

Elisa Rosendo de Carvalho e Silva

O conforto térmico adaptativo
Adequar as soluções construtivas ao lugar

Setembro 2015



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Aos meus pais e irmãs,
aos avós,
à Rosária e ao Carlos.

Ao Professor Doutor Adélio Gaspar e ao Professor Doutor Paulo Mendonça,
Ao Doutor Eugénio Rodrigues
a todas as pessoas que se cruzaram comigo na conclusão desta tarefa.

Aos meus amigos, professores e colegas de curso,
e ao Pedro.

Resumo

Este trabalho visa analisar o conforto térmico de um alojamento habitacional com duas soluções construtivas e avaliar o seu desempenho para as áreas de Évora, Bragança e Porto. A avaliação do conforto térmico é abordada através do modelo adaptativo, que permite a intervenção dos ocupantes na procura das condições de conforto térmico interior. Este trabalho divide-se em três partes: primeiro é feito um enquadramento teórico do tema, depois é apresentado o caso de estudo e a metodologia, e por último são expostos e analisados os resultados.

Concluiu-se que uma só solução construtiva não consegue responder às necessidades de conforto térmico de todas as áreas climáticas. A solução de aço leve (LSF) foi apenas considerada satisfatória para uma zona com um clima severo no Verão, a solução convencional é adequada para uma zona de clima moderado, mas compreende-se a exigência de uma zona com um Inverno extremo, pelo que se considera que nenhuma das soluções é viável.

Palavras-Chave: Conforto térmico, modelo adaptativo, EnergyPlus, EN-15251

Resume

This work aims to analyse the thermal comfort of a dwelling with two constructive solutions and evaluate their performance in the areas of Évora, Bragança and Porto. The evaluation of the thermal comfort is made through the adaptive model, which allows the intervention of the occupants in search for inner thermal comfort conditions. This work is divided into three parts: first is made a theoretical framework of the theme, then it is presented the case study and the methodology, and finally the results are displayed and analysed.

It was concluded that only one constructive solution cannot meet the thermal comfort requirements in all climate areas. The Light Steel Framing (LSF) solution was only considered adequate in severe summer climate zone, the Conventional solution (SC) is suitable for a area with a moderated climate, but it is understandable the demand of an extreme winter climate zone, so none of the solutions were considered reasonable.

Keywords: Thermal comfort, adaptive model, EnergyPlus, EN-15251

Índice

| | |
|----|---------------------------------------|
| 8 | I. Quadros |
| 9 | II. Figuras |
| 10 | III. Abreviações |
| 13 | 1. Introdução |
| 21 | 2. Conforto Térmico Adaptativo |
| 29 | 3. Caso de Estudo |
| 37 | 4. Metodologia |
| 51 | 5. Resultados |
| 59 | 6. Conclusão |
| 61 | Bibliografia |

I. Quadros

| | | |
|----|-----------|--|
| 20 | Quadro 1 | Valores das principais variáveis condicionantes da PPD |
| 22 | Quadro 2 | Categorias dos edifícios sem climatização e respetivos limites de conforto |
| 24 | Quadro 3 | Indicadores para caracterizar o período de desconforto |
| 27 | Quadro 4 | Áreas totais do caso de estudo e áreas mínimas permitidas pelo RGEU |
| 30 | Quadro 5 | Propriedades dos materiais |
| 30 | Quadro 6 | Características das caixa-de-ar |
| 32 | Quadro 7 | Zona climática e correspondentes dados climáticos de referência |
| 39 | Quadro 8 | Soluções Construtivas |
| 45 | Quadro 9 | Variações da temperatura média nas semanas típicas |
| 52 | Quadro 10 | Indicadores diários do período de desconforto para Évora |
| 52 | Quadro 11 | Indicadores diários do período de desconforto para Bragança |
| 53 | Quadro 12 | Indicadores diários do período de desconforto para Porto |

II. Figuras

- 14 Figura 1 Ilustração do conforto térmico
- 17 Figura 2 Perdas e ganhos de calor através de um edifício
- 18 Figura 3 Exemplo de estratégias bioclimáticas para as zonas de clima I1 e V3
- 21 Figura 4 Extensão da zona de conforto em torno da zona neutra para situações com oportunidades adaptativas (a) boa, (b) baixa e (c) inexistente
- 23 Figura 5 Limites de conforto superiores e inferiores para as temperaturas operativas de edifícios sem climatização, em função da temperatura média exterior ponderada
- 26 Figura 6 Diagrama de estudos paramétricos efetuados
- 27 Figura 7 Tipologia de referência usada no caso de estudo
- 28 Figura 8 Representação da SC para as paredes exterior(A) e interior(B)
- 29 Figura 9 Representação da SC para a cobertura
- 29 Figura 10 Representação da LSF para as paredes exterior(A) e interior(B)
- 29 Figura 11 Representação da LSF para a cobertura
- 31 Figura 12 Zonamento Climático para as estações de Inverno e Verão
- 33 Figura 13 Representação gráfica do padrão de ocupação considerada para a unidade de habitação durante um dia da semana e fim-de-semana
- 34 Figura 14 Ambiente de trabalho do EnergyPlus com os parâmetros inseridos
- 35 Figura 15 Diagrama representativo do funcionamento do EnergyPlus
- 36 Figura 16 Simplificação da geometria do modelo para inserção no EnergyPlus
- 37 Figura 17 EnergyPlus: *Zone*
- 38 Figura 18 EnergyPlus: *BuildingSurface:Detailed*
- 38 Figura 19 Visualização tridimensional, em Sketchup, do objeto modelado no EnergyPlus
- 39 Figura 20 EnergyPlus: *Material*
- 40 Figura 21 Visualização tridimensional com diferenciação dos elementos e conforme as soluções construtivas
- 40 Figura 22 EnergyPlus: *ScheduleCompact*
- 42 Figura 23 EnergyPlus: *SimulationControl e RunPeriod*
- 42 Figura 24 EnergyPlus: *Output:Variable*

- 43 Figura 25 EP-Launch: Simulação
- 44 Figura 26 Folha de cálculo: T_{RM}^n
- 44 Figura 27 Folha de cálculo: T_c
- 45 Figura 28 Folha de cálculo: Limites de conforto para Nível II
- 46 Figura 29 Folha de cálculo: Horas de desconforto (%)
- 48 Figura 30 Limites das temperaturas de conforto para Évora, Bragança e Porto
- 50 Figura 31 Temperatura interior do Quarto 3, Évora
- 50 Figura 32 Temperatura interior do Quarto 3, Bragança
- 50 Figura 33 Temperatura interior do Quarto 3, Porto
- 50 Figura 34 Temperatura interior do Sala, Évora
- 51 Figura 35 Temperatura interior do Sala, Bragança
- 51 Figura 36 Temperatura interior do Sala, Porto

III. Abreviações

ASHRAE - *American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers*

CEN - *European Committee for Standardization*

EPBD - *Energy Performance of Buildings Directive*

EPS – Poliestireno expandido

FDS – Fim de Semana

I - Inverno

ICF – *Insulating Concrete Form*

ISO - *International Organization for Standardization*

LSF – *Light Steel Framing*

ONU - Organização das Nações Unidas

PMV – *Predicted Mean Vote*

PPD – *Predicted Percentage of Dissatisfied*

IWEC - *ASHRAE International Weather for Energy Calculations*

RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

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

REH - Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

RSECE - Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

RGEU – Regulamento Geral das Edificações Urbanas

SC – Solução Convencional

SCATs - *Smart Controls and Thermal Comfort*

SEM – Semana

TSW - *Typical Summer Week*

TWW - *Typical Winter Week*

V – Verão

XPS – Poliestireno extrudido

A dissertação que aqui se apresenta surge no contexto do curso de Mestrado em Energia para a Sustentabilidade na Universidade de Coimbra e centra-se na simulação do conforto térmico adaptativo de um alojamento habitacional com duas soluções construtivas diferentes para três áreas climáticas distintas.

Este tema foi proposto pelo Professor Orientador Adélio Gaspar, proposta que acolhi de bom agrado por várias razões. Primeiro, uma vez que me encontrava a fazer autoformação sobre o modelo adaptativo quando esta investigação me foi sugerida. Segunda, porque, embora não esteja diretamente relacionada, vem na sequência do trabalho em investigação desenvolvido na TecMinho durante os meses de Outubro a Dezembro de 2014 para o projeto “InoblockHouse – Sistema construtivo com blocos de cofragem perdida para habitações unifamiliares e modulares”. O trabalho que aí desenvolvi consistiu em estudar o desempenho energético da solução construtiva em questão e em comparar este com o desempenho de outras soluções construtivas para uma habitação tipo previamente estipulada. Aqui tive a oportunidade de utilizar a aplicação do EnergyPlus lecionada na disciplina de “Simulação de Energia em Edifícios” no ano letivo anterior. Terceiro porque, paralelamente a esta experiência profissional, constatei dificuldades na aplicação do modelo adaptativo no cálculo do conforto térmico, ao me ser proposto pelo Professor Co-orientador Paulo Mendonça um trabalho de investigação com a aplicação deste modelo, pelo que um trabalho com este tema seria um bom exercício formativo.

I.1 Objectivo

Os modelos de conforto adaptativo são especificamente pensados para situações onde as pessoas se adaptem ao ambiente, seja através do ajuste do vestuário ou promoção da ventilação natural, contribuindo, assim, para um maior período de conforto térmico, o que possibilita o dimensionamento de equipamentos de aquecimento/arrefecimento com menor potência, originando menores consumos[25], Até como Mies Van der Rohe defendia o “menos é mais” na

arquitetura, também a sustentabilidade procura atingir um nível de conforto interior adequado, reduzindo ao máximo a necessidade de utilização de sistemas de ventilação ou aquecimento artificiais, otimizando os recursos naturais ou sistemas de edificação, de modo a minimizar o impacto ambiental dos edifícios sobre o meio ambiente e os seus habitantes.

Portanto, considerei extremamente útil e pertinente o desafio de desenvolver/aprofundar esta investigação que associa simultaneamente a teoria à prática e com isto poder elaborar um manual de utilização deste modelo a um problema específico. Ou seja, estudar a influência das soluções construtivas convencional (SC), estrutura em aço leve (LSF) no conforto térmico em três áreas climáticas de Portugal distintas como Évora, Bragança e Porto.

Assim, este trabalho, resultando da curiosidade teórica mas também de uma necessidade profissional, visa primeiro descrever o conceito de conforto térmico e o modelo adaptativo para avaliação deste, segundo aplicar esse modelo à análise do desempenho energético de um alojamento de edifício residencial representativo do Portugal e terceiro sugerir a melhor solução construtiva em função da especificidade climática das localizações.

1.2 Metodologia

Por isto, este trabalho será desenvolvido ao longo de quatro capítulos, sendo que se considera imprescindível começar, no primeiro capítulo, por apresentar uma abordagem ao conforto térmico adaptativo e as principais normas existentes sobre esta temática, só depois, no segundo capítulo, é apresentado o objecto de estudo e as variáveis a simular. Aqui, também são descritas e justificadas algumas considerações necessárias para os dados de entrada na aplicação EnergyPlus. Com esta opção, evita-se sobrecarregar o terceiro capítulo, em que se descreve a simulação do modelo parametrizado no EnergyPlus e o cálculo dos limites de conforto térmico pelo modelo adaptativo. O quarto e último capítulo destina-se à apresentação dos resultados obtidos. Por fim, referem-se as principais conclusões e desenvolvimentos futuros, refletidos pela análise dos resultados obtidos. Relativamente à metodologia utilizada, optou-se por aliar a pesquisa e análise documental à modelação na aplicação e a redação do trabalho quase

simultaneamente.

1.3 Enquadramento

No entanto, a inteligibilidade deste trabalho pressupõe uma revisão conceptual e clara dos conceitos fundamentais relacionados com o tema a abordar.

O relatório Brundtland, elaborado pela ONU (Organização das Nações Unidas) em 1987, define que o desenvolvimento sustentável deve “satisfazer as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das futuras gerações de suprir as suas próprias necessidades”[28]. Pode-se começar por considerar que o estilo de vida da sociedade atual não tem sustentabilidade futura, ou seja, que as consequências da progressiva crise económica, social e ambiental são um dado adquirido e que, por isso, é necessário uma mudança de cultura, hábitos e práticas.

Além disso, o sector dos edificios sempre representou grande parte do consumo energético total, sendo a eletricidade a principal fonte de energia, e consequentes emissões de CO₂[15], pelo que se torna essencial procurar atenuar estes impactos.

Na arquitetura estes factos podem ser prevenidos, por exemplo, através da definição de um sistema construtivo que promova alterações conscientes na sua envolvente de forma a atender às necessidades da edificação, habitação e uso do homem moderno, preservando o meio ambiente e os recursos naturais e contribuindo para uma qualidade de vida das gerações atuais e futuras. Ou seja, pode-se melhorar a qualidade de vida ao harmonizar-se o clima, a tradição, a cultura e o ambiente na região, com a conservação da energia e recursos, a reciclagem de materiais e ao reduzir as substâncias perigosas dentro da capacidade dos ecossistemas locais e globais, ao longo do ciclo de vida de um edificio. Este modo de pensar pressupõe um nível de conforto interior adequado com o conhecimento das condições climáticas, hidrográficas e dos ecossistemas da envolvente em que os edificios são construídos; uma redução do consumo energético do edificio; optimização dos recursos naturais; a eficácia e moderação no uso de materiais de construção; e a optimização dos modos de concepção, construção, utilização, renovação e demolição dos edificios.

A qualidade do ambiente interior pode ser definida como a harmonia do conforto térmico, visual, acústico e qualidade do ar. O conforto térmico é considerado como

“o estado da mente que expressa a satisfação do homem com o ambiente térmico que o circunda”[5], uma definição fácil de compreender, mas difícil de converter em parâmetros físicos. A complexidade de avaliar o conforto térmico é ilustrada pela Figura 1, que nos mostra como pessoas em ambientes completamente diferentes parecem estar igualmente confortáveis, termicamente.



Figura 1: Ilustração do conforto térmico[16]

Isto remete-nos para a quantidade de factores que podem implicar o conforto térmico para além da temperatura do ar, e que podem ser quantificados de natureza ambiental como a velocidade do ar e humidade relativa; e/ou de factores subjetivos e pessoais como a atividade metabólica e o vestuário. Uma pessoa considera o ambiente confortável se nenhum tipo de desconforto térmico estiver presente, ou seja, se a pessoa não se sentir nem muito quente nem com muito frio, pelo que esta condição varia de pessoa para pessoa. O objectivo do conforto térmico é proporcionar condições exteriores de maneira a reduzir ao mínimo a necessidade do corpo utilizar os seus mecanismos de regulação térmica.

Existem duas condições necessárias para se atingir o conforto térmico: uma, é quando a combinação da temperatura da pele com a do corpo gera uma sensação de neutralidade térmica; a outra condição é o balanço térmico das trocas de calor entre o corpo humano e o meio que o rodeia, ou seja, que o calor produzido pela atividade metabólica seja igual ao calor libertado pelo corpo. A energia produzida no interior do corpo depende do tipo de atividade realizada (met), e o vestuário influencia as trocas de calor entre o corpo e o meio ambiente, pelo que tem um classificação segundo o seu nível de isolamento (clo).

