



• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Simulação do comportamento térmico e energético de pequenos edifícios com recurso a uma folha de cálculo em Excel

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Autor

Diogo Miguel Vicente Jardim Santos Lopes

Orientador

Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo

Júri

Presidente Professor Doutor António Rui de Almeida Figueiredo
Professor Associado com Agregação da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor José Joaquim da Costa
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Setembro, 2013

“Não importa qual o seu esforço ao longo do caminho, o que importa é que
tenha algo no final.”

(Michael Jordan)

Aos meus Pais.

Agradecimentos

Desde que me lembro sempre pude contar com muitas pessoas, as quais me apoiaram e me disseram para continuar a lutar por aquilo que sempre quis, por isto não podia deixar de agradecer as essas mesmas pessoas no final da minha formação académica e, em especial, na realização deste trabalho. Dito isto, agradeço a todos os meus familiares e amigos que sempre me motivaram para seguir em frente, me transmitiram confiança e se mostraram solidários para me ajudar.

Um obrigado especial aos meus pais e irmã, por me proporcionarem a realização de um curso superior, transmitirem coragem, carinho e ajuda em tudo o que necessitei e que sem os quais não seria possível chegar onde cheguei.

À Isabel Castro um muito obrigado, por todo o apoio, força e disponibilidade demonstrados aquando da realização deste trabalho.

Ao meu orientador Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo, pelos conhecimentos que me transmitiu e, principalmente, pela sua enorme disponibilidade e ajuda demonstradas durante a realização desta dissertação de mestrado. Foi agradável trabalhar com o meu orientador, pois, devido á sua maneira de ser, fomentou um bom trabalho em equipa.

Resumo

Este trabalho relata o desenvolvimento de uma ferramenta de simulação do comportamento térmico e energético de pequenos edifícios com recurso a uma folha de cálculo em Excel. O *software* foi implementado de modo a que a sua utilização seja fácil e intuitiva e, ao mesmo tempo, precisa. Também não foi negligenciada a facilidade de interpretação e a utilidade dos resultados que o mesmo permite estimar.

A metodologia que serve de base ao cálculo assenta no modelo dinâmico horário monozona conhecido como 5R1C por, em teoria, assentar num circuito reo-elétrico constituído por cinco resistências e uma capacitância. A versão utilizada alicerça-se na inicialmente descrita na norma ISO 13790 (2006) e posteriormente melhorada por Raimundo (2007, 2008). Trata-se de uma das metodologias de cálculo admitidas no âmbito das diretivas europeias EPBD (2002, 2010) relativas ao desempenho energético dos edifícios (Energy Performance of Buildings Directives) e cuja utilização é permitida pela atual e futura legislação portuguesa (SCE, 2006; SCE-DL, 2013) no âmbito dos edifícios de habitação e pequenos edifícios de comércio e de serviços.

Embora o modelo implementado seja monozona, o mesmo pode ser aplicado a edifícios multizona, desde que se simule uma zona de cada vez e, no final, seja efetuada uma soma apropriada dos resultados obtidos.

Testou-se a folha de cálculo desenvolvida através da sua aplicação a três edifícios distintos. Mais especificamente, foi simulado o comportamento térmico e energético de um edifício de habitação unifamiliar, de um piso de um hotel de três estrelas e de uma escola primária e creche.

Pensa-se que os objetivos inicialmente propostos foram alcançados, visto que se desenvolveu uma folha de cálculo para simular o comportamento térmico e energético de edifícios, a qual é versátil, intuitiva, de facilidade de utilização e expedita, sendo resultados de fácil interpretação. Esta folha de cálculo é uma ferramenta muito útil para os projetistas de sistemas de AVAC e também para a certificação energética de edifícios.

Palavras-chave: Cálculo dinâmico horário monozona, RSECE, certificação energética de edifícios, sistemas de AVAC.

Abstract

This work describes the development of a tool for the thermal and energy simulation of small buildings using an Excel spreadsheet. The software was implemented so that its use is easy and intuitive and at the same time accurate. The ease of interpretation and the usefulness of its results were also accounted for.

The methodology supporting the calculation is based on the dynamic, hourly and “one-zone” model known as 5R1C because, in theory, it is based on a reo -electric circuit that’s consists of five resistors and one capacitance. The version used stent from the one initially described in ISO 13790 (2006) and later improved by Raimundo (2007, 2008). This is one of the calculation methodologies permitted in the scope of the European directives EPBD (2002 , 2010) on the energy performance of buildings (Energy Performance of Buildings Directives) and whose use is also permitted by existing and future legislation Portuguese (SCE , 2006; SCE- DL , 2013) in the context of residential buildings and small buildings for trade and services .

Although the software implemented is of the “one-zone”, the same can be applied to multi-zone buildings provided that each zone is simulated in turn and at the end of the appropriate sum results is conducted.

The spreadsheet developed was tested through its application to three distinct buildings. More specifically the thermal behavior and performance of a single-family dwelling, a floor of a three star hotel and a primary school were simulated.

It can be concluded that the initially proposed objectives were achieved, since a spreadsheet was developed to simulate the thermal and energy performance of buildings, which is versatile, intuitive and easy to use, providing results that are easy to interpret. It is believed that this work will be helpful to designers of HVAC systems and for the process of energy certification of buildings.

Keywords Dynamic calculation, hourly, one-zone model, RSECE, energy certification of buildings, AVAC systems.

Índice

Índice de Figuras	vi
Simbologia e Siglas	viii
Simbologia.....	viii
Siglas	viii
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Estado da arte e revisão bibliográfica	3
1.3. Objetivos.....	4
2. Folha de Cálculo <i>SEnergED</i>	5
2.1. Descrição geral.....	5
2.2. Modelo de cálculo.....	5
2.3. Estrutura da folha de cálculo <i>SEnergEd</i>	9
3. Utilização da Folha de Cálculo <i>SEnergED</i>	11
3.1. Dados gerais do edifício	11
3.1.1. Separador <i>Edifício</i>	11
3.1.2. Separador <i>Clima</i>	11
3.2. Dados da componente passiva	12
3.2.1. Separador <i>Envolvente exterior opaca vertical</i>	12
3.2.2. Separador <i>Envolvente exterior opaca horizontal</i>	13
3.2.3. Separador <i>Envolvente interior opaca</i>	15
3.2.4. Separador <i>Pontes térmicas lineares interiores</i>	16
3.2.5. Separador <i>Elementos interiores sem requisitos</i>	16
3.2.6. Separador <i>Elementos em contato com o solo</i>	17
3.2.7. Separador <i>Pontes térmicas lineares</i>	17
3.2.8. Separador <i>Envidraçados exteriores</i>	18
3.3. Dados da componente ativa	20
3.3.1. Separador <i>Climatização</i>	20
3.3.2. Separador <i>Utilização</i>	21
3.3.3. Separador <i>Ventilação</i>	22
3.4. Saída de resultados.....	23
3.4.1. Separador <i>Resultados</i>	23
3.4.2. Separador <i>Gráficos</i>	24
4. Exemplos de Aplicação da Folha de Cálculo <i>SEnergED</i>	26
4.1. Edifício de habitação unifamiliar.....	26
4.2. Piso de quartos de um hotel de 3 estrelas	31
4.3. Edifício escolar	36
5. Conclusões.....	41
6. Referências Bibliográficas.....	43

APÊNDICE A	45
1 Introdução	46
2 Aspectos gerais	46
3 Esquema de princípio	47
4 Características geométricas	48
5 Características associadas á inércia	49
6 Representação esquemática do modelo	49
7 Fluxos de calor envolvidos	50
7.1 Transmissão de calor das superfícies da envolvente para o ar interior	50
7.2 Transmissão de calor da massa térmica para as superfícies da envolvente ..	50
7.3 Transferência de energia térmica associada à insuflação de ar novo	50
7.4 Transmissão de calor pelos vãos envidraçados	50
7.5 Transmissão de calor pelos elementos opacos da envolvente	50
7.6 Ganhos radiativos através da envolvente opaca	51
7.7 Ganhos solares através dos vãos envidraçados	52
7.8 Ganhos internos	52
7.9 Ganhos de calor latente	52
8 Repartição dos fluxos de calor pelos nodos do modelo	53
9 Temperaturas nos nodos do modelo	53
9.1 Parâmetros característicos	53
9.2 Temperatura da massa térmica	53
9.3 Temperatura média das superfícies interiores da envolvente	53
9.4 Temperatura média do ar no interior do espaço útil	54
10 Procedimento iterativo de cálculo	54
10.1 Cálculo das temperaturas e da potência útil dos sistemas de climatização	54
10.2 Cálculo dos consumos horários e totais de energia	55
10.3 Cálculo dos consumos anuais de energia primária	56
11 Referências	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Princípio de funcionamento modelo 5R1C [Raimundo, 2008].....	6
Figura 2. Representação esquemática do modelo 5R1C [Raimundo, 2008].....	7
Figura 3. Separador <i>Edifício</i>	11
Figura 4. Separador <i>Clima</i>	12
Figura 5. Separador <i>Envolvente exterior opaca vertical</i>	14
Figura 6. Separador <i>Envolvente exterior opaca horizontal</i>	14
Figura 7. Separador <i>Envolvente interior opaca</i>	15
Figura 8. Separador <i>Pontes térmicas lineares interiores</i>	16
Figura 9. Separador <i>Elementos interiores sem requisitos</i>	16
Figura 10. Separador <i>Elementos em contato com o solo</i>	17
Figura 11. Separador <i>Pontes térmicas lineares</i>	18
Figura 12. Separador <i>Envidraçados exteriores</i>	19
Figura 13. Separador <i>Climatização</i> referente ao aquecimento.....	20
Figura 14. Separador <i>Climatização</i> referente ao arrefecimento.....	20
Figura 15. Separador <i>Utilização</i> (perfil de utilização).....	21
Figura 16. Separador <i>Ventilação</i> (caracterização).....	22
Figura 17. Tabela representativa do separador <i>Resultados</i>	24
Figura 18. Separador <i>Gráficos</i> (gráfico temperaturas e potências).....	25
Figura 19. Alçado principal (voltado a NW) da moradia unifamiliar.....	27
Figura 20. Alçado lateral esquerdo (voltado a NE) da moradia unifamiliar.....	27
Figura 21. Planta da moradia unifamiliar (fachada principal para baixo).....	28
Figura 22. Edifício de habitação – previsão das necessidades e dos consumos anuais e das potências térmicas máximas requeridas para o sistema de AVAC.....	29
Figura 23. Edifício de habitação – valores horários das potências térmicas úteis, da temperatura do ar exterior e da temperatura do ar interior.....	30
Figura 24. Alçado principal (voltado a SW) do hotel de 3 estrelas.....	32
Figura 25. Alçado lateral direito (voltado a SE) do hotel de 3 estrelas.....	32
Figura 26. Planta do 2º piso (piso de quartos) do hotel de 3 estrelas (fachada principal para baixo).....	33
Figura 27. Piso de hotel – previsão das necessidades e dos consumos anuais e das potências térmicas máximas requeridas para o sistema de AVAC.....	34

Figura 28. Piso de hotel – valores horários das potências térmicas úteis, da temperatura do ar exterior e da temperatura do ar interior.....	35
Figura 29. Aspeto geral do edifício escolar, com a fachada principal voltada a Sul.....	36
Figura 30. Planta do Rés-do-Chão do edifício escolar (fachada principal para a direita)...	37
Figura 31. Planta do Piso 1 do edifício escolar (fachada principal para a direita).....	37
Figura 32. Funcionamento de edifício escolar durante o ano.....	38
Figura 33. Edifício escolar – previsão das necessidades e dos consumos anuais e das potências térmicas máximas requeridas para o sistema de AVAC.	39
Figura 34. Edifício escolar – valores horários das potências térmicas úteis, da temperatura do ar exterior e da temperatura do ar interior.....	40

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

A – Área de transferência de calor [m^2]

H – Condutâncias térmicas H [em $W/^\circ C$]

HR – Humidade relativa do ar [%]

P_v – Pressão parcial de vapor [N/m^2]

P_{vs} – Pressão parcial de vapor saturado [N/m^2]

Prf_v – Perfil de utilização da ventilação nesta hora [%]

P_t – Pressão atmosférica total [N/m^2]

Q_{lat-v} – Potência latente [W]

R – Resistência térmica [$m^2 \cdot ^\circ C/W$]

T – Temperatura do ar [$^\circ C$]

V_{AN} – Caudal de ar novo insuflado no espaço [m^3/h]

V_1 - Caudal de ar novo insuflado pelo sistema mecânico [m^3/h]

V_2 – Caudal de ar em ventilação natural [m^3/h]

W – Humidade absoluta do ar [gvapor/kgar seco]

Q_v – Transferência de energia térmica associada ao caudal de ar novo [W]

f_{fc} – Fator de *free-cooling*

f_{ocup} – Fator de ocupação

ε_v – Eficiência dos dispositivos de recuperação de calor do ar de rejeição

τ – Valor da temperatura adimensional do local não aquecido.

Siglas

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

SCE – Sistema Nacional de Certificação Energética e Qualidade do Ar Interior

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

EPDB – Energy Performance of Buildings Directive

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Os principais consumidores de energia nos edifícios de serviços são os equipamentos instalados, a iluminação e o AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado). O valor deste último depende da arquitetura e das soluções construtivas do edifício, da sua utilização e das cargas térmicas indesejáveis, as quais podem ter origem nos ocupantes, na iluminação, nos equipamentos e nas trocas de calor e de massa através da envolvente.

De modo a cumprir as exigências da nova Diretiva europeia Energy Performance of Buildings Directive - recast (EPBD, 2010), o Estado Português já publicou parte da legislação que vem reformular os atuais regulamentos do Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE, 2006). O novo SCE, designado agora apenas como “Sistema Nacional de Certificação Energética dos Edifícios” entra em vigor a 01 de Dezembro de 2013. Atualmente já se encontram publicados os dois diplomas principais, o Decreto-Lei 118/2013 (SCE-DL, 2013) e a Lei 58/2013 (SCE-L, 2013). O Decreto-Lei 118/2013 (SCE-DL, 2013) aprova o novo SCE, transpondo parcialmente para a ordem jurídica nacional a Diretiva EPBD de 2010, define que, independentemente da potência térmica nominal, os edifícios: (i) de habitação passam a estar abrangidos apenas pelo REH (Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação); e (ii) de serviços passam a estar abrangidos apenas pelo RECS (Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços). Em teoria, o REH vem substituir o anterior “Regulamento das características de comportamento térmico dos edifícios” (RCCTE, 2006) e o RECS vem substituir o anterior “Regulamento dos sistemas energéticos de climatização em edifícios” (RSECE, 2006), mas existem diferenças substanciais entre os novos e os anteriores regulamentos do SCE. A Lei 58/2013 (SCE-L, 2013) estabelece os requisitos de acesso e de exercício da atividade no âmbito do SCE dos: (i) Peritos qualificados para a certificação energética (PQ-I e PQ-II); e dos (ii) Técnicos de instalação e manutenção de edifícios e sistemas (TIM-II e TIM-III).

No entanto para o novo SCE ficar estabelecido e pronto a ser aplicado ainda falta a publicação de vários diplomas, uns do tipo Portaria e outros do tipo Despacho.

Mesmo não estando ainda completa a publicação de todos os diplomas que vão constituir o novo SCE já são óbvias as alterações significativas nos métodos de verificação do desempenho energético dos edifícios, o que vai exigir o recurso a novas ferramentas de cálculo. A entidade gestora do SCE, a ADENE – Agência para a energia, tem em preparação uma folha de cálculo para verificação do REH, a aplicar aos edifícios de habitação. A conformidade com o RECS dos GECS (grandes edifícios de comércio e serviços) terá de ser obrigatoriamente verificada recorrendo a programas de simulação dinâmica multizona, os quais têm de estar acreditados segundo a norma ASHRAE 140 (2004). A conformidade com o RECS dos PECS (pequenos edifícios de comércio e serviços) pode ser verificada recorrendo aos programas de simulação dinâmica multizona ou a programas de simulação dinâmica monozona. No entanto, os programas multizona exigem um esforço de cálculo exagerado tendo em conta a realidade dos PECS. Surge assim a necessidade de uma ferramenta de simulação dinâmica monozona, que seja expedita e fácil de utilizar, a qual ainda não existe nenhuma disponível ou em preparação.

O trabalho realizado nesta tese consistiu no desenvolvimento de um programa em Excel para a simulação do comportamento térmico e energéticos de pequenos edifícios, tendo em vista a obtenção dos seus consumos energéticos bem como as potências necessárias para aquecimento e arrefecimento. Este tema surgiu devido, à pouca oferta deste tipo de programas fáceis de utilizar e intuitivos. Este programa foi desenvolvido tendo por base o modelo dinâmico horário monozona 5R1C, que assenta num circuito reo-elétrico constituído por cinco resistências e uma capacitância. A versão utilizada alicerça-se na inicialmente descrita na norma ISO 13790 (2006) e posteriormente melhorada por Raimundo (2007, 2008). Trata-se de uma das metodologias de cálculo admitidas no âmbito das diretivas europeias EPBD (2002, 2010) relativas ao desempenho energético dos edifícios (*Energy Performance of Buildings Directive*) e cuja utilização é permitida pela atual e futura legislação portuguesa (SCE, 2006; SCE-DL, 2013) no âmbito dos edifícios de habitação e pequenos edifícios de comércio e de serviços.

Este tipo de programas cada vez faz mais sentido, devido ao facto de todos os tipos de energias utilizadas atualmente pela sociedade estarem cada vez mais caras. Com o recurso a este tipo de programas podemos tornar os edifícios (casas, serviços públicos,

empresas e etc.) cada vez mais eficientes e logo menos dispendiosos para as pessoas ou para as entidades que as gerem.

Esta tese encontra-se dividida em 5 capítulos. No primeiro é realizada a introdução, onde se apresenta o tema, efetua-se a revisão bibliográfica e demonstra-se os objetivos a alcançar. No segundo capítulo descreve-se o programa e o modelo de cálculo do mesmo, bem como a sua estruturação. No terceiro capítulo procede-se à utilização do programa, ou seja, como se deve utilizar o mesmo. No quarto capítulo serão apresentados três exemplos realizados com recurso ao programa desenvolvido. Por último, no quinto capítulo irão ser apresentadas as conclusões alcançadas com a realização deste trabalho.

1.2. Estado da arte e revisão bibliográfica

Desde 2002, ano em que saiu a Diretiva nº 2002/91/CE –“Energy Performance of Buildings Directive” do Parlamento Europeu e do Conselho (EPBD, 2002), que Portugal como membro da união europeia tem que cumprir com esta legislação, que impõe metodologias para o cálculo da eficiência energética dos edifícios. Devido a isto Portugal teve que implementar um plano de certificação energética para que todos os portugueses tenham a informação necessária sobre a qualidade térmica dos edifícios, como por exemplo as potências e os consumos de energias.

Em 2006 foi realizada a transição para ordem jurídica Portuguesa da Diretiva EPBD (2002), com a publicação em diário da república de três diplomas: um que aprova o SCE - Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE, 2006), outro que aprova o RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE, 2006) e por último o RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização nos Edifícios (RSECE, 2006). A entidade à qual compete a implementação e a fiscalização destes diplomas acima referidos é a ADENE (Agência para a Energia), que deve garantir o bom funcionamento do sistema. Nesta legislação estão abrangidos todos os novos edifícios, tal como os existentes sujeitos a grandes reabilitações, os existentes de serviços, os sujeitos a auditorias periódicas conforme dita o RSECE e os existentes para habitação ou serviços, aquando da realização de contratos de venda e de aluguer (Raimundo, 2007).

