamentos.

As alterações de horários são disponibilizadas para alteração dentro de um período de 24 horas, porém sabe-se que através do tipo de edifício escolhido já é considerado que ele opera de forma reduzida aos finais de semana. Assim, foram feitas as alterações considerando o perfil real de utilização da ESSLei para os dias úteis. Os perfis finais obtidos para a ocupação, iluminação e equipamentos após alterações são apresentados na Figura 16, Figura 17 e Figura 18, respectivamente.

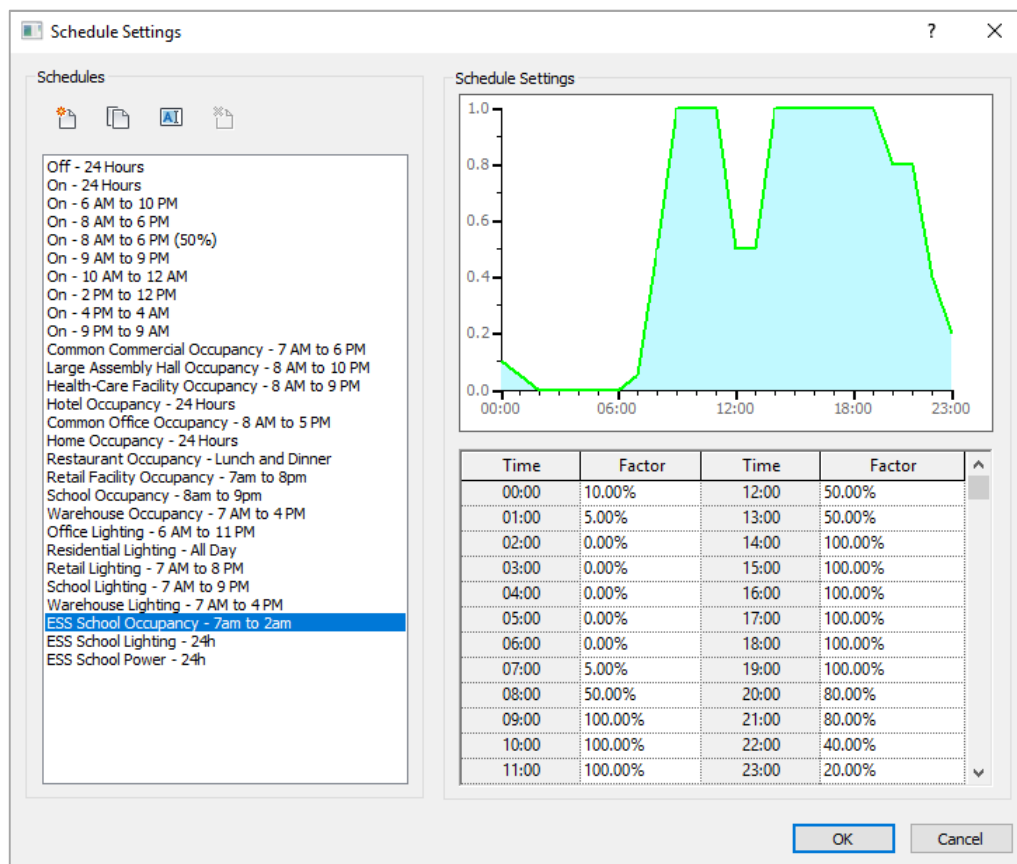


Figura 16 – Perfil de utilização: % ocupação

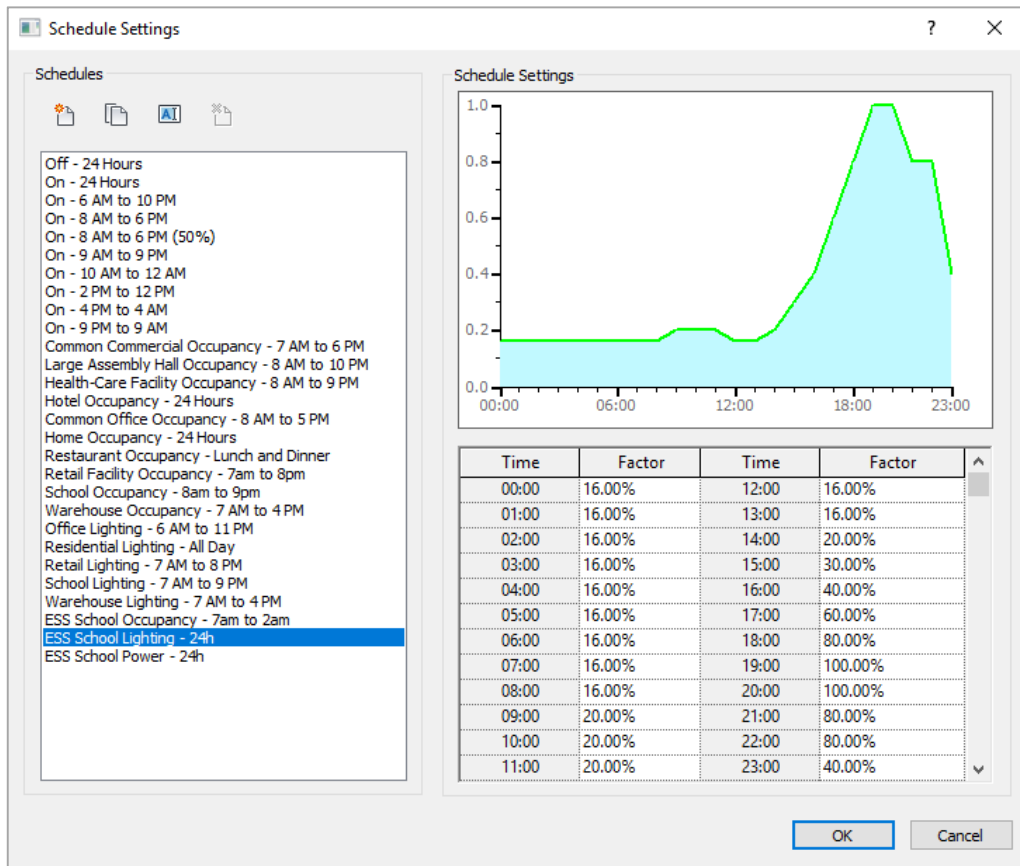


Figura 17 – Perfil de utilização: % iluminação

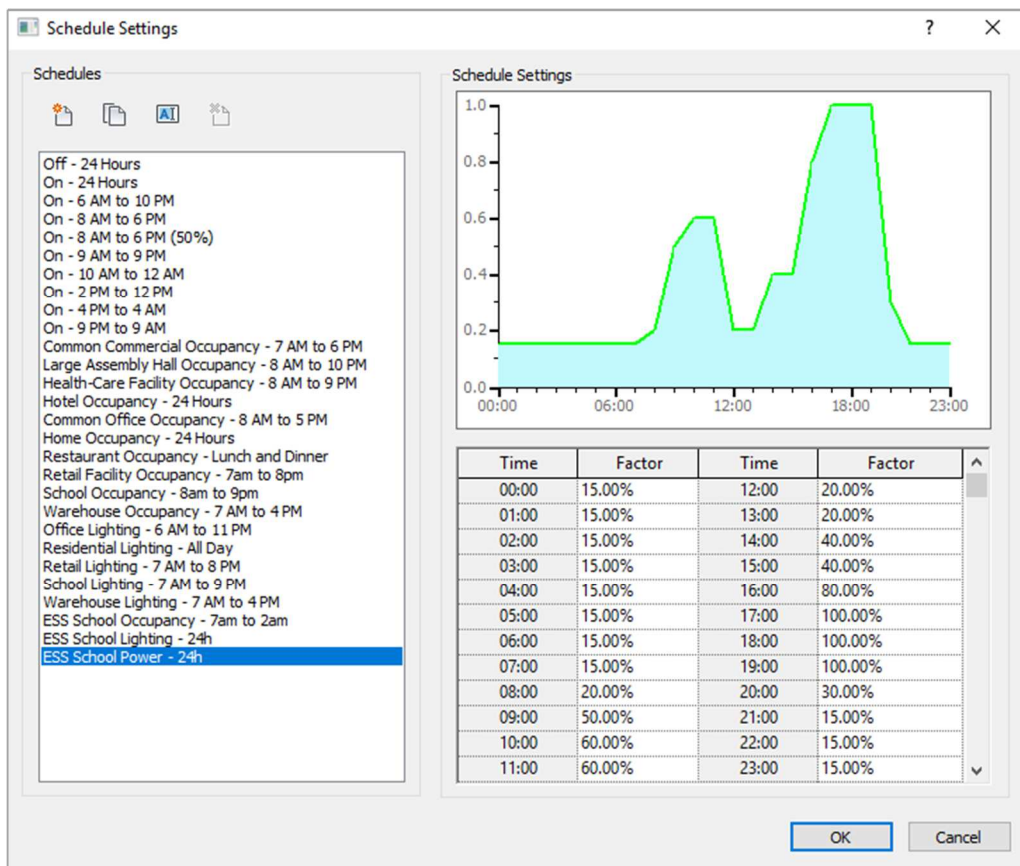


Figura 18 – Perfil de utilização: % equipamentos

3.3.4. Caracterização do sistema de AVAC

O aquecimento e arrefecimento do edifício da ESSLei é assegurado através de um sistema composto por bomba de calor, instalado em uma das zonas técnicas exteriores. A bomba de calor produz água aquecida e arrefecida, consoante as necessidades climáticas em cada estação. A água aquecida e arrefecida é destinada ao abastecimento das Unidades de Tratamento de Ar (UTA) e dos ventiloconvectores (*fan coils*). A distribuição da água quente às UTA's e aos ventiloconvectores é feita por um sistema de dois tubos.

Um esquema simplificado do sistema de AVAC instalado no edifício da ESSLei, com o funcionamento conforme mencionado, é apresentado na Figura 19.

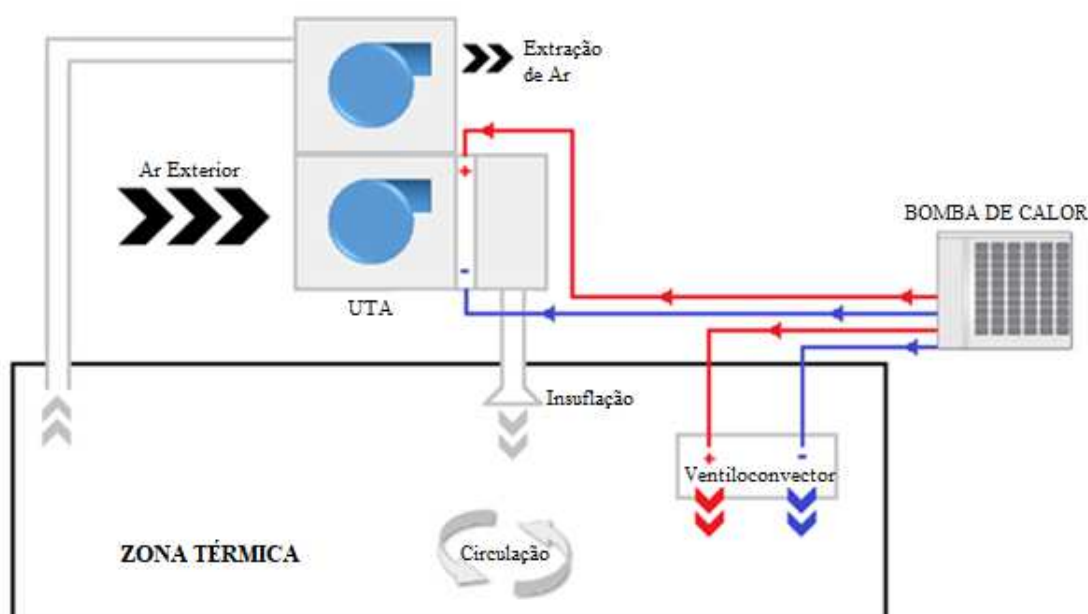


Figura 19 – Esquema simplificado do sistema de AVAC

O funcionamento do sistema ocorre de forma que o ar a ser insuflado nas respetivas zonas térmicas seja aquecido ou arrefecido pela UTA correspondente à zona específica, levando em conta a temperatura predefinida para cada local.

Os ventiloconvectores tem a função de dar suporte às necessidades térmicas que não são garantidas apenas através da insuflação de ar climatizado pelas UTA's e, desta forma, ajudam a proporcionar o conforto ambiental adequado no interior do edifício.

As características do sistema de AVAC real utilizado no edifício da ESSLei são apresentadas na Tabela 10, conforme informações do manual do fabricante.

Tabela 10 – Características do sistema de AVAC da ESSLei (Fernandes *et al.*, 2010)

Características da Bomba de Calor	
Designação	Bomba de calor
Local de instalação	Fosso
Serviço	Climatização
Marca	Blue Box
Modelo	Kappa V Echos 46,2
Nº série	BBOX071618
Potência nominal de arrefecimento	473,2 kW
Potência nominal de aquecimento	499,4 kW
Potência elétrica nominal dos compressores (arrefecimento)	166,3 kW
Potência elétrica nominal dos compressores (aquecimento)	165,7 kW
Nº compressores	2

Para o edifício do estudo de caso, existem diversas UTA's instaladas, sendo que cada uma delas serve determinada zona, a qual conforme já foi mencionado em subcapítulo anterior, são normalmente definidas por possuírem as mesmas características ou necessidades similares de aquecimento e arrefecimento. A distribuição de UTA's nas zonas térmicas definidas para a ESSLei é apresentada na Tabela 11, onde se percebe que algumas zonas não são atendidas pelo sistema de climatização, nomeadamente as zonas de escadas, elevadores e casas de banho.