Quando se calcula o ambiente térmico interior, é preciso ter em conta que a pessoa

não sente a temperatura da sala, apenas a energia que é libertada do corpo. Por isso, para além da atividade metabólica e do vestuário, devem ser tidos em conta a Temperatura do ar, a Temperatura média radiante, a Velocidade do ar e a Humidade, sendo que a Temperatura Operativa é a média entre a Temperatura do Ar e a Temperatura Média Radiante.

Assim, o cálculo do conforto térmico interior procura estimar e prever as melhores condições de conforto para os ocupantes, que corresponde à temperatura a que uma pessoa se sente termicamente confortável. Este cálculo possa ser diferentes abordagens: analítica e adaptativa. A abordagem analítica ou racional parte do pressuposto que, pelo facto dos indivíduos serem biologicamente idênticos, têm idênticas preferências térmicas. Este pensamento considera que as preferências térmicas podem ser padronizadas em ambientes interiores controlados que garantam condições de conforto constantes [1]. A metodologia denominada adaptativa ou empírica, baseia-se na aproximação comportamental fundamentada pela premissa de que as pessoas são agentes ativos face às condições térmicas oferecidas pelos edifícios que ocupam, promovendo ações de alteração do vestuário, postura, atividade física, manipulação das janelas e dos dispositivos de sombreamento, controlar equipamentos de climatização ou mudar de local dentro do edifício, que visam atingir as condições que cada um considera adequadas para obterem uma sensação térmica de conforto[21].

1.4 Estado da Arte

Na realidade, o homem sempre se esforçou para criar ambientes termicamente confortáveis, sendo que o conforto térmico é um dos parâmetros mais importantes a ser considerado na concepção dos edifícios. As normas sobre o conforto térmico são uma ferramenta essencial para obter o ambiente interior dos edifícios termicamente confortável para os seus ocupantes. Inicialmente estas normas definiam as condições de conforto térmico, mas agora são mais exigentes e promovem também a melhoria do desempenho energético.

A preocupação e prevenção no consumo de energia começou com a primeira crise do petróleo nos anos 70. Isto e a necessidade de melhores condições de higiene e conforto nos edifícios levaram ao aumento de estratégias de dinamização e

melhoria das condições naturais para otimização das condições térmicas. Assim, em 1990, surge o RCCTE[22] (Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios) que estabelece requisitos mínimos de qualidade térmica para os novos edifícios de habitação. Em 2006, o decreto-lei n.º 80/06[22] dá seguimento à Diretiva 2002/91/CE *Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD), que, entre outros requisitos, obriga os estados membros da União Europeia ao estabelecimento e atualização periódica dos regulamentos para melhorar o comportamento térmico dos edifícios. A 19 de Maio de 2010 foi publicada a Diretiva 2010/31/EU, que propôs a melhoria do desempenho energético nos edifícios e originou uma revisão da legislação nacional. Foi assim que o REH[23] veio a substituir o RCCTE em 2013.

1.5 Motivação

De facto, a energia utilizada para aquecimento, arrefecimento e iluminação dos edifícios, provém de uma fonte de energia, que é gasta de alguma forma. O conceito de eficiência energética é o uso racional destas fontes de energia e consiste em adoptar sistemas para otimizar o seu uso na redução no consumo de energia e climatização do ambiente. É por isto tudo que é necessário estudar a redução da necessidade de utilização de sistemas de ventilação, arrefecimento ou aquecimento artificiais e optimizar os recursos naturais e sistemas de edificação de modo atingir um nível de conforto interior adequado e minimizar o impacto ambiental dos edifícios sobre o meio ambiente e os seus habitantes.

Em suma, cada pessoa liberta uma determinada quantidade de calor, dependendo da sua atividade metabólica. Os sistemas de iluminação libertam calor cuja intensidade depende da sua eficiência. Parte da energia consumida pelas lâmpadas é libertada sob a forma de calor. Tal como representado na Figura 2, todos os equipamentos que consomem energia também libertam uma certa quantidade de calor e as variáveis climáticas também influenciam os edifícios em termos de transferência de calor.

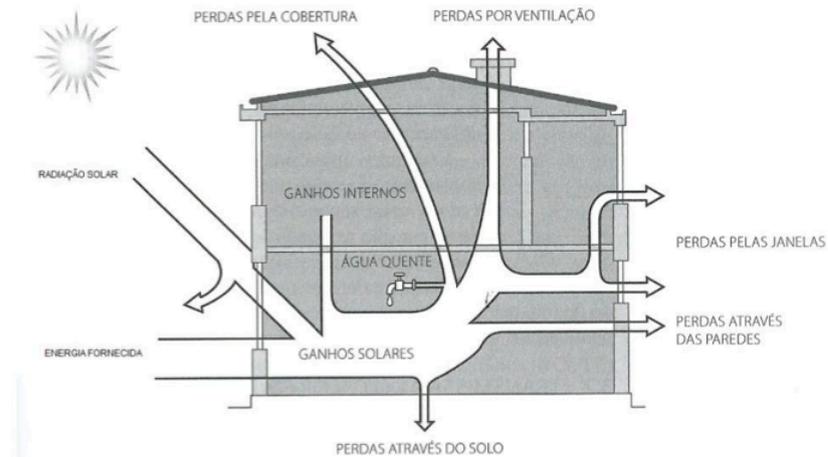


Figura 2: Perdas e ganhos de calor através de um edifício

Aqui, as estratégias bioclimáticas podem ser tidas em conta com o propósito de aumentar o período de conforto térmico, diminuir as necessidades de aquecimento e arrefecimento e assim contribuir com uma redução no uso da energia, ao tirar partido dos recursos naturais renováveis como o sol e o vento, e não renováveis como a água o solo, as árvores e o petróleo, minimizando os impactos ambientais. Na Figura 3 são apresentados exemplos de estratégias bioclimáticas para locais com um clima de Inverno ligeiro e um Verão exigente. Estas soluções podem-se resumir em restringir a condução e promover os ganhos solares no Inverno, ou a promover a ventilação noturna, restringir a condução e os ganhos solares no Verão, através de sombreamentos eficazes sobre os envidraçados.

| Estação | Estratégias Bioclimáticas | Sistemas Passivos |
|--|--|--|
| Inverno – Estação de Aquecimento | Promover Ganhos Solares. | Todos os sistemas de ganho são adequados para os tipos de edifícios mais convenientes  |
| | Restringir Perdas por Condução | Isolar Envolvente  |
| | Promover Inércia Forte | Paredes pesadas com isolamento pelo exterior  |
| Verão – Estação de Aquecimento | Restringir Ganhos Solares | Sombrear Envidraçados  |
| | Restringir Ganhos por Condução | Isolar Envolvente  |
| | Arrefecimento Evaporativo | Espelhos de água; fontes interiores com circulação de ar a velocidades muito baixas. O ar arrefecido é estratificado devendo o ar mais quente ser extraído por convecção natural  |
| | Ventilação | Promover a ventilação nocturna  |
| | Promover Inércia Forte | Tubos Enterrados de preferência associados a zonas húmidas  |
| | Paredes pesadas com isolamento pelo exterior  | |

Figura 3: Exemplo de estratégias bioclimáticas para as zonas de clima I1 e V3[13]

No entanto, estas estratégias devem ser adaptadas ao local em questão, assim como os sistemas construtivos e respetivos materiais, já que a construção do edifício tem influência pelas trocas de calor com o ambiente exterior, como é o exemplo dos envidraçados, que permitem a entrada de radiação solar no edifício. Exatamente por influenciarem o conforto térmico, a escolha dos materiais que compõem os elementos construtivos é uma deve ser tidos em conta na projeção de um edifício.

Daí que, julga-se poder vir, com o resultado deste trabalho, contribuir para uma reflexão sobre o consumo energético e a sua otimização em função das soluções construtivas. Pensa-se também, assim, poder vir a possibilitar uma linha de ação na direção da sustentabilidade do edificado que visa diminuir a pegada ecológica. Este também é um trabalho com o qual me identifico, tanto na minha personalidade como na minha forma de estar no mundo marcada pela constante procura de aprender, otimizar e pela preocupação de organização dessa informação para que os outros também possam tirar proveito dela. Por isto, o trabalho aqui apresentado pretende, em síntese, analisar uma realidade concreta à luz do modelo adaptativo, de tal modo que possa ser usado como um manual de aplicação deste modelo noutros projetos.

Conforto Térmico Adaptativo

Ao longo do tempo foram realizados vários estudos com diferentes abordagens mas o mesmo objectivo: sintetizar, num único parâmetro, os diversos factores condicionantes os diversos índices de conforto que possam prever e garantir estas condições de conforto térmico para os ocupantes.

Enquanto a abordagem analítica recorre a espaços climatizados, nas quais são ajustados diversos factores ambientais (temperatura, velocidade do ar, temperatura das superfícies e humidade) procedendo ao registo das sensações térmicas experienciadas pelos indivíduos quando sujeitos a ambientes interiores com diferentes combinações destas variáveis; a abordagem adaptativa baseia-se na definição de critérios de conforto definidos através de pesquisas de campo, em que as variáveis ambientais são medidas diretamente nos ambientes reais e se procede à recolha das sensações térmicas dos utilizadores dos espaços analisados.

Mais especificamente, o modelo adaptativo surge de uma teoria que considera que o ambiente óptimo não é constante, mas que deve providenciar uma variação óptima a uma frequência óptima. Como Pedro Silva explica, “a estabilidade aparente de um organismo apenas existe porque esta é modificável, ou seja, a ligeira instabilidade é a condição necessária para a verdadeira estabilidade do organismo”[25]. Por isto, os edifícios devem ser capazes de oferecer diferentes tipos de condições térmicas aceitáveis. Ou seja, no princípio adaptativo, numa mudança de ambiente tal que provoque desconforto, as pessoas tendem a restaurá-lo, o que lhe confere uma função de possibilidades de mudança bem como de alcance de temperatura[25].

Estas variáveis, que apresentam uma margem de controlo por parte dos utilizadores do edifício, proporcionando o que é conhecido como “oportunidade adaptativa”, são designadas por “erros adaptativos”, e responsáveis pelas principais discrepâncias entre os resultados apresentados por métodos analíticos e pelas metodologias adaptativas. Toma-se como exemplo a seguinte situação experienciada por Baker e Standeven[4], onde se apresentam os valores dos

principais parâmetros para a determinação da percentagem previsível de insatisfeitos (PPD) para as duas abordagens, em edifício em regime de funcionamento livre[6], sendo uma a situação base e a outra resultado de alterações efectuadas na situação anterior por meio da oportunidades adaptativas.

Quadro 1: Valores das principais variáveis condicionantes da PPD[6]

| | Situação base | Situação adaptativa |
|---|----------------------|----------------------------|
| Temperatura do compartimento, ar (°C) | 30,5 | 29,5 |
| Temperatura do compartimento, radiante (°C) | 30,5 | 29,5 |
| Temperatura localizada, ar (°C) | 30,5 | 28,0 |
| Temperatura localizada, radiante (°C) | 30,5 | 28,0 |
| Velocidade do ar (m/s) | 0,1 | 0,2 |
| Vestuário (clo) | 0,5 | 0,4 |
| Atividade (met) | 1,2 | 1,1 |
| PPD (%) | 68,4 | 17,5 |

O Quadro 1 é elucidativo na influência da existência da oportunidade adaptativa na percentagem previsível de insatisfeitos, passando esta de 68,4% para 17,5%. Por outro lado, tal como é visível na Figura 4, a oportunidade adaptativa/erros adaptativos ainda pode ser verificada para além da zona de conforto, sendo esta tanto maior quanto maior for a liberdade de controlo dos factores condicionantes do conforto térmico nos edifícios. Quando não existe qualquer oportunidade adaptativa na oscilação da temperatura interior fora da zona neutra (entre o limite das temperaturas de conforto) traduz-se em desconforto térmico[1].

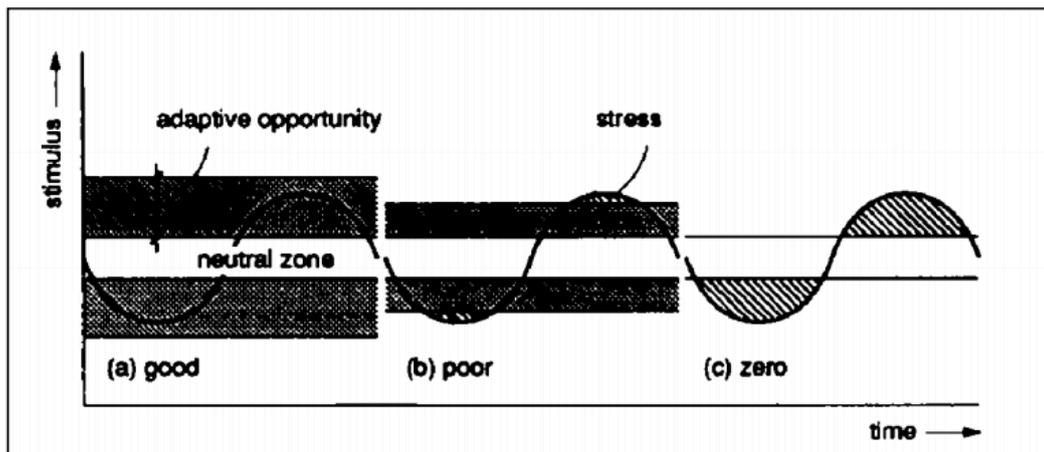


Figura 4: Extensão da zona de conforto em torno da zona neutra para situações com oportunidades adaptativas (a) boa, (b) baixa e (c) inexistente[6]

Em relação às principais normas existentes na área de conforto térmico em edifícios, estas foram elaboradas pela ISO (*International Organization for Standardization*), pela ASHRAE e pelo CEN (*European Committee for Standardization*).

A norma EN 15251:2007[11] considerada neste estudo define parâmetros ambientais interiores para projetar e avaliar o desempenho energético de edifícios abordando a qualidade do ar, ambiente térmico, iluminação e acústica. Este parte de um conjunto de normas cujo objectivo é harmonizar a metodologia para o cálculo do desempenho energético dos edifícios, e propõe duas metodologias de conforto: uma analítica que recorre aos índices do voto médio estimado (PMV) e percentagem previsível de insatisfeitos (PPD) e outra que faz uso de um modelo adaptativo que resultou do projeto de investigação europeu SCATs (*Smart Controls and Thermal Comfort*), desenvolvido em vários países europeus. O algoritmo adaptativo, apresentado por este estudo e adoptado por esta norma, possibilita, para os países europeus, o cálculo da temperatura interior de conforto em função do clima exterior com o intuito de reduzir a energia gasta pelo uso do Ar Condicionado. As medidas físicas incluídas no estudo foram: as temperaturas do ar, humidade relativa e velocidade do ar e foram registados o uso de controlos ambientais: aquecimento, ar condicionado, janelas, portas, persianas, cortinas e ventiladores.