O aparecimento destas medidas surgem pelo facto de no passado recente (últimos vinte anos) darem-se emissões desnecessárias de CO₂, nomeadamente devido ao sobredimensionamento dos equipamentos utilizados. Outro aspeto importante era a má qualidade do ar ambiente no interior dos edifícios. Os principais objetivos da atual legislação do SCE (SCE, 2006; RCCTE, 2006; RSECE, 2006) são melhorar a eficiência energética de todos os consumos dos edifícios, a introdução de regras tendo em conta a eficiência dos equipamentos de climatização, tendo em vista um bom desempenho energético e uma boa qualidade do ar interior. Outra exigência foi a introdução de condições de conforto térmico e de higiene. Por último, um maior controlo em termos de manutenção dos sistemas bem como da eficiência energética e da qualidade do ar interior.

Quer o sistema de certificação energética dos edifícios atual (SCE, 2006; RCCTE, 2006; RSECE, 2006) quer o que vai entrar em vigor em Dezembro de 2013 (SCE-DL, 2013; SCE-L, 2013) têm como objetivos reduzir os consumos de energia, fornecer ao utilizador uma boa qualidade do ar interior e um bom conforto térmico. Para que isso aconteça apresentam alguns critérios, tais como limites ao consumo de energia dos grandes edifícios de serviços, limites de consumo de energia para todos os edifícios que venham a possuir sistemas de climatização abrangidos, bem como as potências máximas dos sistemas a instalar quer o edifício seja novo ou existente, entre outros requisitos.

1.3. Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo a implementação de um Software para a verificação do comportamento térmico e energético dos pequenos edifícios de comércio e de serviços. O programa será desenvolvido tendo por base o modelo dinâmico horário monozona 5R1C, tendo como base o Excel. Assim pretende-se contribuir para o aparecimento de um novo *software* de simulação energética de edifícios de um uso amigável para os utilizadores e com uma introdução de dados explícita e simples, para que possibilite aos utilizadores, em tempo útil, a realização dos cálculos necessários para a certificação energética dos edifícios e ajudar em possíveis melhoramentos que possam ser realizados aos mesmos edifícios para que estes se tornem mais eficientes, logo mais económicos e, essencialmente, mais amigos do ambiente.

2. FOLHA DE CÁLCULO *SEnergED*

2.1. Descrição geral

A folha de cálculo *SEnergEd* consiste num programa desenvolvido em Excel tendo por base o modelo dinâmico horário monozona 5R1C (ISO 13790, 2006; Raimundo, 2008). Através deste programa pretende-se que o utilizador consiga saber as potências de arrefecimento e de aquecimento necessárias para cada edifício (pequenos edifícios de comércio ou de serviços ou edifícios residenciais), assim como os consumos energéticos anuais dos mesmos, para que este possa proceder ou não a melhorias no edifício se assim o pretender ou para verificar a conformidade destes edifícios com os regulamentos do SCE. O programa foi desenvolvido tendo sempre em mente que o mesmo tem de ser suficientemente preciso, que a sua utilização seja intuitiva e ao mesmo tempo fácil e rápida, de modo a que os resultados sejam obtidos em tempo útil.

2.2. Modelo de cálculo

O modelo de cálculo 5R1C assenta num circuito térmico formado por cinco resistências e uma capacitância sobre o qual é aplicado um balanço térmico em regime transitório. Para que os resultados obtidos sejam suficientemente fiáveis é necessário que se verifiquem um conjunto de requisitos, nomeadamente no caso de existir ventilação mecânica, 96% da mesma (caudal de ar novo) tem de entrar no interior do espaço climatizado do edifício, existe um único sistema de aquecimento e de arrefecimento comum para todo o espaço útil do edifício e todos os espaços úteis têm o mesmo *set-point* temperatura. Se algum destes critérios acabados de referir não for cumprido, este modelo não pode vir a ser aplicado, tendo de ser escolhido outro modelo de cálculo.

Apresenta-se na Figura 1 um esquema de princípio do funcionamento do modelo dinâmico horário monozona 5R1C.

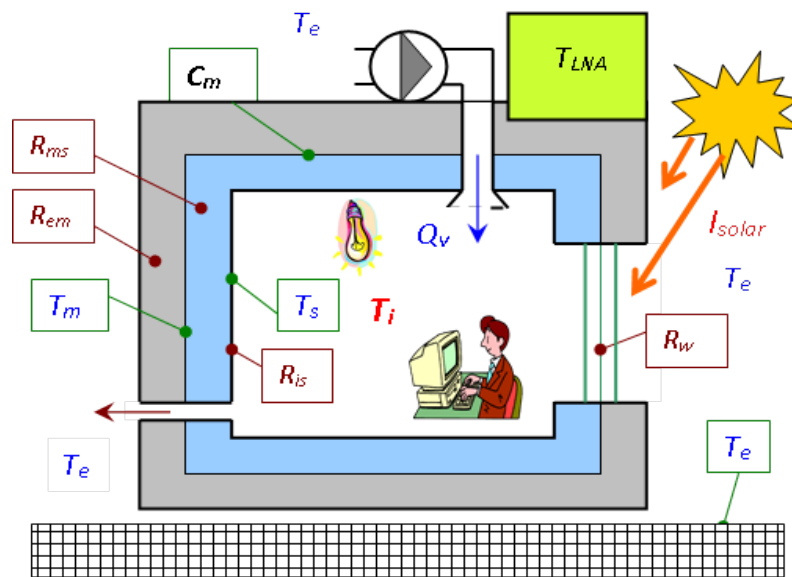


Figura 1. Princípio de funcionamento modelo 5R1C [Raimundo, 2008].

Na Figura 1, T_e é a temperatura do ar exterior e das superfícies sólidas não pertencentes à zona útil [$^{\circ}\text{C}$], T_m é a temperatura da massa térmica [$^{\circ}\text{C}$], T_s é a temperatura da face interior dos elementos construtivos da envolvente [$^{\circ}\text{C}$], T_i é a temperatura do ar interior [$^{\circ}\text{C}$], T_{LNA} é temperatura dos locais não úteis ou não aquecidos [$^{\circ}\text{C}$], I_{solar} é a radiação solar incidente [W], C_m é a massa de inércia térmica [$\text{J}/^{\circ}\text{C}$] (suposta concentrada no interior dos elementos opacos da envolvente), R_{is} é a resistência térmica entre as superfícies interiores e o ar interior [$\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}$], R_{ms} é a resistência térmica entre a massa térmica e as superfícies interiores dos elementos opacos [$\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}$], R_{em} é a resistência térmica entre o exterior e a massa térmica dos elementos opacos [$\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}$], R_w é a resistência térmica dos vãos envidraçados entre o exterior e o ar interior [$\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}$], uma quinta resistência R_v está relacionada com a energia térmica associada à renovação de ar novo. Por último, Q_v é o fluxo de energia térmica associado ao caudal de ar novo introduzido no espaço [W].

Este modelo é denominado de 5R1C pois tem como base um circuito reo-elétrico composto por 5 resistências térmicas (R_{ms} , R_{em} , R_{is} , R_w e R_v) e 1 capacitância (C_m), conforme representado na Figura 2. As resistências podem ser convertidas em condutâncias térmicas H [em $\text{W}/^{\circ}\text{C}$] pela relação:

$$H = \frac{A}{R} = \frac{\text{Área de transferência de calor } [\text{m}^2]}{\text{Resistência térmica } [\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{W}]} \quad (2.1)$$

em que:

- H_{is} – condutância térmica entre a face interior da envolvente e o ar interior;
- H_v – condutância térmica associada ao caudal de ar novo insuflado;
- H_w – condutância térmica pelos vãos envidraçados, entre o exterior e o ar interior;
- H_{ms} – condução de calor entre a massa térmica e a face interior dos elementos opacos;
- H_{em} – transmissão de calor entre o exterior e a massa térmica.

Recorrendo agora ao conceito de condutância térmica, o circuito reo-elétrico anterior pode ser representado alternativamente através do esquema da Figura 2.

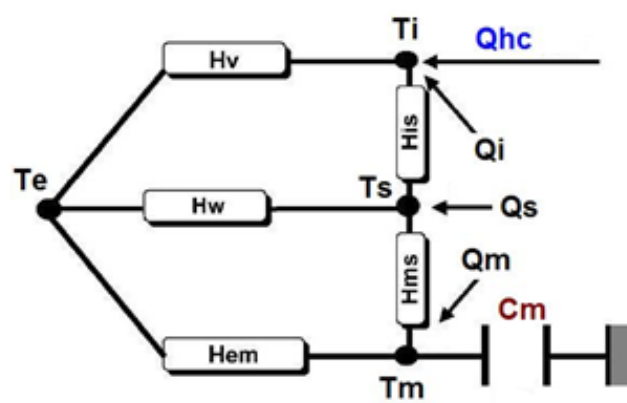


Figura 2. Representação esquemática do modelo 5R1C [Raimundo, 2008].

Na Figura 2, Q_{hc} [W] é o fluxo de calor fornecido/retirado pelos sistemas de climatização (potência térmica necessária para aquecer/arrefecer o ar interior por forma a que a temperatura interior se mantenha dentro do limite predefinido), Q_i [W] é parte do fluxo de calor fornecido ao ar interior a partir dos ganhos internos (iluminação, ocupantes, etc.), Q_s [W] é o fluxo de calor fornecido às superfícies interiores da envolvente por ganhos internos (Q_{int}) e por radiação solar através dos vãos envidraçados ($Q_{w-solar}$), Q_m [W] é o fluxo de calor fornecido à capacitância térmica (C_m) por ganhos internos (Q_{int}) e por ganhos solares através dos elementos opacos ($Q_{op-solar}$).

Apresenta-se no Apêndice A o modelo que serviu de base ao desenvolvimento do programa *SEnergEd*. Trata-se de uma versão melhorada por Raimundo (2008) do modelo dinâmico monozona proposto na norma ISO 13790 (2006). Deste modo não se repetem aqui os detalhes do modelo, apresentando-se apenas as alterações efetuadas em relação ao modelo detalhado no Apêndice A.

Em relação ao modelo de cálculo, foi efetuada uma alteração na fórmula para o cálculo da transporte de energia térmica associada ao caudal de ar novo insuflado (H_v).

Esta condutância térmica era escrita através da equação 2.2a, e passou a ser escrita como se encontra na equação 2.2b, abaixo representadas:

$$H_v = 0.34 Vol (f_{v1} \cdot V_1 + f_{v2} \cdot V_2) \quad (2.2a)$$

$$H_v = 0.34 \left(f_{v1} \cdot \frac{Prf_v}{100} \cdot V_1 + f_{v2} \cdot V_2 \right) \quad (2.2b)$$

em que:

- $f_{v1} = \max[f_{fc}, f_{ocup} \cdot (1 - \varepsilon_v)]$, em que f_{fc} é o fator de *freecooling*, f_{ocup} é o fator de ocupação e ε_v é a eficiência dos dispositivos de recuperação de calor do ar de rejeição ($0.5 \leq \varepsilon_v \leq 1$).
- Prf_v – Perfil de utilização da ventilação nesta hora [%]
- V_1 - Caudal de ar novo insuflado pelo sistema mecânico [m^3/h]
- $f_{v2} = 1 - \max[f_{fc}, f_{ocup}]$, em que f_{fc} é o fator de *freecooling*, f_{ocup} é o fator de ocupação
- V_2 – Renovação de ar nas situações em que o sistema mecânico de ventilação está parado → Caudal de ar novo em ventilação natural [m^3/h]

Foi realizada outra alteração em relação ao proposto em Raimundo (2008), esta relativamente ao modo como é efetuado o cálculo do calor latente relacionado com o caudal de ar novo insuflado. Este valor é obtido a partir do conhecimento do caudal de ar novo insuflado (V_{AN}) e da humidade absoluta do ar exterior (W_e) e do ar interior (W_i) do edifício, recorrendo ao conjunto de passos apresentados a seguir, os quais são aplicados em duplicado, ou seja ao ar no exterior e no interior do espaço. Começa-se por determinar a pressão parcial de vapor saturado (P_{vs}) exterior/interior através da seguinte expressão:

$$P_{vs} = 610.6 \exp\left[\frac{17.27 T}{237.3 + T}\right] \quad [N/m^2] \quad (2.3)$$

onde T é a temperatura do ar interior/exterior. De seguida é calculada a P_v pela seguinte expressão:

$$P_v = \frac{HR P_{vs}}{100} \quad [N/m^2] \quad (2.4)$$

em que HR é a humidade relativa do ar [%]. Por último calcula-se a humidade absoluta do ar (W) interior/exterior através da formula abaixo descrita,

$$W = 621.98 \frac{P_v}{P_t - P_v} \quad [\text{g}_{\text{vapor}} / \text{kg}_{\text{ar seco}}] \quad (2.5)$$

em que P_t representa a pressão atmosférica total (normal), que tem o valor de 101 325 N/m². Podemos então calcular a potência latente associada ao ar insuflado no espaço, através da seguinte fórmula:

$$Q_{lat-v} = 0.81 V_{AN} |W_e - W_i| \quad (2.6)$$

em que V_{AN} é o caudal de ar novo insuflado no espaço [m³/h], W_e e W_i são as humidades absolutas [g_{vapor}/kg_{ar seco}] exterior e interior, respetivamente.

2.3. Estrutura da folha de cálculo *SEnergEd*

A folha de cálculo *SEnergEd* está dividida em três tipos de separadores. Primeiro temos os separadores de introdução de dados, ou seja, das características do edifício. Em segundo lugar temos os separadores que realizam os cálculos, onde os utilizadores não vão ter acesso. Por último temos os separadores de resultados, os quais estão divididos em duas partes, a parte gráfica e outra onde demonstra os consumos anuais do edifício e as potências térmicas para dimensionamento dos sistemas de climatização.

No primeiro tipo de separadores o utilizador tem de introduzir dados, nomeadamente os dados gerais do edifício/FA (área útil de pavimento, pé direito, se é novo ou existente e o tipo do mesmo) e os dados climáticos. No caso dos últimos basta escolher o concelho em que o edifício/FA se encontra, que o próprio programa vai buscar os dados climáticos desse concelho. Ainda no primeiro tipo de separadores temos a envolvente opaca exterior, onde temos de preencher as características das paredes, pavimentos e coberturas em contato com o exterior e suas pontes térmicas planas. Outros dados a introduzir são os da envolvente opaca interior, que consiste em paredes, pavimentos, coberturas e vãos envidraçados em contato com espaços não úteis e suas pontes térmicas planas. Segue-se a caracterização dos elementos de compartimentação interior, que contam apenas para efeitos de inércia térmica, e as pontes térmicas lineares entre o espaço climatizado e o exterior. A seguir temos os envidraçados onde também temos de introduzir as suas características. Em termos dos equipamentos a usar temos os de climatização

(aquecimento e arrefecimento) onde necessitamos de alguns dados como por exemplo, as suas eficiências e potências máximas, também aqui temos de definir o intervalo de temperaturas interior e definir a utilização destes equipamentos. Outros equipamentos são os de ventilação (ventiladores), dos quais precisamos saber o caudal de ar novo insuflado por este sistema, a sua potência consumida e a sua eficiência. Finalmente os últimos dados a introduzir são relativos à ocupação do edifício (densidade), número de pessoas, iluminação e equipamentos.

Nos separadores de cálculo é efetuado o processo iterativo, de onde se obtém a temperatura interior do edifício, hora a hora durante um ano, em estudo tendo em conta todas as suas características elementares. Por último nos separadores de apresentação de resultados, estes apresentam-se de duas formas diferentes graficamente: a primeira onde se pode verificar as variações das temperaturas interiores e exteriores e também a variações das potências. A segunda através de uma tabela representativa dos vários consumos do edifício em teste durante um ano.

3. UTILIZAÇÃO DA FOLHA DE CÁLCULO *SENERGED*

3.1. Dados gerais do edifício

3.1.1. Separador *Edifício*

O separador Edifício, representado na Figura 3, serve para a introdução de dados relativos ao edifício e consiste na identificação do edifício/FA, na introdução da área útil de pavimento (Ap) e do pé direito médio (Pd). Também neste separador temos de referenciar se o edifício é novo ou existente, enquadramento do mesmo, e também o tipo deste (serviços, hotel, residencial, restauração e etc.).

DADOS GERAIS SOBRE A FRACÇÃO AUTÓNOMA OU EDIFÍCIO				
Características da Fração Autónoma ou Edifício				
Identificação da FA ou Edifício:	Espadaneira - vivenda unifamiliar			
Área útil de pavimento - Ap =	58,17	m2		
Pé direito médio - Pd =	2,60	m		
Enquadramento do edifício (Novo / Existente) -->	Novo	▼	1	
Tipo de edifício (segundo Quadro IV.3, pág. 2489) -->	Residencial	▼		
O edifício funciona na:				
	1ª quinzena	2ª quinzena	1ª Qz	2ª Qz
Janeiro --->	Sim - a 100%	Sim - a 100%	1	1
Fevereiro --->	Sim - a 100%	Sim - a 100%	1	1
Março --->	Sim - a 100%	Sim - a 100%	1	1
Abril --->	Sim - a 100%	Sim - a 100%	1	1
Maio --->	Sim - a 100%	Sim - a 100%	1	1
Junho --->	Sim - a 100%	Sim - a 100%	1	1
Julho --->	Sim - a 100%	Sim - a 100%	1	1
Agosto --->	Sim - a 100%	Sim - a 100%	1	1
Setembro --->	Sim - a 100%	Sim - a 100%	1	1
Outubro --->	Sim - a 100%	Sim - a 100%	1	1
Novembro --->	Sim - a 100%	Sim - a 100%	1	1
Dezembro --->	Sim - a 100%	Sim - a 100%	1	1

Figura 3. Separador *Edifício*.

3.1.2. Separador *Clima*

No separador Clima, representado na Figura 4, o utilizador do programa tem de seleccionar em que concelho se situa o edifício/FA, e de seguida carregar onde diz “Actualizar os dados climáticos” para que o programa consiga reordenar os dados climáticos do concelho definido. Ainda neste separador o utilizador tem de colocar a distância do local de implantação do edifício à costa marítima e a altitude do local em relação ao nível do mar.

Após atualizados os dados climáticos, o programa dá-nos a zona climática em estudo quer no inverno quer no verão, a duração da estação de aquecimento e também a energia solar média incidente. Para além disto, é automaticamente importado um ficheiro com os dados climáticos para cada uma das 8760 horas do ano, no qual constam a temperatura exterior [°C], a humidade relativa do ar exterior [%], a radiação solar global incidente sobre uma superfície horizontal [W/m²] e a radiação solar global incidente sobre uma superfície vertical [W/m²] a Norte, a Noroeste, a Oeste, a Sudoeste, a Sul, a Sudeste, a Este e a Nordeste.

DADOS CLIMÁTICOS				
Zonamento climático				
Ficheiro: Coimbra				
Concelho:	COIMBRA	Concelho: Coimbra		
Concelho: Coimbra				
Distância à costa marítima	38	(km)	Longitude =	8,42 ° Oeste
Altitude do lugar (em relação ao nível do mar)	100	(m)	Latitude =	40,2 ° Norte
Zona climática de Inverno -->	I1	(ver Anexo III, pág. 2477 - 2484)		
Número de graus-dias de aquecimento - GD =	1460	°C . dias		
Duração da estação de aquecimento - M =	6,0	meses		
Energia solar média incidente no Inverno numa superfície vertical orientada a Sul - Gsul =	108	kW / m2.mês (ver Quadro III.8, pág. 2484)		
Zona climática de Verão -->	V2-N	(ver Anexo III, pág. 2477 - 2484)		33
Temperatura do ar exterior no Verão - T _{atm} =	19	°C (ver Quadro III.9, pág. 2484)		
Intensidade da radiação solar incidente (kWh / m ²) - I _r (valores retirados do Quadro III.9)	Sup. vertical	N	NE	E
		S	SW	W
Localização da região -->		420	470	450
Norte	Sup. horizontal	790		320
Dados climáticos actualizados	<---- Se igual a '#REF!' os Dados climáticos Não estão actualizados (Para actualizar os Dados climáticos fazer 'Click' sobre o link)			
Actualizar os dados climáticos ----> C:/SEnergEd/Clima/Coimbra.xlsx				

Figura 4. Separador *Clima*.