Tabela 11 – Distribuição das UTA's nas zonas térmicas (Santos, 2012)

UTA	Zonas Térmicas
UTA I	Zona 1.1
UTA II	Zona 2.1
	Zona 2.2
UTA III	Zona 2.4
UTA IV	Zona 1.2
UTA V	Zona 0.6
	Zona 1.4
UTA VI	Zona 0.1
	Zona 0.4
UTA VII	Zona 0.2
	Zona 0.3
UTA VIII	Zona -1.1
UTA IX	Zona -1.4
UTA X	Zona -1.2

Retornando ao modelo do edifício da ESSLei desenvolvido no Autodesk Revit, nesta etapa foi necessário fazer a definição do sistema de AVAC para sua consideração na simulação energética. Entretanto, o *software* disponibiliza de uma lista limitada de sistemas de AVAC e, desta forma, foi necessário fazer a escolha de um sistema que possuísse características o mais próximo possível do caso real. Assim, foi definido o sistema '12 SEER/7.7 HSPF Split Packaged Heat Pump', que possui as seguintes características (AutoDesk®, 2018):

- 12 SEER/7.7 HSPF (Fator de Desempenho Sazonal de Aquecimento) < sistema de bomba de aquecimento split/completo de 11,25 ton;
- Ventilador de volume constante curvado adiante e motor de eficiência premium;
- Manómetro de água 2,0 polegadas (498 Pa) com sistema de dutos de pressão estática de volume constante;
- Economizador de temperatura do bulbo seco diferencial integrado;
- Unidade de água quente residencial (fator de energia de 0,575).

A definição do sistema de AVAC foi feita nas configurações de energia para a criação do modelo energético. Entretanto, foi ainda definido para cada uma das zonas (através das propriedades de cada um dos espaços) as suas condições, ou seja, se são condicionadas ou não. Para as zonas em que não possuem sistema de climatização, que é o caso das zonas - 1_2.1, -1_2.2, -1.3, 0.5, 1.3 e 2.3 (zonas de escadas, elevadores e casas de banho), foi inserida a condição de 'não condicionado', pois assim as cargas de aquecimento e arrefecimento não são calculadas. Já para as demais zonas, foi considerada a condição 'aquecido e arrefecido'.

Para cada um dos espaços, conforme zona a que pertence, foram ainda considerados os valores referentes às bombas e ventiloconvectores conforme definido também por Santos (2012) em quilowatts. Estes valores foram convertidos para W/m² levando em consideração as áreas de cada uma das zonas do modelo criado no Autodesk Revit, conforme mostra a Tabela 12. Assim os valores obtidos foram inseridos no programa para a definição das cargas do sistema de AVAC por área.

Tabela 12 – Valores das bombas e ventiladores AVAC

Piso	Zonas Térmicas	Área [m ²]	UTA	Bombas e Ventiladores AVAC [kW]	Cargas AVAC [W/m ²]
Pisos -1, 0, 1, 2 e Cobertura	Zona -1_2.1	207,7	-	0,00	0,00
	Zona -1_2.2	165,8	-	0,00	0,00
-1	Zona -1.1	337,4	VIII	3,10	9,19
	Zona -1.2	653,4	X	5,20	7,96
	Zona -1.3	40,2	-	0,25	6,22
	Zona -1.4	387,4	IX	7,80	20,13
0	Zona 0.1	56,1	VI	1,53	27,25
	Zona 0.2	100,2	VII	2,60	25,94
	Zona 0.3	57,7	VII	2,80	48,54
	Zona 0.4	440,3	VI	5,52	12,54
	Zona 0.5	39,3	-	0,25	6,36
	Zona 0.6	369,5	V	3,40	9,20
1	Zona 1.1	255,9	I	5,70	22,27
	Zona 1.2	445,0	IV	6,00	13,48
	Zona 1.3	39,0	-	0,25	6,40
	Zona 1.4	266,1	V	3,00	11,27
2	Zona 2.1	34,1	II	0,58	16,99
	Zona 2.2	449,3	II	6,82	15,18
	Zona 2.3	39,8	-	0,25	6,28
	Zona 2.4	247,9	III	3,10	12,50

Para cada uma das zonas térmicas, foi ainda inserida a temperatura de 20°C para o *set-point* de aquecimento e a temperatura de 25°C para o *set-point* de arrefecimento.

3.3.5. Caudais de ar novo

O ar novo, ou externo, é também um dado importante para a simulação energética, uma vez que a variação de sua temperatura assim como a intensidade que circula nos ambientes internos de uma edificação podem influenciar os resultados obtidos na simulação.

Para inserir estas informações no modelo, foi necessário fazer o cálculo do caudal de ar novo para cada uma das zonas térmicas, procedimento que foi realizado tendo como suporte uma folha de cálculo elaborada pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), considerando o método de cálculo prescritivo. Para o correto uso desta folha de

cálculo foram consideradas as suas instruções de utilização, disponíveis também pelo LNEC (2013).

A folha de cálculo utilizada para o cálculo do caudal novo de cada uma das zonas térmicas do modelo do estudo de caso é apresentada na Figura 20, para as quais foi definida uma concentração exterior de CO₂ igual a 390 ppm, conforme recomendado. O tipo de atividade metabólica foi considerado conforme instruções da LNEC (2013), sendo que para as zonas com espaços de bares, atividades de lazer ou laboratórios foi definido como atividade ‘moderada’. Os perfis de ocupação foram definidos pela mesma folha de cálculo do Microsoft Excel, considerando as horas de ocupação reais da ESSLei.

Dados de entrada										Dados de saída			Informação		Informação		
Designação do espaço ou agrupamento de espaços semelhantes	Área p.a. (m ²)	Pd (m)	n.º Ocup.	Faixa Etária	Tipo de atividade (metabólica)	Limiar de proteção CO ₂	Perfil Ocupa.	Tipo de espaço (Carga potente edifício)	Método de Ventilação (Eficácia de remoção de poluentes)	Caudal de ar nov. QAN (m³/h)	Caudal de ar QAN (m³/h)	CO ₂ médio ocupação	CO ₂ máximo	Caudal de ar nov. QAN (m³/h)	Caudal de ar QAN (m³/h)	Método Prescritivo	Caudal de ar QAN (m³/h)
Zona-1_L2,1	207,749	3	10	até 18 anos e adultos	Sedentária	1250 ppm (2250 mg/m ³)	ESS	Predominância (superior a 75%) de materiais de baixa emissão poluente	3- Insuflação pelo teto, de ar quente pelo menos 9°C acima da temperatura do local e estação/sistema pelo teto (ventilação mecânica e híbrida)	519	415	1250 ppm (2250 mg/m ³)	1676 ppm (3016 mg/m ³)	519	415	519	415
Zona-1_L2,2	168,814	3	10	até 18 anos e adultos	Sedentária	1250 ppm (2250 mg/m ³)	ESS	Predominância (superior a 75%) de materiais de baixa emissão poluente	3- Insuflação pelo teto, de ar quente pelo menos 9°C acima da temperatura do local e estação/sistema pelo teto (ventilação mecânica e híbrida)	415	332	1250 ppm (2250 mg/m ³)	1676 ppm (3016 mg/m ³)	415	332	415	332
Zona-11	337,449	3	20	até 18 anos e adultos	Moderada	1250 ppm (2250 mg/m ³)	ESS	Predominância (superior a 75%) de materiais de baixa emissão poluente	2- Insuflação pelo teto, de ar quente pelo menos 9°C acima da temperatura do local e estação/sistema pelo teto (ventilação mecânica e híbrida)	844	675	1250 ppm (2250 mg/m ³)	1488 ppm (2845 mg/m ³)	861	693	875	700
Zona-12	653,365	3	72	até 18 anos e adultos	Moderada	1250 ppm (2250 mg/m ³)	ESS	Predominância (superior a 75%) de materiais de baixa emissão poluente	3- Insuflação pelo teto, de ar quente pelo menos 9°C acima da temperatura do local e estação/sistema pelo teto (ventilação mecânica e híbrida)	2697	2157	1250 ppm (2250 mg/m ³)	1377 ppm (2478 mg/m ³)	3039	2479	3160	2520
Zona-13	40,22	3	4	até 18 anos e adultos	Sedentária	1250 ppm (2250 mg/m ³)	ESS	Predominância (superior a 75%) de materiais de baixa emissão poluente	2- Insuflação pelo teto, de ar quente pelo menos 9°C acima da temperatura do local e estação/sistema pelo teto (ventilação mecânica e híbrida)	101	80	1250 ppm (2250 mg/m ³)	1443 ppm (2698 mg/m ³)	118	94	120	96
				até 18 anos e adultos		1250 ppm			3- Insuflação pelo teto, de ar quente pelo			1250 ppm	1363 ppm				

Figura 20 – Folha de cálculo para o caudal de ar novo de cada uma das zonas térmicas

Os resultados obtidos para o caudal de ar novo de cada uma das zonas pelo método prescritivo são apresentados na Tabela 13 em m³/h seguido de sua conversão em l/s.m².

Tabela 13 – Valores calculados para os caudais de ar novo de cada uma das zonas térmicas

Piso	Zonas Térmicas	Área [m ²]	Caudal de Ar Novo [m ³ /h]	Caudal de Ar Novo [l/s.m ²]
Pisos -1, 0, 1, 2 e Cobertura	Zona -1_2.1	207,7	519	0,69
	Zona -1_2.2	165,8	414	0,70
-1	Zona -1.1	337,4	875	0,72
	Zona -1.2	653,4	3.150	1,34
	Zona -1.3	40,2	120	0,83
	Zona -1.4	387,4	2.100	1,51
0	Zona 0.1	56,1	150	0,74
	Zona 0.2	100,2	300	0,83
	Zona 0.3	57,7	210	1,01
	Zona 0.4	440,3	2.160	1,36
	Zona 0.5	39,3	120	0,85
	Zona 0.6	369,5	1.440	1,08
1	Zona 1.1	255,9	4.080	4,43
	Zona 1.2	445,0	2.160	1,35
	Zona 1.3	39,0	120	0,85
	Zona 1.4	266,1	1.440	1,50
2	Zona 2.1	34,1	120	0,98
	Zona 2.2	449,3	1.200	0,74
	Zona 2.3	39,8	120	0,84
	Zona 2.4	247,9	720	0,81

Os valores calculados para os caudais de ar novo foram inseridos nas propriedades de cada uma das zonas do modelo e, um exemplo de como foram inseridos estes valores é apresentado na Figura 21, para a Zona 2.1.

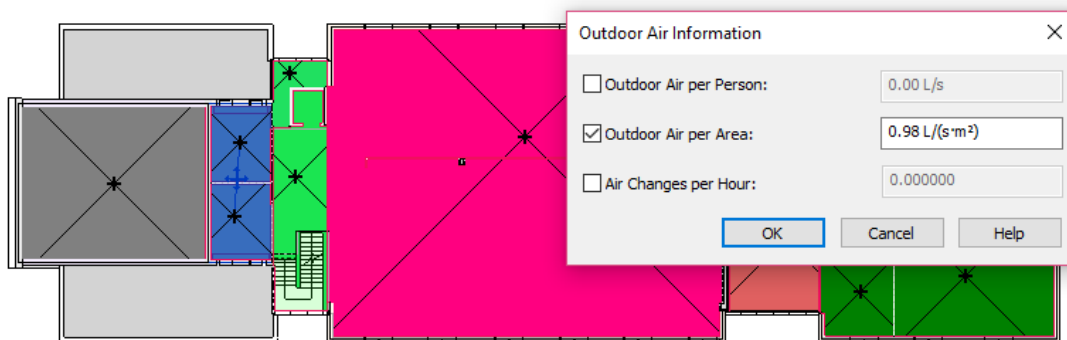


Figura 21 - Exemplo da inserção do caudal de ar novo na Zona 2.1

3.3.6. Configurações de energia para a criação do modelo energético

Após as considerações realizadas e apresentadas anteriormente, foram feitas alterações no quadro de configurações de energia no modelo BIM. Esta etapa é muito importante, pois trata-se da escolha dos dados que serão considerados na criação do modelo energético e, conseqüentemente, na simulação energética. Uma má escolha destas configurações energéticas pode fazer com que as características elétricas ou os coeficientes de transmissão térmico inseridos em cada um dos espaços, sejam substituídos por valores padrão definidos pelo *software*.

Estas configurações são apresentadas na Figura 22 (janela de configurações de energia) e são consideradas para todo o modelo. Em seguida, será comentada a escolha de cada uma das opções disponíveis.

Nas configurações comuns do quadro consta o tipo do edifício (cujas escolhas já foram explicadas em subcapítulo anterior), a localização que já havia sido inserida, assim como o nível do chão, o qual foi definido como nível -1, sendo que os níveis existentes abaixo deste são considerados como subterrâneos.

Na parte das configurações relacionadas com o modelo detalhado, existem duas opções de categorias que podem ser exportadas para a simulação energética: ambientes (*rooms*) ou espaços (*spaces*). A escolha pela categoria ‘espaços’ faz com que sejam consideradas as informações quanto ao nome, número, condição do espaço, tipo de espaço, ocupação (pessoas/m²), potência de iluminação (W/m²), potência de equipamento (W/m²) e zona que foram atribuídos a cada um dos espaços. As informações definidas para as zonas térmicas que são consideradas nesta opção, são os parâmetros de *setpoints* para aquecimento e arrefecimento assim como o caudal de ar novo. Assim, foi esta a opção considerada nas configurações de energia, uma vez que carregam informações importantes do modelo para a análise e que ajuda na criação de um modelo mais preciso.