Este modelo estabelece quatro categorias de edifícios (sem climatização), não em função da qualidade construtiva mas em função do tipo de edifício. Esta divisão, discriminada no Quadro 2, tem efeitos nos intervalos de conforto considerados face à temperatura de conforto calculada pelo modelo. Estes limites, embora não correspondendo às condições ideais de conforto térmico, são sinónimo de satisfação para maioria das pessoas de um grupo exposto às mesmas condições térmicas.

Quadro 2: Categorias dos edifícios e respetivos limites de conforto[20]

| Categoria | Descrição | Limite de conforto |
|------------------|---|---------------------------|
| I | Expectativas elevadas só usada para espaços ocupados por pessoas muito sensíveis e com necessidades especiais | $\pm 2^{\circ}\text{C}$ |
| II | Nível de expectativa normal para novas construções e renovações | $\pm 3^{\circ}\text{C}$ |
| III | Nível de expectativa aceitável e moderado (para edifícios existentes) | $\pm 4^{\circ}\text{C}$ |
| IV | Valores fora dos critérios para as categorias acima. (só aceite para períodos limitados) | $\pm > 4^{\circ}\text{C}$ |

A Figura 5 ajuda a perceber que isto na significa que um edifício de classe I corresponde um intervalo menor de conforto, com maior expectativa mas menor tolerância, e a um edifício de classe III corresponde um maior intervalo de conforto.

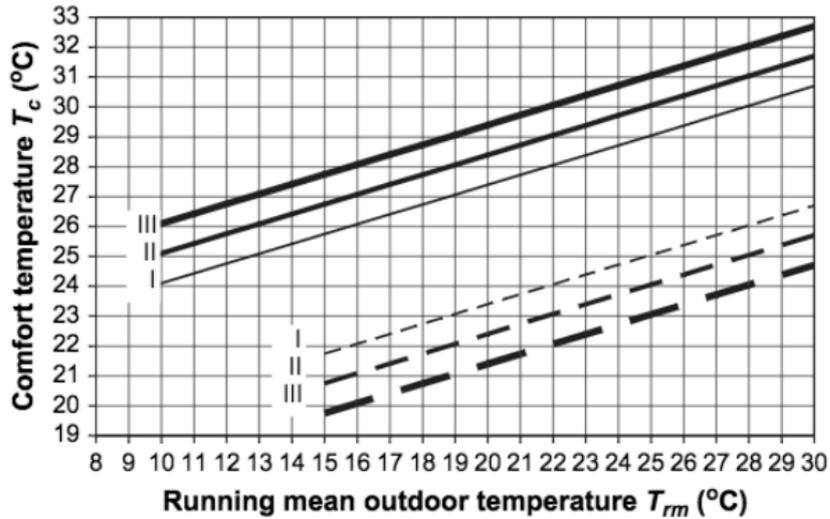


Figura 5: Limites de conforto superiores e inferiores para as temperaturas operativas de edifícios sem climatização, em função da temperatura média exterior ponderada[20]

O cálculo da temperatura média exterior ponderada é obtida pela Eq. 1.1[7]:

$$T_{RM}^n = c \cdot T_{RM}^{n-1} + (1 - c) \cdot T_{DM}^{n-1} \quad (1.1)$$

com:

T_{RM}^n - temperatura média exterior ponderada do dia n (°C);

T_{RM}^{n-1} - temperatura média exterior ponderada do dia n-1 (°C);

T_{DM}^{n-1} - temperatura média exterior do dia n-1 (°C);

c - parâmetro que varia entre 0 e 1 que define a velocidade de resposta da face às alterações da temperatura exterior.

Os resultados do estudo SCATs apontam para um valor de $c = 0,8$ para os países europeus[7], pelo que, o modelo adaptativo adoptado por esta norma assume a forma da Eq. 1.2 :

$$T_{RM}^n = 0,8 \cdot T_{RM}^{n-1} + 0,2 \cdot T_{DM}^{n-1} \quad (1.2)$$

O estudo SCATs, que fundamenta o modelo adaptativo adoptado pela norma[11], para além da equação geral das temperaturas interiores de conforto para o território europeu (Eq. 1.2), apresenta uma equação específica para a temperatura interior de conforto para cada um dos países onde a pesquisa decorreu. As equações deste

modelo são do tipo da Eq. 1.3, na qual os parâmetros d e e foram obtidos por meio de análise de regressão dos dados recolhidos durante a realização do estudo:

$$T_c = d \cdot T_{RM}^n + e \quad (1.3)$$

sendo:

T_{RM} - temperatura média ponderada exterior (°C);

T_c - temperatura operativa interior de conforto (°C).

Estabelecidos os intervalos de conforto e os critérios para a determinação da temperatura interior de conforto, é necessário caracterizar o período de desconforto através de indicadores descritos no Quadro 3.

Quadro 3: Indicadores para caracterizar o período de desconforto

| Indicador | Descrição |
|--|---|
| Horas de desconforto (%) | Número de horas em que não se verificam os limites de conforto. Percentagem de horas com desconforto em relação ao total de horas dos períodos analisados |
| Graus-Hora de desconforto (°C.h) | Número de graus acima e abaixo dos limites de conforto na duração do período com desconforto |
| Sobreaquecimento e sobrearrefecimento médios dos períodos com desconforto (°C) | Média do número de graus acima ou abaixo do limite superior ou inferior do intervalo de conforto, durante o período em que há desconforto |

No entanto, apesar da EN 15251:2007[11] se basear em normas já existentes (ASHRAE 55 e ISO 7730), visa critérios de conforto mais exigentes do que o regulamento nacional em vigor e pensa-se que poderá levar ao aumento indesejável do consumo de energia, indo contra o principal objectivo da EPBD[26].

Todavia, uma das aplicações destas normas adaptativas é a possibilidade de prever a temperatura interior de conforto através da temperatura exterior, sendo muito útil para avaliar se soluções passivas de aquecimento/arrefecimento são viáveis para o edifício. A utilização da temperatura ponderada (T_{RM}) neste modelo conduz a

resultados mais fiáveis, uma vez que a temperatura média mensal torna os resultados dependentes de temperaturas registadas em dias muito anteriores aos dias das medições. Isto é, estabelecem-se correlações específicas com dados de estações meteorológicas, permitindo avaliações baseadas em dados preexistentes. Porém, a oportunidade adaptativa também é composta por aspetos subjetivos (físico, fisiológico ou psicológico) que influenciam as condições de conforto e são considerados como “erros adaptativos”, que representam a diferença entre a estreita zona de conforto prevista pela método adaptativo e a larga zona de conforto medida por observações.

Na generalidade, os modelos adaptativos que estão mais de acordo com os princípios das medições realizadas evidenciaram-se mais fidedignos na análise do conforto térmico e possuem limites de conforto mais tolerantes que os dos modelos analíticos[8].

3.

Caso de Estudo

Este estudo pretende analisar o conforto térmico de uma tipologia representativa dum alojamento habitacional em Portugal com duas soluções construtivas diferentes para cada uma de três áreas climáticas selecionadas, tal como esquematizado na Figura 6.

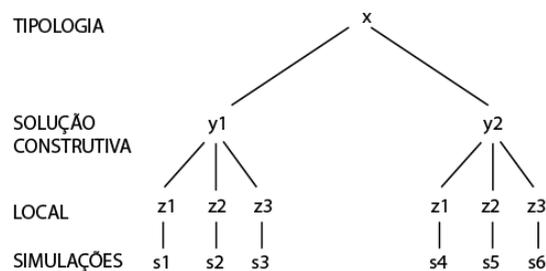


Figura 6: Diagrama de estudos paramétricos efetuados

Para este estudo foi considerada uma habitação T3 contemporânea de referência com base na área média das habitações T3 na zona climática I3 - a mais exigente em termos de regulamentação térmica Portuguesa[2]. De acordo com dados estatísticos recentes (2014) o tipo habitação T3 é a tipologia mais frequente em Portugal (cerca de 23%)[14]. Essa predominância é uma realidade constante nos últimos 15 anos e este tipo de habitação é geralmente adequado para uma família composta por 3 a 4 pessoas. Assim, a tipologia de referência[12] representada na Figura 7 tem uma área de 144m² resultante da associação de 4 módulos em forma de quadrado de 6x6m. A cada um destes 6m tem uma parede perpendicular à parede exterior com a mesma solução construtiva que as paredes exteriores.

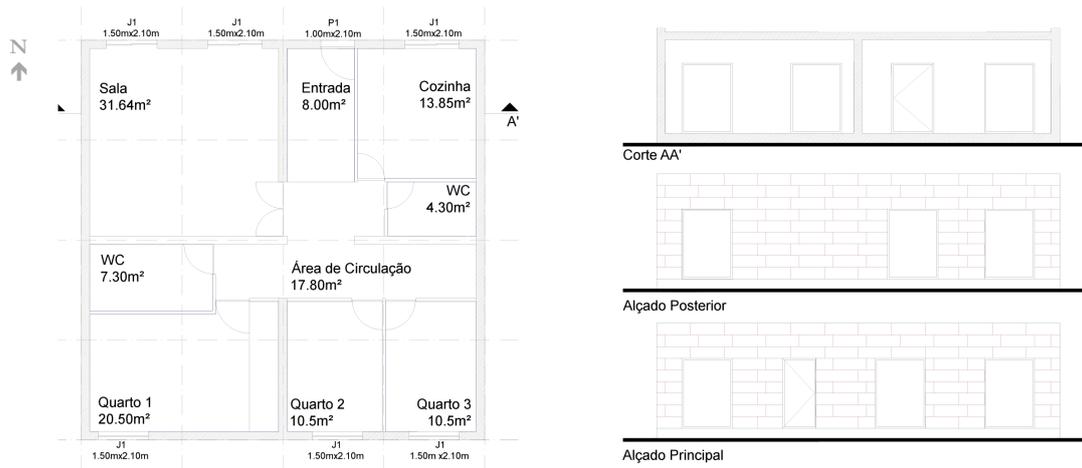


Figura 7: Tipologia de referência usada no caso de estudo[12]

Este modelo é composto por três quartos, uma sala, uma cozinha e dois compartimentos sanitários. Os compartimentos e áreas totais do estudo de caso são apresentados na Quadro 4, sendo que o tamanho dos mesmos são compatíveis com as áreas mínimas permitidas pelo Regulamento Geral das Edificações Urbanas (RGEU)[24]. Para efeitos de orientação do modelo, foi considerada a fachada com os quartos situado a Sul, pois assim consegue-se obter uma maior temperatura nos quartos devido aos ganhos solares durante o inverno.

Quadro 4: Áreas totais do caso de estudo e áreas mínimas permitidas pelo RGEU

| | RGEU (m ²) | Caso de Estudo (m ²) |
|--|------------------------|----------------------------------|
| Distribuição dos espaços (para distribuir entre a sala e cozinha) | 8 | |
| Entrada | - | 8 |
| Área de Circulação | - | 17.8 |
| Sala de Estar | 12 | 31.64 |
| Cozinha | 6 | 13.85 |
| Quarto 1 | 10.5 | 20.5 |
| Quarto 2 | 9 | 10.5 |
| Quarto 3 | 9 | 10.5 |
| WC 1 | 4.5 | 4.3 |
| WC 2 | - | 7.3 |
| Área Total | 91 | 144 |

Foi considerado o seguinte conjunto de soluções construtivas: convencional (SC), e outra de inércia mais fraca, de estrutura em aço leve (LSF).

A solução CS é composta por partições interiores e exteriores não-estruturais feitas com tijolos justapostos e unidos com argamassa de cimento e uma estrutura de betão armado, representado na Figura 9, que inclui lajes, vigas, pilares e fundações. As unidades de tijolos de cerâmica ocos têm furos horizontais e apresentam uma geometria regular com quatro lados estriados, que permite uma boa adesão de qualquer tipo de acabamento. Normalmente nas paredes exteriores, reproduzida na Figura 8, devido aos requisitos de isolamento, é usada uma solução dupla que consiste numa estrutura de tijolos de 300x200x150mm com um estrutura de parede interior composta por tijolos de 300x200x110mm separadas por um intervalo de ar parcialmente ocupada com XPS (poliestireno extrudido).

Neste caso de estudo, o sistema de partição interior, visível na Figura 8, consiste numa única parede feita de unidades de tijolos ocos (300x200x110mm) revestida por 15mm de espessura de reboco de cimento em ambos os lados, o que resulta numa espessura total de 140mm e num peso específico total de cerca de 150Kg/m³.

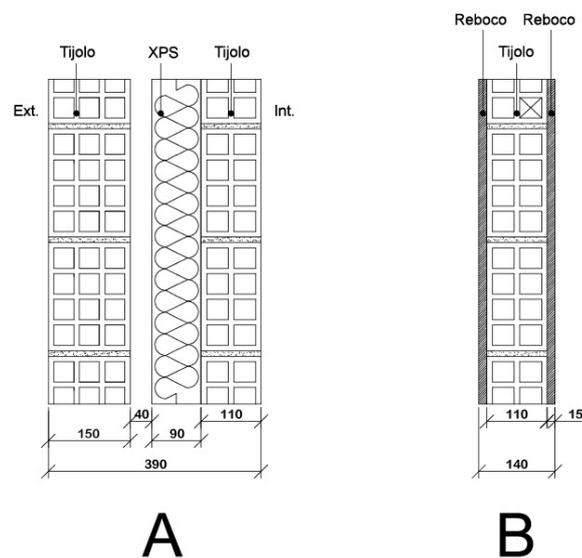


Figura 8: Representação da SC para as paredes exterior(A) e interior(B)

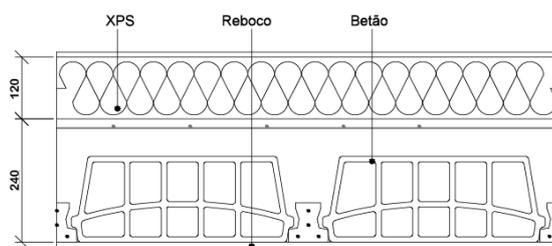


Figura 9: Representação da SC para a cobertura

A solução LSF utiliza o aço como principal elemento estrutural. É uma estrutura que não utiliza tijolo nem cimento e o betão é apenas empregue no embasamento, nas caves e nos muros de suporte. Este método de construção pode ser utilizado na execução de paredes exteriores ou interiores, coberturas e lajes e em todo o tipo de edifícios. Na Figura 10 é possível identificar as paredes estruturais que são compostas por uma estrutura com perfis de aço espaçadas entre 150mm a 60mm, com uma espessura maior do que as paredes não estruturais interiores.