3.2. Dados da componente passiva

Os dados a introduzir relativos à componente passiva do edifício devem ser previamente obtidos seguindo a legislação do SCE em vigor. Ou seja, até dia 30 de Novembro de 2013 devem ser seguidos os pressupostos do RCCTE (2006) e do RSECE (2006). A partir da data anterior devem ser seguidas as exigências do REH (2013) e do RECS (2013).

3.2.1. Separador *Envoltente exterior opaca vertical*

Neste separador, apresentado na Figura 5, o utilizador do programa tem de introduzir os dados que caracterizam as paredes em contato com o exterior e as suas pontes térmicas

planas. Para isso tem de saber a sua orientação (norte, sul, este e etc), a área de superfície interior de cada um destes elementos verticais (A , m^2), a sua massa superficial útil (M_{si} , kg/m^2), o fator de sombra (F_{sop}), a cor da face exterior das mesmas, o coeficiente de transmissão térmica superficial (U , $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$). O coeficiente de transmissão térmica superficial de referência (U_{ref} , $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$) não está de momento a ser utilizado, servirá para no futuro simular o edifício de referência.

Ainda neste separador o programa verifica se o coeficiente de transmissão térmica superficial U cumpre com os requisitos mínimos impostos pela regulamentação do SCE. Também são efetuados os cálculos dos ganhos radiativos através da envolvente exterior opaca (Q_{op-rad} , em W). Estes fluxos de calor são o resultado da diferença entre a radiação solar absorvida pelas faces exteriores dos elementos opacos (Q_{sol}) e a radiação perdida para o céu frio (Q_{sky}). Deste modo o programa calcula para cada um desses elementos os ganhos radiativos por cada hora do ano.

3.2.2. Separador Envolvente exterior opaca horizontal

Relativamente a este separador, representado na Figura 6, o utilizador tem de inserir os mesmos dados referidos na seção 3.2.1 pavimentos sobre o exterior e também para coberturas em contato com o exterior e respetivas pontes térmicas planas. Também aqui o programa faz a verificação do cumprimento dos requisitos mínimos por parte dos coeficientes de transmissão de calor superficiais. Efetuam-se também os cálculos dos ganhos radiativos através da envolvente exterior opaca (Q_{op-rad} , W) para cada hora do ano.

3.2.3. Separador Envolvente interior opaca

Neste separador, apresentado na Figura 7, o utilizador tem de realizar a caracterização dos elementos em contacto com espaços não úteis, ou seja, espaços em que não é necessário garantir condições de conforto térmico (armazéns, garagens, etc.). Os elementos a introduzir são os relativos às paredes em contacto com espaços não úteis ou edifícios adjacentes e pontes térmicas planas, pavimentos e coberturas (tetos) sobre espaços não úteis e suas pontes térmicas e por último vãos envidraçados nas mesmas condições. Aquando da caracterização destes elementos, o utilizador tem de introduzir a área (A , m^2), a massa superficial útil (M_{si} , kg/m^2), o coeficiente de transmissão térmica superficial (U , $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$) e o tipo de espaço não útil adjacente (armazém, garagem coletiva e etc.).

Paredes em contacto com espaços não úteis ou edif. adjacentes e PTF	Área (m^2)	M_{si} (kg/m^2)	U ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	Tipo de espaço não útil (ou não climatizado)	A_i (m^2)	A_u (m^2)	τ (-)
			0,00	...			
			0,00	...			
Parede de separação edif adjacente	22,57	11,0	0,49	4- Edifício adjacente			0,60
			0,00	...			
			0,00	...			
			0,00	...			
			0,00	...			
			0,00	...			
Porta para caixa de escadas, etc.			0,00	...			
TOTAL	22,57						
Pavimentos sobre espaços não úteis e suas pontes térmicas planas	Área (m^2)	M_{si} (kg/m^2)	U ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	Tipo de espaço não útil (ou não climatizado)	A_i (m^2)	A_u (m^2)	τ (-)
			0,00	...			
			0,00	...			
			0,00	...			
			0,00	...			
TOTAL	0,00						
Coberturas (tectos sob espaços não úteis) e suas pontes t. planas	Área (m^2)	M_{si} (kg/m^2)	U ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	Tipo de espaço não útil (ou não climatizado)	A_i (m^2)	A_u (m^2)	τ (-)
			0,00	...			
			0,00	...			
Tecto em madeira e pladur	58,17	9,0	0,50	8.1- Desvão não habitado não ventilado	60,76	75,10	0,80
			0,00	...			
TOTAL	58,17						
Vãos envidraçados em contacto com espaços não úteis	Área (m^2)	M_{si} (kg/m^2)	U ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	Tipo de espaço não útil (ou não climatizado)	A_i (m^2)	A_u (m^2)	τ (-)
			0,00	...			
			0,00	...			
TOTAL	0,00						

Figura 7. Separador Envolvente interior opaca.

3.2.6. Separador Elementos em contacto com o solo

Como se demonstra na Figura 10, no que diz respeito a este separador é fundamental introduzir as características das paredes e dos pavimentos em contacto com o solo, nomeadamente o seu desenvolvimento linear (B , m), cota (Z , m), área (A , m^2), massa superficial útil (M_{si} , kg/m^2) e o coeficiente de transmissão térmica superficial (U , $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$). É também necessário definir se o pavimento é isolado ou não, bem como a resistência térmica do isolante instalado ($R_{isolante}$, $m^2 \cdot ^\circ C/W$). O coeficiente de transmissão térmica linear (ψ , $W/(m \cdot ^\circ C)$) é determinado automaticamente pelo próprio programa.

Paredes e Pavimentos em contacto com o Solo	Tipo	Comp. B (m)	Cota Z (m)	Área (m^2)	Ms (kg/m^2)	U_{parede} ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	Pavimento isolado ?	$R_{isolante}$ ($m^2 \cdot ^\circ C/W$)	ψ ($W/m \cdot ^\circ C$)
	Parede								
	Parede								
	Parede								
	Parede								
	Parede								
	Pavimento								
Pavimento térreo	Pavimento	22,68	0,68	58,17	75,00		Sim	0,52	1,80
	Pavimento								
	Pavimento								

Figura 10. Separador Elementos em contacto com o solo.

3.2.7. Separador Pontes térmicas lineares

Este separador, apresentado na Figura 11, serve para introduzir as características das pontes térmicas lineares entre o espaço interior útil e o ambiente exterior.

Conforme definido pela regulamentação do SCE (RCCTE, 2006; REH, 2013), as pontes térmicas lineares estão divididas em vários tipos (A, B, C, D, E, F, G, H e I). Para defini-las temos de introduzir alguns dados das mesmas, tais como, o tipo de ponte térmica linear:

- Ai, Ci, Ei, Fi, Gi, Hi - Parede isolada pelo interior
- Ae, Ce, Ee, Fe, Ge, He - Parede isolada pelo exterior
- Ar, Cr, Er, Fr, Gr, Hr - Parede isolada na caixa-de-ar
- Ao, Co, Eo, Fo, Go, Ho - Parede sem isolamento térmico
- Bi.1 - Parede isolada pelo interior e pavimento isolado pela face inferior
- Bi.2 - Parede isolada pelo interior e pavimento isolado pela face superior
- Be.1 - Parede isolada pelo exterior e pavimento isolado pela face inferior
- Be.2 - Parede isolada pelo exterior e pavimento isolado pela face superior
- Br.1 - Parede isolada na caixa-de-ar e pavimento isolado pela face superior
- Br.2 - Parede isolada na caixa-de-ar e pavimento isolado pela face inferior

- Bo - Parede ou pavimento sem isolamento térmico
- Di.1 - Parede isolada pelo interior e cobertura isolada pela face superior
- Di.3 - Parede isolada pelo interior e cobertura isolada pela face inferior
- De.1 - Isolamento contínuo pelo exterior (parede isolada pelo exterior e cobertura isolada pelo exterior)
- De.2 - Isolamento não contínuo pelo exterior
- De.3 - Parede isolada pelo exterior e cobertura isolada pela face inferior
- Dr.1 - Parede isolada na caixa-de-ar e cobertura isolada pela face superior
- Dr.3 - Parede isolada na caixa-de-ar e cobertura isolada pela face inferior
- Do - Parede ou cobertura sem isolamento térmico

Adicionalmente é necessário ainda impor outras características, tais como desenvolvimento linear (B , m), cota (Z , m), espessura do pavimento (e_p , m), espessura da(s) parede(s) (e_m , m), distância entre o nível inferior do isolamento da parede e o isolamento do pavimento (d , m), se o pavimento é isolado ou não e se a parede é em betão ou não. O coeficiente de transmissão térmica linear (ψ , W/(m.°C)) é determinado automaticamente pelo próprio programa.

Pontes térmicas lineares	Tipo	Comp.	Cota	Pavimento	Parede	Dist.	Pavimento	Parede em	ψ
Ligações entre:	(ver Leg.)	B (m)	Z (m)	e_p (m)	e_m (m)	d (m)	isolado ?	betão ?	(W / m.°C)
Fachada com os Pavimentos térreos (tipo A)									
(se o pavimento não tiver isolamento térmico os valores de ψ são agravados em 50 %)	Ae	20,37	0,68	0,15		0,62	Sim		0,25
Fachada com pavimentos sobre locais não aquecidos ou sobre o exterior (tipo B)									

Figura 11. Separador Pontes térmicas lineares.

3.2.8. Separador Envidraçados exteriores

No separador Envidraçados exteriores, representado na Figura 12, é necessário introduzir os dados que caracterizam os mesmos, nomeadamente orientação (norte, sul e etc.), área (A , m²), coeficiente de transmissão térmica superficial (U , W/(m².°C)), número de vidros ($n_v = 1$ para 1 vidro e $n_v = 2$ para 2 ou mais), fração envidraçada (F_g), fator de seletividade angular do envidraçado (F_w), o fator solar do vidro ($g_{\perp v}$), o fator solar do envidraçado com a proteção solar ativa a 100% ($g_{\perp 100}$). O fator solar médio de cada envidraçado para o inverno ($g_{\perp inverno}$) e para o verão ($g_{\perp verão}$) é determinado pelo próprio programa:

$$g_{\perp inverno} = \text{Min} \{g_{\perp v} ; [0.7 - 0.07 (n_v - 1)]\} \quad (3.1.a)$$

$$g_{\perp\text{verão}} = 0.3 g_{\perp v} + 0.7 g_{\perp 100} \quad (3.1.b)$$

em que, exclusivamente para este efeito, se considera que o verão ocorre entre o dia 15 de Abril e o dia 15 de Outubro e o inverno no resto do tempo. O programa faz automaticamente a verificação se o fator solar do edifício cumpre ou não os requisitos mínimos impostos pelos regulamentos do SCE (RCCTE, 2006; SCE-DL, 2013).

Segue-se a introdução dos dados relativos aos ângulos de sombreamento dos envidraçados, tal como, o ângulo de sombreamento do horizonte (α_h), o ângulo de sombreamento por elementos horizontais próximos (α_o) e o ângulo de sombreamento por elementos verticais próximos na esquerda ($\beta_{f\text{-esq}}$) como na direita ($\beta_{f\text{-dir}}$).

A partir dos dados anteriores, o programa calcula para cada hora do ano os ganhos solares através dos vãos envidraçados através da equação:

$$Q_{w\text{-solar}} = \sum_{j=1}^{n_j} A_{w,j} F_{s,j} F_{g,j} F_{w,j} g_{\perp,j} E_j \quad (3.2)$$

onde $A_{w,j}$ é a área total do vão envidraçado j , isto é, área da janela, incluindo vidro e caixilho (A , m^2), $F_{s,j}$ é o fator de obstrução, $F_{g,j}$ é a fração envidraçada, $F_{w,j}$ é o fator de correção da seletividade angular, $g_{\perp,j}$ é o fator solar do vão e E_j representa a radiação solar global incidente no vão envidraçado j [W/m^2].

Valores para os envidraçados exteriores										Ângulos de sombreamento:				
Designação do vão envidraçado	Orientação (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW)	Área A (m ²)	U _{v,gn} (W/m ² .°C)	Nº de vidros (1, 2, ≥ 3)	Fração envidr. Fg (-)	Fator de selectiv. angular Fw (-)	Fator solar do vidro g _{lv} (-)	Fator solar c/ protecção 100% activa g _{l100} (-)	Fator solar do envidraçado g _⊥	Fator solar verifica os requisitos mínimos ?	Somb. do horizonte α _h (°)	Elementos horizontais próximos α _o (°)	Elementos verticais próximos. Pala: esquerda β _{f-Esq} (°) direita β _{f-Dir} (°)	
Verticais:		5,67												
	Norte	0,00	0,00						0,00					
	Norte	0,00	0,00						0,00					
	Norte	0,00	0,00						0,00					
V1	Noroeste	0,97	2,85	2	0,70	0,90	0,75	0,06	0,27	Sim	0	0	0	0
V2	Noroeste	0,96	2,85	2	0,70	0,90	0,75	0,06	0,27	Sim	0	0	0	0
	Noroeste	0,00	0,00						0,00					
	Oeste	0,00	0,00						0,00					
	Oeste	0,00	0,00						0,00					
	Oeste	0,00	0,00						0,00					
	Sudoeste	0,00	0,00						0,00					
	Sudoeste	0,00	0,00						0,00					
	Sudoeste	0,00	0,00						0,00					
	Sul	0,00	0,00						0,00					
	Sul	0,00	0,00						0,00					
	Sul	0,00	0,00						0,00					
	Sul	0,00	0,00						0,00					
V5	Sudeste	1,00	2,85	2	0,70	0,90	0,75	0,06	0,27	Sim	18	0	0	59
V6	Sudeste	0,39	2,85	2	0,70	0,90	0,75	0,06	0,27	Sim	18	0	0	70
V7	Sudeste	0,49	2,85	2	0,70	0,90	0,75	0,06	0,27	Sim	18	0	0	83
	Este	0,00	0,00						0,00					
	Este	0,00	0,00						0,00					
	Este	0,00	0,00						0,00					
V3	Nordeste	0,93	2,85	2	0,70	0,90	0,75	0,06	0,27	Sim	32	0	0	0
V4	Nordeste	0,93	2,85	2	0,70	0,90	0,75	0,06	0,27	Sim	32	0	0	0
	Nordeste	0,00	0,00						0,00					
	Horizontal								0,00		0			
	Horizontal								0,00		0			

Figura 12. Separador Envidraçados exteriores.

3.3. Dados da componente ativa

3.3.1. Separador Climatização

A caracterização dos sistemas de climatização, quer para a função de aquecimento (Figura 13) quer para a de arrefecimento (Figura 14), efetua-se no separador Climatização. Para definir os vários parâmetros do sistema de climatização é imperativo inserir algumas das características, tal como, se existe ou não humidificação do ar durante a estação de aquecimento (visto que, para a mesma humidade absoluta, ao aumento da temperatura corresponder uma diminuição da humidade relativa). Outros parâmetros importantes são as temperaturas de Set-point do ar interior, ou seja, a temperatura abaixo da qual é necessário aquecer (Tseth) e aquela a partir da qual é necessário arrefecer (Tsetc). A eficiência dos equipamentos, a humidade relativa no interior do edifício, a máxima potência de aquecimento e de arrefecimento permitidas pelos sistemas de AVAC instalados e a contribuição das energias renováveis, são outros aspetos a impor ao programa para que este consiga realizar os cálculos.

Neste separador são ainda definidos os perfis (de 0 a 100%) de funcionamento dos equipamentos responsáveis pela função de aquecimento e pela de arrefecimento, para cada hora de cada dia da semana.

Aquecimento	
Temperatura de Setpoint para aquecimento:	20,00 °C
Designação do sistema de aquecimento do ar ambiente:	
Fonte de energia do sistema de aquecimento:	
Eficiência do sistema de aquecimento:	2,90 <--- As eficiências não são em percentagem
Máxima potência sensível do equipamento de aquecimento:	3,00 kW <--- Se não existe coloque 0 kW
Existe sistema de humidificação do ar (em aquecimento) ? --->	Sim
Humidade relativa do interior do edifício (em aquecimento):	40,00 %
Contribuição de energias renováveis para o aquecimento:	0,00 kWh/ano <--- Contribuição para redução das necessidades de energia

Figura 13. Separador Climatização referente ao aquecimento.

Arrefecimento	
Temperatura de Setpoint para arrefecimento:	25,00 °C <--- Este Setpoint tem de ser superior ao de aquecimento
Designação do sistema de arrefecimento do ar ambiente:	
Fonte de energia do sistema de arrefecimento:	
Eficiência do sistema de arrefecimento:	2,70 <--- As eficiências não são em percentagem
Máxima potência sensível do equipamento de arrefecimento:	3,00 kW <--- Se não existe coloque 0 kW
Humidade relativa do interior do edifício (em arrefecimento):	50,00 %
Contribuição de energias renováveis para o arrefecimento:	0,00 kWh/ano <--- Contribuição para redução das necessidades de energia

Figura 14. Separador Climatização referente ao arrefecimento.

3.3.2. Separador Utilização

O separador Utilização, apresentado na Figura 15, serve para definir o perfil de utilização do edifício/FA. Neste separador são definidos a quantidade máxima de utilizadores/moradores que podem estar presentes no interior da área útil do edifício (N_{ocup}) e qual é o seu nível médio de atividade (M_{ocup} , W/ocupante). Segue-se a especificação das densidades máximas instaladas nas áreas úteis do edifício (D , W/m²) de sistemas de iluminação e de equipamentos não relacionados com as funções de AVAC. É ainda necessário especificar os perfis (P , de 0 a 100%) para cada hora de cada dia da semana de ocupação, de iluminação e de equipamentos não relacionados com as funções de AVAC.

A partir da informação anterior são determinadas, para cada uma das 8760 horas do ano, as potências relacionadas com a ocupação (Q_{ocup} , W), a iluminação (Q_{ilum} , W) e os equipamentos não relacionados com as funções de AVAC (Q_{equip} , W), vindo

$$Q_{ocup} = N_{ocup} M_{ocup} P_{ocup} / 100 \quad (3.3)$$

$$Q_{ilum} = A_{ilum} D_{ilum} P_{ilum} / 100 \quad (3.4)$$

$$Q_{equip} = A_{equip} D_{equip} P_{equip} / 100 \quad (3.5)$$

Perfil de ocupação					
Para o edifício a funcionar a 100%					
2ª a 6ª Feira		Sabados		Domingos	
Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)	Hora	Utilização (%)
0 - 1	95	0 - 1	90	0 - 1	100
1 - 2	95	1 - 2	90	1 - 2	100
2 - 3	95	2 - 3	90	2 - 3	100
3 - 4	95	3 - 4	90	3 - 4	100
4 - 5	95	4 - 5	90	4 - 5	100
5 - 6	95	5 - 6	90	5 - 6	100
6 - 7	65	6 - 7	60	6 - 7	35
7 - 8	40	7 - 8	29	7 - 8	30
8 - 9	20	8 - 9	29	8 - 9	25
9 - 10	25	9 - 10	29	9 - 10	25
10 - 11	25	10 - 11	29	10 - 11	25
11 - 12	20	11 - 12	15	11 - 12	20
12 - 13	15	12 - 13	15	12 - 13	20
13 - 14	25	13 - 14	20	13 - 14	25
14 - 15	25	14 - 15	20	14 - 15	25
15 - 16	25	15 - 16	20	15 - 16	25
16 - 17	15	16 - 17	15	16 - 17	20
17 - 18	20	17 - 18	20	17 - 18	25
18 - 19	20	18 - 19	25	18 - 19	20
19 - 20	25	19 - 20	35	19 - 20	30
20 - 21	45	20 - 21	45	20 - 21	40
21 - 22	55	21 - 22	70	21 - 22	55
22 - 23	85	22 - 23	80	22 - 23	85
23 - 24	95	23 - 24	90	23 - 24	100

Figura 15. Separador Utilização (perfil de utilização).