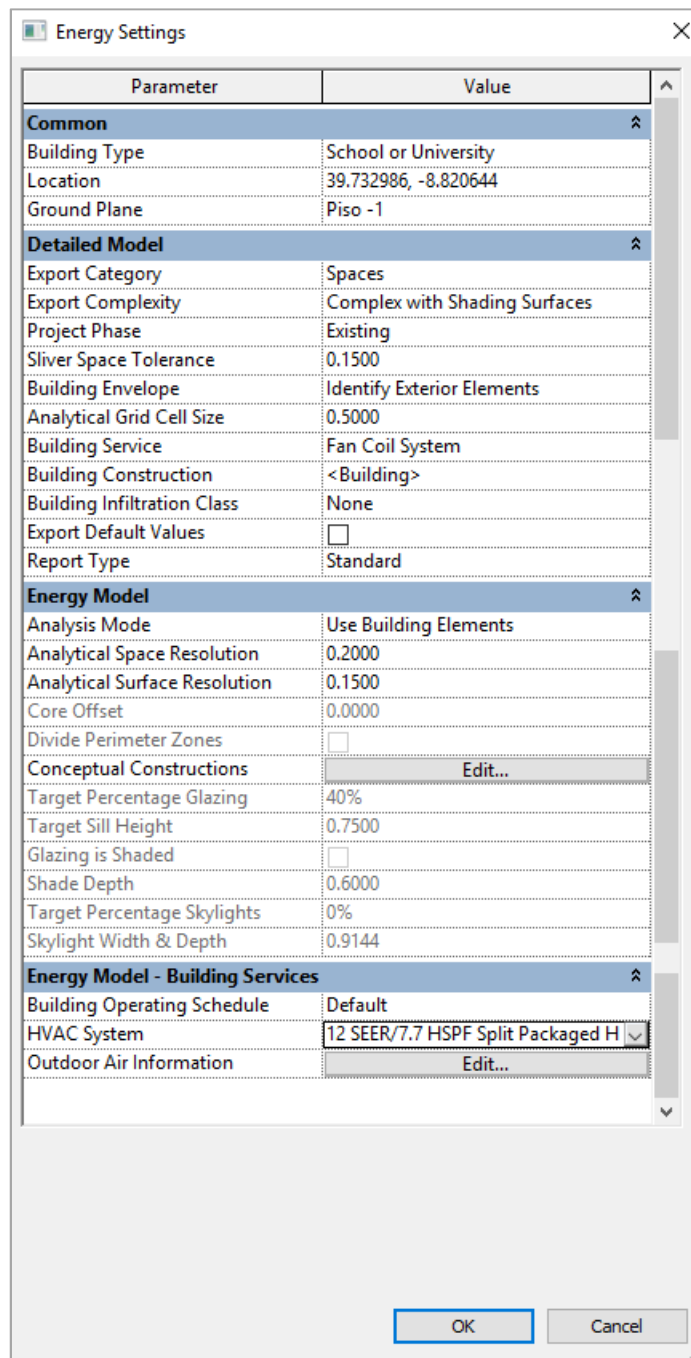


Figura 22 – Configurações energéticas consideradas na criação do modelo energético

É importante ainda mencionar que, ao optar pela consideração de ‘espaços’ nas configurações de energia, por padrão, a análise usará propriedades térmicas com base nos materiais atribuídos aos elementos de construção existentes no modelo (AutoDesk®, 2016). Porém, neste caso, deve-se ainda editar a opção de ‘Construção de edifício’ (*Building construction*) disponível na seção do ‘modelo de energia’, certificando-se que as opções não estão assinaladas, caso contrário serão substituídos os valores padrão dos

coeficientes de transmissão térmico dos materiais pelos valores lá sugeridos, conforme apresenta a Figura 23.

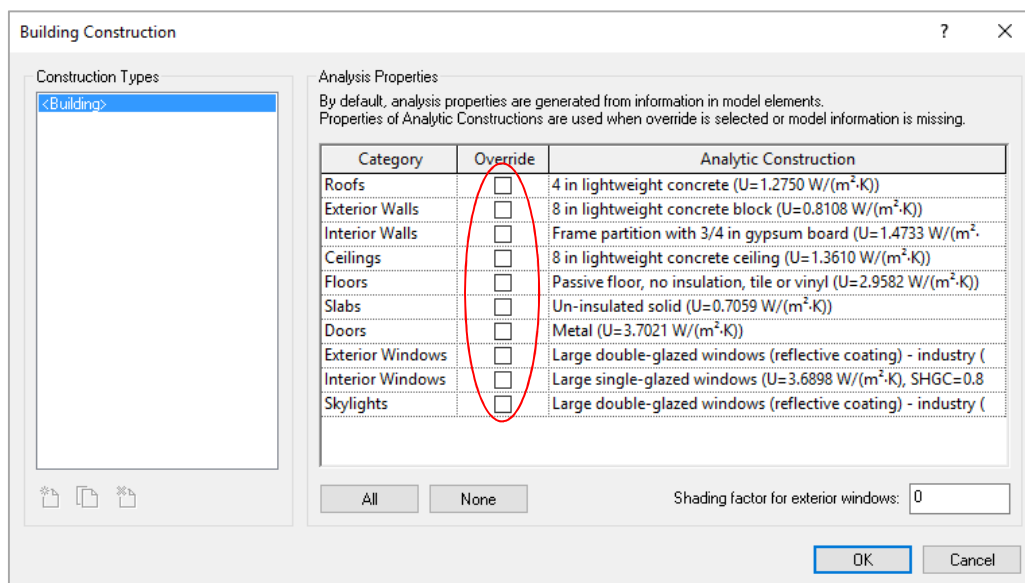


Figura 23 – Janela de configuração para ‘construção de edifício’ da seção do ‘modelo de energia’

Para a complexidade de exportação, o Autodesk Revit sugere que a complexidade simples é suficiente para análises energéticas, pois quanto mais simples a geometria exportada mais rápido será realizada a simulação. Entretanto, este seria o caso ideal para uma etapa inicial de projeto, quando se quer ter uma idéia do consumo energético de forma mais rápida. Como o objectivo deste estudo é a simulação dos consumos de energia de um edifício existente, é importante que a representação da edificação seja o mais fiel possível do real e, que sejam consideradas todas as características construtivas já inseridas no *software*. Desta forma, optou-se por definir como ‘complexa com superfícies de sombra’ que considera ainda informações das superfícies de sombra, importantes para uma simulação energética de um edifício já existente.

A opção de ‘fase de projeto’ foi definida como ‘existente’. Neste caso, foi importante considerar esta mesma definição para todos os elementos de construção do modelo, nas suas propriedades particulares, para que as características térmicas destes elementos fossem consideradas na simulação energética. Caso contrário, estas características poderiam não ser consideradas por estarem definidas numa fase de projeto anterior (se estivessem definidas como ‘nova construção’ significaria que ainda não existiam completamente na fase escolhida para a simulação).

Na opção de ‘elemento de construção’ (*Building envelope*), foi definido para identificar os elementos externos, pois neste caso as superfícies analíticas originadas a partir de elementos de construção no ambiente serão classificadas como externas ou superfícies de sombreamento.

A opção de ‘serviço de construção’ (*Building services*) fica disponível quando a análise é feita por ‘espaços’, como é o caso, e através deste parâmetro é especificado o sistema de aquecimento e resfriamento da construção. Porém, quando considerado um sistema de AVAC na aba ‘energy model – building services’, é esta a definição que será considerada na análise.

A ‘classe de infiltração da construção’ não é usada na análise de energia, pois o GBS aplica configurações padrão de infiltração. Desta forma, não foi alterada esta opção.

Na guia de configurações do ‘modelo detalhado’, foi desmarcada a opção ‘valores padrão de exportação’, pois desta forma somente os valores especificados pelo utilizador para pessoas, densidade de potência de iluminação e equipamentos, tipo de construção e espaços são considerados. Caso contrário, os valores padrão definidos pelo Autodesk Revit para estes tópicos seriam também considerados.

Para o ‘tipo de relatório’, especifica-se o nível de informação que deseja-se que seja fornecida no relatório de cargas de aquecimento e arrefecimento.

Na aba de ‘modelo de energia’ dentre as opções disponíveis para o modo de análise (elementos de construção, construções conceituais, ou os dois simultaneamente) foi definido que para o presente estudo o modo de análise seria por ‘elementos de construção’, opção a qual proporciona informações detalhadas da construção na criação do modelo energético. Como o modelo foi criado a partir de elementos de construções, os quais inclusive possuem propriedades e características construtivas e térmicas, consideradas importantes para a simulação energética, esta opção seria a mais adequada.

Na ‘resolução do espaço analítico’ assim como ‘resolução de superfície analítica’, os valores sugeridos fornecem um bom equilíbrio entre a precisão e o tempo de processamento do modelo de energia para a maioria dos casos (AutoDesk®, 2018), porém estes valores podem ser ajustados conforme desejado. Esta configuração permite controlar o tamanho da maior folga permitida na geometria do modelo para a análise de energia e, sendo assim, ela não precisa ser totalmente fechada para gerar resultados válidos na

Assim, após as configurações de energia foi gerado o modelo energético, o qual pode ser observado na Figura 25. Este é o modelo utilizado para a realização da simulação energética, o qual possui os espaços e superfícies analíticas, que são gerados considerando os espaços existentes no modelo assim como as tolerâncias definidas nas configurações de energia.

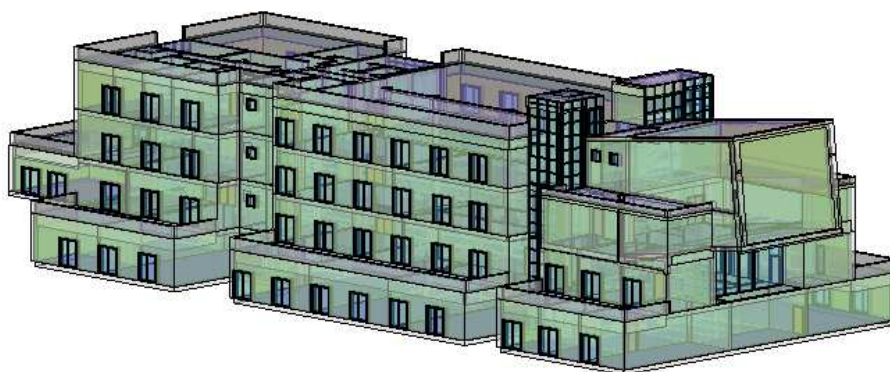


Figura 25 – Modelo energético

3.4. Simulações energéticas e validação do modelo

Uma simulação é o exercício de uma representação o mais próxima possível do real e, portanto, uma simulação energética tem como objectivo obter uma perspectiva do desempenho energético e do real comportamento do objeto de simulação, no caso uma edificação.

Como ferramenta de simulação energética foi optado por utilizar o Energy Analysis do Autodesk Revit, que conecta com o GBS para a obtenção dos resultados. Esta facilidade de comunicação torna-se importante na escolha da ferramenta de análise de energia. Além disso, este programa mostrou ter uma interface amigável e maior número de dados de saída entre os *freeware softwares* mais utilizados para análises energéticas.

No processo de realização das simulações energéticas, é importante também passar por uma fase de validação/calibração do modelo, que trata-se do ajuste de parâmetros até que se obtenha um valor próximo ao consumo energético real. Pois para que o modelo e a simulação sejam confiáveis é necessário que sejam obtidos resultados fiáveis.

Para o estudo de caso da presente dissertação foi realizada esta calibração a partir da inserção de dados reais julgados importantes em cada uma das zonas térmicas, assim como outras definições dos espaços. A cada alteração foi realizada nova simulação com o fim de avaliar os resultados e compará-los ao consumo real do edifício, conhecido a partir de dados da auditoria energética, o qual foi tomado como referência para a calibração do modelo.

4. Resultados e discussões

Após a apresentação e descrição das etapas realizadas para as simulações energéticas do edifício em questão, através do Energy Analysis do Autodesk Revit, serão apresentados, no presente capítulo, os resultados obtidos, tomando como referência os valores da auditoria energética, assim como será feita uma discussão de resultados e comparação entre as diferentes formas de simulação.

Será ainda realizada uma comparação dos resultados obtidos neste estudo com os obtidos em estudo realizado por Santos (2012), onde foi realizada uma análise comparativa de programas de simulação do consumo energético de edifícios através de outras ferramentas, dentre elas o EnergyPlus, porém não em ambiente BIM.

Além disso, serão explorados os demais dados obtidos a partir da simulação realizada através do Energy Analysis do Autodesk Revit, conectado com o GBS, nomeadamente as emissões de gases de efeito estufa em consequência do consumo energético, cargas de aquecimento e arrefecimento dos componentes do edifício, e distribuição dos ventos. Alguns destes resultados, no entanto, são apresentados de forma mais detalhada na plataforma *online* GBS.

4.1. Comparação dos dados da auditoria com os resultados da simulação

Ao longo da realização das simulações energéticas através do Energy Analysis do Autodesk Revit, foi realizada a calibração do modelo, com a inserção de dados realísticos

e, comparando sempre os resultados obtidos com o consumo anual conhecido a partir de dados de uma auditoria energética realizada no edifício, até que chegou-se a um resultado próximo do real.

Os dados da auditoria energética, tomados como referência para a calibração do modelo, são apresentados na Tabela 14, juntamente com a desagregação do consumo por sector, onde pode-se notar que o sistema de AVAC é o maior responsável no consumo de energia. Sabe-se ainda que a energia eléctrica é a única fonte de energia disponível no edifício, não existindo energia produzida por combustíveis, como por exemplo o gás natural. Além disso, é importante destacar que durante a auditoria os sistemas de AVAC estavam no modo de produção de frio.

Tabela 14 – Consumo de energia e sua desagregação por sector, conforme dados recolhidos da auditoria energética (adaptado de Santos, 2012)

Forma de Energia	Energia Final [kWh/ano]	Sector	Valor Percentual
Energia eléctrica	422.999	AVAC	67%
		Outros	33%

A comparação dos resultados da auditoria, com os resultados obtidos com a simulação energética realizada a partir do Energy Analysis do Autodesk Revit e do EnergyPlus, são apresentados na Tabela 15. São também apresentados os desvios dos dois simuladores relativamente aos dados de referência. É possível constatar que os valores obtidos com a simulação do presente estudo foram mais próximas do consumo de referência, embora existissem aproximações feitas quanto ao perfil de operação do edifício e ao tipo de sistema de AVAC, devido limitações nomeadamente na alteração dos padrões predefinidos do Autodesk Revit.

Tabela 15 – Comparação dos consumos energéticos anuais e seus desvios em relação à auditoria

Método	Consumo total [kWh/ano]	Erro [%]
Auditoria (referência)	422.999,0	-
Energy Analysis do Autodesk Revit	425.240,0	0,5
EnergyPlus (Santos, 2012)	391.333,3	7,5

Os dados referentes à simulação com o uso do *software* EnergyPlus (um dos programas mais divulgados para tal fim tanto em meios profissional como académico), foram obtidos

a partir da criação de um modelo em 3D no ScketchUp. Esta simulação, apresentou um maior desvio em relação à auditoria energética.

Na Figura 26 é apresentada de forma gráfica uma comparação dos consumos totais entre a auditoria e as duas formas de simulação avaliadas.