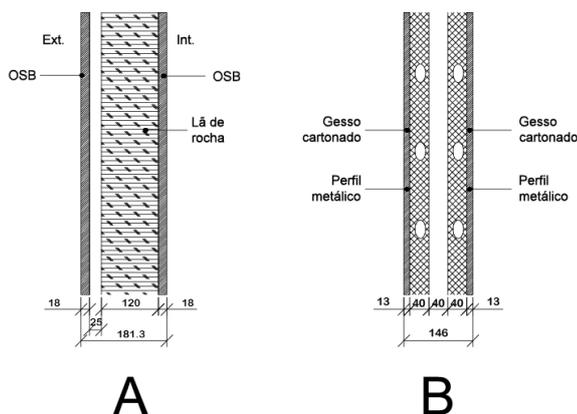


Figura 10: Representação da solução LSF para as paredes exterior(A) e interior(B)

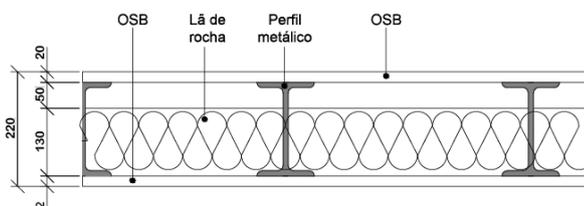


Figura 11: Representação da solução LSF para a cobertura

Tendo em conta que os materiais influenciam o cumprimento dos requisitos de

conforto térmico, deve-se ter em conta alguns critérios e características que foram recolhidos e definidos, tais como o calor específico (J/Kg-K) e condutividade térmica (W/m-K) [3] que foram retirados do ITE 50[17] e de Mendonça[19]. É necessário, também, definir a rugosidade de cada material, que segundo as definições do programa depende da textura da superfície de contacto. Também são definidos os espaços de ar presentes nas paredes, pavimentos e cobertura e a respetiva resistência térmica.

Quadro 5: Propriedades dos materiais

| Material | Rugosidade | Condutividade (W/m-K) | Densidade (Kg/m ³) | Calor Específico (J/Kg-K) |
|-----------------|----------------------|--------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Betão | <i>Medium Rough</i> | 2.000 | 2350 | 940 |
| EPS 200 | <i>Medium Rough</i> | 0.033 | 30 | 1550 |
| Tijolo | <i>Rough</i> | 0.423 | 1900 | 960 |
| OSB | <i>Medium Smooth</i> | 0.130 | 650 | 1300 |
| Reboco Armado | <i>Rough</i> | 0.800 | 1500 | 1046 |
| Gesso Cartonado | <i>Smooth</i> | 0.250 | 875 | 1000 |
| Lã de Rocha | <i>Medium Rough</i> | 0.040 | 70 | 735 |
| XPS | <i>Medium Rough</i> | 0.037 | 32 | 1550 |

Quadro 6: Características das caixa-de-ar[23]

| | Espessura (mm) | Resistência Térmica (W/m ² .°C) |
|------------|-------------------|--|
| Vertical | 25-300 | 0.18 |
| Horizontal | 30-300 | 0.16 |

Em relação aos locais, foram utilizados os ficheiros climáticos cedidos pela ASHRAE *International Weather for Energy Calculations* (IWEC) e disponibilizado no site do EnergyPlus[10], pelo que a seleção se restringe aos locais existentes.

Normalmente, as características climáticas de cada país ou região são definidas por meio de um conjunto de dados com suficiente representatividade temporal e

espacial, evitando, deste modo, a necessidade de se proceder à sua obtenção em cada caso particular. Por isto, no REH existe uma definição de zonas climáticas para o inverno e o verão que está ilustrada na Figura 12.

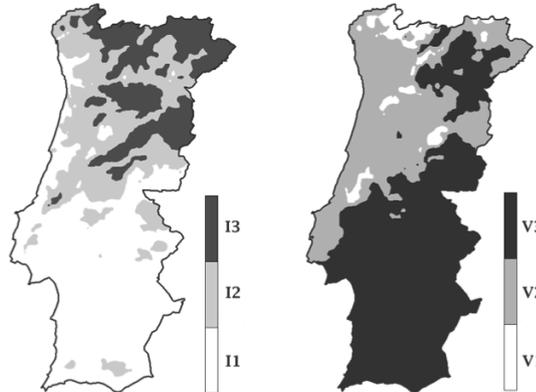


Figura 12: Zonamento Climático para as estações de Inverno e Verão[23]

Por isto, achou-se relevante fazer um estudo para regiões que englobassem todas as zonas climáticas previstas no regulamento[23]. Das possibilidades existentes nos ficheiros climáticos para Portugal, selecionaram-se locais com um clima severo no verão, outro no inverno e outro com um clima representativo de uma área mais povoada de Portugal, tal como Évora, Bragança e Porto, respetivamente.

A localidade de Évora (N 38°34' W 7°54'), foi considerada por se situar no sul e interior do país, a 321m de altitude e com temperaturas exteriores que variam de 38.4°C a 1.6°C (23 de Julho e 31 de Janeiro). A escolha de Bragança (N 41°47' W 6°43') deve-se ao facto de esta região pertencer ao clima de inverno mais severo existente em Portugal, a 692m de altitude, cujas temperaturas exteriores são entre 36.2°C e -6°C (19 de Agosto e 19 de Janeiro). A localidade de Porto (N 41°13' W 8°40') encontra-se apenas a 73m de altitude, verificando-se temperaturas exteriores de 32°C a 0°C (6 de Julho e 1 Janeiro). No Quadro 7 é possível verificar os dados climáticos de referência para cada localidade.

Quadro 7: Zona climática e dados climáticos de referência correspondentes [23]

| | Zona Climática Inverno | | | Zona Climática Verão | | |
|----------|------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|--------------------------------|---------------------------|
| | | Nº Graus dias (GD) (°C.dias) | Duração estação aquec. (meses) | | Temp. ext. projecto (°C) | Amplitude térmica (°C) |
| Évora | I1 | 1290 | 5.7 | V3 | 36 | 17 |
| Bragança | I3 | 2850 | 8.0 | V2 | 33 | 15 |
| Porto | I2 | 1610 | 6.7 | V1 | 30 | 9 |

Assim, todas as simulações foram feitas para o mesmo modelo T3, descrito anteriormente, para Évora, Bragança e Porto, diferindo apenas na solução construtiva: SC e LSF. No entanto, a simulação dinâmica terá ainda as seguintes considerações como referência:

- Taxa de renovação do ar constante de 0.4 h^{-1} em condições médias de funcionamento para garantir a qualidade do ar interior[23];
- De maneira a avaliar os ganhos internos resultantes da ocupação, foi determinado um valor metabólico de 120W/pessoa durante o dia (6h-18h) e 80W/pessoa durante a noite (18h-6h);
- A resistência térmica do vestuário foi definido em 0.5Clo no Verão (21 de Março a 21 de Setembro) e 1Clo no Inverno (22 de Setembro a 20 de Março)[23];
- Um ganho adicional de 4W/m^2 de outros equipamentos elétricos durante as horas de ocupação, correspondente aos ganhos térmicos internos médios por unidade de superfície definido do REH[23];
- A ocupação média portuguesa é de 1.7 pessoas por unidade de habitação[14], mas o REH define que o número convencional de ocupantes a considerar para uma habitação com a tipologia T3 é de 4 ocupantes (n+1) [23];
- O padrão de ocupação está representado na Figura 13 e é baseado na metodologia de cálculo nacional do Reino Unido (NCM) para padrões de ocupação para frações[27];

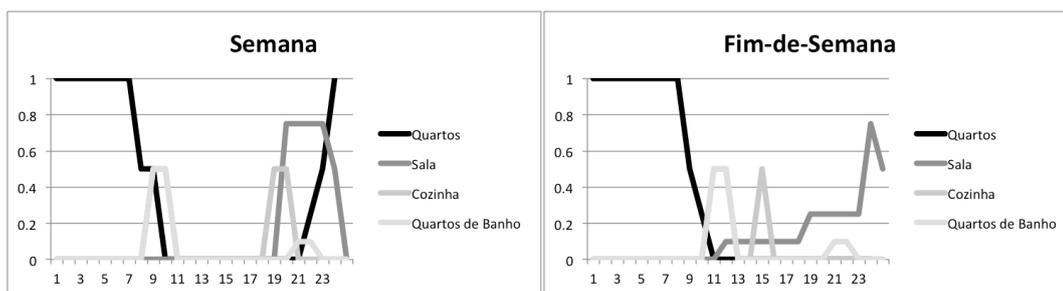


Figura 13: Representação gráfica do padrão de ocupação considerada para a unidade de habitação durante um dia da semana e fim-de-semana

Em relação ao cálculo do conforto térmico adaptativo, serão consideradas as seguintes premissas, de acordo com a norma EN 15251:2007[11]:

- Categoria II, com nível de expectativa normal para novas construções e renovações, o que corresponde a um limite de $\pm 3^{\circ}\text{C}$ face às temperaturas diárias de conforto.

Para o cálculo da temperatura média exterior ponderada T_{RM}^n num ano (x), foram considerados valores até 1 ano antes, sendo que o valor da temperatura do último dia do ano $x - 2$, foi considerado igual à temperatura exterior.

4.

Metodologia

Esta tarefa prevê a simulação dinâmica do caso em estudo – tipologia selecionada, e o cálculo do conforto térmico adaptativo do modelo com duas soluções construtivas para três condições climáticas de referência.

Começou-se por simular o modelo através do motor de simulação dinâmica do comportamento térmico EnergyPlus[9] apresentado na Figura 14, um software que permite considerar condições de tempo/clima e ocupação complexas na previsão das necessidades de aquecimento e arrefecimento e das condições interiores de um edifício.

Os programas computacionais de simulação energética de edifícios permitem estudar o desempenho térmico de soluções arquitectónicas, elementos construtivos e sistemas de climatização em menos tempo e com precisão do que quando calculados manualmente. São, também, ferramentas úteis na fase de projeto dos edifícios para estimativa das potências dos sistemas de climatização necessárias a instalar.

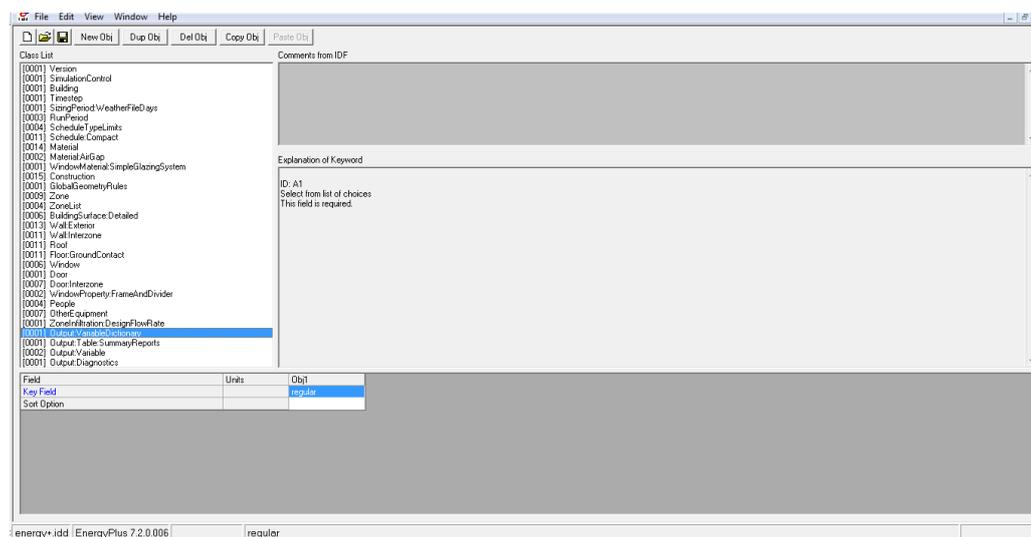


Figura 14: Ambiente de trabalho do EnergyPlus com os parâmetros inseridos

O processo de trabalho do EnergyPlus baseia-se na modelação de uma tipologia arquitectónica através da sua geometria, das características dos materiais que

compõem a sua envolvente, das condições ambientais exteriores e de determinados parâmetros caracterizadores dos ambientes interiores do edifício (ocupação, iluminação, equipamentos e infiltração). Aqui são abordados apenas os parâmetros de entrada utilizados para a realização desta dissertação, uma vez que o programa apresenta um conjunto de funcionalidades que ultrapassam a abrangência do âmbito deste trabalho e que vai permitir obter os dados necessários para o cálculo do balanço térmico do edifício através do método adaptativo. A introdução dos dados é feita no ficheiro de formato IDF (*Input Data File*), pela plataforma ou em formato texto. O diagrama da Figura 15 representa o funcionamento do EnergyPlus com a indicação da informação utilizada no *input* e a informação pretendida do *output* utilizados neste estudo.

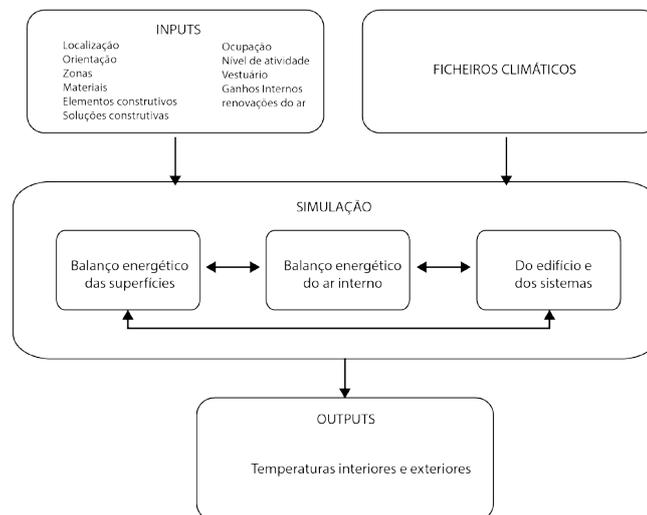


Figura 15: Representação do funcionamento do EnergyPlus para este estudo

Assim, em primeiro lugar, foram inseridas as características gerais do edifício (*Simulation Parameters:Building*) e as regras para a introdução da sua geometria (*Simulation Parameters:GeometryRules*). Para introdução das coordenadas dos elementos construtivos, estipulou-se como ponto de partida o canto inferior esquerdo de cada um dos elementos seguindo-se o vértice no sentido contrário aos ponteiros do relógio. É preciso ter em conta que este método considera que o utilizador se localiza e visualiza no exterior da zona a qual pertence o elemento a introduzir. Tudo isto deve ser tido em conta tanto nos elementos verticais como horizontais.

Para a modelação tridimensional é necessário simplificar o seu desenho, tal como representado na Figura 16, onde foram consideradas as dimensões relevantes dos limites exteriores da envolvente e os eixos dos elementos interiores, pois a espessura dos elementos é gerada pela introdução das construções e respectivos materiais.