3.3.3. Separador Ventilação

No programa desenvolvido existe um separador onde se tem que estabelecer as características da ventilação, o qual se encontra representado na Figura 16. Este separador destina-se a impor o caudal de ar novo insuflado no espaço pelo sistema mecânico (V_1 , m^3/h). Outros aspetos importantes são a potência consumida pelos ventiladores Pot_{ventil} , (W) e o caudal de ar que entra no espaço nas situações em que o sistema mecânico de ventilação se encontra desligado V_2 , (m^3/h), por ventilação natural. Trata-se de ar que passa pelas persianas, ou uma janela aberta, etc. Existência ou não de *free cooling*, que consiste num processo de arrefecimento que explora a existência de diferenças de temperatura entre ambientes (ar interior e ar ambiente por exemplo). Também é necessário saber se existe ou não recuperação de calor do ar rejeitado e qual é a sua eficiência (valores típicos entre 0.5 e 1). Segue-se a atribuição da contribuição das energias renováveis para os sistemas de ventilação mecânica. É ainda necessário especificar neste separador o perfil de funcionamento (P_{ventil} , de 0 a 100%) para cada hora de cada dia da semana dos sistemas de ventilação mecânica. Como se admite que os ventiladores estão no interior do espaço, ou e que são arrefecidos pelo ar que insuflam, a carga térmica resulta igual à potência elétrica consumida, vindo:

$$Q_{ventil} = \frac{P_{ventil} Pot_{ventil}}{100} \quad (3.6)$$

Ventilação	Valor Máximo			
Caudal de ar renovado pelo sistema mecânico:	95,00 m3/hora	Caudal 1		
Potência consumida pelos ventiladores e bombas:	12,00 W	<--- Valor máximo para o edifício a funcionar a 100%		
Eficiência dos ventiladores e das bombas:	0,70	<--- As eficiências não são em percentagem		
Caudal de ar renovado em ventilação natural:	50,00 m3/hora	Caudal 2		
Existe freecooling ? --->	Sim	<--- Sim ou Não	Fnc = 1 (entre 16-06 e 15-09)	
			Fnc = 0 (restantes dias)	
Existe recuperação de calor do ar de rejeição? --->	Sim	<--- Sim ou Não	Frc = 0,75 (entre 16-10 e 15-04)	
			Frc = 0 (restantes dias)	
Eficiência deste sistema de recuperação:	0,75	<--- As eficiências não são em percentagem (valores entre 0,5 e 1)		
Contribuição de energias renováveis para a ventilação:	0,00 kWh/ano	<--- Contribuição para as necessidades de energia		

Figura 16. Separador Ventilação (caracterização).

3.4. Saída de resultados

Os resultados são apresentados de duas formas diferentes, a que correspondem dois separadores diferentes. No primeiro, designado Resultados, são resumidos numa tabela e no segundo, designado Gráficos, eles são apresentados graficamente.

3.4.1. Separador *Resultados*

Neste separador, o qual se apresenta na Figura 17, resumem-se os valores anuais previstos pelo programa para as necessidades de energia útil (sem e com contabilização das contribuições de energia renovável) do edifício e quais os consumos de energia final correspondentes. Em termos energéticos [kWh/ano], os resultados são detalhados através da apresentação dos valores:

- Global para o edifício;
- Aquecimento: componente latente e sensível;
- Arrefecimento: componente latente e sensível;
- Ventilação e bombagem;
- Equipamentos (não AVAC);
- Iluminação.

Segue-se a apresentação dos valores globais das necessidades e dos consumos de energia para climatização [kWh/ano], para a qual se assume que inclui apenas as funções de aquecimento e de arrefecimento). Neste separador são ainda apresentadas as potências térmicas (úteis) máximas requeridas para os equipamentos responsáveis pelo aquecimento e pelo arrefecimento do ar interior. A serem instalados com estas potências, estes sistemas têm capacidade suficiente para garantir que, em todas as 8760 horas do ano, a temperatura do ar interior se mantém dentro dos limites estabelecidos para as temperaturas de Set-point.

Neste separador são ainda apresentados valores para todas as horas do ano de vários parâmetros, os quais o utilizador pode consultar ou utilizar para preparar gráficos adequados à análise que pretende efetuar.

	Necessidade (energia útil)		Consumo (energia final)	
	Sem contribuição energia renovável [kWh/ano]	Após contribuição energia renovável [kWh/ano]	Consumo [kWh/ano]	Consumo [%]
Energia global para o edifício	166.423,99	166.423,99	84.495,10	100,00%
Energia para aquecimento:				
- Componente sensível	83.717,26	83.717,26	28.868,02	34,17%
- Componente latente	7.631,20	7.631,20	2.631,45	3,11%
Energia para arrefecimento:				
- Componente sensível	39.993,87	39.993,87	14.812,54	17,53%
- Componente latente	525,05	525,05	194,46	0,23%
Energia para ventilação e bombagem	8.008,00	8.008,00	11.440,00	13,54%
Energia para equipamentos (não AVAC)	3.138,10	3.138,10	3.138,10	3,71%
Energia para iluminação	23.410,53	23.410,53	23.410,53	27,71%
Energia para climatização (aquec + arref):	131.867,37	131.867,37	46.506,47	55,04%
- Aquecimento:	91.348,45	91.348,45	31.499,47	37,28%
- Arrefecimento:	40.518,91	40.518,91	15.007,00	17,76%
Potências térmicas máximas (úteis)	Sensível [kW]	Latente [kW]	Total [kW]	
- Aquecimento:	82,03	24,25	106,28	
- Arrefecimento:	86,05	23,85	109,89	

Figura 17. Tabela representativa do separador *Resultados*.

3.4.2. Separador Gráficos

Apresenta-se na Figura 18 um aspeto global do separador Gráficos, no qual é representado um ano completo de funcionamento do edifício. Nos gráficos representados neste separador os valores das temperaturas e das potências são referentes a uma hora, assim sendo cada ponto do gráfico representa uma hora do ano. Os valores em abcissas marcam o fim de cada mês. Na metade superior apresentam-se os valores úteis horários da potência sensível para aquecimento (a vermelho), da sensível para arrefecimento (a verde) e da latente (a azul claro). Na metade inferior apresenta-se a evolução, ao longo do ano, da temperatura do ar no interior da zona útil do edifício (a vermelho) e a do ar no exterior do mesmo (a verde).

Os resultados em forma de gráfico foram introduzidos no programa pois é uma maneira fácil de verificar se o edifício tem o comportamento térmico dentro dos parâmetros definidos para o mesmo.

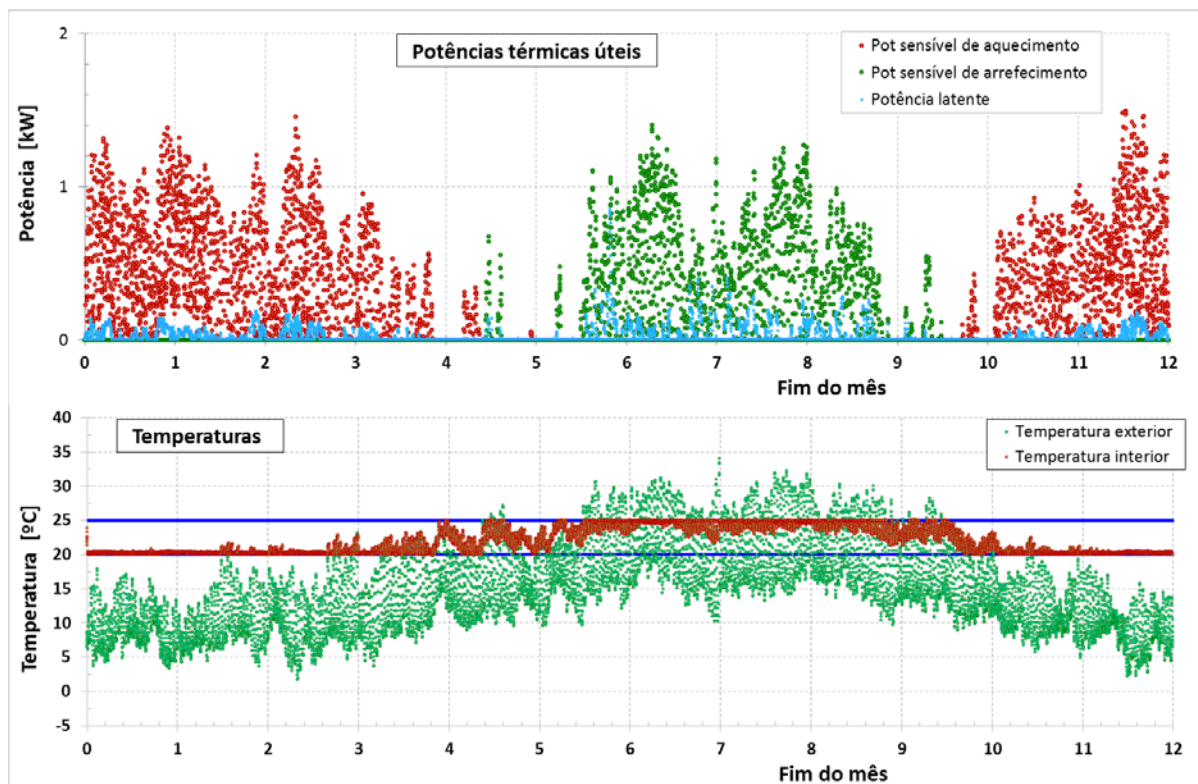


Figura 18. Separador Gráficos (gráfico temperaturas e potências).

4. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA FOLHA DE CÁLCULO *SEnergED*

Neste capítulo são apresentados alguns exemplos que se realizaram para testar a folha de cálculo. Não se realizou a validação da mesma pois para isso teria sido necessário bastante tempo, visto que era inevitável a comparação dos resultados com alguns dos programas comerciais disponíveis no mercado, como por exemplo, *EnergyPlus/DesignBuilder*. Efetuaram-se testes a três edifícios/FA de tipologias de uso diferentes (uma habitação, um piso de hotel e uma escola), os quais têm diferentes características e também diferentes perfis de utilização. Os resultados que se apresentam a seguir não foram comparados com os resultados obtidos com recurso a outros programas. Mesmo assim, pensa-se que os mesmos são úteis para demonstrar a aplicabilidade, a facilidade de utilização e o tipo de resultados que se obtêm recorrendo à folha de cálculo *SEnergEd*.

4.1. Edifício de habitação unifamiliar

O primeiro teste efetuado consiste na simulação térmica e energética de uma habitação unifamiliar, a qual sofreu uma grande remodelação pelo que é considerada como um edifício novo (RCCTE, 2006). Esta habitação é uma pequena moradia geminada, localizada na periferia de Coimbra, tendo sido originalmente construída nos anos 60 e a sua tipologia é atualmente um T2 (dois quartos). Esta está inserida na zona climática I1 - V2-N (RCCTE, 2006), localiza-se a cerca de trinta e oito quilómetros da costa marítima e a cem metros de altitude. Este edifício tem uma área útil de pavimento de 58.17 m² e um pé direito de 2.60 m. Apresenta-se na Figura 19 a representação do alçado principal (voltado a Noroeste), na Figura 20 o alçado lateral esquerdo (voltado a Nordeste) e na Figura 21 a planta. Esta moradia unifamiliar encontra-se descrita com mais detalhe em Raimundo et al (2007).



Figura 19. Alçado principal (voltado a NW) da moradia unifamiliar.

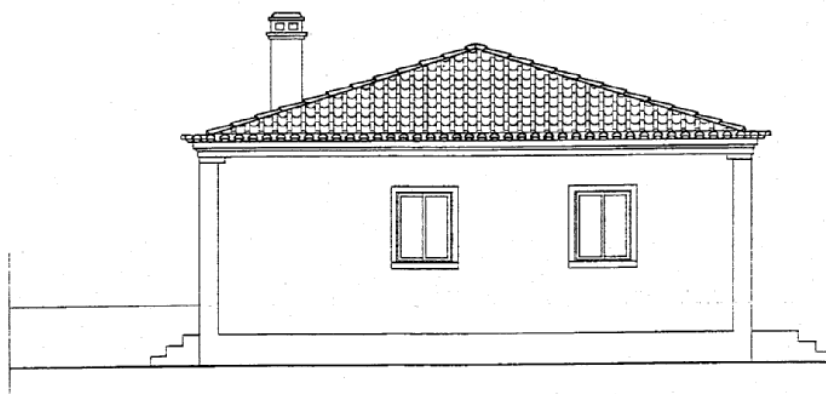


Figura 20. Alçado lateral esquerdo (voltado a NE) da moradia unifamiliar.

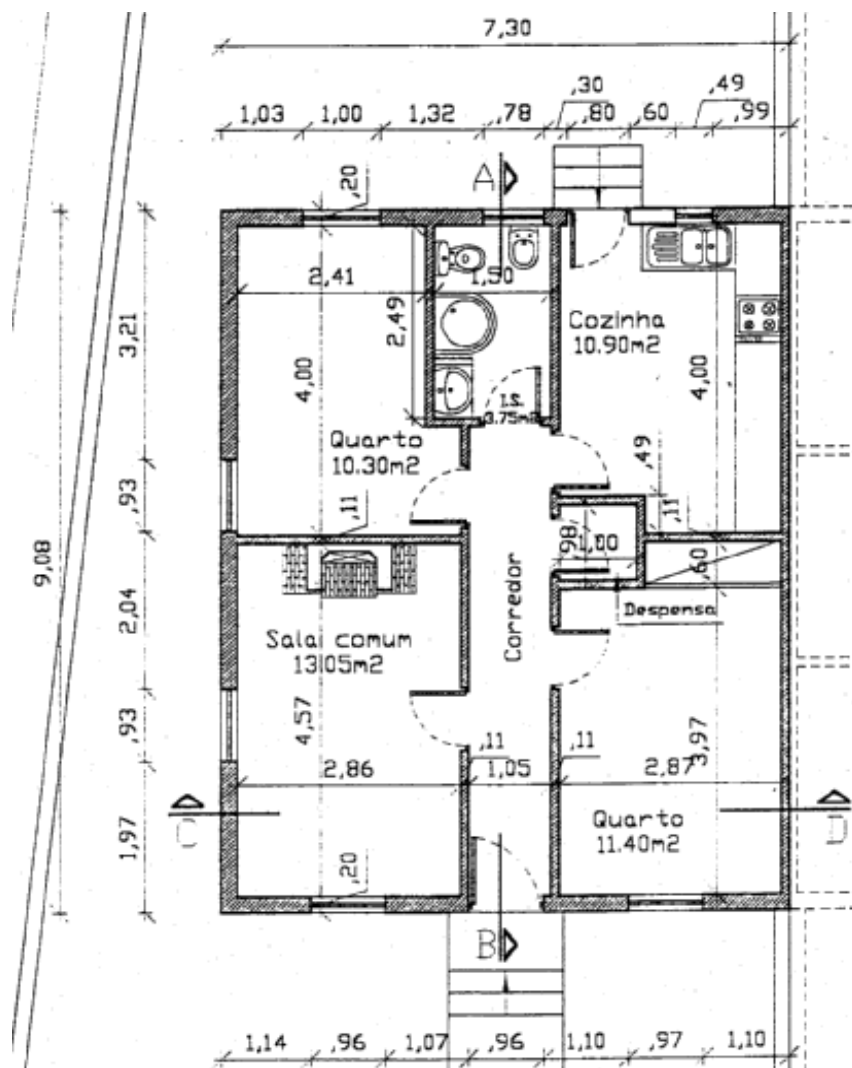


Figura 21. Planta da moradia unifamiliar (fachada principal para baixo).

O edifício está dotado de um equipamento elétrico de climatização (aquecimento e arrefecimento) do tipo chiller/bomba de calor com uma eficiência do sistema em modo de aquecimento $COP = 2.9$ e uma eficiência em modo de arrefecimento $EER = 2.7$.

Apresentam-se a seguir os resultados previstos pela folha de cálculo *SEnerged* para o funcionamento anual deste edifício. Na Figura 22 resumem-se os valores das necessidades anuais de energia útil e os correspondentes consumos, assim como os valores máximos das potências térmicas (úteis) requeridas para o sistema de climatização. Na Figura 23 representam-se graficamente os valores horários das potências térmicas úteis, da temperatura do ar exterior e da temperatura do ar interior.

	Necessidade (energia útil)		Consumo (energia final)	
	Sem contribuição energia renovável [kWh/ano]	Após contribuição energia renovável [kWh/ano]	Consumo [kWh/ano]	Consumo [%]
Energia global para o edifício	7.499,86	7.499,86	5.963,29	100,00%
Energia para aquecimento:				
- Componente sensível	1.472,20	1.472,20	507,66	8,51%
- Componente latente	92,92	92,92	32,04	0,54%
Energia para arrefecimento:				
- Componente sensível	740,34	740,34	274,20	4,60%
- Componente latente	96,79	96,79	35,85	0,60%
Energia para ventilação e bombagem	37,19	37,19	53,13	0,89%
Energia para equipamentos (não AVAC)	550,86	550,86	550,86	9,24%
Energia para iluminação	4.509,56	4.509,56	4.509,56	75,62%
Energia para climatização (aquec + arref):	2.402,26	2.402,26	849,75	14,25%
- Aquecimento:	1.565,12	1.565,12	539,70	9,05%
- Arrefecimento:	837,13	837,13	310,05	5,20%
Potências térmicas máximas (úteis)	Sensível [kW]	Latente [kW]	Total [kW]	Valores máximos absolutos
- Aquecimento:	1,50	0,19	1,68	
- Arrefecimento:	1,40	0,85	2,25	

Figura 22. Edifício de habitação – previsão das necessidades e dos consumos anuais e das potências térmicas máximas requeridas para o sistema de AVAC.

Como podemos verificar na Figura 22, temos todos os consumos que o edifício tem durante um ano, quer para a energia global do edifício quer para aquecimento e arrefecimento, para ventilação e bombagem, para equipamentos (não AVAC) e por último para a iluminação. Conforme se pode constatar, a energia gasta em iluminação representa mais de 75% do valor total de energia gasta no edifício. Por sua vez, a energia gasta para as funções de aquecimento e de arrefecimento do ambiente interior representa apenas uma pequena fração do total. Isto deve-se provavelmente ao fato de ser uma habitação de pequenas dimensões e daí o tipo de consumo da mesma. São ainda de realçar as baixas potências térmicas úteis para as quais os equipamentos de climatização devem estar dimensionado, sendo suficiente 1.68 kW para a função de aquecimento e 2.25 kW para a de arrefecimento.