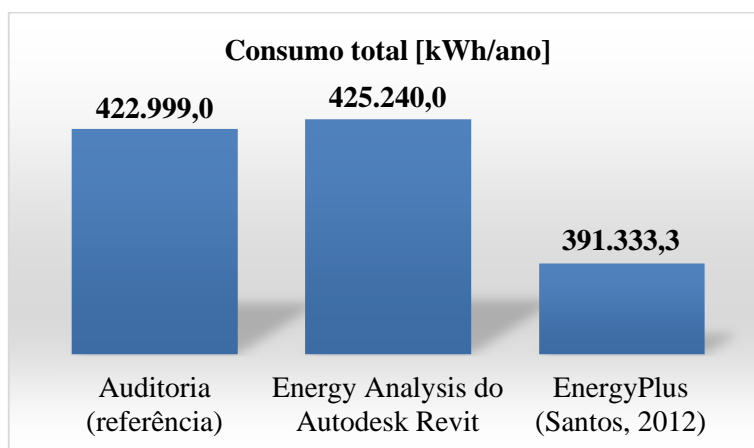


Figura 26 – Comparação entre os consumos energéticos anuais totais

A partir da simulação energética realizada no presente estudo, e também dos dados de simulação do EnergyPlus, que estão a ser comparados, obteve-se uma desagregação do consumo energético mais detalhada do que dos dados conhecidos da auditoria. Foram obtidas percentagens do uso da energia não só para o sistema de AVAC, mas também para o aquecimento, arrefecimento, iluminação, equipamentos diversos e equipamentos auxiliares do sistema de AVAC. Assim, a Figura 27 mostra a desagregação do consumo obtida a partir das simulações.

Verificou-se que as percentagens de consumo das simulações para iluminação, equipamentos e sistema de AVAC encontram-se próximas. Comparando os consumos totais relacionados ao sistema de AVAC (destacado em cinza nos gráficos da Figura 27) com os dados da auditoria, no entanto, verificou-se que embora as simulações apresentaram valores próximos entre si (28,8% e 33,7% do consumo total), divergem dos dados da auditoria energética (67,0%). Este grande desvio pode ter ocorrido pelo sistema de AVAC considerado na simulação no Autodesk Revit não ter representado suficientemente as características do sistema real existente no edifício, devido a consideração dos sistemas padrões disponíveis. Outra justificação poderá ser o facto de que a auditoria foi realizada considerando apenas um determinado período do ano, época de

verão, e desta forma não representar todas as situações de utilização dos sistemas de AVAC que ocorrem ao longo de um ano inteiro.

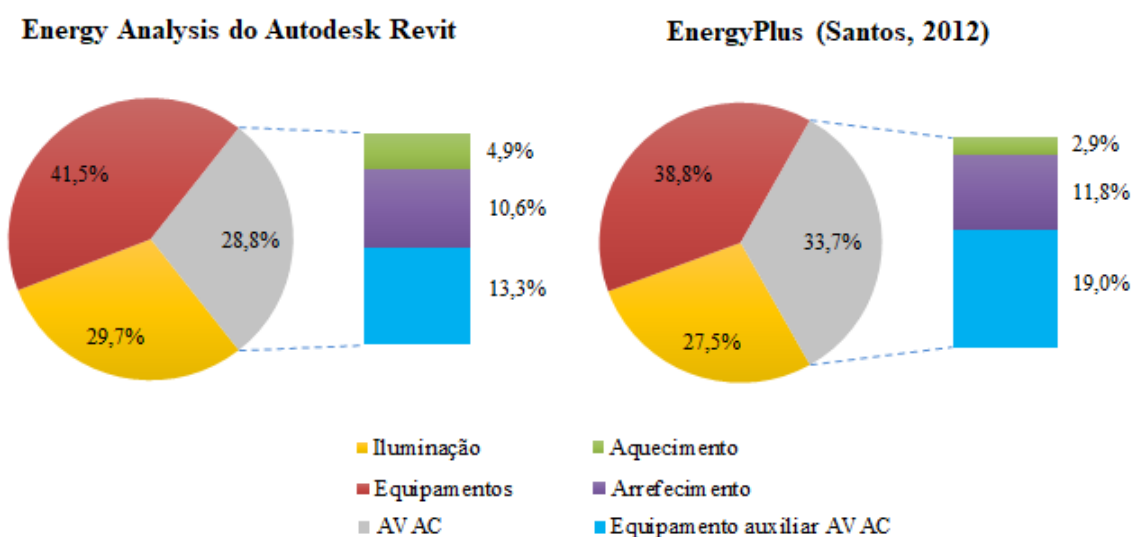


Figura 27 – Comparação da desagregação dos consumos de energia elétrica a partir das simulações

Com as comparações realizadas, constatou-se que embora o consumo total final obtido a partir da simulação do presente estudo seja próximo do consumo de referência, quando são comparados os consumos por sector eles divergem. No que diz respeito à desagregação dos consumos de energia, os resultados obtidos no Energy Analysis aproximam-se dos resultados do EnergyPlus.

É importante mencionar que, a análise energética realizada no Energy Analysis, e consequentemente no GBS, apresentam resultados não só do uso de energia elétrica mas também do uso de combustível. Como no edifício em questão existe apenas energia elétrica, os resultados referentes ao consumo de combustível foram desprezados, e subtraídos quando julgado necessário, sem prejuízos na análise.

Além dos consumos energéticos anuais e sua desagregação, como já apresentado, a simulação realizada através do Energy Analysis proporciona também resultados quanto aos consumos mensais de energia. Sendo assim, os consumos mensais de eletricidade obtidos na simulação são apresentados na Figura 28 em comparação com os consumos mensais do edifício da ESSLei conhecido a partir de dados da auditoria energética. Nota-se que as maiores divergências ocorrem nos meses de Junho, Julho e Setembro, ao contrário dos meses de Janeiro, Abril, Agosto e Novembro, onde os consumos encontram-se muito próximos.

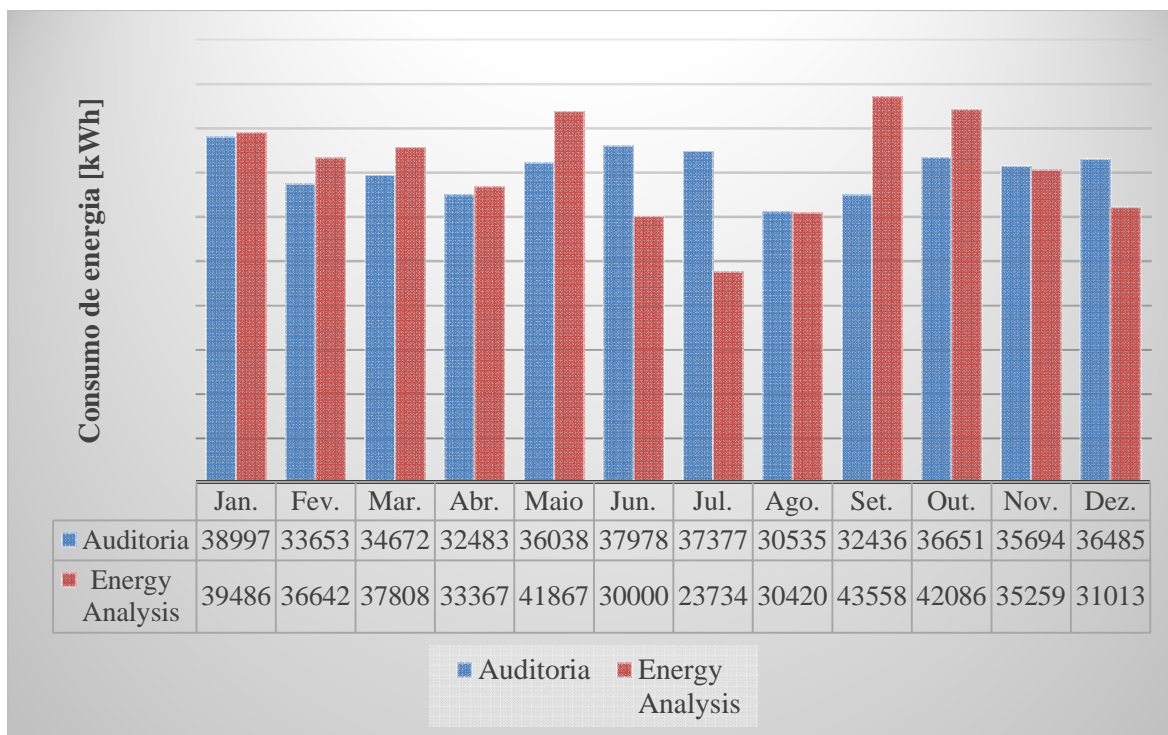


Figura 28 – Comparação do consumo mensal de energia da ESSLei entre dados da auditoria e da simulação no Autodesk Revit

Ainda na Figura 28, verificou-se que segundo dados da auditoria energética, o menor consumo ocorre no mês de Agosto, o que é de se esperar sendo que é o mês de férias lectivas. Em relação ao consumo simulado, o maior período de férias lectivas para escolas ou universidade é considerado como sendo entre 9 de Junho e 24 de Agosto, conforme já comentado em capítulo anterior devido padrões do *software*. Neste caso, é normal que o menor consumo anual simulado seja no mês de Julho.

Após a análise dos consumos anuais, mensais e desagregação dos consumos por sector, foi feito o cálculo dos consumos específicos de energia (Tabela 16), onde foi considerado o consumo de energia elétrica total e a área útil do edifício conforme cada um dos diferentes simuladores energéticos. O consumo específico de energia de referência é o calculado a partir dos dados da auditoria energética, com um valor de 91,0 kWh/m².ano.

Tabela 16 – IEE de cada uma das formas de simulação

	Área Útil [m ²]	Consumo Total [kWh/ano]	Consumo Específico de Energia [kWh/m ² .ano]
Auditoria (referência)	4.645,8	422.999,0	91,0
Energy Analysis do Autodesk Revit	4.376,0	425.240,0	97,2
EnergyPlus	5.046,8	391.333,3	77,5

A diferença da área do edifício, que pode ser notada nas tabelas de resultados, se dá pela diferente consideração de áreas pelos *softwares*. O Autodesk Revit considera as áreas úteis de cada um dos ambientes as quais depende ainda da resolução dos espaços e superfícies analíticas (que foram definidos nas configurações de energia e influenciam a área dos espaços), enquanto que no EnergyPlus é considerada a área total construída.

De forma geral, em relação à experiência de realização da simulação do desempenho energético do edifício a partir do Energy Analysis do Autodesk Revit, os resultados e comparações de diferentes simulações do projeto podem ser facilmente visualizados e, os dados são automaticamente gravados na plataforma *online* GBS. Entretanto, para a visualização da desagregação do consumo de energia detalhado, conforme apresentado anteriormente, foi necessário aceder a plataforma GBS, pois neste aspeto os resultados apresentados pelo Autodesk Revit apresentaram-se mais simplificados.

Além destes aspetos mencionados, percebeu-se que quando a análise é realizada no Energy Analysis, o número de simulações foi de 248 (*number of runs* = 248), sendo que uma destas análises diz respeito ao modelo criado e as demais são simulações alternativas com sugestões de mudanças de elementos de construção, sistemas de AVAC ou mesmo a orientação do edifício. Assim, pode-se mais facilmente analisar se há uma opção de alteração do projeto que proporcione uma redução no consumo energético do edifício, redução de emissão de gases ou ainda redução de custo.

4.2. Emissões de CO₂

Na realização de um estudo energético em edifícios, é importante analisar também a emissão de gases de efeito estufa que o consumo de energia provoca, e pensar em alternativas que possam auxiliar a reduzir este consumo.

A quantidade de gases de efeito estufa é normalmente representada através da equivalência em dióxido de carbono (CO_{2e}), a qual leva em conta o potencial de aquecimento global dos diversos gases e calcula quanto de CO₂ seria emitido se eles fossem o dióxido de carbono.

Para o cálculo desta emissão em consequência do consumo de energia, foi multiplicado este consumo pelo fator de conversão e de emissão, tendo em consideração o Despacho

(extrato) nº15793-D/2013 (Cabral, 2013b), de Portugal, uma vez que estes fatores diferem de país para país.

Assim, considerando que o consumo de energia total simulado foi de 425.240,0 kWh/ano, fazendo-se os cálculos necessários, obteve-se uma quantidade de emissão de 153.086,4 kgCO_{2e}.

4.3. Cargas de aquecimento e arrefecimento

As cargas mensais de aquecimento e arrefecimento tem o objetivo de mostrar a influência de aquecimento e arrefecimento existente no edifício para cada mês do ano, devido aos seus componentes estruturais e ocupação. Estes dados também são obtidos pela simulação realizada em Autodesk Revit e GBS, e auxiliam de maneira visual na tomada de decisão em relação a estes intervenientes.

Estas cargas mensais mostram a necessidade de aquecimento e arrefecimento a partir dos ganhos (representados pelos valores positivos) e perdas (representadas pelos valores negativos) de calor devido aos componentes do edifício, tais como envolvente, existência e característica das janelas, iluminação, equipamentos diversos (computadores, plugues, equipamentos de escritório, etc.), ocupantes, radiação solar, entre outros.

A Figura 29 mostra as cargas mensais de aquecimento, onde é possível perceber que as maiores perdas de calor no edifício da ESSLei ocorrem em função do entorno subterrâneo, da cobertura, das paredes e da condutividade das janelas. Em relação aos ganhos, nota-se que a existência de equipamentos, iluminação e taxa de ocupantes auxiliam na redução da necessidade de aquecimento. As maiores necessidades de aquecimento ocorrem nos meses de Janeiro, Fevereiro e Dezembro, já nos os meses de Junho e Setembro não se tem perdas de calor por influência dos componentes do edifício.