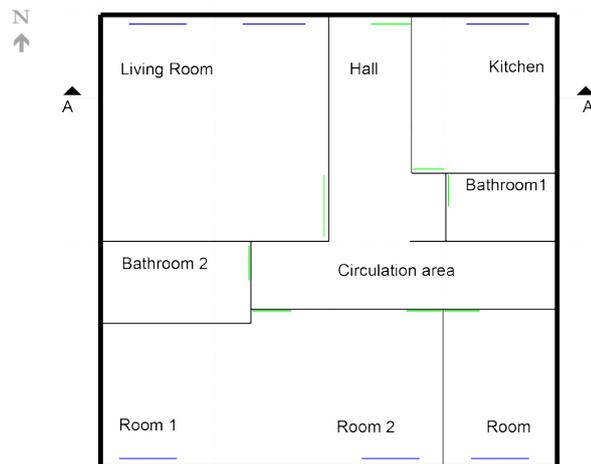


Figura 16: Simplificação da geometria do modelo para inserção no EnergyPlus

Assim, foram identificadas as zonas térmicas do objecto de estudo (*ThermalZone an Surfaces:Zone*), como apresenta a Figura 17, definidas como espaços delimitados com o mesmo valor de temperatura, e que neste caso correspondem aos diferentes compartimentos. Optou-se aqui por delimitar o objecto de estudo por várias zonas térmicas em vez de considerar o objecto de estudo apenas uma zona térmica, pois quando o modelo é desenhado no EnergyPlus, este não tem como identificar e definir uma geometria interior. Isto é, se apenas se considerasse uma zona térmica não seria possível criar uma parede interior que nas suas características estivesse em contacto, nas duas faces, com a mesma zona térmica. Cada zona também é definida pela introdução de coordenadas, tendo em conta que a origem da zona é em relação à origem do edifício, do seu volume e pé-direito. A determinação da origem de cada uma das zonas é um passo crucial na utilização do programa, uma vez que estes pontos serão a origem do referencial através do qual são introduzidas as coordenadas de todos elementos interiores pertencentes a cada uma das zonas. Também é possível agrupar as zonas (*ThermalZone an*

Surfaces:ZoneList) para facilitar a atribuição de algumas características a um grupo de zonas, em vez de inserir a mesma informação repetidamente para cada zona.

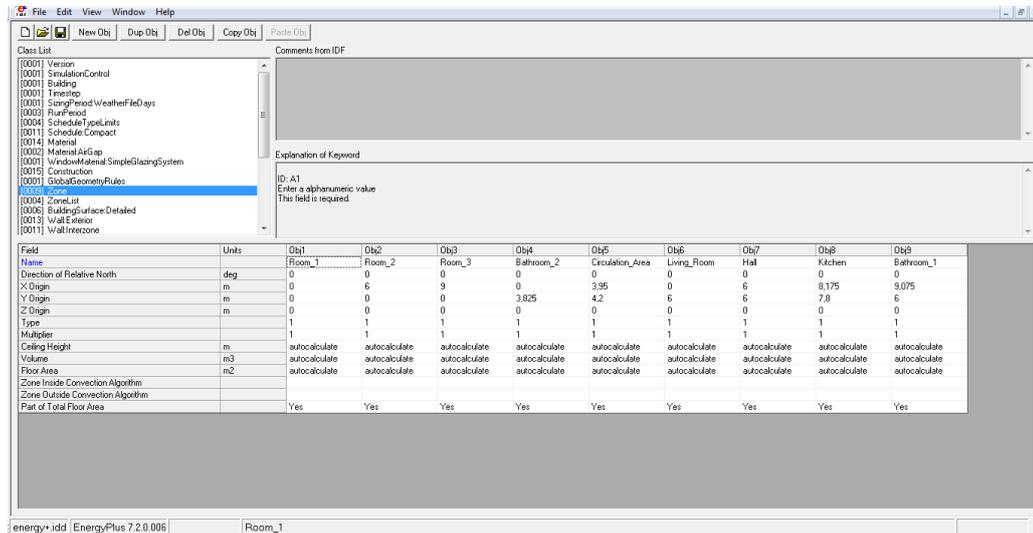


Figura 17: EnergyPlus: Zone

De seguida, foram criados os elementos construtivos para cada uma das zonas, e os elementos comuns foram indicados com as respetivas zonas de contacto, tal como é visível na Figura 18. Estes dados podem ser inseridos de diversas formas, dentro do grupo *ThermalZone and Surfaces*. Neste caso, foram inseridas as paredes exteriores (*Wall:Exterior*), as paredes interiores estruturais (*BuildingSurface:Detailed*) e de separação (*Wall:Interzone*), o tecto (*Roof*) e o chão (*Floor:GroundContact*), as portas (*Door* e *DoorInterzone*) e janelas (*Window*). Todos os limites exteriores do modelo foram considerados com exposição ao sol e ao vento.

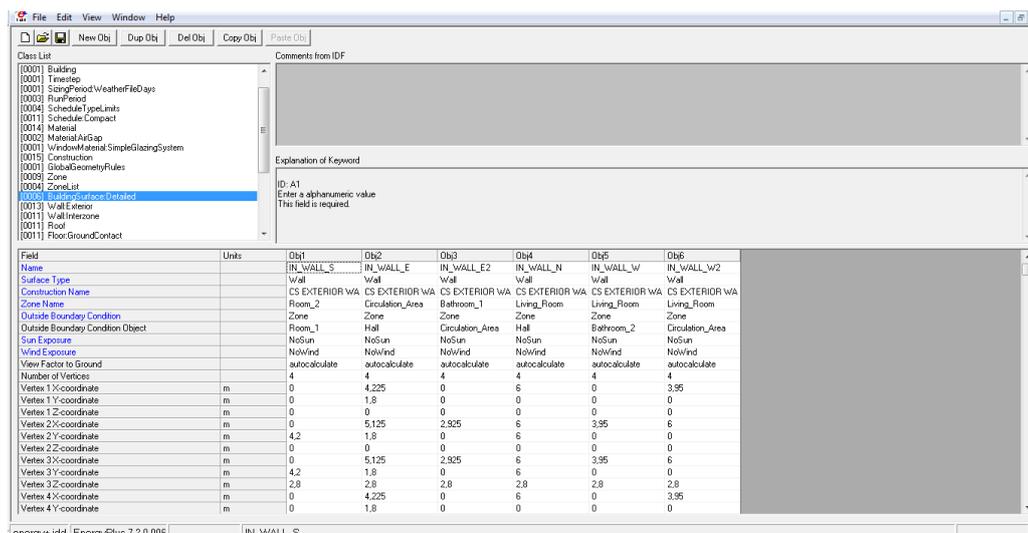


Figura 18: EnergyPlus: *BuildingSurface:Detailed*

Entretanto, como forma de analisar a coerência da modelação do edifício feita no programa (processo moroso) com a realidade, e para mais tarde não serem reportados erros, pode-se proceder a uma simulação com o intuito de se obter o ficheiro CAD que permita a visualização 3D do edifício em estudo. Na Figura 19 é visível a possibilidade de visualizar tridimensionalmente o modelo no Sketchup através do *Plug-In Legacy OpenStudio*, sendo que o Sketchup passa a conseguir abrir o ficheiro em formato IDF. Ainda é possível conciliar a modelação do objecto em OpenStudio com a simulação no EnergyPlus, mas não foi o caso.

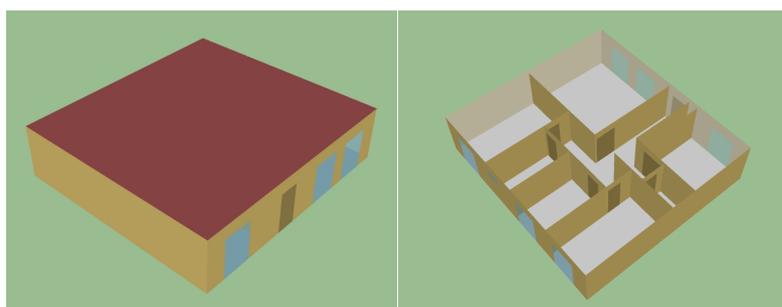


Figura 19: Visualização tridimensional, em Sketchup, do objeto modelado no EnergyPlus

No entanto, para completar a informação dos elementos construtivos é necessário introduzir primeiro os materiais e respetivas propriedades exemplificado na Figura 20 (*Surface Construction Elements: Material, AirGap, SimpleGlazingSystem* e *BuildingSurface: WindowProperty:FrameAndDivider*) e depois as soluções

construtivas (*Surface Construction Elements: Construction*).

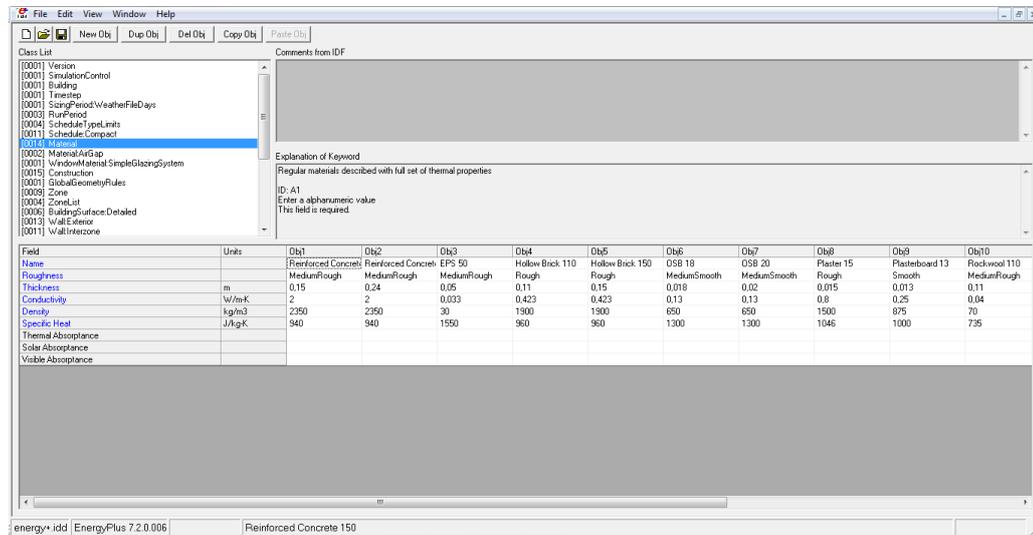


Figura 20: EnergyPlus: *Material*

No EnergyPlus, a inserção dos materiais nas soluções construtivas é sempre do exterior para o interior, tal como a ordenação esquematizada no Quadro 8 e é possível distinguir numa visualização tridimensional, representada na Figura 21.

Quadro 8: Soluções Construtivas

| | | Parede Exterior | cm | Parede Interior | cm | Cobertura | cm | Pavimento | cm |
|-----|---|------------------------|-----|------------------------|-----|------------------|-----|------------------|----|
| CS | 1 | Tijolo | 15 | Reboco Armado | 1.5 | XPS | 12 | Betão | 24 |
| | 2 | Caixa-de-ar | 4 | Tijolo | 11 | Betão | 24 | | |
| | 3 | XPS | 9 | Reboco Armado | 1.5 | Reboco Armado | 1.5 | | |
| | 4 | Tijolo | 11 | | | | | | |
| LSF | 1 | OSB | 1.8 | Gesso Cartonado | 1.3 | OSB | 2 | OSB | 2 |
| | 2 | Caixa-de-ar | 3.5 | Caixa-de-ar | 12 | Lã de Rocha | 13 | Caixa-de-ar | 18 |
| | 3 | Lã de Rocha | 11 | Gesso Cartonado | 1.3 | Caixa-de-ar | 5 | OSB | 2 |
| | 4 | OSB | 1.8 | | | OSB | 2 | | |

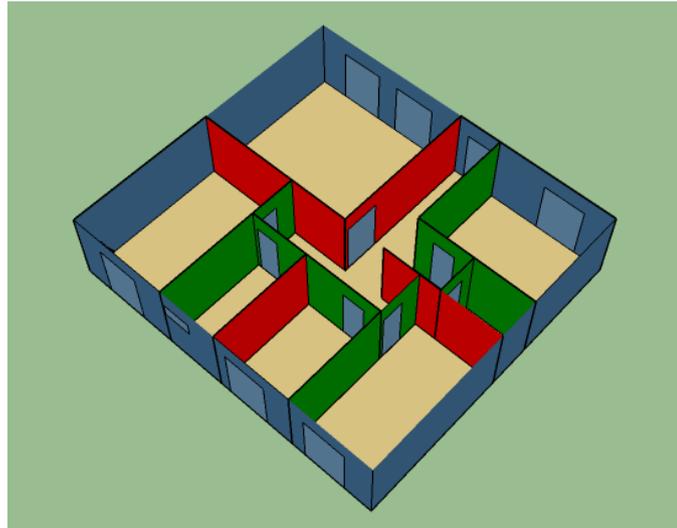


Figura 21: Visualização tridimensional com diferenciação dos elementos e conforme as soluções construtivas

Ainda antes de inserir os elementos que libertam calor e condicionam a temperatura ambiente (*Internal Gains:People, OtherEquipment*), foram inseridos os horários que vão determinar a atividade de cada um deles do modo apresentado na figura 22 (*Schedules: ScheduleTypeLimits*). Estes podem ter diferentes limites e podem ser inseridos detalhadamente (dia, semana e ano) ou de forma compacta (*Schedules: ScheduleCompact*).

| Field | Units | Obj1 | Obj2 | Obj3 | Obj4 | Obj5 | Obj6 | Obj7 | Obj8 | Obj9 | Obj10 |
|---------------------------|--------|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|----------------|
| Name | | Schedule | OCUP Q | OCUP Sa | OCUP Co | OCUP IS | EQUI Q | EQUI Sa | EQUI Co | EQUI IS | Activity |
| Schedule Type Limits Name | | On/Off | Fraction | Fraction | Fraction | Fraction | On/Off | On/Off | On/Off | On/Off | Metabolism |
| Field 1 | varies | Through: 12/31 | Through: 12/31 | Through: 12/31 | Through: 12/31 | Through: 12/31 | Through: 12/31 | Through: 12/31 | Through: 12/31 | Through: 12/31 | Through: 12/31 |
| Field 2 | varies | For: all days | For: weekdays Sum | For: weekdays Sum | For: weekdays Sum | For: weekdays Sum | For: all days |
| Field 3 | varies | Unit: 24.00 | Unit: 7.00 | Unit: 18.00 | Unit: 7.00 | Unit: 7.00 | Unit: 7.00 | Unit: 18.00 | Unit: 7.00 | Unit: 7.00 | Unit: 7.00 |
| Field 4 | varies | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 80 |
| Field 5 | varies | | Unit: 9.00 | Unit: 22.00 | Unit: 9.00 | Unit: 9.00 | Unit: 9.00 | Unit: 22.00 | Unit: 9.00 | Unit: 9.00 | Unit: 23.00 |
| Field 6 | varies | | 5 | 75 | 5 | 5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 120 |
| Field 7 | varies | | Unit: 21.00 | Unit: 23.00 | Unit: 17.00 | Unit: 19.00 | Unit: 21.00 | Unit: 23.00 | Unit: 17.00 | Unit: 19.00 | Unit: 24.00 |
| Field 8 | varies | | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 80 |
| Field 9 | varies | | Unit: 22.00 | Unit: 24.00 | Unit: 19.00 | Unit: 21.00 | Unit: 22.00 | Unit: 24.00 | Unit: 19.00 | Unit: 21.00 | |
| Field 10 | varies | | 25 | 0 | 5 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | |
| Field 11 | varies | | Unit: 23.00 | For: weekends Holi | Unit: 23.00 | Unit: 23.00 | Unit: 23.00 | Unit: 23.00 | For: weekends Holi | Unit: 24.00 | Unit: 24.00 |
| Field 12 | varies | | 5 | Unit: 10.00 | 0 | 0 | 1 | Unit: 10.00 | 0 | 0 | |
| Field 13 | varies | | Unit: 24.00 | 0 | Unit: 24.00 | Unit: 24.00 | Unit: 24.00 | 0 | For: weekends Holi | For: weekends Holi | |
| Field 14 | varies | | 1 | Unit: 17.00 | 0 | 0 | 0 | Unit: 17.00 | Unit: 9.00 | Unit: 9.00 | |
| Field 15 | varies | | For: weekends Holi | 1 | For: weekends Holi | For: weekends Holi | For: weekends Holi | 1 | 0 | 0 | |
| Field 16 | varies | | Unit: 7.00 | Unit: 22.00 | Unit: 9.00 | Unit: 9.00 | Unit: 8.00 | Unit: 22.00 | Unit: 11.00 | Unit: 11.00 | |
| Field 17 | varies | | 1 | .25 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| Field 18 | varies | | Unit: 8.00 | Unit: 23.00 | Unit: 11.00 | Unit: 11.00 | Unit: 9.00 | Unit: 23.00 | Unit: 13.00 | Unit: 19.00 | |

Figura 22: EnergyPlus: *ScheduleCompact*

A renovação do ar também tem influência na temperatura interior do modelo. O EnergyPlus apresenta diversos modos de se considerar o fluxo de ar, possibilitando a realização de simulações com elevado grau de complexidade (estudo de permeabilidade ao ar em paredes ou vãos envidraçados, por exemplo). Para efeitos de cálculo, foram definidas as taxas de renovações horárias do fluxo de ar (*ZoneAirflow:ZoneInfiltration:DesignFlowRate*). O campo da *ZoneVentilation* corresponde à quantidade de ar proveniente do ambiente exterior e que se infiltra diretamente no interior de cada zona térmica não intencionalmente, pelo meio de abertura/fecho de portas exteriores, rachas nas janelas e através dos elementos construtivos.