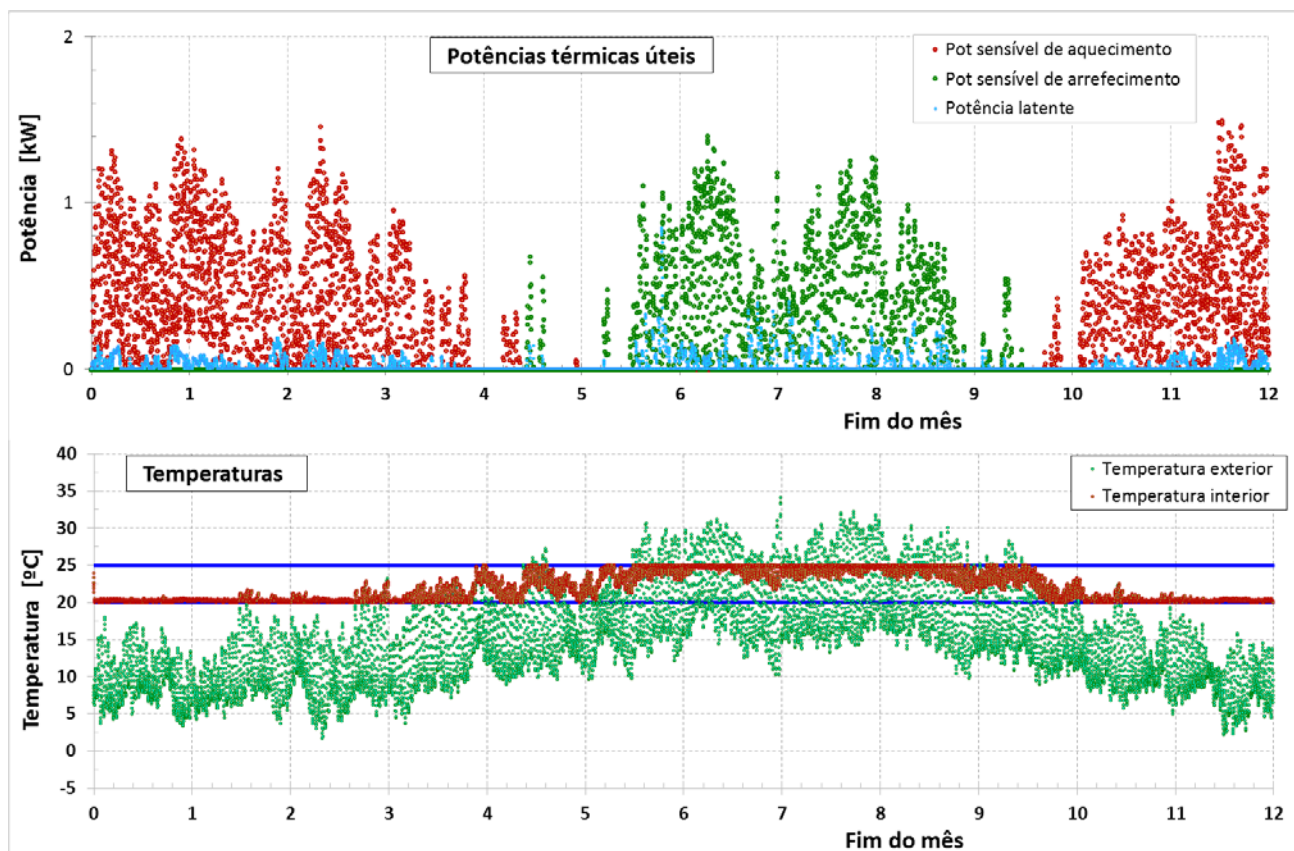


Figura 23. Edifício de habitação – valores horários das potências térmicas úteis, da temperatura do ar exterior e da temperatura do ar interior.

Na parte superior da Figura 23 podemos verificar a evolução, durante um ano de utilização, das potências térmicas úteis de aquecimento, de arrefecimento e latente. Na parte inferior da mesma figura encontra-se a representação gráfica dos valores da temperatura do ar exterior e do ar interior em cada uma das 8760 horas do ano. Conforme se pode verificar, se os equipamentos de climatização estiverem sempre prontos para funcionar, eles conseguem manter a temperatura do ar interior dentro dos Set-points pré-estabelecidos de 20°C de temperatura mínima e 25°C de máxima.

4.2. Piso de quartos de um hotel de 3 estrelas

Foi realizado um segundo teste tendo por base um piso de quartos de um hotel de três estrelas situado em Fátima (Vila Nova de Ourém). O hotel foi construído de raiz, logo é caracterizado como um edifício novo (RSECE, 2006; Raimundo, 2007; SCE-DL, 2013). Conforme se pode constatar nas Figuras 24 e 25, este hotel está inserido entre dois prédios sensivelmente com a mesma altura. O edifício tem a sua fachada principal voltada para Sudoeste (Figura 24) e a posterior para Nordeste, ficando as laterais orientadas a Noroeste e Sudeste.

Na sua plenitude, o hotel é constituído por 43 quartos completos (22 duplos, 18 individuais e 3 duplos para deficientes), distribuídos por quatro pisos, zonas de utilização comum (receção, átrio com zona de estar, restaurante, bar, bengaleiro, circulações, 2 escadarias, 2 elevadores e instalações sanitárias para senhoras, homens e deficientes), zonas de apoio aos serviços (escritório, rouparias, cozinha, copas da cozinha, copas de piso, despensa, espaço para instalações frigoríficas, armazém de produtos alimentares, sala de refeições do pessoal e vestiários para pessoal feminino e masculino), estacionamento (17 lugares para veículos ligeiros, 3 lugares para veículos de deficientes) e áreas técnicas (para Chiller, caldeiras de apoio para preparação de AQS e para depósitos). O estacionamento localiza-se na Cave e Subcave, as zonas de utilização comum encontram-se maioritariamente no Rés-do-chão e os quartos localizam-se nos quatro pisos superiores.

Para uma simulação apropriada o hotel tem de ser dividido em pelo menos 7 zonas térmicas correspondendo a: (A) espaços de estacionamento e arrumos na Cave e Subcave; (B) receção e espaços anexos no Rés-do-Chão; (C) Restaurante e cozinha no Rés-do-Chão; (D) 1º piso de quartos; (E) 2º piso de quartos; (F) 3º piso de quartos; e (G) 4º piso de quartos. Devido à folha de cálculo *SEnerEd* permitir apenas a simulação de uma zona de cada vez, a simulação completa do funcionamento do edifício exige a simulação de modo independente de cada zona e depois uma soma apropriada dos resultados obtidos. Neste trabalho apresenta-se apenas a simulação da zona E, ou seja o piso de quartos correspondente ao 2º andar do edifício do qual se apresenta uma planta na Figura 26 (com a fachada principal voltada para baixo).



Figura 24. Alçado principal (voltado a SW) do hotel de 3 estrelas.

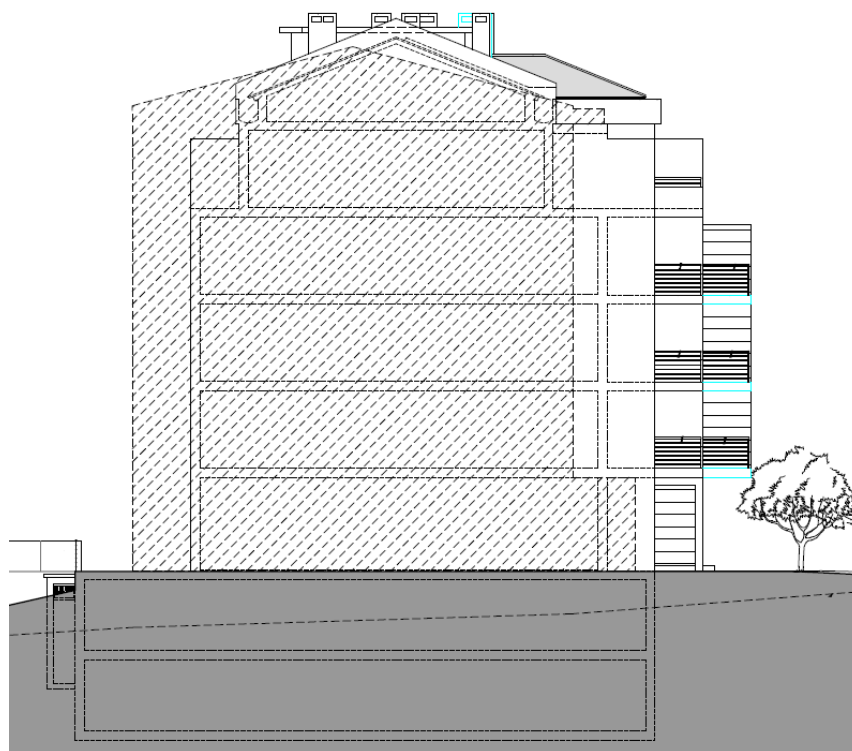


Figura 25. Alçado lateral direito (voltado a SE) do hotel de 3 estrelas.

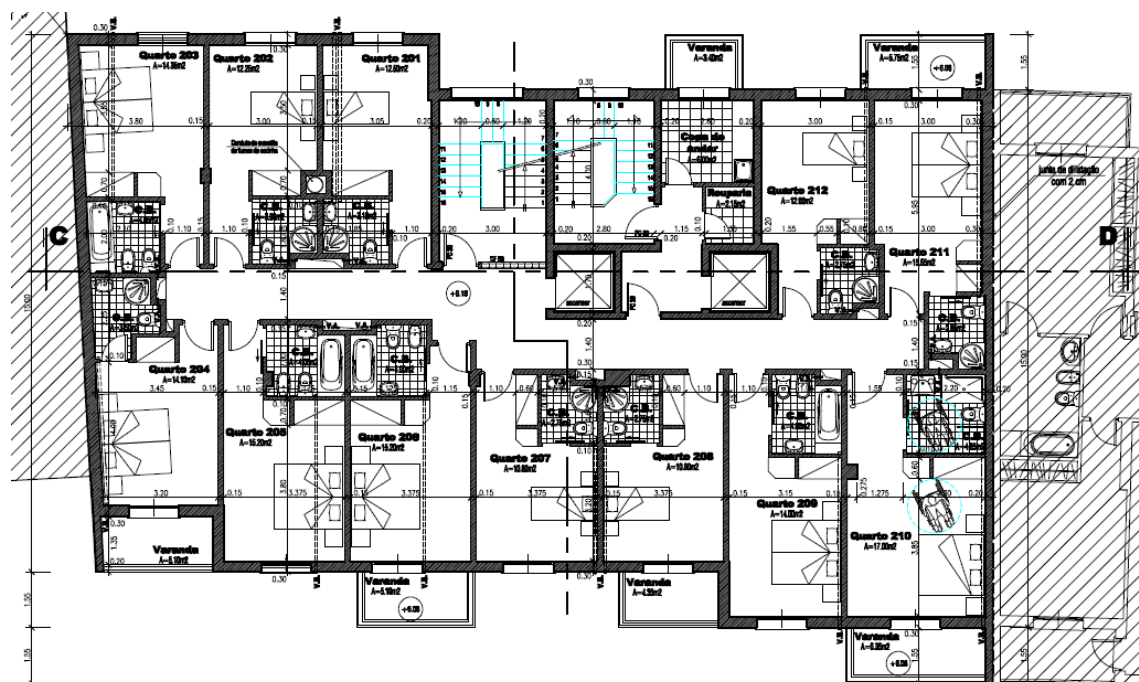


Figura 26. Planta do 2º piso (piso de quartos) do hotel de 3 estrelas (fachada principal para baixo).

O hotel está inserido na zona climática I2 – V2-N (RCCTE, 2006) e encontra-se situado a cerca de cinquenta quilómetros da costa marítima e a trezentos e cinquenta metros de altura em relação ao nível do mar. O piso do hotel em estudo tem uma área útil de pavimento de 253.80 m² e um pé direito de 2.50 m.

O edifício será munido de um equipamento de climatização (aquecimento e arrefecimento) do tipo chiller/bomba de calor, tendo como fonte de energia a eletricidade, com uma eficiência do sistema em modo de aquecimento $COP = 2.6$ e em modo de arrefecimento $EER = 3.3$.

Apresentam-se nas Figuras 27 e 28 os resultados previstos pela folha de cálculo *SEnergEd* para o funcionamento do 2º piso de quartos do hotel durante um ano. Na Figura 27 constam os valores anuais das necessidades de energia útil, dos correspondentes consumos e das potências térmicas úteis máximas requeridas para os equipamentos de aquecimento e de arrefecimento. Na Figura 28 apresenta-se uma representação gráfica dos valores horários das potências úteis para climatização e das temperaturas do ar no exterior e no interior deste piso de quartos.

	Necessidade (energia útil)		Consumo (energia final)	
	Sem contribuição energia renovável [kWh/ano]	Após contribuição energia renovável [kWh/ano]	Consumo [kWh/ano]	Consumo [%]
Energia global para o edifício	63.246,75	63.246,75	50.157,45	100,00%
Energia para aquecimento:				
- Componente sensível	27.062,38	27.062,38	10.408,61	20,75%
- Componente latente	0,00	0,00	0,00	0,00%
Energia para arrefecimento:				
- Componente sensível	4.571,23	4.571,23	1.385,22	2,76%
- Componente latente	130,06	130,06	39,41	0,08%
Energia para ventilação e bombagem	15.962,63	15.962,63	22.803,75	45,46%
Energia para equipamentos (não AVAC)	2.403,44	2.403,44	2.403,44	4,79%
Energia para iluminação	13.117,02	13.117,02	13.117,02	26,15%
Energia para climatização (aquec + arref):	31.763,67	31.763,67	11.833,24	23,59%
- Aquecimento:	27.062,38	27.062,38	10.408,61	20,75%
- Arrefecimento:	4.701,30	4.701,30	1.424,64	2,84%
Potências térmicas máximas (úteis)	Sensível [kW]	Latente [kW]	Total [kW]	Valores máximos absolutos
- Aquecimento:	15,77	0,00	15,77	
- Arrefecimento:	11,00	2,84	13,84	

Figura 27. Piso de hotel – previsão das necessidades e dos consumos anuais e das potências térmicas máximas requeridas para o sistema de AVAC.

Na Figura 27 constata-se que, para este piso, a potência máxima útil de aquecimento é de aproximadamente 16 kW e a de arrefecimento é de 14 kW, as quais resultam da soma da potência máxima sensível com a máxima latente. É de realçar que neste caso existe uma grande discrepância no consumo de energia entre o aquecimento e o arrefecimento, ou seja, gasta-se muito mais energia para aquecer o piso (20.75% da energia total gasta no piso) do que para o arrefecer (2.76 % da energia total gasta no piso). Outro aspeto relevante é que de toda a energia gasta neste piso do edifício durante um ano cerca de 45 % dessa é utilizada para a ventilação e bombagem, logo se estes equipamentos forem mais eficientes verificar-se-á uma redução de consumo significativa. A iluminação, por si só, é responsável por 26.15 % do consumo de energia total no piso.

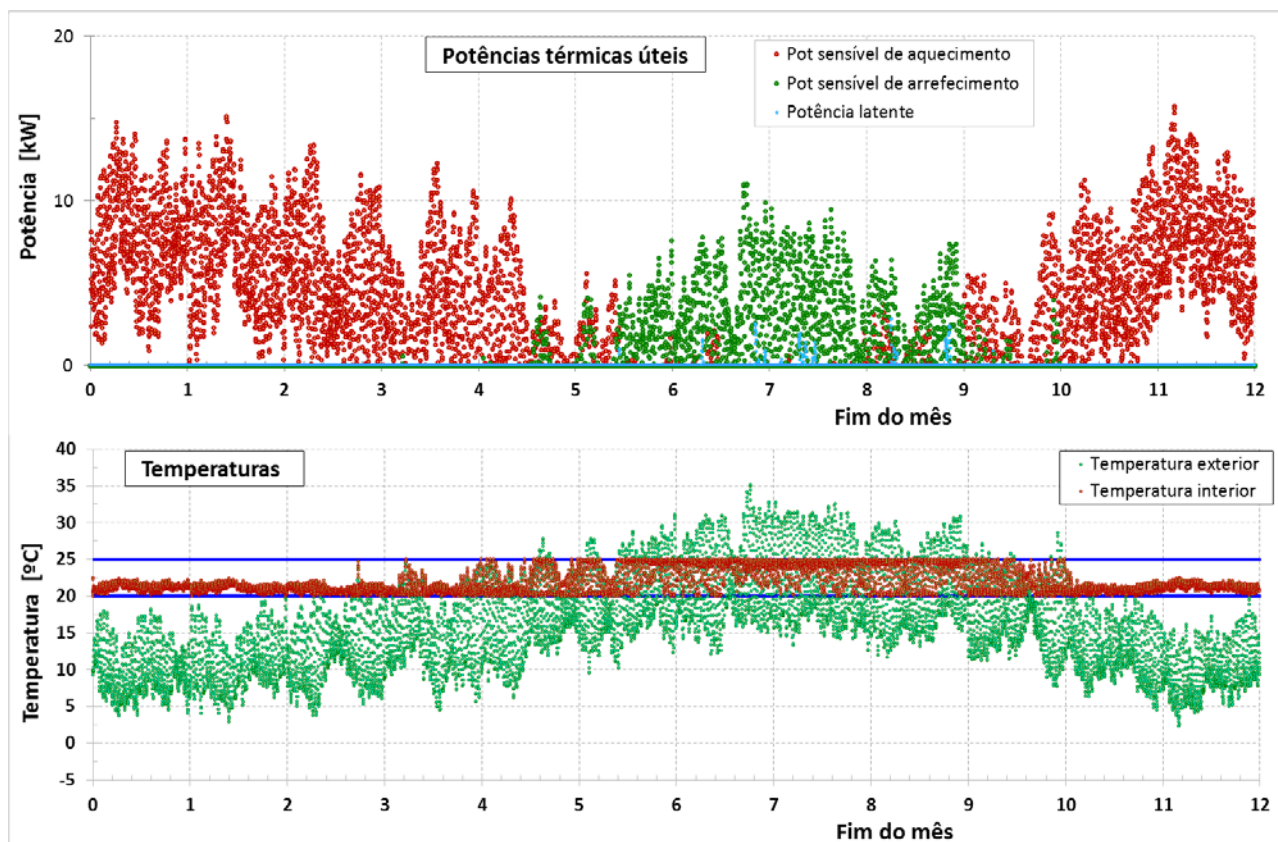


Figura 28. Piso de hotel – valores horários das potências térmicas úteis, da temperatura do ar exterior e da temperatura do ar interior.

Na Figura 28 podemos constatar as variações, durante um ano de utilização do piso do hotel, das potências sensíveis de aquecimento e de arrefecimento e das latentes. Podemos afirmar que para este caso os equipamentos de climatização deveriam ter cerca de 20 kW de potência (soma da sensível mais latente) para a realização do aquecimento (valor um pouco maior do que o necessário por margem de segurança) e de 15 kW de potência para a realização do arrefecimento. Com estas potências disponíveis, como se pode analisar na Figura 28, as temperaturas interiores mantêm-se dentro do intervalo de temperaturas pré-definido a uma temperatura mínima de 20°C e uma máxima de 25°C.

4.3. Edifício escolar

O terceiro teste á folha de cálculo *SEnergEd* consiste na simulação térmica e energética de um edifício escolar, ao qual foi realizada uma grande remodelação acompanhada de uma ampliação, podendo o mesmo ser considerado como novo (RSECE, 2006; Raimundo, 2007; SCE-DL, 2013). O edifício encontra-se inserido no interior da zona urbana de Serpa, a que corresponde uma zona climática I1 – V3-S (RCCTE, 2006), está a cerca de duzentos e sessenta metros (260 m) de altitude e encontra-se a aproximadamente duzentos quilómetros da costa marítima (200 km).

O edifício tem uma área útil de pavimento de 642 m² e um pé direito de 3.03 m. Conforme se pode observar na Figura 29, está repartido por dois pisos, Rés-do-chão e 1º andar. O edifício é maioritariamente composto por salas de aulas, gabinetes e um refeitório e tem a sua fachada principal voltada a Sul. Apresenta-se na Figura 30 a planta do Rés-do-Chão e na Figura 31 a planta do Piso 1, em que a fachada principal aparece do lado direito. Mais detalhes sobre esta escola podem ser encontrados em Lamas (2007).



Figura 29. Aspeto geral do edifício escolar, com a fachada principal voltada a Sul.



Figura 30. Planta do Rés-do-Chão do edifício escolar (fachada principal para a direita).



Figura 31. Planta do Piso 1 do edifício escolar (fachada principal para a direita).