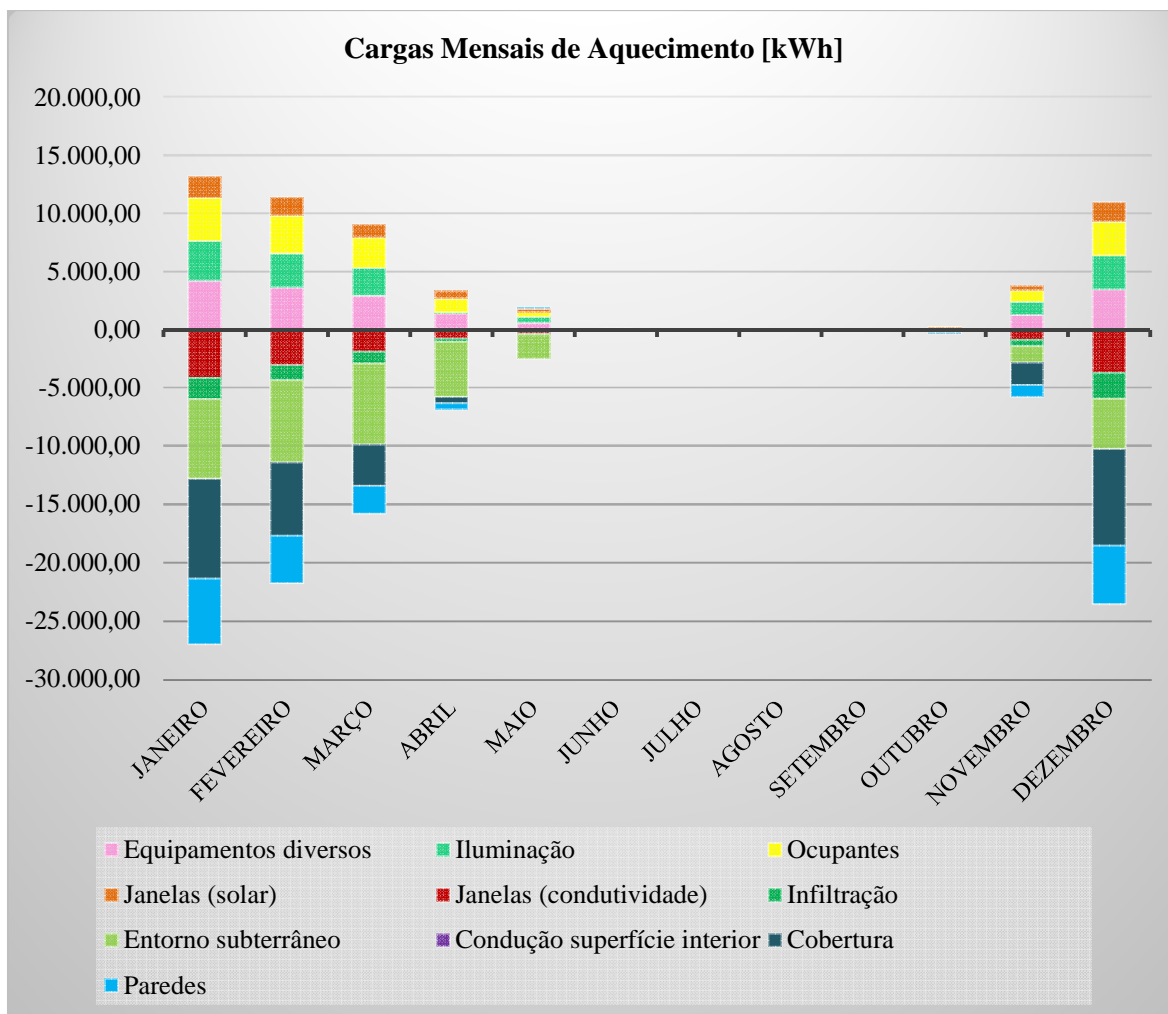


Figura 29 – Cargas mensais de aquecimento da ESSLei

Para as cargas mensais de arrefecimento, apresentadas na Figura 30, percebe-se que a maior necessidade de arrefecimento ocorre nos meses de Julho e Agosto, que são os meses que possuem maiores ganhos de calor devido aos elementos do edifício. A maior necessidade de arrefecimento em todos os meses do ano ocorre em função dos ocupantes do edifício, o que quer dizer que a liberação de calor dos ocupantes do edifício, devido a uma grande taxa de ocupação, tem uma considerável influência na qualidade do ar interior e no conforto ambiental dos espaços do edifício. A segunda maior causa da necessidade de arrefecimento ocorre em consequência da existência de equipamentos e, em seguida, devido ao calor adquirido pela radiação solar nas janelas e luminárias. Depois, percebe-se que principalmente a cobertura do edifício gera uma necessidade de arrefecimento durante os meses mais quentes, entretanto quando são observadas novamente as cargas de aquecimento (Figura 29), nota-se que a estrutura da cobertura proporciona uma menor necessidade de aquecimento nos meses mais frios.

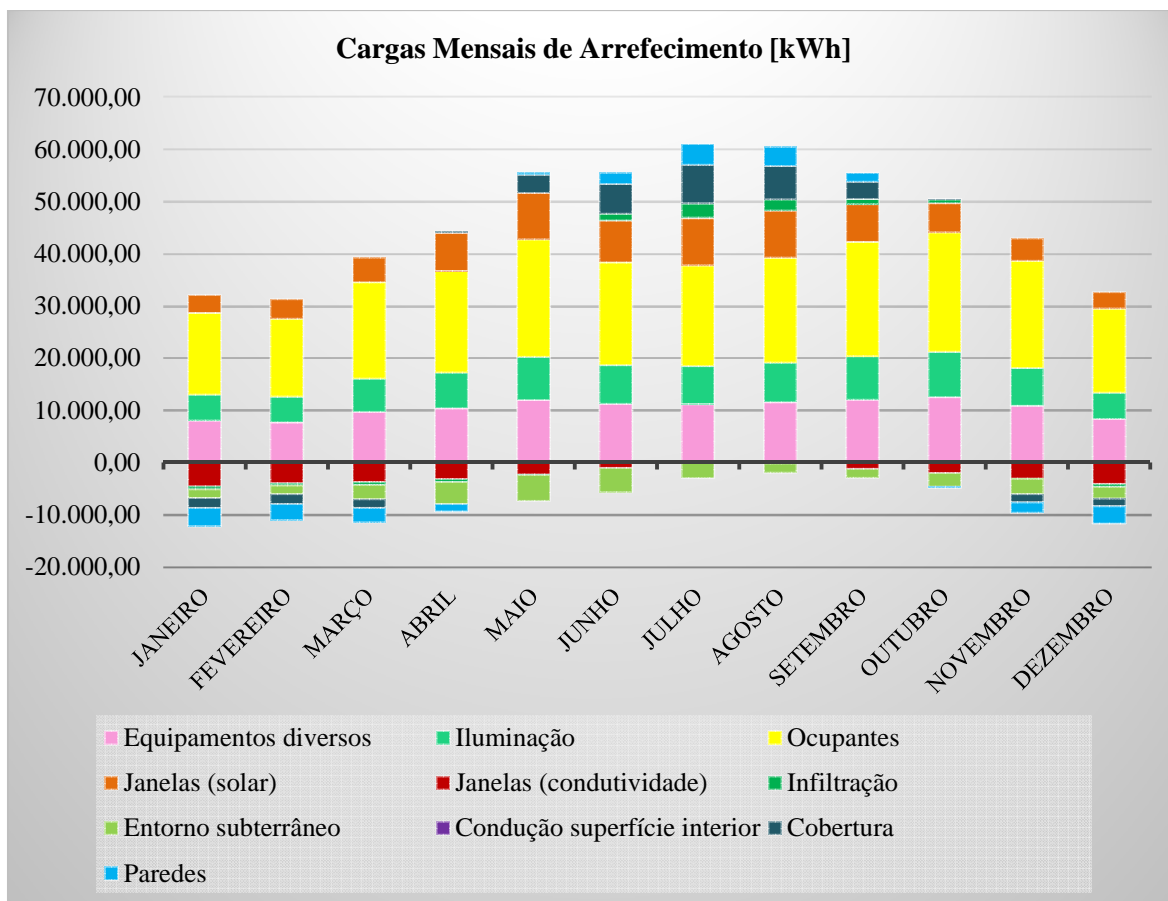


Figura 30 – Cargas mensais de arrefecimento da ESSLei

Através da análise das cargas de aquecimento e arrefecimento, é possível estudar os fatores de maior influência na necessidade do uso de climatização no edifício, e sugerir alterações para minimizá-lo. Alguns fatores não podem ser alterados, como por exemplo os ocupantes do edifício, já outros elementos como o tipo de luminárias, materiais e isolamentos de coberturas, parede e janelas, podem ser mais facilmente modificados.

Assim, de acordo com a análise das cargas mensais apresentadas, verificou-se que tanto a cobertura como as paredes do edifício proporcionam uma grande parte da perda de calor durante os meses frios, o que gera uma maior necessidade de aquecimento, além de proporcionar ganhos de calor durante os meses quentes, o que gera uma maior necessidade de arrefecimento. Para a melhoria deste quadro, sugere-se que a estrutura destes elementos seja alterada, com o uso de diferentes composições de materiais, que proporcionem um melhor isolamento térmico. Sabe-se, entretanto, que estas paredes já possuem um isolamento térmico do tipo *wallmate*, de 3 cm. Neste caso, sugere-se a aplicação de um isolamento de maior espessura, de 5 cm por exemplo, que seria capaz de diminuir ainda mais a transmissão de calor para os ambientes internos.

Em relação à envolvente envidraçada do edifício, verificou-se que o ganho de calor proporcionado pelas janelas existentes contribui para o maior uso de arrefecimento, não tendo uma grande influência na necessidade de aquecimento do edifício. Sendo assim, sugere-se uma alteração dos vidros das janelas para um que tenha um coeficiente de transmissão térmica (U) mais baixo. Este coeficiente representa a quantidade de calor que é transmitida através do envidraçado e, sendo assim, um valor mais baixo significaria uma diminuição da transferência de calor para os ambientes internos do edifício.

As lâmpadas também poderiam ser alteradas para um tipo que liberte menos calor, como por exemplo as lâmpadas LED (*Light Emitting Diode*), que além de liberar muito pouco calor ainda diminuem o consumo de energia. Devido ao grande número de lâmpadas existentes no edifício, por se tratar de uma escola, esta alteração poderia auxiliar consideravelmente na diminuição do consumo de energia.

É importante ter em consideração que para edificações existentes, como a do estudo de caso, algumas modificações embora se mostrem de grande influência no consumo de energia do edifício, podem não se tornar atrativas pelo grande trabalho de intervenção que seria necessário. É o caso da alteração dos isolamentos das paredes e dos vidros das janelas, por exemplo. Outras, como a alteração das lâmpadas, mostram-se ser alterações de menor dificuldade.

4.4. Influência e distribuição dos ventos

O estudo do padrão dos ventos predominantes e sua distribuição para o local da construção pode auxiliar os projetistas na decisão de estratégias de alterações na orientação e na disposição das aberturas do edifício, de forma a proporcionar um maior aproveitamento da ventilação natural. A simulação realizada em Autodesk Revit e GBS proporcionam dados quanto à distribuição do vento e sua frequência conforme a localização definida para o projeto.

A rosa dos ventos anual para a distribuição da velocidade dos ventos em cada direção, é apresentada na Figura 31. Conforme se afasta do centro da rosa dos ventos, significa que existe uma maior frequência. Desta forma, pode ser observado que a maior frequência de ventos ocorre a nor-nordeste, com mais de 16% das horas anuais, mas grande parte destes

ventos são de menores velocidades. Os ventos vindos da direção noroeste e norte também são comuns, com uma frequência de mais de 10% e 8% das horas anuais, respectivamente.

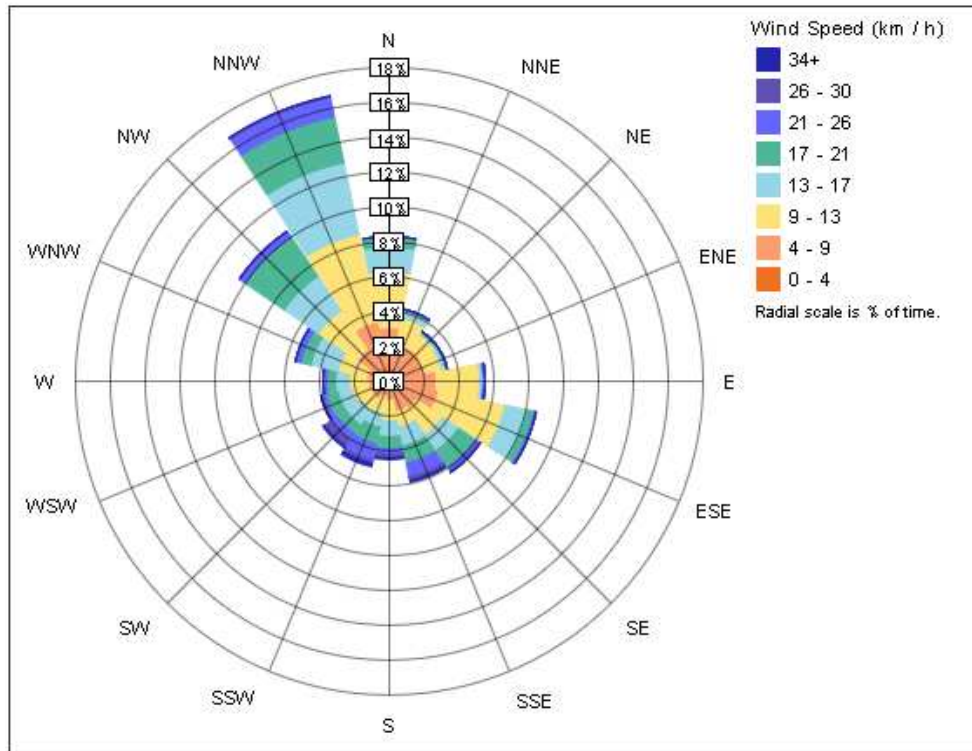


Figura 31 – Rosa dos ventos anual para a velocidade dos ventos

A rosa dos ventos anual para a frequência dos ventos em cada direção, é apresentada na Figura 32, sendo que agora são apresentadas as velocidades dos ventos em vez da percentagem de tempo, e o número de horas que ocorrem.