Ainda antes de simular é necessário inserir informações gerais sobre a aplicação (*Simulation Parameters: Version*) para responder às necessidades do utilizador e às opções de simulação, como o local e outros parâmetros específicos da simulação. Este tipo de informação tanto pode ser inserida no início como no fim da modelação. Em relação ao local (*Location and Climate: Site:Location*), este campo não precisa de ser preenchido por serem utilizados os ficheiros climáticos do EnergyPlus que se sobrepõem a esta informação. Aqui são disponibilizados dois tipos de ficheiros climáticos, um onde constam valores climáticos registados em tempo real (EPW) por estações meteorológicas estrategicamente posicionadas, e outro com base em dados estatísticos respectivos ao país e à zona em estudo (STAT). O ficheiro climático utilizado foi elaborado estatisticamente, ou seja, a simulação é feita para um ano típico. A Figura 23 mostra o preenchimento do tipo de cálculo e simulação (*Simulation Parameters: SimulationControl*) que se pretende fazer; o intervalo de tempo unitário da simulação (*Simulation Parameters: Timestep*), que não poderá ser superior a 1 hora e que tem implicações importantes na precisão da modelação e no tempo total de execução da simulação; e por fim a definição do período de simulação (*Location and Climate: RunPeriod*), ou seja, os dias e meses inicial e final e o número de anos a simular.

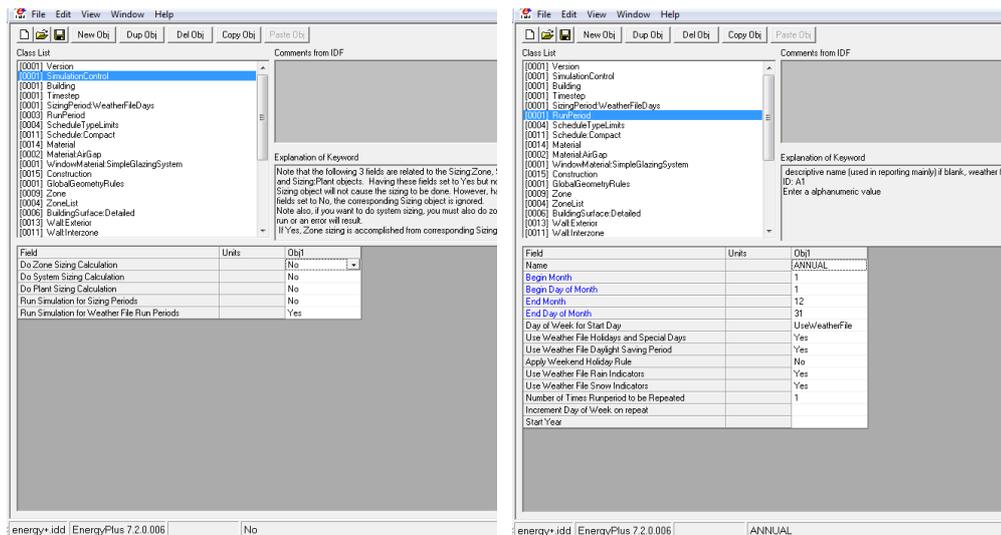


Figura 23: EnergyPlus: *SimulationControl* e *RunPeriod*

Para gerar a simulação e escolher os tipos de dados a gerar, é necessário escolher um dicionário (*Output Reporting: Output:VariableDictionary*), gravar o ficheiro e simular. Só depois é possível escolher o tipo de dados que queremos simular e informação a obter (*Output Reporting: Output:Variable* e *Output:SummaryReports*). A Figura 24 apresenta as opções selecionadas para este trabalho, sendo que vai ser necessário obter a temperatura média exterior diária (*Outdoor Dry Bulb*) e a temperatura operativa horária (*Zone Operative Temperature*) das zonas térmicas, para confronto com as temperaturas e intervalos de conforto para os períodos da simulação.

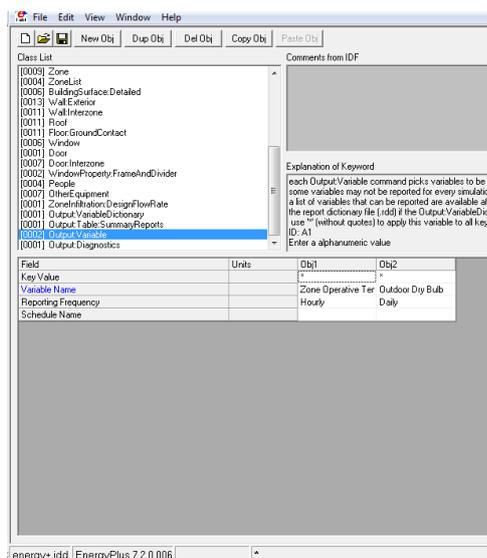


Figura 24: EnergyPlus: *Output:Variable*

Como representado na Figura 25, a ferramenta *EP-Launch* do EnergyPlus permite selecionar os ficheiros de simulação e os ficheiros climáticos para fazer as simulações, gerar os ficheiros de dados e obter os resultados pretendidos. As simulações devem decorrer sem qualquer tipo de erro ou aviso, o que, segundo o EnergyPlus, significa que não houve má interpretação dos dados necessários e que não há discrepâncias ou anomalias em valores que são introduzidos mais que uma vez. É gerado um ficheiro CSV (*Comma Separated Values*) com os resultados pretendidos.

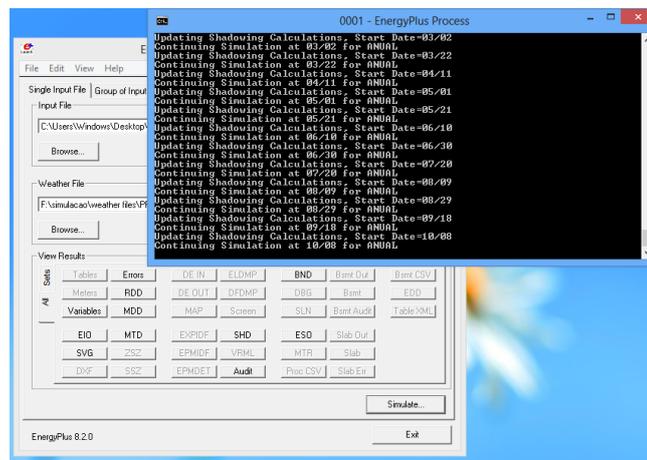


Figura 25: EP-Launch: Simulação

Depois de obter os dados necessários para cada uma das seis simulações, vai-se determinar, para cada combinação, o tempo, graus-hora, sobreaquecimento e sobreaquecimento médios dos períodos de desconforto, com a elaboração de elementos gráficos que facilitem a leitura e a interpretação dos mesmos.

Para isto, primeiro calcula-se a temperatura média exterior ponderada para cada dia (T_{RM}^n) com a aplicação da Eq. 1.2, onde são utilizadas a temperatura média diária exterior gerada no EnergyPlus. Aqui, recorre-se a uma folha de cálculo para geração dos dados, como exemplificado na Figura 26.

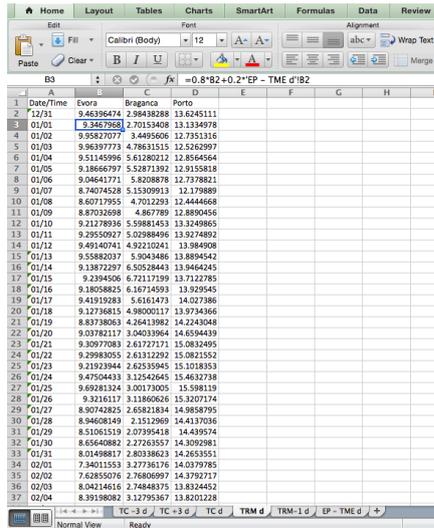


Figura 26: Folha de cálculo: T_{RM}^n

Na Figura 27 é aplicada a Eq. 1.3 para obtenção da temperatura interior de conforto (T_c), onde são utilizados os valores de T_{RM}^n acabados de calcular.

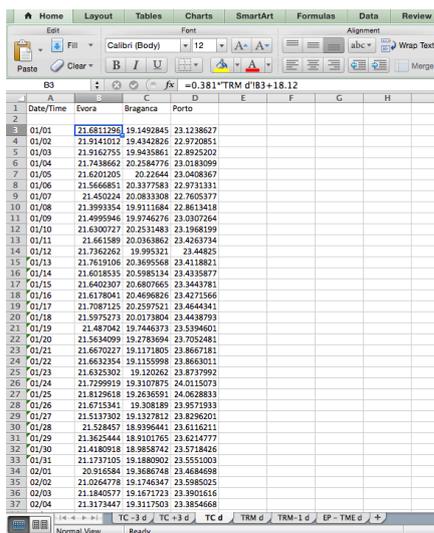


Figura 27: Folha de cálculo: T_c

Depois é calculado os limites do conforto diários (± 3) a partir da temperatura interior de conforto média de cada dia (T_c), como é possível visualizar na Figura 28.

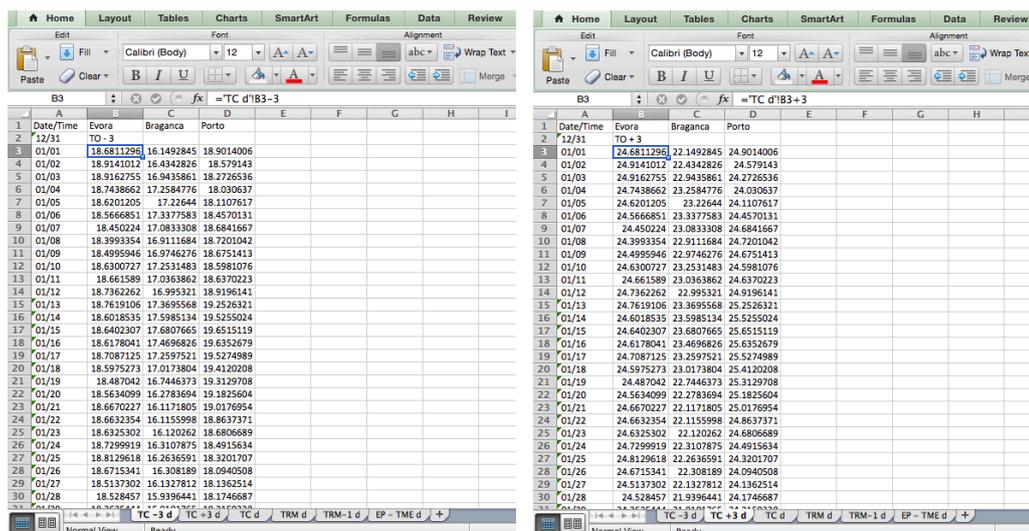


Figura 28: Folha de cálculo: Limites de conforto para Nível II

Para estudar o tempo de desconforto foram selecionados dias que pudessem representar a variação da temperatura no Verão e no Inverno. Por isso optou-se por escolher um dia típico de Verão e outro de Inverno, que correspondem aos dias que mais se aproximam da temperatura média de uma semana típica da época, que por sua vez são representativas dessa época. Ao abrir o ficheiro .STAT[10] no *Notepad*, é possível visualizar quais são as semanas típicas e extremas para cada estação do ano. Na primeira a temperatura média da semana é a mais próxima da temperatura média da época, e, na semana extrema, a temperatura média da semana é a temperatura mais próxima da máxima ocorrida nessa época.

Quadro 9: Variações da temperatura média nas semanas típicas

| | Semana típica | | Temperatura média | |
|-----------------|---------------|---------------|-------------------|---------------|
| | Verão (TSW) | Inverno (TWW) | Verão (TSW) | Inverno (TWW) |
| Évora | 9/09 a 15 /09 | 12/02 a 18/02 | 22.59°C | 10.52°C |
| Bragança | 29/06 a 5/07 | 17/02 a 23/02 | 20.5°C | 5.29°C |
| Porto | 15/07 a 21/07 | 29/01 a 4/02 | 18°C | 10.55°C |

Assim, tal como é visível no Quadro 9, no caso de Évora, a *Typical Summer Week* (TSW) é de 9 a 15 de Setembro e a *Typical Winter Week* (TWW) é de 12 a 18 de Fevereiro, com temperaturas médias de 22.59°C e 10.52°C, respetivamente. Em

Bragança, a TSW é de 29 de Junho a 5 de Julho e a TWW de 17 a 23 de Fevereiro, com temperaturas médias de 20.5°C e 5.29°C, respetivamente. No Porto, a TSW é de 15 a 21 de Julho e a TWW de 29 de Janeiro a 4 de Fevereiro, com temperaturas médias de 18°C e 10.55°C, respetivamente. Ao ter acesso às temperaturas médias da semana típica, seleciona-se o dia do ano que mais se aproxima desse valor, através da visualização dos resultados da temperatura exterior diária para cada local, obtidos na simulação do EnergyPlus. No EnergyPlus, identifica-se estes dias no campo do período de simulação (*Location and Climate: RunPeriod*) quando se faz a simulação horária da temperatura operativa.

Depois, a diferença da temperatura operativa, obtida pelo EnergyPlus, com os limites da temperatura de conforto permite identificar se o período horário está em conforto ou desconforto (valor negativo pelo limite inferior, e valor positivo pelo limite superior). Assim, determina-se o número de horas em desconforto e a sua distribuição percentual (%) ao longo do dia, obtendo uma folha de cálculo como a da Figura 29, onde é possível identificar os períodos mais críticos.