O edifício será dotado de um equipamento de climatização (aquecimento e arrefecimento) do tipo Chiller/bomba de calor, tendo como fonte de energia a eletricidade, com uma eficiência do sistema para a função de aquecimento $COP = 2.9$ e uma eficiência em modo de arrefecimento $EER = 2.7$.

Na simulação deste edifício foi considerado um funcionamento de acordo com a sua tipologia, o qual se encontra esquematizado no separador representado na Figura 32. Tratando-se de um edifício escolar, o mesmo terá de encerrar para férias durante a totalidade do mês de Agosto e a segunda quinzena de Dezembro. Considera-se ainda que o edifício funciona de modo parcial na primeira quinzena de Abril e de Setembro e durante todo o mês de Julho. Adicionalmente o edifício encontra-se completamente encerrado aos fins de semana (Sábados e Domingos). No decurso das simulações, a folha de cálculo *SEnergEd* assume que quer o número de ocupantes quer o funcionamento dos sistemas ativos instalados no edifício (AVAC, iluminação, equipamentos, etc.) é proporcional à respetiva percentagem de funcionamento.

O edifício funciona na:			1ª quinzena	2ª quinzena
Janeiro --->	Sim - a 100%	Sim - a 100%	Sim - a 100%	Sim - a 100%
Fevereiro --->	Sim - a 100%	Sim - a 100%	Sim - a 100%	Sim - a 100%
Março --->	Sim - a 100%	Sim - a 100%	Sim - a 100%	Sim - a 100%
Abril --->	Sim - a 20%	Sim - a 100%	Sim - a 100%	Sim - a 100%
Maio --->	Sim - a 100%	Sim - a 100%	Sim - a 100%	Sim - a 100%
Junho --->	Sim - a 100%	Sim - a 100%	Sim - a 100%	Sim - a 100%
Julho --->	Sim - a 60%	Sim - a 20%	Sim - a 20%	Sim - a 20%
Agosto --->	Não	Não	Não	Não
Setembro --->	Sim - a 60%	Sim - a 100%	Sim - a 100%	Sim - a 100%
Outubro --->	Sim - a 100%	Sim - a 100%	Sim - a 100%	Sim - a 100%
Novembro --->	Sim - a 100%	Sim - a 100%	Sim - a 100%	Sim - a 100%
Dezembro --->	Sim - a 100%	Não	Não	Não

Figura 32. Funcionamento de edifício escolar durante o ano.

Apresentam-se nas Figuras 33 e 34 os resultados previstos pela folha de cálculo *SEnergEd* para um ano de funcionamento deste edifício escolar. Na Figura 33 consta um resumo dos parâmetros relacionados com o consumo anual de energia e com as potências máximas recomendadas para o sistema responsável pelas funções de aquecimento e de arrefecimento. Na Figura 34 apresenta-se em modo gráfico os valores, para cada uma das 8760 horas do ano, das potências térmicas úteis relacionadas com o aquecimento e com o arrefecimento e as temperaturas do ar no exterior e no interior do edifício.

	Necessidade (energia útil)		Consumo (energia final)	
	Sem contribuição energia renovável [kWh/ano]	Após contribuição energia renovável [kWh/ano]	Consumo [kWh/ano]	Consumo [%]
Energia global para o edifício	74.642,57	74.642,57	47.053,87	100,00%
Energia para aquecimento:				
- Componente sensível	25.288,97	25.288,97	8.720,34	18,53%
- Componente latente	3.182,94	3.182,94	1.097,57	2,33%
Energia para arrefecimento:				
- Componente sensível	18.248,06	18.248,06	6.758,54	14,36%
- Componente latente	173,00	173,00	64,08	0,14%
Energia para ventilação e bombagem	6.215,44	6.215,44	8.879,20	18,87%
Energia para equipamentos (não AVAC)	2.435,65	2.435,65	2.435,65	5,18%
Energia para iluminação	19.098,50	19.098,50	19.098,50	40,59%
Energia para climatização (aquec + arref):	46.892,98	46.892,98	16.640,52	35,36%
- Aquecimento:	28.471,91	28.471,91	9.817,90	20,87%
- Arrefecimento:	18.421,06	18.421,06	6.822,62	14,50%
Potências térmicas máximas (úteis)	Sensível [kW]	Latente [kW]	Total [kW]	Valores máximos absolutos
- Aquecimento:	57,22	13,66	70,87	
- Arrefecimento:	56,58	20,08	76,66	

Figura 33. Edifício escolar – previsão das necessidades e dos consumos anuais e das potências térmicas máximas requeridas para o sistema de AVAC.

Por análise da Figura 33 verifica-se que a potência térmica máxima útil para a função de aquecimento é de aproximadamente 71 kW e a para a função de arrefecimento é de 77 kW. Estas potências máximas advêm da soma da potência máxima sensível com a máxima latente. É de referir que neste caso a diferença entre o consumo de energia para aquecimento e de arrefecimento é pequena, sendo de apenas cerca de 5%, gastando-se 20.87% do total da energia consumida no edifício para aquecimento e 14.50% para arrefecimento. Neste edifício a maior fatia do consumo anual de energia pertence aos gastos relacionados com a iluminação, que representam cerca de 41% do total. Outro consumo de energia relevante é o que diz respeito às funções de ventilação e bombagem, que representa aproximadamente 19% do total.

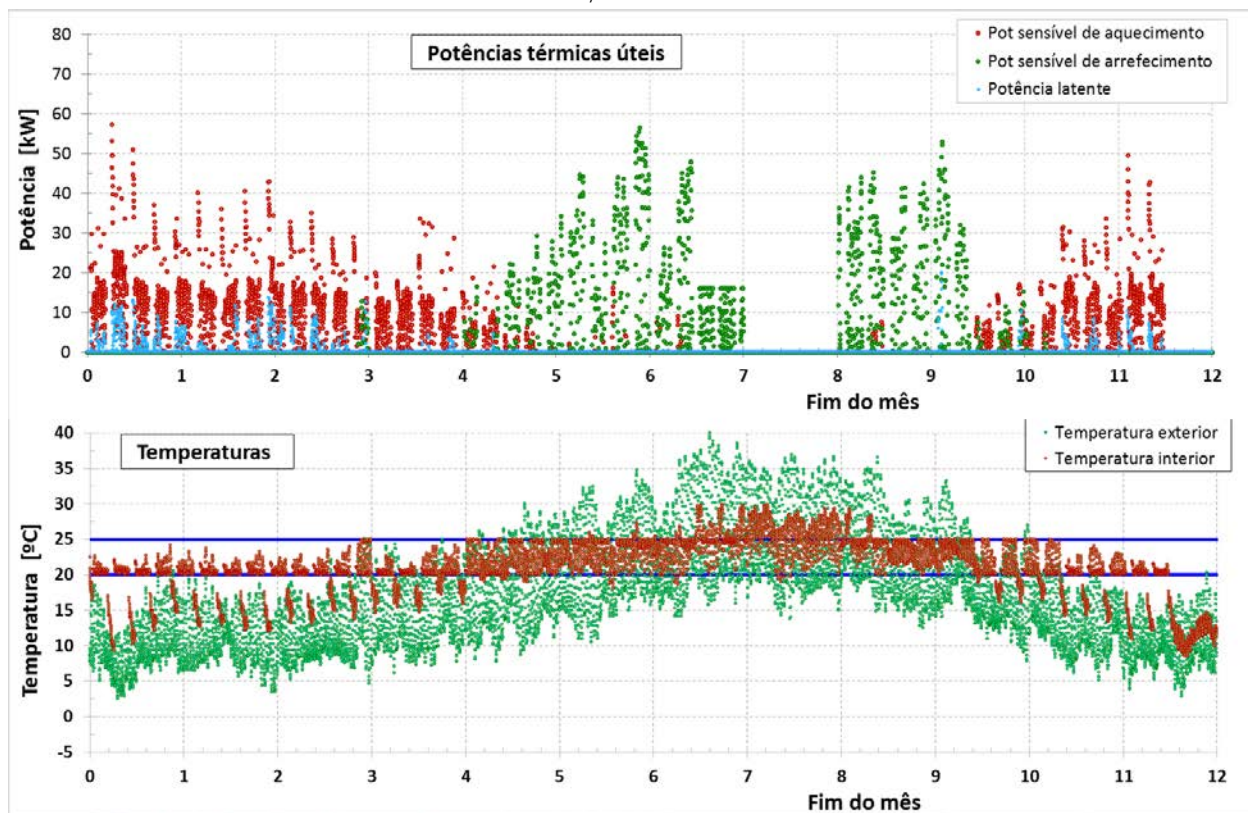


Figura 34. Edifício escolar – valores horários das potências térmicas úteis, da temperatura do ar exterior e da temperatura do ar interior.

Na Figura 34 podem-se confirmar as variações, durante um ano de utilização do edifício escolar, das potências de aquecimento, de arrefecimento e latentes, bem como das temperaturas interiores e exteriores do ar no exterior e no interior do edifício. Conforme se pode verificar, os equipamentos de aquecimento e de arrefecimento cumprem a sua função, mantendo a temperatura do ar interior dentro dos limites impostos para os Set-points (20°C de temperatura mínima e 25°C de máxima). Obviamente que, durante os períodos em que o edifício se encontra encerrado, a temperatura do ar interior ultrapassa os limites anteriores, como é o caso dos fins de semana e das férias escolares. No entanto a temperatura do ar interior nunca chega a atingir os valores do ar exterior. Isto deve-se à boa qualidade da componente passiva do edifício, sendo de realçar a sua elevada inércia térmica, um bom isolamento térmico das suas soluções construtivas opacas e um eficaz sombreamento dos seus envidraçados.

5. CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho era o desenvolvimento de uma folha de cálculo em Excel que permitisse a simulação térmica e energética de edifícios e que a mesma fosse expedita, de fácil utilização e suficientemente precisa para que a mesma possa ser utilizada quer na seleção dos equipamentos de AVAC a instalar quer para verificação da conformidade regulamentar do edifício com o SCE.

Pensa-se que os objetivos inicialmente propostos foram atingidos. Ou seja, desenvolveu-se uma folha de cálculo para a simulação do comportamento térmico e energético de pequenos edifícios de serviços e de habitações, em que a introdução de dados é intuitiva, é de fácil utilização e muito versátil. Este software tanto pode ser utilizado na seleção das soluções construtivas mais adequadas para o edifício, como na pré-seleção dos equipamentos de AVAC, assim como no apoio à certificação energética de edifícios. A folha de cálculo implementada foi designada de *SEnergEd* (Simulação Térmica e Energética de Edifícios).

A metodologia que serve de base ao cálculo assenta no modelo dinâmico horário monozona conhecido como 5R1C por, em teoria, assentar num circuito reo-elétrico constituído por cinco resistências e uma capacitância. A versão utilizada alicerça-se na inicialmente descrita na norma ISO 13790 (2006) e posteriormente melhorada por Raimundo (2007, 2008). Trata-se de uma das metodologias de cálculo admitidas no âmbito das diretivas europeias EPBD (2002, 2010) relativas ao desempenho energético dos edifícios (*Energy Performance of Buildings Directive*) e cuja utilização é permitida pela atual e futura legislação portuguesa relacionada com o Sistema Nacional de Certificação Energética dos Edifícios (SCE, 2006; SCE-DL, 2013).

Não foi realizada a validação do programa por manifesta falta de tempo, pois para o desenvolvimento desta folha de cálculo foi necessário adquirir novos conhecimentos de programação em Excel, anteriormente desconhecidos, o que exigiu bastante tempo e também dedicação. Também se tem a noção de que a folha de cálculo *SEnergEd* possa vir a necessitar de algumas melhorias, nomeadamente em termos de simulação do

comportamento energético dos espaços complementares e de torná-la mais rápida a arrancar e a encerrar. Podem, obviamente, ser ainda introduzidas novas funcionalidades.

Para a realização deste trabalho tive de aplicar muitos dos conhecimentos que adquiri ao longo do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica. Também tive de adquirir conhecimentos novos, nomeadamente relacionados com a simulação térmica e energética de edifícios, eficiência energética, projeto e dimensionamento de sistema de AVAC e programação em Excel.

Como comentário final gostaria de realçar que a realização deste trabalho permitiu-me aprofundar os meus conhecimentos em áreas que considero interessantes e preparar-me melhor para enfrentar a minha atividade futura. Espero que a folha de cálculo *SEnergEd* possa vir a ser útil na conceção de edifícios novos e na remodelação dos existentes, aos projetistas de sistemas de AVAC e aos técnicos envolvidos no Sistema Nacional de Certificação Energética dos Edifícios.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHRAE 140 (2004), “Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs”, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 156 páginas, 2004
- EPBD (2002), “Energy Performance of Buildings Directive (Directiva da UE relativa ao desempenho energético dos edifícios) ”, Directiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, 16 de Dezembro de 2002.
- EPBD (2010), “Energy Performance of Buildings Directive - recast (Directiva da UE relativa ao desempenho energético dos edifícios - reformulada) ”, Directiva 2010/31/EU do Parlamento e do Conselho de 19 de Maio de 2010.
- INETI (2007), “Programa RCCTE-STE de verificação do RCCTE e do RSECE”, INETI, http://www.ineti.pt/produtos_e_servicos/.
- ISO 13790 (2006), “Energy performance of buildings - calculation of energy use for space heating and cooling”, International standard ISO, TC 163 / SC 2 / WG 10 & CEN TC 89 / WG 4 / N 284, 2006.
- ISO 15193 (2006), “Energy performance of buildings - energy requirements for lighting”, International standard ISO, CEN/ TC 169, N 0618, 2006.
- Lamas, F.B., Gaspar, A.R. e Raimundo, A.M. (2007), “Exemplo prático de aplicação do RSECE-energia”, Módulo sobre RSECE-energia dos cursos de formação SCE do DEM - FCTUC.
- Liao, Z e Dexter, A.L. (2004), “A simplified physical model for estimating the average air temperature in multi-zone heating systems”, Building and Environment, Vol. 39, pp. 1013-1022.
- Nielsen, T.R. e Svendsen, S. (2005), “Simplified hourly calculation of energy performance in accordance with the Energy Performance of Buildings Directive”, 7th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Vol. 2, The Icelandic Building Research Institute, Reykjavik, Iceland.
- Raimundo, A.M. (2007), “Enquadramento e aplicação do SCE”, Módulo sobre RSECE-energia dos cursos de formação SCE do DEM - FCTUC.
- Raimundo, A.M. (2008), “Cálculo do comportamento térmico de edifícios através do modelo dinâmico horário monozona 5R1C”, II Conferência Nacional de Métodos Numéricos em Mecânica de Fluidos e Termodinâmica, Universidade de Aveiro, 8-9 de Maio de 2008
- Raimundo, A.M., Gaspar, A.R. e Lamas, F.B. (2007), “Exemplo prático de aplicação do RCCTE”, Módulo sobre RCCTE dos cursos de formação SCE do DEM - FCTUC.
- RECS (2013), “Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e

- Serviços”, Portarias e Despachos ainda não publicados em Diário da República.
- REH (2013), “Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação”, Portarias e Despachos ainda não publicados em Diário da República.
- RCCTE (2006), “Regulamento das características de comportamento térmico dos edifícios”, Decreto-Lei nº 80/2006, Diário da República nº 67 - Série I – A, 4 de Abril de 2006.
- RSECE (2006), “Regulamento dos sistemas energéticos de climatização em edifícios”, Decreto-Lei nº 79/2006, Diário da República nº 67 - Série I – A, 4 de Abril de 2006.
- SCE (2006), “Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios”, Decreto-Lei nº 78/2006, Diário da República nº 67 - Série I – A, 4 de Abril de 2006.
- SCE-DL (2013), “Sistema Nacional de Certificação Energética dos Edifícios”, Decreto-Lei nº 118/2013, Diário da República, 1ª série, nº 159, 20 de Agosto de 2013.
- SCE-L (2013), “Requisitos de acesso e de exercício da atividade no âmbito do SCE”, Lei nº 58/2013, Diário da República, 1ª série, nº 159, 20 de Agosto de 2013.
- Tavares, F.B. (2010), “Implementação de um software de cálculo para verificação do RSECE (Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios)”, Tese de MiEM (Mestrado integrado em Engenharia Mecânica), Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra.
- Yao, R., Baker, N., e McEvoy, M. (2002), “A simplified thermal resistance network model for building thermal simulation”, eSim’02 - Canadian Conference on Building Energy Simulation.

APÊNDICE A

II Conferência Nacional de Métodos Numéricos em Mecânica de Fluidos e Termodinâmica
Universidade de Aveiro, 8-9 de Maio de 2008

Cálculo do comportamento térmico de edifícios através do modelo dinâmico horário monozona 5R1C

António M. Raimundo

Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Luís Reis Santos, 3030 – 788 Coimbra,
Portugal

email: antonio.raimundo@dem.uc.pt

web: <https://woc.uc.pt/dem/>

Sumário

A Directiva nº 2002/91/CE – EPBD (Energy Performance of Buildings Directive) do Parlamento Europeu e do Conselho [1], impõe aos estados membro da União Europeia o estabelecimento de legislação que estabeleça metodologias de cálculo da eficiência energética dos edifícios. A transposição para a ordem jurídica Portuguesa da Directiva EPBD foi consubstanciada em 2006 com a publicação em Diário da República de três diplomas: o que aprova o SCE – Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios [2], o RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios [3] e o RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização nos Edifícios [4].

Em função da tipologia do edifício e da potência máxima nele instalada, a regulamentação anterior exige que, para a certificação energética do edifício e dos sistemas de climatização nele instalados, seja utilizada uma determinada metodologia de cálculo. Enquanto que para os edifícios abrangidos pelo RCCTE [3] a metodologia de cálculo está convenientemente descrita, para os edifícios do foro do RSECE [4] os métodos admissíveis são apenas especificados.

Com o objectivo de colmatar a não existência, na bibliografia disponível, de uma descrição adequada do método recomendado pelo RSECE para o cálculo dos consumos energéticos dos edifícios residenciais e dos pequenos edifícios de serviços e das potências máximas dos sistemas de climatização neles instalados, é apresentado neste texto, de forma estruturada, simples e compacta, a formulação matemática deste modelo. Deste modo, pretende-se contribuir para o aparecimento de novo software de simulação térmica de edifícios de uso amigável e com uma introdução de dados expedita, que permita aos projectistas a realização em tempo útil dos cálculos necessários para a certificação energética do edifícios.

Palavras chave: SCE, RCCTE, RSECE, norma ISO 13790/2006, simulação térmica de edifícios

1 Introdução

A aplicação dos regulamentos SCE a cada edifício depende da sua tipologia e da potência instalada, definida como a máxima entre as potências para aquecimento e para arrefecimento. Ao nível da tipologia os edifícios são classificados como residenciais, de serviços pequenos e de serviços grandes. Os edifícios de serviços são considerados como grandes todos os que tiverem uma área útil de pavimento $A_p > 1000 \text{ m}^2$ (ou 500 m^2 se forem centros comerciais, supermercados, hipermercados ou piscinas aquecidas cobertas) e pequenos todos os outros.

Para os edifícios abrangidos pelo RCCTE [3], ou seja, com uma potência máxima instalada $P \leq 25 \text{ kW}$ (de habitação e pequenos de serviços), a metodologia de cálculo dos seus consumos energéticos para aquecimento, arrefecimento e preparação de AQS está convenientemente descrita no RCCTE. Por outro lado, as metodologias aceites para cálculo dos consumos energéticos dos edifícios abrangidos pelo RSECE [4], que inclui os edifícios com uma potência instalada $P > 25 \text{ kW}$ e os grandes edifícios de serviços, são apenas enumeradas no RSECE (Art.º 10º, 13º, 30º e Anexo VIII).