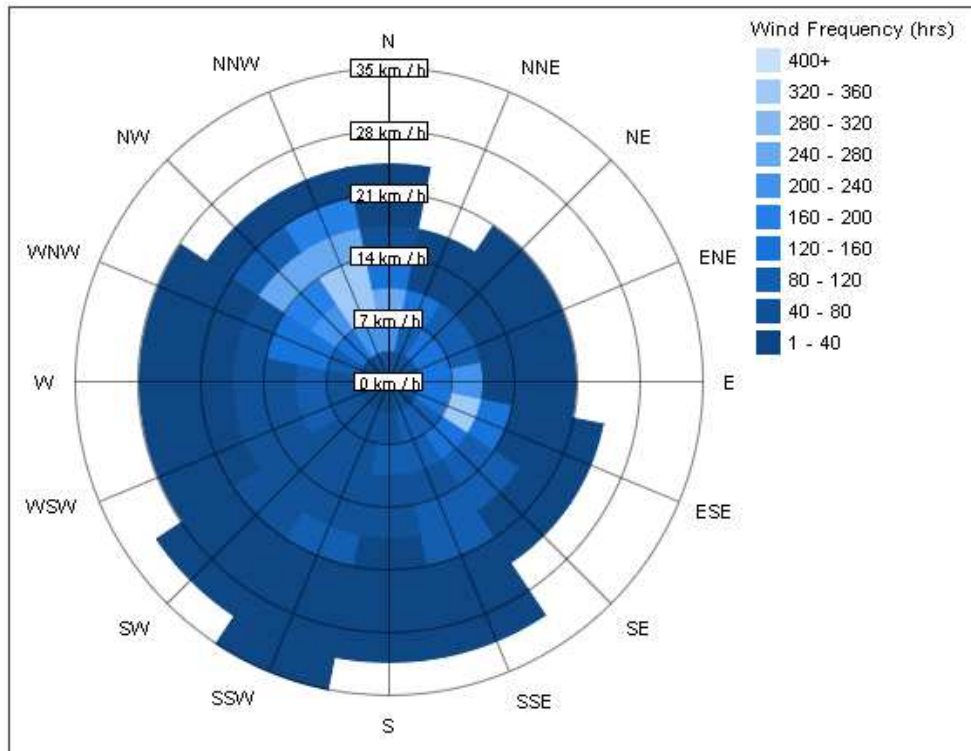


Figura 32 – Rosa dos ventos anual para a frequência dos ventos

Para uma melhor análise da influência dos ventos na edificação ao longo do ano, é importante realizar uma análise mensal, para que possa ser possível um melhor aproveitamento de uma ventilação natural principalmente nos meses de calor, porém sem que ocorra a entrada de grandes ventos frios no inverno, mantendo assim um equilíbrio para o conforto ambiental durante todas as épocas. Assim, na Figura 33 são apresentadas as rosas dos ventos mensais, as quais mostram a frequência dos ventos em cada mes do ano.

Como já visto em subcapítulo anterior, a maior necessidade de arrefecimento do edifício ocorre nos meses de Julho e Agosto, o que se torna um período ideal para se ter uma boa ventilação natural. Observando as rosas dos ventos mensais (Figura 33), nota-se que os maiores ventos ocorrem de noroeste à sudoeste e, como pode ser observado na Figura 34, existe uma grande área de janelas nestas direções, que podem proporcionar a entrada destes ventos no edifício. Em relação aos meses de inverno, percebe-se que o mês de Janeiro não tem grandes ventos que ocorrem nesta mesma direção (noroeste à sudoeste), em contrapartida, os meses de Fevereiro e Dezembro possuem ventos nesta direção, o que torna necessário que durante o inverno estas aberturas encontrem-se fechadas para que haja um maior conforto interno no edifício durante estes meses.

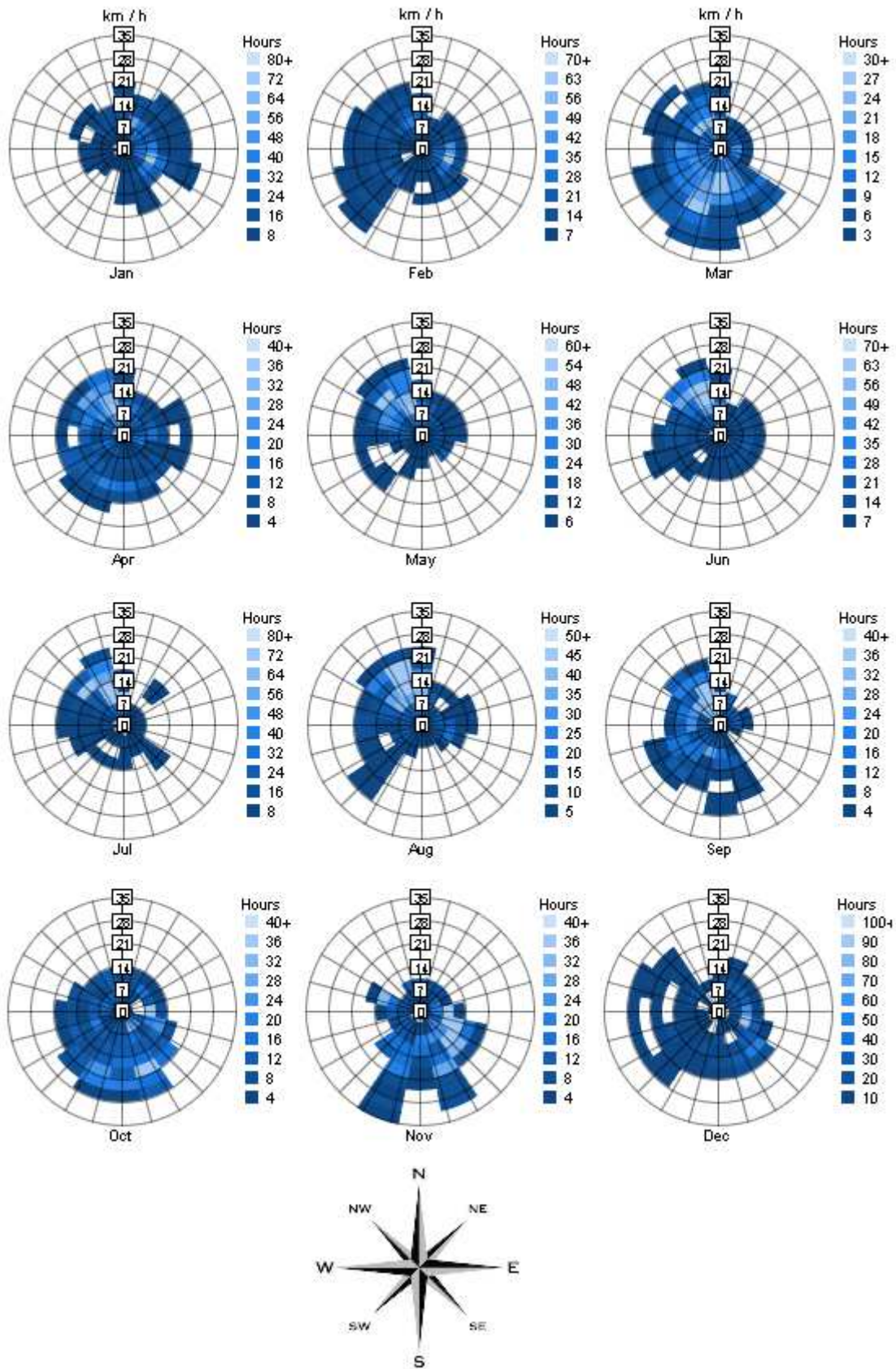


Figura 33 – Rosas dos ventos mensais para a frequência dos ventos

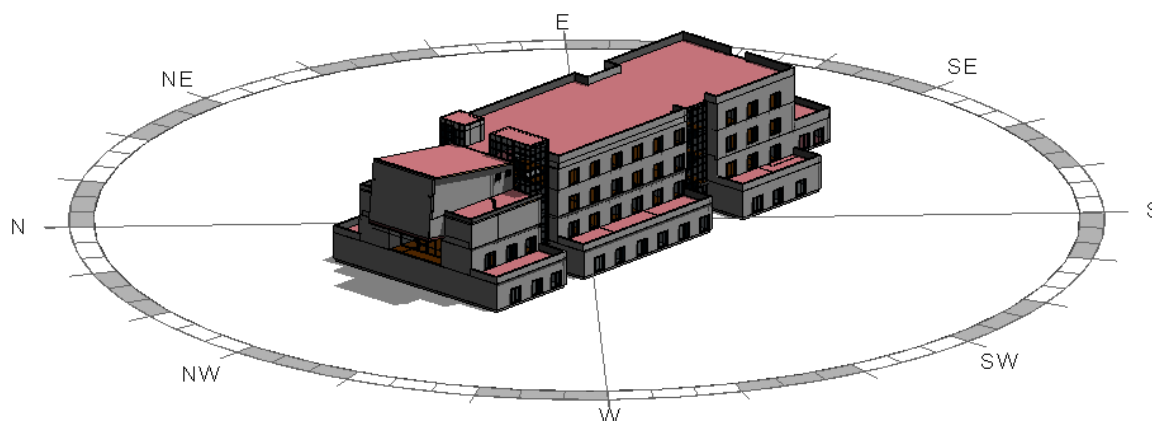


Figura 34 – Orientação do edifício da ESSLei

5. Conclusão

São muitas as ferramentas de simulação que podem ser usadas para a análise do desempenho energético de edifícios, porém é necessário saber quais as ideais para cada caso, uma vez que diferem quanto à disponibilidade de dados de entrada, possibilidade de alteração/customização de dados, quantidade de resultados finais fornecido pela simulação, entre outros fatores.

Para a realização de uma simulação energética de um edifício já existente é importante utilizar parâmetros reais do edifício para se ter resultados mais fiáveis. Um modelo de um edifício desenvolvido em ambiente BIM possui muita informação integrada e, o uso desta informação na simulação energética é uma vantagem, uma vez que ganha-se tempo de análise.

Além disso, a metodologia BIM está a tornar-se cada vez mais comum na indústria da AECO, o que faz com que o estudo e conhecimento da interoperabilidade entre programas que proporcionam o desenvolvimento de projetos em BIM e programas de análises, torne-se essencial.

Alguns dos fatores considerados importantes na simulação energética de edifícios e que podem ter grande influência no seu consumo energético são as características térmicas da envolvente do edifício, por estar em contacto direto com o ambiente externo, o comportamento dos ocupantes e a frequência com que utilizam a edificação, as horas de

operação da iluminação e equipamentos, orientação e localização do edifício, sombreamento, sua geometria e tamanho, assim como a definição do sistema de AVAC.

Na preparação do modelo em ambiente BIM para análise através do Energy Analysis do Autodesk Revit, foi optado por utilizar os padrões predefinidos pelo *software*, fazendo-se as alterações adequadas para se obter um modelo que represente as características reais da edificação o mais próximo possível. Após a realização das simulações e processo de calibração, foi possível obter um desvio de 0,5% em comparação com o consumo anual de energia elétrica da auditoria energética. Este desvio é considerado aceitável e muito inferior ao obtido com o EnergyPlus, que foi de 7,5%.

Em relação à desagregação do consumo de energia elétrica, entretanto, obteve-se uma diferença maior comparando-se os sectores, o que ocorre também com os resultados do EnergyPlus (Santos, 2012) quando comparados aos valores de referência. Estas diferenças podem ter ocorrido devido as definições feitas no Autodesk Revit para o sistema de AVAC não terem representado suficientemente as condições reais, em consequência das limitações encontradas no *software*, nomeadamente na alteração dos padrões predefinidos. Outra justificativa seria o facto da auditoria ter sido realizada considerando apenas um pequeno período (Junho), e não com monitorizações ao longo de um ano inteiro.

O perfil de operação do edifício (ocupação, iluminação e equipamentos), tem grande influência na análise energética, assim como o sistema de AVAC, pois possui uma grande percentagem no consumo total. Desta forma, a escolha do sistema de AVAC dentre os sistemas disponíveis no Autodesk Revit, e sem a caracterização detalhada deste sistema, pode ter influenciado nos resultados da desagregação dos consumos de energia.

Com a realização do presente estudo constatou-se que, o facto do Autodesk Revit e do GBS trabalharem de forma integrada proporciona uma maior facilidade na prática de simulações energéticas pelos profissionais da indústria da AECO. Além disso, esta forma de simulação proporciona uma comparação facilitada entre diferentes alternativas de projetos e uma grande gama de resultados para análise. É possível obter não só os consumo energéticos totais anuais, mas também mensais, dados para análise da emissões de gases de efeito estufa, da distribuição dos ventos, assim como o potencial de geração de energia renovável.

Principalmente para o caso de edifícios que se enquadram nos padrões estipulados pelo programa (que considera normalmente os padrões da ASHRAE), estas ferramentas constituem uma boa opção para a avaliação do futuro consumo energético de edifícios. A existência dos padrões se torna uma grande vantagem e diminui a complexidade na utilização, pois programas de simulação como o EnergyPlus necessitam de um conhecimento mais profundo para a realização de análises.

O estudo da interoperabilidade entre um modelo em BIM e um *software* específico de simulação, serve como sugestão de um estudo futuro, sendo que os resultados do EnergyPlus apresentados na presente dissertação foram obtidos a partir de um modelo em 3D criado no SketchUp, e não em ambiente BIM. Outra sugestão seria explorar o potencial de geração de energia renovável do edifício e avaliar qual a influência que teria com a implementação de sistemas de painéis fotovoltaicos, por exemplo. Com isso, seria possível ainda analisar a possível redução de emissão de gases de efeito estufa.