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|----|----|------------------|------------|------------------|------------|-----------------|------------|-----------------|---------|
| 1 | | EP - TO HV ROOMS | | EP - TO HI ROOMS | | EP - TO HV SALA | | EP - TO HI SALA | |
| 2 | | | | | | | | | |
| 3 | 1 | 0.02732298 | -5.972677 | -1.4530213 | -7.4530213 | -2.2583553 | -8.2583553 | -2.105758 | -8.105 |
| 4 | 2 | 0.07800549 | -5.9219945 | -0.6423833 | -6.6423833 | -2.3280373 | -8.3280373 | -2.3104653 | -8.3104 |
| 5 | 3 | 0.07265778 | -5.9273422 | -0.5439144 | -6.5439144 | -2.3813968 | -8.3813968 | -2.3632913 | -8.3632 |
| 6 | 4 | 0.06423709 | -5.9357429 | -0.5155716 | -6.5155716 | -2.4268477 | -8.4268477 | -2.4060119 | -8.4060 |
| 7 | 5 | 0.06321489 | -5.9367851 | -0.5006569 | -6.5006569 | -2.462564 | -8.462564 | -2.4447834 | -8.4447 |
| 8 | 6 | 0.06474091 | -5.9352591 | -0.494006 | -6.494006 | -2.4914601 | -8.4914601 | -2.4821655 | -8.4821 |
| 9 | 7 | 0.14078061 | -5.8592194 | -0.3765706 | -6.3765706 | -2.4876106 | -8.4876106 | -2.4843124 | -8.4843 |
| 10 | 8 | -0.1039408 | -6.1039408 | -0.2130091 | -6.2130091 | -2.4373538 | -8.4373538 | -2.4096218 | -8.4096 |
| 11 | 9 | -0.2146617 | -6.2146617 | -0.4679724 | -6.4679724 | -2.3734211 | -8.3734211 | -2.316187 | -8.316 |
| 12 | 10 | -0.6268987 | -6.6268987 | -0.6478456 | -6.6478456 | -2.2659739 | -8.2659739 | -2.2045426 | -8.2045 |
| 13 | 11 | -0.7783125 | -6.7783125 | -0.9826781 | -6.9826781 | -2.0690238 | -8.0690238 | -1.6538367 | -7.6538 |
| 14 | 12 | -0.5058793 | -6.5058793 | -1.0574879 | -7.0574879 | -1.8717036 | -7.8717036 | -1.3172398 | -7.3172 |
| 15 | 13 | -0.2455052 | -6.2455052 | -0.9274879 | -6.9274879 | -1.7103117 | -7.7103117 | -1.1981498 | -7.1981 |
| 16 | 14 | -0.1166423 | -6.1166423 | -0.8883395 | -6.8883395 | -1.6315221 | -7.6315221 | -1.146342 | -7.146 |
| 17 | 15 | -0.0783995 | -6.0783995 | -0.8851283 | -6.8851283 | -1.570363 | -7.570363 | -1.1270923 | -7.1270 |
| 18 | 16 | -0.137364 | -6.137364 | -0.9514994 | -6.9514994 | -1.5921868 | -7.5921868 | -1.1509736 | -7.1509 |
| 19 | 17 | -0.293571 | -6.293571 | -1.1369291 | -7.1369291 | -1.6931413 | -7.6931413 | -1.2422536 | -7.2422 |
| 20 | 18 | -0.476184 | -6.476184 | -1.3476012 | -7.3476012 | -1.7984675 | -7.7984675 | -1.2644184 | -7.2644 |
| 21 | 19 | -0.6662729 | -6.6662729 | -1.5707882 | -7.5707882 | -1.738559 | -7.738559 | -1.3916874 | -7.3916 |
| 22 | 20 | -0.8730039 | -6.8730039 | -1.7548293 | -7.7548293 | -1.0627923 | -7.0627923 | -1.5016029 | -7.5016 |
| 23 | 21 | -1.0608346 | -7.0608346 | -1.9180158 | -7.9180158 | -1.1157544 | -7.1157544 | -1.5953501 | -7.5953 |
| 24 | 22 | -0.8593044 | -6.8593044 | -2.0518381 | -8.0518381 | -1.1527163 | -7.1527163 | -1.6746615 | -7.6746 |
| 25 | 23 | -0.503724 | -6.503724 | -2.1654903 | -8.1654903 | -1.2985953 | -7.2985953 | -1.4142572 | -7.4142 |
| 26 | 24 | -0.2073774 | -6.2073774 | -2.2709737 | -8.2709737 | -2.0407455 | -8.0407455 | -1.529943 | -7.5299 |
| 27 | | | 0.71 | | 1.00 | | 1.00 | | 1.00 |
| 28 | | | | | | | | | |
| 29 | | | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | | |

Figura 29: Folha de cálculo: Horas de desconforto (%)

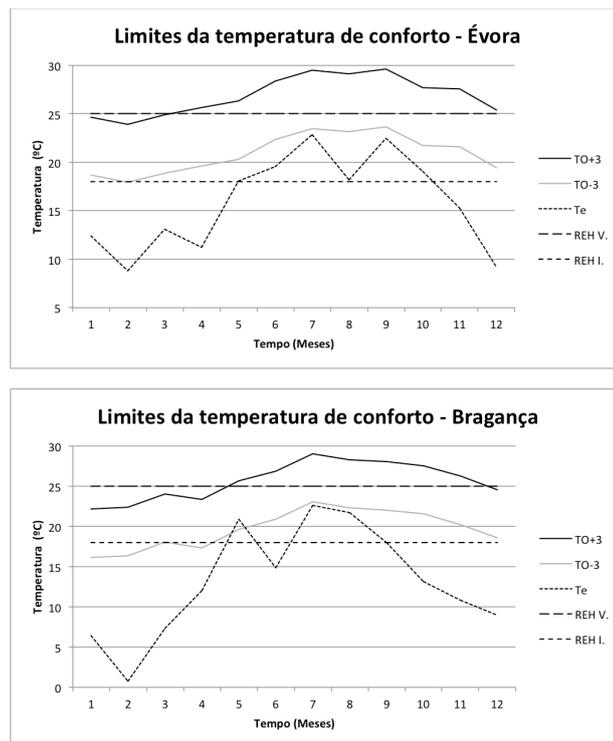
Para calcular os graus-hora (°C.h) de desconforto, multiplica-se os graus acima do limite superior de conforto - graus-hora de desconforto por calor - e abaixo do limite inferior de conforto - graus-hora de desconforto por frio - pela duração do período com desconforto. Para obter os valores de sobreaquecimento ou sobrefrefecimento (°C) dos períodos de desconforto, calcula-se a média do

número de graus acima ou abaixo do limite superior ou inferior do intervalo de conforto durante o período em que há desconforto, respetivamente.

5. Resultados

Neste capítulo apresenta-se a análise dos resultados obtidos para cada uma das situações descritas no Caso de Estudo deste trabalho.

Começou-se por analisar os limites das temperaturas interior de conforto adaptativas para cada um dos locais. As condições ambientes consideradas ideais para um ambiente térmico confortável, no contexto nacional[23], são de uma temperatura do ar de 18°C para a estação de aquecimento (Inverno) e de 25°C, com 50% de humidade relativa, para a estação de arrefecimento (Verão). Na Figura 30 é possível interpretar todas estas temperaturas limites de conforto e referência.



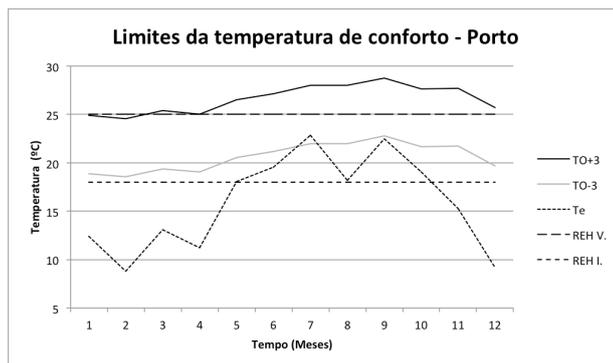


Figura 30: Limites das temperaturas de conforto para Évora, Bragança e Porto

Sublinha-se que as curvas relativas às temperaturas limite (de conforto) calculadas encontram-se, para todas as localidades, entre os valores de referência das temperaturas de ambientes interiores definidos pelo REH para a altura do Verão. Ou seja, em todos os meses da estação de arrefecimento, a temperatura de conforto é sempre superior aos 25°C assumidos pela regulamentação, pelo que seria possível verificar situações de conforto térmico para temperaturas interiores superiores à temperatura de projeto (em edifícios em regime de funcionamento livre) assumida pelo REH. Já no Inverno, por vezes o valor de referência do REH está entre a zona de conforto, como no caso de Bragança, mas no caso de Évora e Porto, a zona de conforto raramente inclui os 18°C[23].

Com vista a quantificar e caracterizar o conforto térmico é observada a distribuição do desconforto ao longo dos dias típicos de Verão e Inverno para Évora (9 de Maio e 2 de Abril), Bragança (29 de Junho e 25 de Dezembro) e Porto (21 de Julho e 17 de Março). Esta análise também é feita apenas para duas zonas térmicas, o Quarto 3 e a Sala de Estar, uma a norte e outra a sul, pois a soma ou a média das temperaturas das áreas térmicas poderiam dar noções erradas do que se quer analisar.

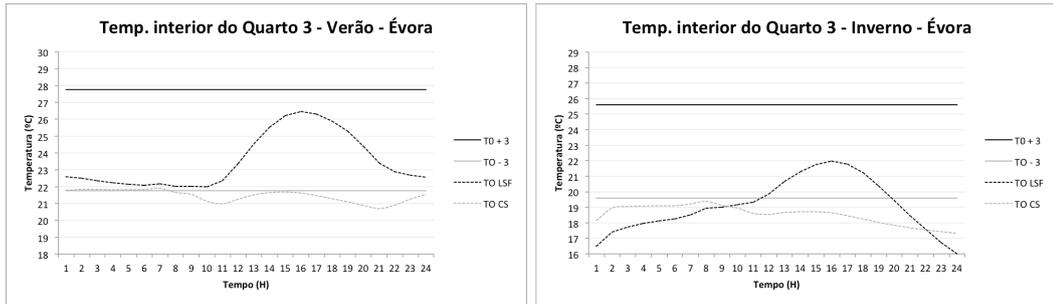


Figura 31: Temperatura interior do Quarto 3, Évora

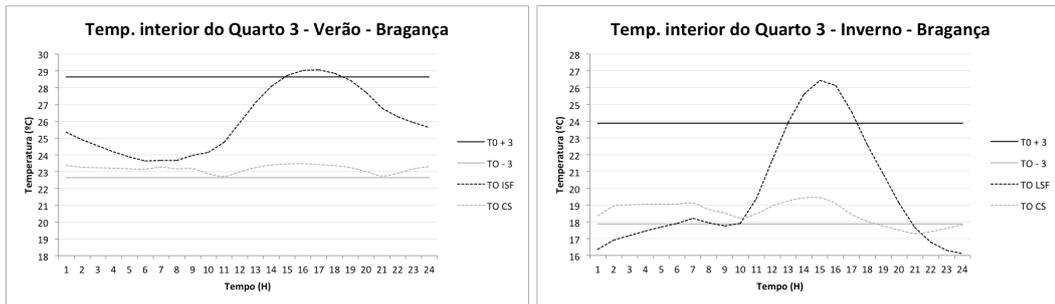


Figura 32: Temperatura interior do Quarto 3, Bragança

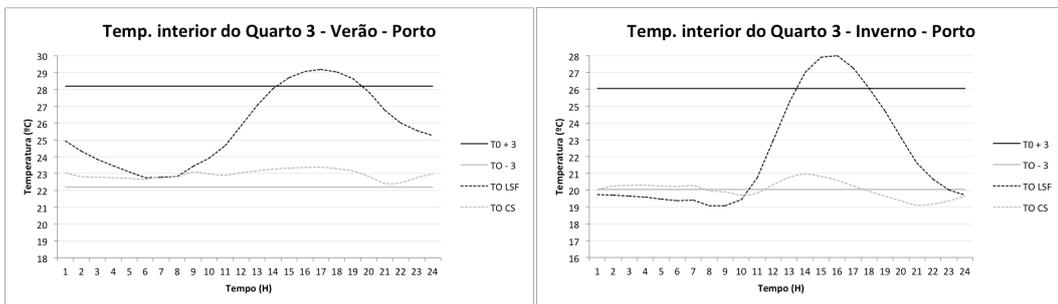


Figura 33: Temperatura interior do Quarto 3, Porto

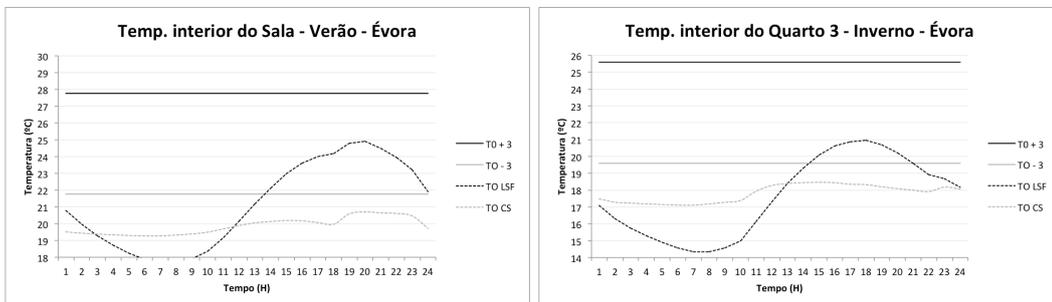


Figura 34: Temperatura interior da Sala, Évora

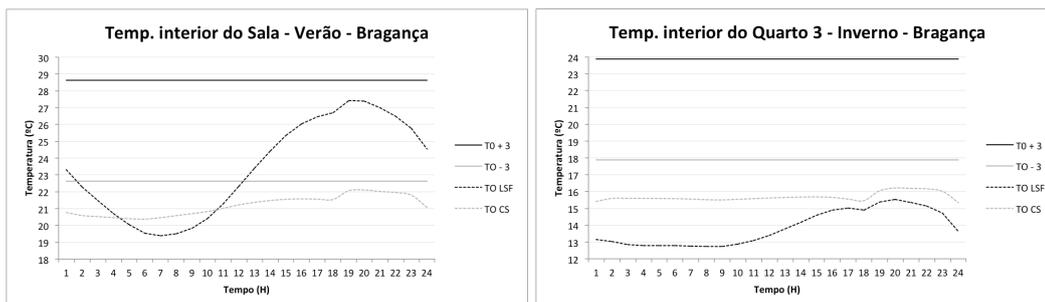


Figura 35: Temperatura interior da Sala, Bragança

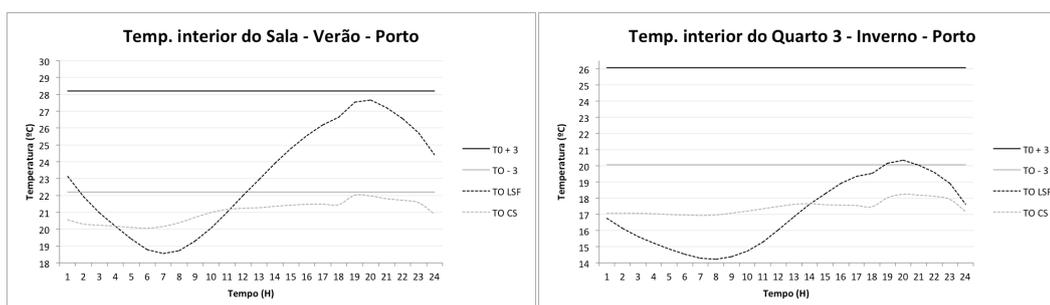


Figura 36: Temperatura interior da Sala, Porto

Para os dias seleccionados, a banda de conforto para Évora situa-se entre os 27.8°C e 21.8°C no Verão e os 25.6°C e 19.6°C no Inverno, enquanto que para Bragança se situa entre os 28.6°C e 22.6°C no Verão e os 23.8°C e 17.9°C no Inverno. A temperaturas da zona de conforto para o Porto situam-se entre os 28.2°C e 22.2°C no Verão e os 26°C e 20°C no Inverno.