Para cálculo dos consumos energéticos dos grandes edifícios de serviços e das potências máximas dos sistemas de climatização neles instalados, o RSECE exige metodologias de cálculo dinâmicas detalhadas multizona (RSECE, Art.º 8º, 13º, 30º e Anexo VIII). Para cálculo dos consumos energéticos dos pequenos edifícios de serviços e dos edifícios residenciais e as potências máximas dos sistemas de climatização neles instalados pode ser utilizada a metodologia dinâmica simplificada monozona 5R1C. O RSECE permite, ainda, que este método possa ser utilizado como simulação detalhada multizona desde que aplicado isoladamente a cada zona distinta do edifício e os respectivos resultados sejam adequadamente adicionados para obter o seu desempenho energético global (RSECE, Anexo VIII).

Para simulação dinâmica detalhada multizona devem utilizar-se programas “comerciais”, os quais têm de estar acreditados segundo a norma ASHRAE 140-2004 [5], estando actualmente credenciados, entre outros, os seguintes [6]: EnergyPlus, Esp-r, BLAST, HAP 4.31, TRACE 700, TRNSYS, DOE-2, CLIM2000, CASIS, Visual DOE 4.1, SRES/SUM, S3PAS, TASE, SRES-BRE e TRNSYS/TUD. Enquanto que para simulação detalhada a oferta de *software* é vasta, ao nível da simulação dinâmica simplificada monozona é muito reduzida, sendo de referir apenas o programa RCCTE-STE do INETI [7].

O uso de programas de simulação detalhada exige um grande esforço de aprendizagem e a introdução dos dados necessários à simulação de cada edifício requer ao projectista muito tempo, o que faz com que o recurso a este tipo de programas para cálculo dos consumos energéticos dos edifícios abrangidos pelo RSECE do tipo de serviços pequenos e residenciais e da potência máxima a instalar não seja economicamente viável. Nestes casos é mais aconselhado o uso de programas de simulação dinâmica simplificada monozona.

Com o objectivo de colmatar a não existência, na bibliografia disponível, de uma descrição adequada do método de simulação horária monozona 5R1C, é apresentado neste texto, de forma estruturada, simples e compacta, a formulação matemática deste modelo. Deste modo, pretende-se contribuir para o aparecimento de novo *software* de simulação térmica dos edifícios abrangidos pelo RSECE.

2 Aspectos gerais

De entre as metodologias dinâmicas monozona existentes de cálculo do comportamento térmico dos edifícios enquadrados nas normas de aplicação da directiva EPBD [1], o RSECE [4] opta pelo método horário monozona descrito na norma ISO 13790:2006 [8] e conhecido como 5R1C, por se basear em um circuito de analogia reo-eléctrica composto por 5 resistências e 1 capacitância.

Este modelo é baseado num balanço térmico em regime transitório, os cálculos são efectuados com base na área útil de pavimento (A_p) e no volume útil (Vol) da FA/edifício (conforme definidos no RCCTE), assume intervalos de tempo (*time steps*) de uma hora e considera a FA/edifício como uma única zona interna (monozona), constituída apenas pelos espaços úteis. Não permite calcular o comportamento térmico dos espaços considerados como não úteis (conforme definidos no RCCTE). Considera que não existe transferência de calor entre a zona útil em simulação e os espaços adjacentes em que seja previsível que a temperatura do ar interior destes não difere em mais dos que 4 °C da do espaço em questão.

Critérios de validade de aplicação do modelo monozona 5R1C:

- Todos os espaços da zona útil têm as mesmas temperaturas de *set-point* do ar interior (mínima e máxima);
- Só existe um sistema de aquecimento (ou nenhum), o qual serve todos os espaços da zona útil;

- Só existe um sistema de arrefecimento (ou nenhum), o qual serve todos os espaços da zona útil;
- Se existir um sistema de ventilação mecânica, pelo menos 96% do caudal de ar novo é introduzido no espaço útil (ou seja, 4% do caudal de ar novo pode ser fornecido aos espaços não úteis ou outros);
- Se um ou mais dos critérios anteriores não for aplicável é necessário recorrer à simulação dinâmica multizona.

Informação necessária para aplicação do modelo (*Inputs*):

- Localização, posição e orientação do edifício;
- Base de dados climatológicos horários para o local de implantação do edifício;
- *Layout* de implantação do edifício (para efeitos de radiação solar e sombreamentos);
- Características geométricas e propriedades termofísicas e solares da envolvente exterior opaca;
- Características geométricas e propriedades termofísicas e solares dos vãos envidraçados;
- Caracterização dos espaços vizinhos considerados como não úteis (coeficiente τ , definido no RCCTE);
- Características geométricas e propriedades termofísicas da envolvente interior com requisitos térmicos;
- Características geométricas e propriedades termofísicas da envolvente interior sem requisitos térmicos;
- Características geométricas e propriedades termofísicas dos elementos internos ao espaço útil, para efeitos de massa térmica (inércia);
- Ganhos (ou perdas) de calor por fontes internas (ocupantes, iluminação, equipamentos, etc.);
- Eficiência dos sistemas de recuperação de energia e suas características de funcionamento;
- Características de funcionamento dos sistemas do tipo *free-cooling*;
- Taxas de renovação de ar (caudal de ar novo);
- Perfis de utilização (pessoas, equipamentos, iluminação, etc.);
- Características e perfis de funcionamento dos sistemas AVAC;
- Potência máxima de aquecimento permitida pelos equipamentos instalados ($Q_{h, \max}$);
- Potência máxima de arrefecimento permitida pelos equipamentos instalados ($Q_{c, \max}$);
- Set-point para a temperatura mínima do ar interior (T_{seth});
- Set-point para a temperatura máxima do ar interior (T_{setc}).

Informação obtida com a aplicação do modelo (*Outputs*):

- Evolução horária da temperatura média do ar no interior do espaço útil (T_i);
- Evolução horária da temperatura média das superfícies da envolvente em contacto com o ar interior (T_s);
- Evolução horária da temperatura média da massa térmica (T_m);
- Potência térmica fornecida (ou retirada) pelos sistemas de aquecimento e de arrefecimento (Q_{hc}), Fig. 1;
- Consumo de energia (por ano, semestre, mês, etc.) para aquecimento (Q_{aq}), para arrefecimento (Q_{arr}) e para outros fins (Q_{out});
- Potências máximas permitidas pelo RSECE para os sistemas de climatização a instalar na FA/edifício;
- Indicador de eficiência energética para os padrões nominais (IEE_{nom}) e para os reais (IEE_{real});
- Vários outros parâmetros de menor relevo.

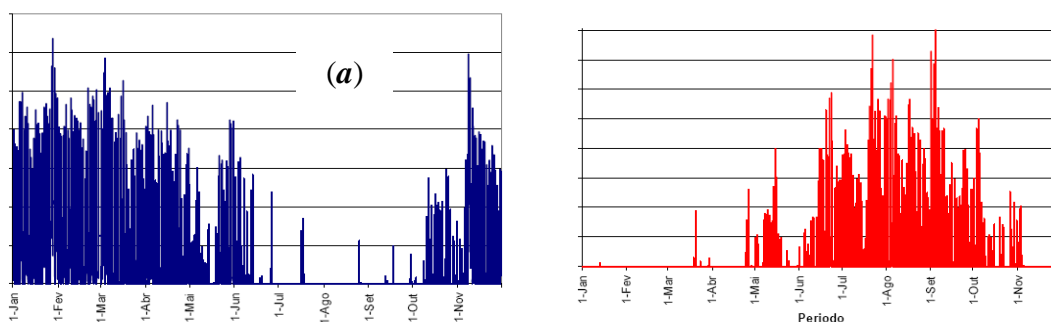


Fig.1. Potência útil fornecida pelo sistema de climatização: (a) aquecimento, (b) arrefecimento.

3 Esquema de princípio

É feita a distinção entre a temperatura do ar no interior da zona (T_i), a temperatura média das superfícies da envolvente em contacto com o ar interior (T_s) e a temperatura média da massa térmica (T_m), conforme se representa esquematicamente na Fig. 2.

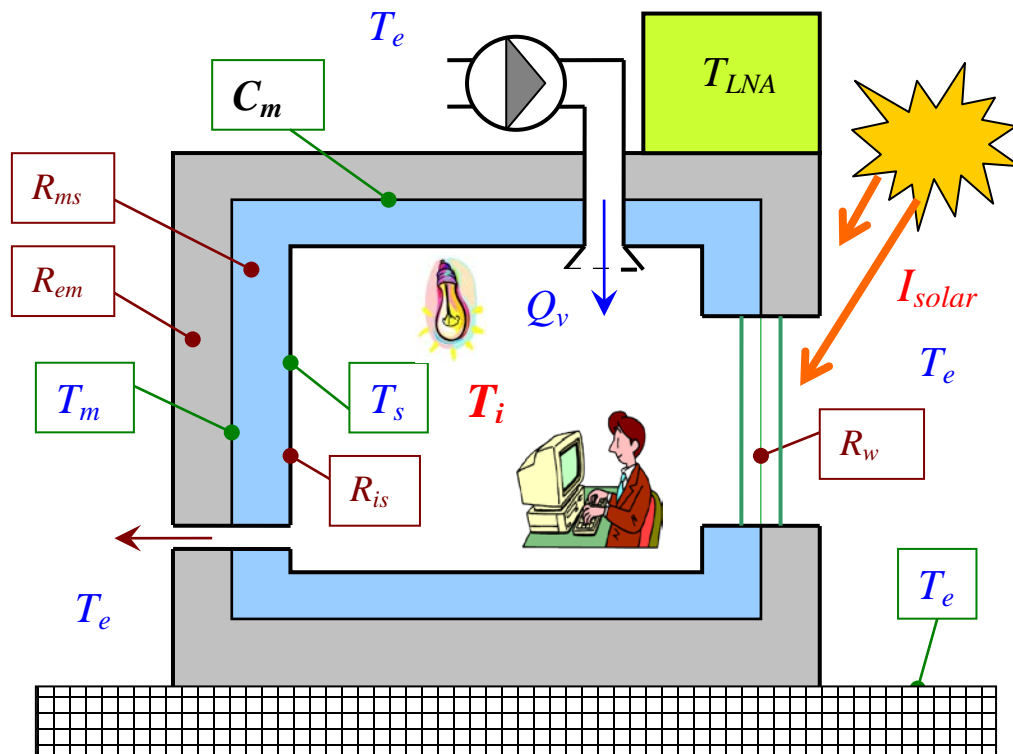


Fig.2. Esquema de princípio.

O método assenta numa metodologia de simulação horária anual (8760 horas) de um espaço monozona representado esquematicamente na Fig. 2, com recurso a equações simplificadas representativas dos fenómenos de transmissão de calor envolvidos, em que:

T_i – temperatura média do ar no interior do espaço útil [°C];

T_s – temperatura média das superfícies da envolvente em contacto com o ar interior [°C];

T_m – temperatura média da massa térmica, massa de inércia [°C];

T_e – temperatura do ar exterior e das superfícies sólidas não pertencentes à envolvente da zona útil [°C];

T_{LNA} – temperatura dos locais não úteis ou não aquecidos, $T_{LNA} = \tau \cdot T_e$ [°C];

I_{solar} – radiação solar [W];

C_m – massa de inércia, concentrada virtualmente no interior dos elementos opacos da envolvente [J / °C];

R_{is} – resistência térmica entre as superfícies interiores e o ar interior [$m^2 \cdot ^\circ C / W$];

R_{ms} – resistência térmica entre a massa térmica e as superfícies interiores dos elementos opacos [$m^2 \cdot ^\circ C / W$];

R_{em} – resistência térmica entre o exterior e a massa térmica dos elementos opacos [$m^2 \cdot ^\circ C / W$];

R_w – resistência térmica dos vãos envidraçados entre o exterior e o ar interior [$m^2 \cdot ^\circ C / W$];

Q_{hc} – fluxo de calor fornecido (ou retirado) pelos sistemas de climatização [W], não representado na figura;

Q_{is} – fluxo de calor transferido entre as superfícies interiores da envolvente e o ar interior [W], não representado;

Q_v – fluxo de energia térmica associado ao caudal de ar novo introduzido no espaço [W];

Q_w – fluxo de calor pelos vãos envidraçados em contacto com o exterior [W], não representado na figura;

Q_{op} – fluxo de calor através dos elementos opacos da envolvente [W], não representado na figura;

$Q_{op-solar}$ – ganhos solares através da envolvente opaca [W], não representado na figura;

$Q_{w-solar}$ – ganhos solares através dos vãos envidraçados [W], não representado na figura;

Q_{int} – fluxo de calor gerado (ou consumido) internamente [W], não representado na figura.

4 Características geométricas

As características geométricas necessárias para a aplicação do modelo são medidas pelo interior e são definidas de acordo com o RCCTE [3]:

A_p – área útil de pavimento [m^2];

P_d – pé direito médio [m];

Vol – volume do espaço útil [m^3] $\rightarrow Vol = A_p \cdot P_d$;

A_s – área total das faces interiores da envolvente (opaca + envidraçados) [m^2].

5 Características associadas á inércia

A partir do indicador de inércia térmica (I_t) e da área útil de pavimento (A_p), determinados seguindo os pressupostos do RCCTE, determinam-se as características associadas à inércia recorrendo à Tabela 1, em que:

A_m – área de transferência da massa térmica [m^2];

C_m – capacitância térmica (ou massa para a inércia) da FA/edifício [$J / ^\circ C$].

Tabela 1. Características associadas à inércia.

I_t [kg / m ² de pavimento]	Classe de inércia	A_m [m ²]	C_m [J / °C]
$I_t < 50$	Muito fraca	$2,5 \cdot A_p$	$80\ 000 \cdot A_p$
$50 \leq I_t < 150$	Fraca	$2,5 \cdot A_p$	$110\ 000 \cdot A_p$
$150 \leq I_t \leq 400$	Média	$2,5 \cdot A_p$	$165\ 000 \cdot A_p$
$400 < I_t \leq 700$	Forte	$3,0 \cdot A_p$	$260\ 000 \cdot A_p$
$I_t > 700$	Muito forte	$3,5 \cdot A_p$	$370\ 000 \cdot A_p$

6 Representação esquemática do modelo

O método assenta numa metodologia de simulação horária anual (8760 horas) de um espaço monozona representado esquematicamente pelo circuito reo-eléctrico representado na Fig. 3, composto por 5 resistências térmicas e 1 capacitância → modelo 5R1C.

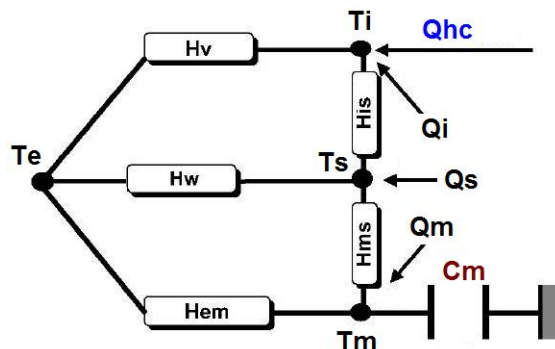


Fig.3. Representação esquemática do modelo.

Para além das temperaturas anteriormente referidas (T_i , T_s , T_m e T_e) e da capacitância térmica ou massa para a inércia (C_m), no esquema encontram-se evidenciados os fluxos de calor [em W]:

Q_{hc} – fornecido (ou retirado) pelos sistemas de climatização, fluxo de calor necessário para aquecer (ou arrefecer) o ar interior por forma a que $T_{seth} \leq T_i \leq T_{setc}$;

Q_i – fornecido ao ar interior, a partir dos ganhos internos (Q_{int});

Q_s – fornecido às superfícies interiores da envolvente, por ganhos internos (Q_{int}) e por radiação solar através dos vãos envidraçados ($Q_{w-solar}$);

Q_m – fornecido à capacitância térmica (C_m), por ganhos internos (Q_{int}) e por ganhos solares através dos elementos opacos ($Q_{op-solar}$).

As condutâncias térmicas H [em W / °C] dizem respeito à:

H_{is} – transmissão de calor entre as superfícies interiores da envolvente e o ar interior;

H_v – transferência de energia térmica associada ao caudal de ar novo insuflado;

H_w – transmissão de calor (condução) pelos vãos envidraçados entre o exterior e o ar interior;

H_{ms} – condução de calor entre a massa térmica e as superfícies interiores dos elementos opacos;

H_{em} – transmissão de calor entre o exterior e a massa térmica dos elementos opacos,

e são definidas como

$$H = \frac{A}{R} = \frac{\text{Área de transferência de calor [m}^2\text{]}}{\text{Resistência térmica [m}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{W]}} \tag{1}$$

7 Fluxos de calor envolvidos

Apresentam-se seguidamente as expressões a utilizar para determinar os fluxos de calor *instantâneos* considerados no modelo 5RIC.

7.1 Transmissão de calor das superfícies da envolvente para o ar interior

Fluxo de calor transferido por convecção das superfícies interiores da envolvente (opaca + envidraçados) para o ar interior da zona útil

$$Q_{is} = h_{is} \cdot A_s \cdot (T_s - T_i) \rightarrow H_{is} = h_{is} \cdot A_s \quad (2)$$

h_{is} – coeficiente de transferência de calor por convecção entre as faces interiores da envolvente e o ar interior ($h_{is} = 3,45 \text{ W / m}^2 \cdot \text{°C}$).

7.2 Transmissão de calor da massa térmica para as superfícies da envolvente

Fluxo de calor transferido por condução da massa térmica para as superfícies interiores da envolvente

$$Q_{ms} = h_{ms} \cdot A_m \cdot (T_m - T_s) \rightarrow H_{ms} = h_{ms} \cdot A_m \quad (3)$$

h_{ms} – coeficiente de transferência de calor por condução entre a massa térmica e as faces interiores da envolvente ($h_{ms} = 9,10 \text{ W / m}^2 \cdot \text{°C}$).

7.3 Transferência de energia térmica associada à insuflação de ar novo

Tendo em conta que para o ar $\rho \cdot c_p / 3600 \approx 0,34$, as perdas de calor (por unidade de tempo) correspondentes à renovação do ar interior, vêm

$$Q_v = \rho \cdot c_p \cdot Rph \cdot Vol \cdot (T_i - T_e) / 3600 \rightarrow Q_v = 0,34 \cdot Rph \cdot Vol \cdot (T_i - T_e) \quad (4)$$

Rph – caudal de insuflação de ar novo no espaço útil [renovações / h].

Tendo em conta que o sistema mecânico de ventilação só deve funcionar durante os períodos em que a zona útil está ocupada por pessoas, a existência dispositivos de recuperação de calor do ar de rejeição e a utilização de *free-cooling* durante o período mais quente do ano

$$Q_v = 0,34 \cdot Vol \cdot (f_{v1} \cdot Rph_1 + f_{v2} \cdot Rph_2) \cdot (T_i - T_e) \rightarrow H_v = 0,34 \cdot Vol \cdot (f_{v1} \cdot Rph_1 + f_{v2} \cdot Rph_2) \quad (5)$$

$$\text{com } f_{v1} = \max[f_{fc}, f_{ocup} \cdot (1 - \varepsilon_v)] \quad \text{e} \quad f_{v2} = 1 - \max[f_{fc}, f_{ocup}] \quad (6)$$

Rph_1 – caudal de insuflação de ar novo (por ventilação mecânica ou natural) durante os períodos de ocupação e de *free-cooling*, [renovações / h];

Rph_2 – caudal de insuflação de ar novo pelos durante os períodos de não ocupação [renovações / h];

f_{fc} – factor de *free-cooling*:

$f_{fc} = 1$ quando entre 15 de Junho e 15 de Setembro e $(T_i - T_e) > 4 \text{ °C}$, $f_{fc} = 0$ nas restantes situações;

f_{ocup} – factor de ocupação:

$f_{ocup} = 1$ para ocupação do espaço útil superior a 10% (ou outro valor), $f_{ocup} = 0$ nos restantes casos;

ε_v - eficiência dos dispositivos de recuperação de calor do ar de rejeição ($0,5 \leq \varepsilon_v \leq 1$).