Bibliografia

- Abanda, F. H., & Byers, L. (2016). An investigation of the impact of building orientation on energy consumption in a domestic building using emerging BIM (Building Information Modelling). *Energy*, 97, 517–527.
- AutoDesk®. (n.d.). AutoDesk® Building Performance Analysis Help Manual. Consultado em 3 abril 2018. Disponível em http://help.autodesk.com/view/BUILDING_PERFORMANCE_ANALYSIS/ENU/
- AutoDesk®. (2016). AutoDesk® Revit 2016: Ajuda. Consultado em 3 abril 2018. Disponível em <http://help.autodesk.com/view/RVT/2016/PTB/>
- AutoDesk®. (2018). AutoDesk Knowledge Network. Consultado em 5 jun. 2018. Disponível em <https://knowledge.autodesk.com/>
- Bernardo, H., Quintal, E., & Oliveira, F. (2017). Using a Calibrated Building Energy Simulation Model to Study the Effects of Improving the Ventilation in a School. *Energy Procedia*, 113, 151–157.
- Cabral, P. H. G. (2013a). Despacho n.º 15793-F/2013. *Diário Da República*, 2ª Série, 234(3), 26–31.
- Cabral, P. H. G. (2013b). Despacho n.º 15793-D/2013. *Diário Da República*, 2ª Série, 234(3), 13.
- Carvalho, C. P. (2016). *A metodologia BIM – Building Information Modeling na Gestão da Manutenção das infraestruturas do Campus 2 do Instituto Politécnico de Leiria* (Dissertação de Mestrado não editada). NOVA Information Management School, Leiria.
- Fernandes, M., Caels, P., Gaspar, A., Costa, J., Bernardo, H., Quintal, E., & Simões, B. (2010). *Caracterização e Inspeção dos Equipamentos de Produção Térmica para AVAC nos Edifícios do Instituto Politécnico de Leiria - Campus 2*. Wsbp engineering, lda.
- Hirsch, J. J. (2016). *Welcome to DOE-2.com: The Home of DOE-2 Based Building Energy Use and Cost Analysis Software*. Consultado em 20 jul. 2018. Disponível em

<http://doe2.com/>

- IEA. (2017). *Energy Technology Perspectives 2017 - Catalysing Energy Technology Transformations*.
- Iiter, D. A., & Ergen, E. (2015, janeiro). Analysis of the information flow from BIM to energy simulation programs. In *Conference: Organization, Technology, and Management in Constrcution*.
- INESC Coimbra. (2009). *Caracterização da Envolvente - Edifícios do Instituto Politécnico de Leiria*. Leiria.
- Le, M. (2014). *Autodesk® Green Building Studio for an Energy- Efficient , Sustainable Building* (Monografia de Licenciatura em Engenharia de Construção não editada). University of Applied Sciences, Visamäki.
- LNEC. (2013). *Manual de Instruções da Ferramenta de Cálculo: Aplicação LNEC para Determinar Caudal Mínimo de Ar Novo de Acordo com o Método Analítico do RECS*. Lisboa.
- Lopes, M. A. R., Antunes, C. H., Reis, A., & Martins, N. (2017). Estimating energy savings from behaviours using building performance simulations. *Building Research & Information*, 45(3), 303–319.
- Mustafaraj, G., Marini, D., Costa, A., & Keane, M. (2014). Model calibration for building energy efficiency simulation. *Applied Energy*, 130, 72–85.
- Queiróz, G. R., Schimaniak, N. K., Santos, J. C. P., & Grigoletti, G. C. (2015). Autodesk Revit® como Ferramenta BIM Aplicada à Simulação Térmica de Edificações. *Revista de Arquitetura IMED*, 4(2), 33–41.
- Reeves, T., Olbina, S., & Issa, R. (2015). Guidelines for Using Building Information Modeling for Energy Analysis of Buildings. *Buildings*, 5(4), 1361–1388.
- Santos, T. A. (2012). *Análise comparativa de programas de simulação do consumo energético de edifícios* (Dissertação de Mestrado não editada). Instituto Politécnico de Leiria, Leiria.
- Sun, X. (2016). *Investigating Building Information Model to Building Energy Model Data Transfer Integrity and Simulation Results* (Dissertação de Mestrado em Ciências Aplicadas no Programa de Ciências da Construção). Ryerson University, Canadá.

U.S.GBC. (n.d.). Better buildings are our legacy. Consultado em 27 jul. 2018. Disponível em <https://new.usgbc.org/leed>

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Anexos

A) Caracterização da envolvente do edifício

Nas Figura A. 1, Figura A. 2, Figura A. 3 e Figura A. 4 são apresentadas as plantas baixas de cada um dos pisos do edifício da ESSLei com a identificação da envolvente (paredes, portas e envidraçados), as quais possuem as características descritas na Tabela A. 1.

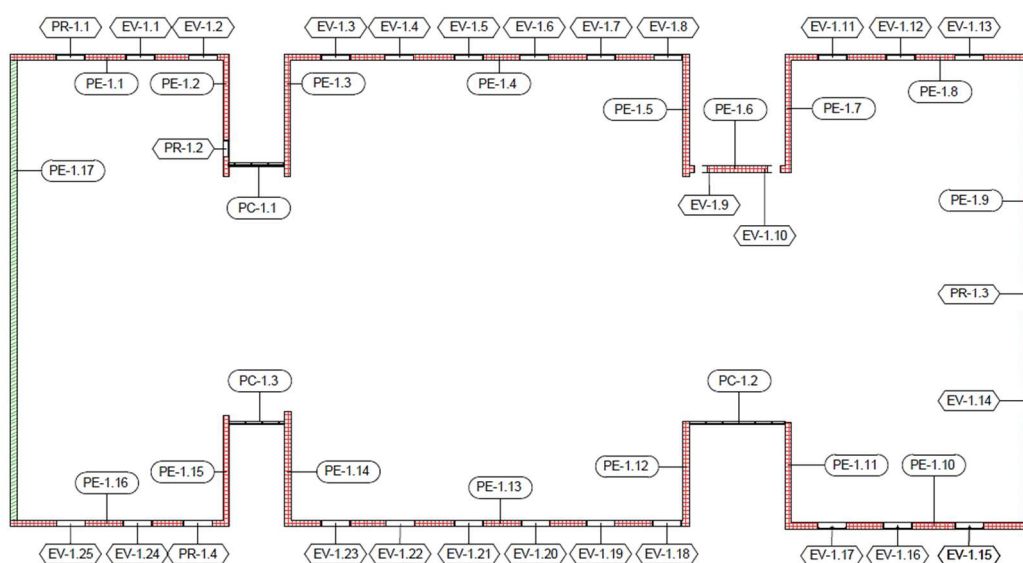


Figura A. 1 - Identificação da envolvente do piso -1

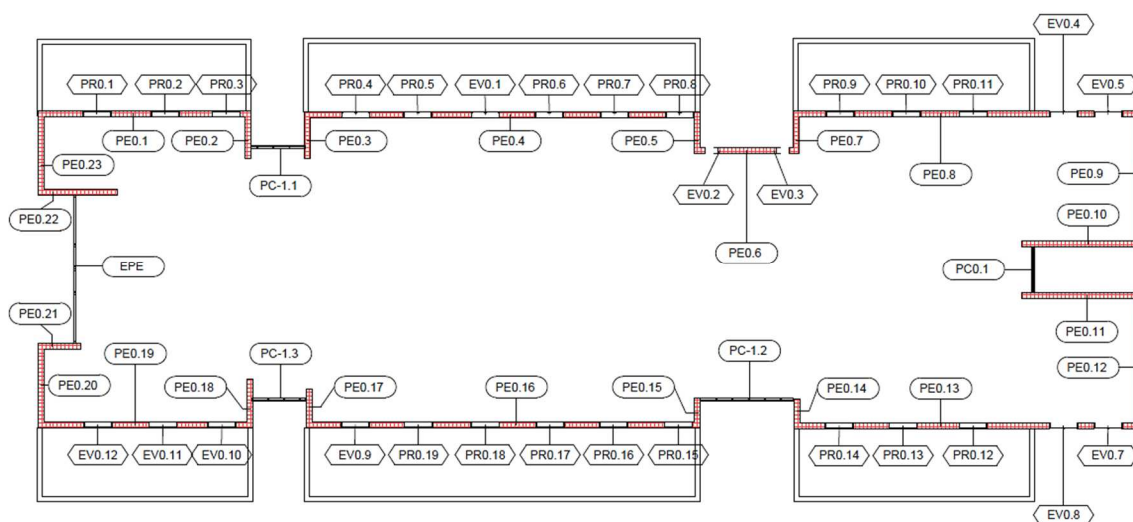


Figura A. 2 - Identificação da envolvente do piso 0

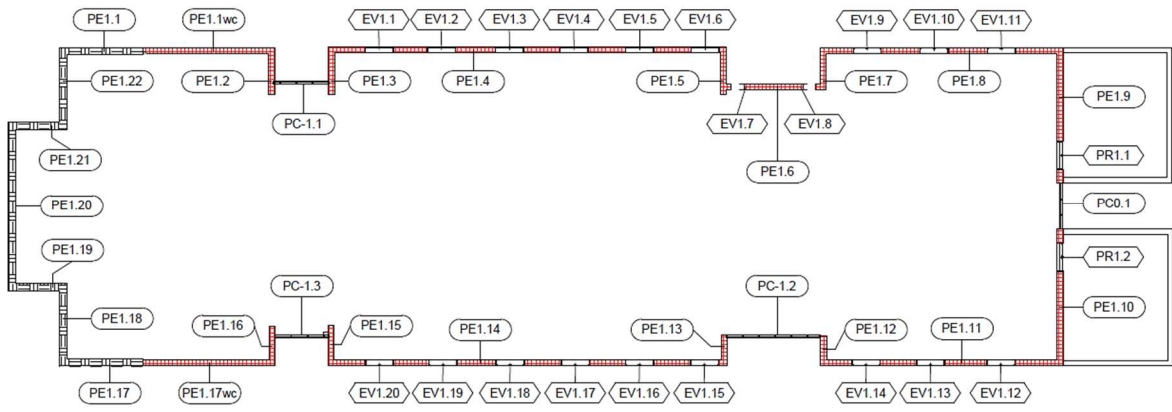


Figura A. 3 - Identificação da envolvente do piso 1

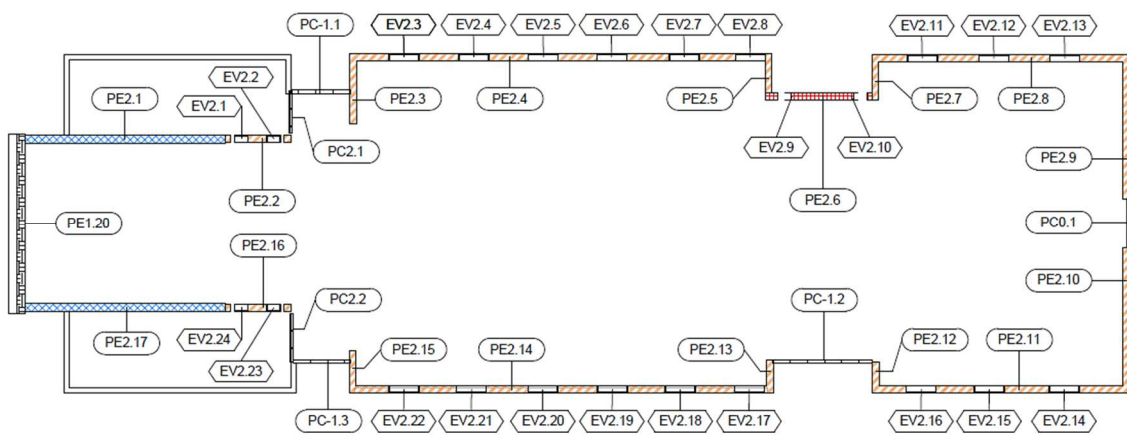


Figura A. 4 - Identificação da envolvente do piso 2

Legenda:

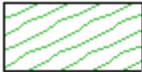

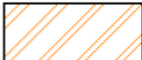


-  Parede enterrada
-  Parede exterior tipo 1
-  Parede exterior tipo 2
-  Parede exterior tipo 3
-  Parede exterior tipo 4

Tabela A. 1 – Caracterização da envolvente do edifício da ESSLei (adaptado de INESC Coimbra, 2009)

Piso	Orientação	Envolvente Opaca		Envolvente Envidraçada		
		Código	Tipo	Código	Tipo	Área [m ²]
-1	NE	PE-1.1	Parede exterior tipo 1	PR-1.1	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV-1.1	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV-1.2	Envidraçado tipo 1	3,5
	SE	PE-1.2	Parede exterior tipo 1	PR-1.2	Envidraçado tipo 2	2,1
	NE			PC-1.1	Envidraçado tipo 4 com porta envidraçada do tipo 1	-
	NW	PE-1.3	Parede exterior tipo 1			
	NE	PE-1.4	Parede exterior tipo 1	EV-1.3	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV-1.4	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV-1.5	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV-1.6	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV-1.7	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV-1.8	Envidraçado tipo 1	3,5
	SE	PE-1.5	Parede exterior tipo 1			
	NE	PE-1.6	Parede exterior tipo 1	EV-1.9	Envidraçado tipo 2	0,64
				EV-1.10	Envidraçado tipo 2	0,64
	NW	PE-1.7	Parede exterior tipo 1			
	NE	PE-1.8	Parede exterior tipo 1	EV-1.11	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV-1.12	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV-1.13	Envidraçado tipo 1	3,5
	SE	PE-1.9	Parede exterior tipo 1	PR-1.3	Envidraçado tipo 2	4,75
EV-1.14				Envidraçado tipo 1	3,5	
SW	PE-1.10	Parede exterior tipo 1	EV-1.15	Envidraçado tipo 1	3,5	
			EV-1.16	Envidraçado tipo 1	3,5	
			EV-1.17	Envidraçado tipo 1	3,5	
NW	PE-1.11	Parede exterior tipo 1				
SW			PC-1.2	Envidraçado tipo 4 com porta envidraçada do tipo 1	-	
SE	PE-1.12	Parede exterior tipo 1				

Piso	Orientação	Envolvente Opaca		Envolvente Envidraçada		
		Código	Tipo	Código	Tipo	Área [m²]
-1	SW	PE-1.13	Parede exterior tipo 1	EV-1.18	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV-1.19	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV-1.20	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV-1.21	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV-1.22	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV-1.23	Envidraçado tipo 1	3,5
	NW	PE-1.14	Parede exterior tipo 1			
	SW			PC-1.3	Envidraçado tipo 4 com porta envidraçada do tipo 1	-
	SE	PE-1.15	Parede exterior tipo 1			
	SW	PE-1.16	Parede exterior tipo 1	PR-1.4	Envidraçado tipo 1	3,5
EV-1.24				Envidraçado tipo 1	3,5	
EV-1.25				Envidraçado tipo 1	3,5	
NW	PE-1.17	Parede enterrada				
0	NE	PE0.1	Parede exterior tipo 1	PR0.1	Envidraçado tipo 1	3,5
				PR0.2	Envidraçado tipo 1	3,5
				PR0.3	Envidraçado tipo 1	3,5
	SE	PE0.2	Parede exterior tipo 1			
	NE			PC-1.1	Envidraçado tipo 4	-
	NW	PE0.3	Parede exterior tipo 1			
	NE	PE0.4	Parede exterior tipo 1	PR0.4	Envidraçado tipo 1	3,5
				PR0.5	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV0.1	Envidraçado tipo 1	3,5
				PR0.6	Envidraçado tipo 1	3,5
				PR0.7	Envidraçado tipo 1	3,5
				PR0.8	Envidraçado tipo 1	3,5
	SE	PE0.5	Parede exterior tipo 1			
	NE	PE0.6	Parede exterior tipo 1	EV0.2	Envidraçado tipo 2	0,64
				EV0.3	Envidraçado tipo 2	0,64
	NW	PE0.7	Parede exterior tipo 1			
NE	PE0.8	Parede exterior tipo 1	PR0.9	Envidraçado tipo 1	3,5	
			PR0.10	Envidraçado tipo 1	3,5	
			PR0.11	Envidraçado tipo 1	3,5	
			EV0.4	Envidraçado tipo 1	3,5	
			EV0.5	Envidraçado tipo 1	3,5	
SE	PE0.9	Parede exterior tipo 1				
SW	PE0.10	Parede exterior tipo 1				