Assim, é possível perceber que na SC, apenas a divisão do Quarto está confortável durante o Verão, excepto em Évora, que na Figura 31 verifica um período de desconforto apenas a partir das 8:00 até ao fim do dia. Na Sala confirma-se sempre desconforto térmico para Évora e Bragança (Figuras 34 e 35) durante ambas as dias de Verão e Inverno, o oposto do que acontece no Porto (Figura 36).

Na solução LSF, é possível perceber que, para todos os locais tanto no Quarto como na Sala e igualmente no Verão como no Inverno, há maior variação da temperatura interior, mas com um período de desconforto menor em relação à SC. Nesta solução apenas se verifica um conforto total no Quarto durante o Verão e em Évora, visível na Figura 31, e um desconforto contínuo ao longo de todo o dia na Sala durante o Inverno, para todas as localizações.

Em geral, quando existe um período de desconforto, este é comum a partir das 18:00, o que pode ser reflexo da ocupação e metabolismo dos ocupantes. No entanto, é perceptível uma maior variação da temperatura interior na solução LSF. Em ambas soluções é claro que a divisão do Quarto é a mais agradável, certamente pela sua localização a Sul.

No entanto, neste estudo ainda se observa a distribuição do desconforto ao longo dos dias através do cálculo das horas de desconforto, sobreaquecimento ou sobreaquecimento médios, ao longo desse dia, apresentando os resultados e a interpretação do comportamento do conforto térmico das soluções construtivas SC e LSF por zonas climáticas.

Quadro 10: Indicadores diários do período de desconforto para Évora

| Indicadores | Quarto | | | | Sala | | | |
|-----------------------|--------|------|-----|------|------|------|------|------|
| | SC | | LSF | | SC | | LSF | |
| | V | I | V | I | V | I | V | I |
| Horas (%) | 71 | 100 | 0 | 67 | 100 | 100 | 54 | 75 |
| Graus-Hora (°C.h) | 132 | 618 | 0 | 392 | 1097 | 1026 | 314 | 893 |
| Sobreaquecimento (°C) | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Sobreaquecimento (°C) | 0.46 | 1.07 | - | 1.53 | 1.90 | 1.78 | 2.77 | 3.64 |

Quadro 11: Indicadores diários do período de desconforto para Bragança

| Indicadores | Quarto | | | | Sala | | | |
|-----------------------|--------|------|------|------|------|------|------|------|
| | SC | | LSF | | SC | | LSF | |
| | V | I | V | I | V | I | V | I |
| Horas (%) | 0 | 25 | 17 | 63 | 100 | 100 | 50 | 100 |
| Graus-Hora (°C.h) | 0 | 11 | 5 | 236 | 843 | 1266 | 236 | 2326 |
| Sobreaquecimento (°C) | - | - | 0.29 | 1.44 | - | - | - | - |
| Sobreaquecimento (°C) | - | 0.30 | - | 0.85 | 1.46 | 2.20 | 2.02 | 4.04 |

Quadro 12: Indicadores diários do período de desconforto para Porto

| Indicadores | Quarto | | | | Sala | | | |
|------------------------|--------|------|------|------|------|---|------|------|
| | SC | | LSF | | SC | | LSF | |
| | V | I | V | I | V | I | V | I |
| Horas (%) | 0 | 50 | 21 | 71 | 0 | 0 | 46 | 92 |
| Graus-Hora (°C.h) | 0 | 51 | 18 | 211 | 0 | 0 | 121 | 1592 |
| Sobreaquecimento (°C) | - | - | 0.74 | 1.21 | - | - | 0.92 | - |
| Sobrarrefecimento (°C) | - | 0.41 | - | 0.53 | - | - | 1.10 | 3.62 |

Assim, no Quadro 10 é possível verificar que para Évora o desconforto é muito grande, seja qual for a construção e o dia. No Quadro 11 apura-se que para Bragança o desconforto é muito maior na Sala que no Quarto, que por sua vez está situado a Sul, independentemente da construção e do dia. No Quadro 12 identifica-se no Porto um período de conforto aceitável em ambas as divisões, para ambos os dias para a SC, ao contrário da solução LSF que provoca sempre desconforto. Aqui também é possível apurar que a maior parte do desconforto é por sobrarrefecimento, tendendo a sobreaquecer consoante atenua e área climática de Verão. Os valores de Graus-Hora permite perceber que apesar da grande quantidade de horas de desconforto, esta pode não ser tão crítica, pela ténue diferença de graus em cada hora. Por exemplo, no Quadro 10, em Évora, no Quarto, a SC proporciona desconforto no Verão em mais 4% do que a LSF no Inverno, mas metade da diferença de graus da temperatura ambiente para a temperatura de conforto. Isto quer dizer que, para compensar uma grande variação de temperatura pode ser necessário uma adaptação maior, ou um maior consumo de energia.

Entretanto, acrescenta-se que na simulação dinâmica também podem ser obtidos os valores do coeficiente de transmissão térmica (U) das soluções simuladas. Nestes dados também se encontram os valores de condutividade térmica de cada material, necessário para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica (U) de cada elemento. O coeficiente permite avaliar o desempenho das transmissões de calor em cada elemento, sendo que, quanto maior for o seu valor mais rápidas são as trocas de energia térmica e que, quanto menor for o seu valor melhor o nível de

isolamento. Assim, um conhecimento deste valor também permite desenhar e testar um projeto com viabilidade para o objetivo. Neste caso verifica-se que todos os elementos das soluções construtivas SC e LSF cumprem os valores máximos e de referência do coeficiente de transmissão térmica da envolvente opaca definidos pelo atual REH para todas as zonas climáticas[23].

A localização do edifício determina o clima ao qual está sujeito, sendo que as variáveis climáticas que mais influenciam os edifícios em termos de transferência de calor são a temperatura do ar exterior e a radiação solar. A temperatura do ar é a variável indutora das trocas de calor por condução através da envolvente do edifício. Já a radiação solar pode constituir uma fonte de calor muito importante para o aquecimento passivo no Inverno ou a evitar no Verão.

Neste estudo foi estudado o comportamento do conforto térmico no interior de um caso de estudo selecionado (alojamento T3), onde foram aplicadas as soluções construtivas SC e LSF, que apresentaram desempenhos diferentes consoante os locais - Évora, Bragança e Porto. A Solução Convencional (SC) é caracterizada por utilizar tijolos elementos verticais, e a solução *Light Steel Framing* (LSF) por utilizar perfis aço nas estruturas. Para além das paredes, a SC tem uma solução de cobertura diferente da LSF. Os locais inserem-se em zonas climáticas totalmente diferentes, consideradas pelo REH[23]: Évora na I1 V3, Bragança na I3 V2 e Porto na I2 e V1. Para a análise do conforto térmico foi considerada a abordagem adaptativa de interpretação do conforto térmico que é um tipo de abordagem empírica baseada em estudos de campo (condições reais não controladas), nos quais são registadas as condições ambientes (obtidas por medições). Para isto, foi obtida a temperatura operativa do caso de estudo através do programa EnergyPlus, e calculados os respetivos limites de conforto térmico. De seguida foi analisado o tempo, a quantidade (Graus-Hora) e a diferença de graus do período em desconforto.

Em relação aos resultados obtidos, em Évora, em geral a solução SC tem claramente um maior período de desconforto, que também se reflete nos Graus-Hora desse período, mesmo que toda esta diferença de temperatura seja menor que o mínimo do conforto considerado para aquele local. Por isto, a solução LSF seria a mais indicada para aplicar em Évora, embora, sempre que há desconforto seja

mais de metade do dia, quer no Verão como no Inverno, o que não a considera uma boa solução construtiva em geral, para o local.

Em Bragança, a zona da Sala nunca consegue estar totalmente com temperaturas aceitáveis, apesar de se considerar a uma temperatura confortável durante metade do dia no Verão, com a solução LSF. No entanto, para o Quarto 3, apenas a solução SC consegue manter um período de conforto total no Verão e mínimo no Inverno, ao contrário da LSF, que, por comparação, mantém um alto período de desconforto, com um número elevado de Graus-Hora e com diferenças de temperatura tanto acima como abaixo dos limites de conforto. Por isto, o melhor seria procurar outras soluções construtivas que se pudessem adaptar mais ao local e manter uma temperatura interior mais uniforme em relação ao conforto térmico no Verão e Inverno.

No Porto, a SC consegue ser facilmente identificada como a melhor solução para este local, pois não tem qualquer desconforto na Sala durante ambos os períodos, e o desconforto sentido no Quarto durante o Inverno, apesar de ser durante metade do dia, é de uma variação mínima da temperatura.

Sendo assim, pode-se concluir que a estrutura de LSF é aceitável para um clima muito exigente no verão, mas no entanto não consegue responder às temperaturas de uma zona II. Já a solução SC adequa-se a um clima moderado no Verão e pouco exigente no Verão, pelo que seria necessário encontrar outras soluções que também possam corresponder às necessidades de um clima severo no Inverno e moderado no Verão. No entanto, as conclusões apresentadas são baseadas apenas em dois dias, mesmo que representativos, mas em casos reais pode ser adequado e mais rigoroso fazer um estudo para mais dias. Ainda assim, julga-se que esta investigação possa servir de fundamento para muitos outros estudos, por permitir estudar a utilização do método e resultados para comparar mais sistemas construtivos ou localidades de interesse específicas; analisar a influência da geometria no desempenho térmico do edifício; ou até para fazer um estudo do conforto térmico adaptativo de qualquer edifício existente como caso de estudo. Também se considera relevante a eventual comparação dos consumos (ou horas de conforto/desconforto) utilizados no método adaptativo com os simulados na metodologia prevista no REH.

Bibliografia

- [1] Abrantes J. Implicações do Conforto Térmico no Consumo Energético – Uma Hipótese de Modelo Adaptativo Aplicada ao Verão. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, FCT/UNL. Lisboa 2012
- [2] ADENE. Estatística Sistema de Certificação Energética (Março 2013). Disponível em: http://www2.adene.pt/pt-Pt/subportais/SCE/Informacao/Publicoemgeral/Documents/relatsce_1303.pdf.
- [3] Aktas G. Design Parameters and Initiatives for Ecological and Green Design in Interior Architecture, *WSEAS Transactions on Environment and Development*, Volume 9, No.2, 2013, 57-67
- [4] Almeida H. Análise do Conforto Térmico de Edifícios Utilizando as Abordagens Analítica e Adaptativa. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, IST. Lisboa 2010
- [5] ASHRAE: Handbook of Fundamentals. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta 1997
- [6] Baker N, Standeven M. Thermal comfort for free-running buildings. *Energy and Buildings*, 1996, 175-182
- [7] Chvatal K M. Relação entre o Nível de Isolamento Térmico da Envolvente dos Edifícios e o Potencial de Sobreaquecimento no Verão Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto 2006
- [8] Coelho D. Avaliação do Conforto Térmico em salas de aula. Tese de Mestrado ESTGV, Instituto Politécnico de Viseu. 2014. Disponível em: <http://repositorio.ipv.pt/bitstream/10400.19/2522/1/Tese%20elaborada%20por%20Daniel%20Coelho>
- [9] ENERGYPLUS v 8.2.0 software. U.S. Department of Energy. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>.
- [10] ENERGYPLUS Weather Data. U.S. Department of Energy. Disponível em: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=PRT/cname=Portugal.

- [11]EN 15251:2007. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics
- [12]Oliveira F, Mendonça P, Couto J P, Camões A, Silva E. Comparative environmental and economic analysis of South European building constructive systems. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, Volume 10, 2014, 509-528
- [13]Gonçalves H, Graça J. Conceitos Bio climáticos para os Edifícios em Portugal. DGGE, 2004
- [14]INE. Estatísticas da Construção e Habitação 2014. INE. Edição 2015. Disponível em:
https://www.ine.pt/xportal/xmain?Xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes&publicacao=pub_boui=224786561&publicacoesmodo=2
- [15]INE. Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010. INE, Edição 2011
- [16]INNOVA. Thermal Comfort. Dinamarca
- [17]Santos P, Matias L. ITE 50 – Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios. LNEC. Lisboa, 2006
- [18] McCartney K J, Nicol F. Developing an adaptive control algorithm for Europe. *Energy and Buildings* 34, 2002, 623-635
- [19]Mendonça P. Habitar sob uma segunda pele : estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho. Guimarães 2005
- [20]Nicol F, Humphreys M. Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN 15251. *Building and Environment* 45, 2010, 11-17. Disponível em:
http://www.researchgate.net/publication/245145577_Derivation_of_the_adaptive_equations_for_thermal_comfort_in_free-running_buildings_in_European_standard_EN15251

- [21] Nicol F, Pagliano L. Allowing for Thermal Comfort in Free-Running Buildings in the New European Standard EN 15251. Disponível em: http://www.new-learn.info/about/doc/nicol_free_running_2007.pdf
- [22] RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios. Decreto-Lei 80/2006 de 4 de Abril, Portugal. Disponível em: <http://www.rccte.com/>
- [23] REH - Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação. Decreto-Lei 118/2013 de 20 de Agosto, Portugal.
- [24] RGEU - Regulamento Geral das Edificações Urbanas. Decreto-Lei no 38382 de 7 de Agosto 1951, Portugal. Disponível em: <http://www.gaiurb.pt/lex/RGEU.pdf>
- [25] Silva P. Análise do comportamento térmico de construções não convencionais através de simulação em visualdoe. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho. Guimarães, 2006.
- [26] Teixeira A. Impacto da Norma de conforto Europeia EN 15251 na certificação energética em edifícios de serviços. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009. Disponível em: <http://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58967/1/000137740.pdf>
- [27] UK NCM - National calculation methodology – occupancy pattern for fractions. Disponível em: <http://www.ncm.bre.co.uk/>
- [28] Wikipédia - Relatório Brundtland [consult. 07/2015]. Disponível em: http://pt.wikipedia.org/wiki/Relat%C3%B3rio_Brundtland