Piso	Orientação	Envolvente Opaca		Envolvente Envidraçada		
		Código	Tipo	Código	Tipo	Área [m²]
0	SE			PC0.1	Envidraçado tipo 4	-
	NE	PE0.11	Parede exterior tipo 1			
	SE	PE0.12	Parede exterior tipo 1			
	SW	PE0.13	Parede exterior tipo 1	EV0.7	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV0.8	Envidraçado tipo 1	3,5
				PR0.12	Envidraçado tipo 1	3,5
				PR0.13	Envidraçado tipo 1	3,5
	SW	PE0.13	Parede exterior tipo 1	PR0.14	Envidraçado tipo 1	3,5
	NW	PE0.14	Parede exterior tipo 1			
	SW			PC-1.2	Envidraçado tipo 4	-
	SE	PE0.15	Parede exterior tipo 1			
	SW	PE0.16	Parede exterior tipo 1	PR0.15	Envidraçado tipo 1	3,5
				PR0.16	Envidraçado tipo 1	3,5
				PR0.17	Envidraçado tipo 1	3,5
				PR0.18	Envidraçado tipo 1	3,5
				PR0.19	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV0.9	Envidraçado tipo 1	3,5
	NW	PE0.17	Parede exterior tipo 1			
	SW			PC-1.3	Envidraçado tipo 4	-
	SE	PE0.18	Parede exterior tipo 1			
	SW	PE0.19	Parede exterior tipo 1	EV0.10	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV0.11	Envidraçado tipo 1	3,5
EV0.12				Envidraçado tipo 1	3,5	
NW	PE0.20	Parede exterior tipo 1				
NE	PE0.21	Parede exterior tipo 1				
NW			EPE	Envidraçado fixo tipo 3	9,96	
				Porta com envidraçado tipo 2	5,98	
				Porta com envidraçado tipo 2	5,98	
				Envidraçado fixo tipo 3	9,96	
SW	PE0.22	Parede exterior tipo 1				
NW	PE0.23	Parede exterior tipo 1				
1	NE	PE1.1	Parede exterior tipo 3			
	NE	PE1.1wc	Parede exterior tipo 1			

Piso	Orientação	Envolvente Opaca		Envolvente Envidraçada		
		Código	Tipo	Código	Tipo	Área [m²]
1	SE	PE1.2	Parede exterior tipo 1			
	NE			PC-1.1	Envidraçado tipo 4	-
	NW	PE1.3	Parede exterior tipo 1			
	NE	PE1.4	Parede exterior tipo 1	EV1.1	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV1.2	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV1.3	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV1.4	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV1.5	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV1.6	Envidraçado tipo 1	3,5
	SE	PE1.5	Parede exterior tipo 1			
	NE	PE1.6	Parede exterior tipo 1	EV1.7	Envidraçado tipo 2	0,64
				EV1.8	Envidraçado tipo 2	0,64
	NW	PE1.7	Parede exterior tipo 1			
	NE	PE1.8	Parede exterior tipo 1	EV1.9	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV1.10	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV1.11	Envidraçado tipo 1	3,5
	SE	PE1.9	Parede exterior tipo 1	PR1.1	Envidraçado tipo 1	3,5
	SE			PC0.1	Envidraçado tipo 4	-
	SE	PE1.10	Parede exterior tipo 1	PR1.2	Envidraçado tipo 1	3,5
	SW	PE1.11	Parede exterior tipo 1	EV1.12	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV1.13	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV1.14	Envidraçado tipo 1	3,5
	NW	PE1.12	Parede exterior tipo 1			
	SW			PC-1.2	Envidraçado tipo 4	-
SE	PE1.13	Parede exterior tipo 1				
SW	PE1.14	Parede exterior tipo 1	EV1.15	Envidraçado tipo 1	3,5	
			EV1.16	Envidraçado tipo 1	3,5	
			EV1.17	Envidraçado tipo 1	3,5	
			EV1.18	Envidraçado tipo 1	3,5	
			EV1.19	Envidraçado tipo 1	3,5	
			EV1.20	Envidraçado tipo 1	3,5	
NW	PE1.15	Parede exterior tipo 1				
SW			PC-1.3	Envidraçado tipo 4	-	
SE	PE1.16	Parede exterior tipo 1				
SW	PE1.17wc	Parede exterior tipo 1				

Piso	Orientação	Envolvente Opaca		Envolvente Envidraçada		
		Código	Tipo	Código	Tipo	Área [m²]
1	SW	PE1.17	Parede exterior tipo 3			
	NW	PE1.18	Parede exterior tipo 3			
	SW	PE1.19	Parede exterior tipo 3			
	NW	PE1.20	Parede exterior tipo 3			
	NE	PE1.21	Parede exterior tipo 3			
	NW	PE1.22	Parede exterior tipo 3			
2	NE	PE2.1	Parede exterior tipo 4			
	NE	PE2.2	Parede exterior tipo 2	EV2.1	Envidraçado tipo 1	0,64
				EV2.2	Envidraçado tipo 1	0,64
	NW			PC2.1	Envidraçado tipo 4	-
	NE			PC-1.1	Envidraçado tipo 4	-
	NW	PE2.3	Parede exterior tipo 2			
	NE	PE2.4	Parede exterior tipo 2	EV2.3	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV2.4	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV2.5	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV2.6	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV2.7	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV2.8	Envidraçado tipo 1	3,5
	SE	PE2.5	Parede exterior tipo 2			
	NE	PE2.6	Parede exterior tipo 1	EV2.9	Envidraçado tipo 2	0,64
				EV2.10	Envidraçado tipo 2	0,64
	NW	PE2.7	Parede exterior tipo 2			
	NE	PE2.8	Parede exterior tipo 2	EV2.11	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV2.12	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV2.13	Envidraçado tipo 1	3,5
	SE	PE2.9	Parede exterior tipo 2			
SE			PC0.1	Envidraçado tipo 4	-	
SE	PE2.10	Parede exterior tipo 2				
SW	PE2.11	Parede exterior tipo 2	EV2.14	Envidraçado tipo 1	3,5	
			EV2.15	Envidraçado tipo 1	3,5	
			EV2.16	Envidraçado tipo 1	3,5	
NW	PE2.12	Parede exterior tipo 2				
SW			PC-1.2	Envidraçado tipo 4	-	
SE	PE2.13	Parede exterior tipo 2				

Piso	Orientação	Envolvente Opaca		Envolvente Envidraçada		
		Código	Tipo	Código	Tipo	Área [m²]
2	SW	PE2.14	Parede exterior tipo 2	EV2.17	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV2.18	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV2.19	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV2.20	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV2.21	Envidraçado tipo 1	3,5
				EV2.22	Envidraçado tipo 1	3,5
	NW	PE2.15	Parede exterior tipo 2			
	SW			PC-1.3	Envidraçado tipo 4	-
	NW			PC2.2	Envidraçado tipo 4	-
	SW	PE2.16	Parede exterior tipo 2	EV2.23	Envidraçado tipo 1	0,64
				EV2.24	Envidraçado tipo 1	0,64
SW	PE2.17	Parede exterior tipo 4				
NW	PE1.20	Parede exterior tipo 3				

Legenda:

PE – Parede exterior

PR – Porta

EV – Envidraçado

PC – Parede cortina

EPE – Envidraçado porta de entrada

B) Plantas das zonas térmicas

A Figura B. 1, Figura B. 2, Figura B. 3, Figura B. 4 e Figura B. 5 apresentam a divisão do edifício em zonas térmicas.

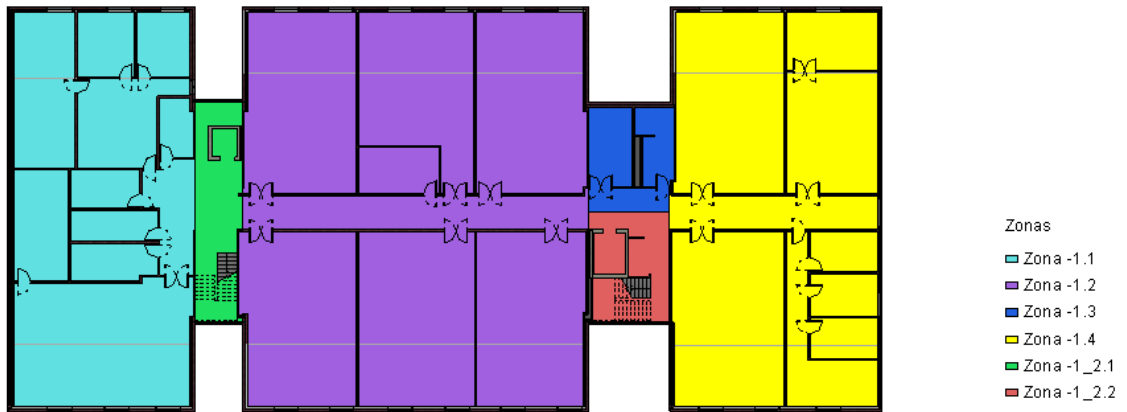


Figura B. 1 – Zonas térmicas do piso -1

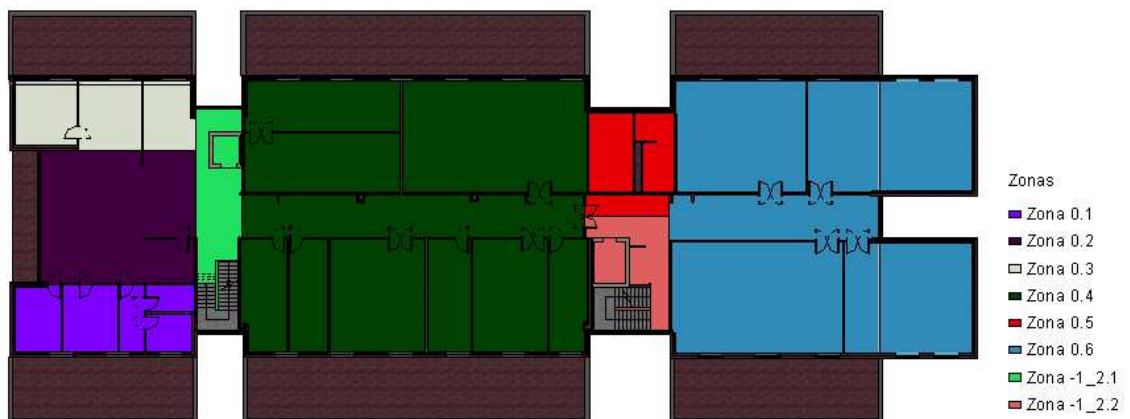


Figura B. 2 – Zonas térmicas do piso 0

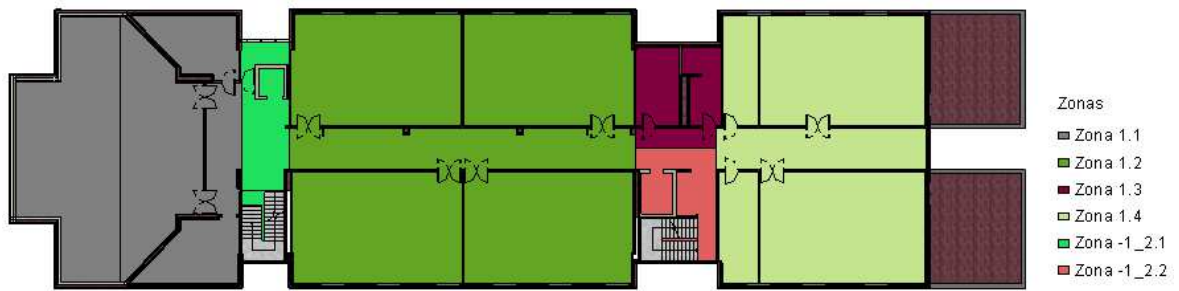


Figura B. 3 – Zonas térmicas do piso 1

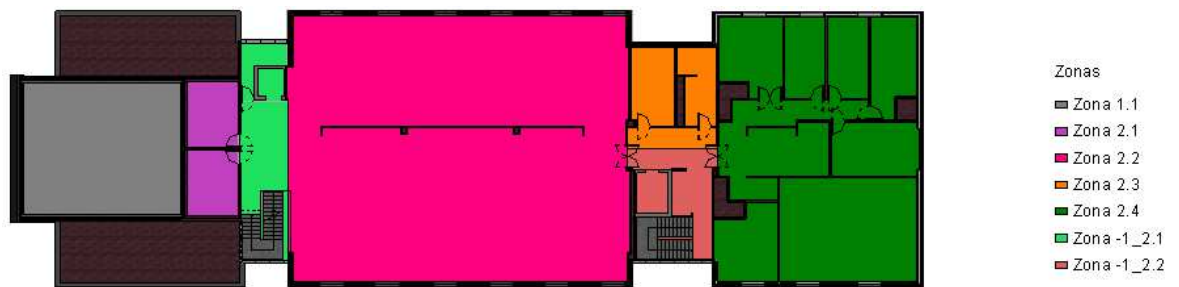


Figura B. 4 – Zonas térmicas do piso 2

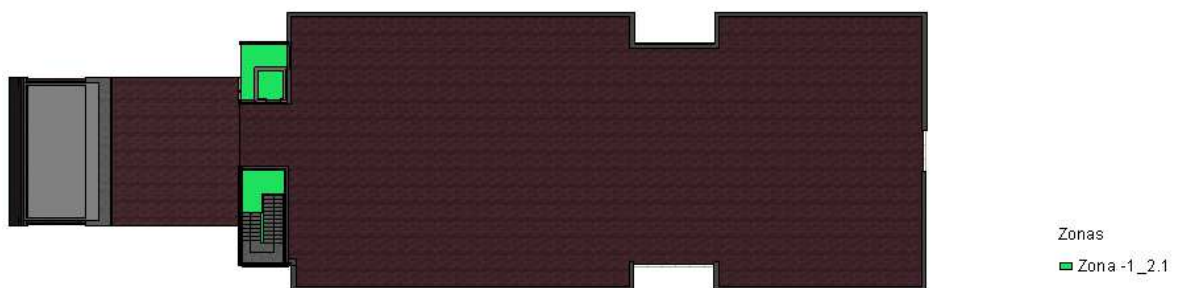


Figura B. 5 – Zonas térmicas da cobertura

Esta página foi intencionalmente deixada em branco