7.4 Transmissão de calor pelos vãos envidraçados

Estes fluxos de calor instantâneos são obtidos pelas “mesmas” equações do modelo sazonal em regime quase-permanente adoptado no RCCTE. Então, considerando que a FA/edifício possui n_j vãos envidraçados em contacto com o exterior, vem

$$Q_w = \sum_{j=1}^{n_j} U_{w,j} \cdot A_{w,j} \cdot (T_i - T_e) \rightarrow H_w = \sum_{j=1}^{n_j} U_{w,j} \cdot A_{w,j} \cdot \text{com } U_{w,j} = 1 / \left[\left(1 / U_{\text{wdn},j} \right) - R_{\text{si}} \right] \quad (7)$$

$A_{w,j}$ – área total do vão envidraçado j , isto é, área da janela, incluindo vidro e caixilho [m^2];

$U_{\text{wdn},j}$ – coeficiente de transmissão térmica superficial médio dia-noite do vão j [$\text{W/m}^2 \cdot \text{°C}$];

R_{si} – resistência térmica superficial interior do vão j [$\text{m}^2 \cdot \text{°C/W}$], Quadro VII.1 do RCCTE [3].

7.5 Transmissão de calor pelos elementos opacos da envolvente

As perdas de calor pela envolvente opaca (pelas paredes, coberturas, pavimentos, etc.) são obtidos pelas “mesmas” equações do modelo sazonal em regime quase-permanente adoptado no RCCTE [3], têm origem na diferença de temperatura entre o interior e o exterior da zona útil e resultam da soma de 4 parcelas:

Q_{ext} - perdas de calor pelos ni elementos opacos em contacto com o exterior (paredes, coberturas e pavimentos), quer em zona corrente quer em zona de ponte térmica plana [W];

Q_{lna} - perdas de calor pelos nl elementos da envolvente (paredes, envidraçados, coberturas e pavimentos) em contacto com locais não aquecidos (p. ex. armazéns, arrecadações, garagens, caixas de escada, sótãos não habitados, etc.) quer em zona corrente quer em zona de ponte térmica plana [W];

Q_{pe} - perdas de calor pelos nt elementos da envolvente em contacto com o terreno (paredes e pavimentos) [W];

Q_{pt} - perdas de calor pelas nk pontes térmicas lineares existentes na FA/ edifício [W].

$$Q_{op} = Q_{ext} + Q_{lna} + Q_{pe} + Q_{pt} \rightarrow H_{op} = \sum_{i=1}^{ni} U_{op,i} \cdot A_i + \sum_{l=1}^{nl} U_{op,l} \cdot A_l \cdot \tau_l + \sum_{t=1}^{nt} \psi_t \cdot B_t + \sum_{k=1}^{nk} \psi_k \cdot B_k \quad (8)$$

com $U_{op} = 1 / \left[(1/U) - R_{si} \right]$

R_{si} – resistência térmica superficial interior do elemento construtivo [$m^2 \cdot ^\circ C/W$], Quadro VII.1 do RCCTE [3];

U_i – coeficiente de transmissão térmica do elemento opaco i da envolvente exterior [$W/m^2 \cdot ^\circ C$];

A_i – área do elemento opaco i da envolvente exterior [m^2];

U_l – coeficiente de transmissão térmica do elemento l em contacto com uma zona não útil [$W/m^2 \cdot ^\circ C$];

A_l – área do elemento l em contacto com uma zona não útil [m^2];

τ_l – coeficiente de temperatura da zona não útil em contacto com o elemento l [m^2];

ψ_t – coeficiente de transmissão térmica linear do elemento t em contacto com o solo [$W / m \cdot ^\circ C$];

B_t – desenvolvimento linear do elemento t em contacto com o solo [m];

ψ_k – coeficiente de transmissão térmica linear da ponte térmica linear k [$W / m \cdot ^\circ C$];

B_k – desenvolvimento linear da ponte térmica linear k [m].

A condutância térmica associada às perdas de calor pela envolvente opaca (H_{op}) é dividida em duas parcelas (2 resistências térmicas em série), vindo

$$\frac{1}{H_{op}} = \frac{1}{H_{em}} + \frac{1}{H_{ms}} \rightarrow H_{em} = 1 / \left(\frac{1}{H_{op}} - \frac{1}{H_{ms}} \right) \quad (9)$$

H_{em} – condutância térmica entre o exterior e a massa térmica dos elementos opacos [$W / ^\circ C$];

H_{ms} – condutância térmica entre a massa térmica e as superfícies interiores dos elementos [$W / ^\circ C$] (equação 3).

7.6 Ganhos radiativos através da envolvente opaca

Os ganhos por radiação através da envolvente exterior opaca (Q_{op-rad} , em W) são obtidos seguindo uma abordagem muito próxima da utilizada no modelo sazonal em regime quase-permanente adoptado no RCCTE [3] para a contabilização dos ganhos solares. No entanto, agora é incluída uma nova parcela, a radiação de longo comprimento de onda perdida para o céu frio (Q_{sky}). Deste modo, estes fluxos de calor resultam da diferença entre a radiação solar absorvida pelas faces exteriores dos elementos opacos (Q_{sol}) e a radiação perdida para o céu frio (Q_{sky}) pelas mesmas superfícies. Então, para os ni elementos opacos da envolvente exterior do espaço útil, vem

$$Q_{op-rad} = Q_{sol} - Q_{sky} \rightarrow Q_{op-rad} = \sum_{i=1}^{ni} U_i \cdot A_i \cdot \left(\alpha_i \cdot E_i \cdot F_{sop,i} - F_{r,i} \cdot h_{r,i} \cdot \Delta T_{sky} \right) / h_e \quad (10)$$

U_i – coeficiente de transmissão térmica superficial do elemento opaco i da envolvente [$W/m^2 \cdot ^\circ C$];

A_i – área do elemento opaco i [m^2];

α_i – coeficiente de absorção (para a radiação solar) da face exterior do elemento opaco i ;

E_i – radiação solar global incidente na face exterior do elemento opaco i [W/m^2];

$F_{sop,i}$ – factor de redução por sombreamentos:

$F_{sop,i} = 1$ para superfícies não sombreadas e $F_{sop,i} = 0$ para superfícies completamente sombreadas;

$F_{r,i}$ – factor de forma da face exterior do elemento i e o céu:

$F_{r,i} = 1$ para superfícies horizontais sem obstáculos pelo meio, $F_{r,i} = 0.5$ para superfícies verticais sem obstáculos pelo meio e $F_{r,i} = 0$ para superfícies completamente obstruídas;

$h_{r,i}$ – coeficiente de transmissão de calor por radiação para o céu frio ($h_{r,i} = 5 \cdot \varepsilon_i$, em $W/m^2 \cdot ^\circ C$, em que ε_i é a emissividade radiativa da face exterior do elemento i);

ΔT_{sky} – diferença de temperatura entre o ambiente exterior (a T_e) e o céu frio (a T_{sky}): $\Delta T_{sky} \approx 11$ °C;
 h_e – coeficiente de transmissão de calor (por convecção + radiação) na face exterior da envolvente externa:
 $h_e = 25$ W/m².°C.

7.7 Ganhos solares através dos vãos envidraçados

Estes fluxos de calor instantâneos são obtidos seguindo a abordagem utilizada no modelo sazonal em regime quase-permanente adotado no RCCTE [3]. Então, os ganhos solares através dos n_j vãos envidraçados pertencentes à envolvente exterior vêm

$$Q_{w-solar} = \sum_{j=1}^{n_j} A_{w,j} \cdot F_{s,j} \cdot F_{g,j} \cdot F_{w,j} \cdot g_{\perp,j} \cdot E_j \quad (11)$$

$A_{w,j}$ – área total do vão envidraçado j , isto é, área da janela, incluindo vidro e caixilho [m²];
 $F_{s,j}$ – factor de obstrução ($F_s = F_h \cdot F_o \cdot F_f$, respectivamente, F_h - factor de sombreamento do horizonte, F_o – factor de sombreamento por elementos horizontais próximos e F_f – factor de sombreamento por elementos verticais próximos);
 $F_{g,j}$ - fracção envidraçada do vão j ;
 $F_{w,j}$ - factor de correcção da selectividade angular do envidraçado j ;
 $g_{\perp,j}$ - factor solar do vão envidraçado j ;
 E_j – radiação solar global incidente no vão envidraçado j [W/m²].

7.8 Ganhos internos

Os ganhos térmicos internos incluem todas as fontes de calor situadas no interior da zona útil (excluindo, obviamente, os sistemas de aquecimento e de arrefecimento), nomeadamente os ganhos de calor devido ao metabolismo de ocupantes e o calor dissipado pelos equipamentos e nos dispositivos de iluminação, entre outros. Estes ganhos dependem essencialmente das potências e dos rendimentos dos dispositivos envolvidos, e dos perfis de utilização (pessoas, equipamentos e iluminação, etc.). Em cada instante, os ganhos térmicos internos (Q_{int} , em W) podem ser obtidos a partir da soma

$$Q_{int} = Q_{ocup} + Q_{equip} + Q_{light} + Q_{ventil} + Q_{other} \quad (12)$$

Q_{ocup} – fluxo de calor libertado pelos ocupantes [W];
 Q_{equip} – fluxo de calor libertado pelos equipamentos [W];
 Q_{light} – fluxo de calor gerado nos sistemas de iluminação [W];
 Q_{ventil} – calor introduzido no interior do espaço útil pelo arrefecimento dos equipamentos de ventilação [W];
 Q_{other} – calor *fornecido* ao interior da zona útil por quaisquer outras fontes de calor [W].

7.9 Ganhos de calor latente

Os ganhos térmicos latentes (Q_{lat} , em W) incluem os internos (derivados das fontes de calor latente situadas no interior da zona útil) e os externos (transferidos para a zona útil através da envolvente pela ventilação e por difusão através dos elementos porosos da mesma), vindo

$$Q_{lat} = Q_{lat-ocup} + Q_{lat-equip} + Q_{lat-other} + Q_{lat-dif} + Q_{lat-v} \quad (13.a)$$

$Q_{lat-ocup}$ – fluxo de calor latente libertado pelos ocupantes [W];
 $Q_{lat-equip}$ – calor latente libertado pelos equipamentos [W];
 $Q_{lat-other}$ – calor latente fornecido por outras fontes [W], processos envolvendo água;
 $Q_{lat-dif}$ – calor transferido por difusão pela envolvente porosa [W];
 Q_{lat-v} – calor latente associado à renovação de ar / ventilação [W].

Cada um dos fluxos de calor latente anteriores deve ser calculado recorrendo a uma equação representativa do fenómeno em apreço. Para obter o calor latente associado à renovação de ar por ventilação recomenda-se

$$Q_{lat-v} = H_v \cdot h_{fg} \cdot (W_e - W_i) / 1007 \quad (13.b)$$

H_v – condutância de ventilação [W / °C];

h_{fg} – calor latente de vaporização [J / kg];

W_e – humidade absoluta do ar exterior [kg_{vapor} / kg_{ar seco}];

W_i – humidade absoluta do ar interior [kg_{vapor} / kg_{ar seco}].

8 Repartição dos fluxos de calor pelos nodos do modelo

Os fluxos de calor não representados por condutâncias térmica são repartidos pelos 3 nodos do modelo da seguinte forma

$$Q_i = 0,5 \cdot Q_{int} \quad , \quad (14)$$

$$Q_m = Q_{op-rad} + 0,5 \cdot Q_{int} \cdot f_{ms} \quad ,$$

$$Q_s = Q_{w-solar} + 0,5 \cdot Q_{int} \cdot (1 - f_{ms}) \quad ,$$

com $f_{ms} = \min[1, A_m/A_s]$

Q_i – fluxo de calor fornecido ao ar interior [W];

Q_m – fluxo de calor fornecido à capacitância térmica C_m [W];

Q_s – fluxo de calor fornecido às superfícies interiores da envolvente do espaço útil [W].

9 Temperaturas nos nodos do modelo

As expressões para as temperaturas nos nodos do modelo podem ser obtidas a partir de balanços térmicos aos volumes de controlo a eles associados. No modelo 5R1C são considerados incrementos de tempo de 1 hora ($\Delta t = 3\,600$ segundos). Os valores obtidos para as temperaturas representam valores médios para a hora em questão, excepto T_m^P e T_m^F que são os valores instantâneos da temperatura da massa térmica, respectivamente, no início e no fim do incremento de tempo.

9.1 Parâmetros característicos

É conveniente considerar as condutâncias térmicas auxiliares H_1 , H_2 e H_3 [em W / °C] e o fluxo de calor total associado à massa térmica Q_{mtot} [em W]

$$H_1 = \frac{1}{(1/H_v) + (1/H_{is})} \quad H_2 = H_1 + H_w \quad , \quad H_3 = \frac{1}{(1/H_2) + (1/H_{ms})} \quad (15)$$

$$Q_{mtot} = Q_m + H_{em} \cdot T_e + \frac{H_3}{H_2} \cdot \left[Q_s + H_w \cdot T_e + H_1 \cdot \left(T_e + \frac{Q_i + Q_{hc}}{H_v} \right) \right] \quad (16)$$

Q_{hc} – fluxo de calor fornecido pelos sistemas de climatização [W],

fluxo de calor necessário para aquecer (ou arrefecer) o ar interior por forma a que $T_{seth} \leq T_i \leq T_{setc}$.

9.2 Temperatura da massa térmica

Por forma a estabilizar o cálculo, iterativo em cada incremento de tempo, deve ser utilizado o esquema de Crank-Nicholson para obter a temperatura no fim do incremento de tempo (T_m^F) a partir do seu valor no início do mesmo (T_m^P), vindo

$$T_m^F = \frac{T_m^P \cdot [C_m - 0,5 \cdot (H_3 + H_{em}) \cdot \Delta t] + Q_{mtot} \cdot \Delta t}{C_m + 0,5 \cdot (H_3 + H_{em}) \cdot \Delta t} \quad (17)$$

A temperatura média da massa térmica durante o intervalo de tempo ($\Delta t = 3600$ segundos), vem então

$$T_m = 0,5 \cdot (T_m^P + T_m^F) \quad (18)$$

9.3 Temperatura média das superfícies interiores da envolvente

Para o intervalo de tempo considerado, o valor médio da temperatura das superfícies da envolvente em contacto com o ar interior vem

$$T_s = \frac{Q_s + H_{ms} \cdot T_m + H_w \cdot T_e + H_1 \cdot [T_e + (Q_i + Q_{hc}) / H_v]}{H_{ms} + H_w + H_1} \quad (19)$$

9.4 Temperatura média do ar no interior do espaço útil

Desprezando a inércia térmica associada ao ar interior ($\rho \cdot c_p \cdot Vol$), a temperatura média do ar interior durante o incremento de tempo considerado resulta

$$T_i = \frac{Q_i + Q_{hc} + H_{is} \cdot T_s + H_v \cdot T_e}{H_{is} + H_v} \quad (20)$$

10 Procedimento iterativo de cálculo

As equações de cálculo das temperaturas da massa térmica (T_m) das superfícies interiores da envolvente (T_s) e do ar no interior do espaço útil (T_i), apresentadas anteriormente, pressupõem conhecido o valor do fluxo de calor fornecido (ou retirado) pelos sistemas de climatização (Q_{hc}), que representa o fluxo de calor necessário para aquecer (ou arrefecer) o ar interior por forma a que $T_{seth} \leq T_i \leq T_{setc}$, em que:

Q_{hc} positivo → aquecimento do ar interior;

Q_{hc} negativo → arrefecimento do ar interior.

Acontece que Q_{hc} é desconhecido, sendo necessário recorrer, em cada incremento de tempo Δt , a um processo iterativo para o cálculo do valor médio de Q_{hc} , T_m , T_s e T_i nesse intervalo de tempo.

Antes dos cálculos relativos ao primeiro incremento de tempo devem ser inicializadas algumas variáveis, sendo recomendável assumir:

$$Q_{hc} = 0, T_i = T_s = T_m = T_m^P = T_m^F = 0,5 \cdot (T_{seth} + T_{setc}), Q_{aq} = 0, Q_{arr} = 0, Q_{equip} = 0, Q_{light} = 0, Q_{ventil} = 0$$

Q_{aq} - consumo total de energia primária para aquecimento [kgep];

Q_{arr} - consumo total de energia primária para arrefecimento [kgep];

Q_{equip} - consumo total de energia primária pelos equipamentos [kgep];

Q_{light} - consumo total de energia primária para iluminação [kgep];

Q_{ventil} - consumo total de energia primária pelos ventiladores e bombas de circulação (fora dos períodos de aquecimento e de arrefecimento) [kgep].

Para converter energia útil em energia primária utilizam-se os factores (RSECE, Anexo IX):

- electricidade → $F_{pu} = 0,290$ kgep / kWh;

- combustíveis sólidos, líquidos e gasosos → $F_{pu} = 0,086$ kgep / kWh.

10.1 Cálculo das temperaturas e da potência útil dos sistemas de climatização

1º passo – verificação se é necessário aquecer ou arrefecer

- fazer $Q_{hc} = 0$ e $T_m^P = T_m^F$ (em que T_m^F é a temperatura da massa térmica no final do instante anterior);

- aplicar as equações (1) a (20) para obter os valores de T_m^F , T_m , T_s e T_i ;

- se $T_{seth} \leq T_i \leq T_{setc}$ → não é necessário aquecimento nem arrefecimento, $Q_{hc} = 0$, o processo convergiu → avançar para o 5º passo;

- se não se verificou a condição anterior → memorizar T_i como $T_{i,0}$ → $T_{i,0} = T_i$.

2º passo – identificação do processo necessário (aquecimento ou arrefecimento)

- se $T_{i,0} < T_{seth}$ → é necessário aquecer → fazer: $T_{set} = T_{seth}$, $Sig = +1$ (memorização do processo), $Q_{hc,max} = Q_{h,max}$ (máxima potência de aquecimento dos equipamentos) → ir para o 3º passo.

- se $T_{i,0} > T_{setc}$ → é necessário arrefecer → fazer: $T_{set} = T_{setc}$, $Sig = -1$ (memorização do processo), $Q_{hc,max} = Q_{c,max}$ (máxima potência de arrefecimento dos equipamentos) → ir para o 3º passo.

3º passo – cálculo da potência de aquecimento ou de arrefecimento

- assumir uma potência de aquecimento ou de arrefecimento $Q_{hc} = 10 \cdot A_p \cdot Sig$;

- aplicar as equações (1) a (20) para obter os valores de T_m^F , T_m , T_s e T_i ;

- memorizar esta T_i como $T_{i,10}$ → $T_{i,10} = T_i$;

- memorizar esta potência Q_{hc} como $Q_{hc,10} \rightarrow Q_{hc,10} = Q_{hc}$;
- calcular a potência (não limitada) que seria necessária para que $T_i \approx T_{set}$

$$Q_{hc,nl} = Q_{hc,10} \cdot (T_{set} - T_{i,0}) / (T_{i,10} - T_{i,0}) \quad (21)$$

- calcular a potência, limitada pela máxima permitida pelos equipamentos instalados ($Q_{hc,max}$), o que poderá levar a uma T_i fora dos limites estabelecidos

$$Q_{hc} = Sig \cdot \min [Sig \cdot Q_{hc,nl} ; Q_{hc,max}] \quad (22)$$

4º passo – cálculo das temperaturas para o intervalo de tempo

Para a potência anterior, aplicar as equações (1) a (20) para obter novos valores para T_m^F , T_m , T_s e T_i .

O processo pode ser considerado como convergido, na medida que mais iterações não produzem um aumento significativo da precisão do cálculo e os valores anteriores podem ser considerados como definitivos.

5º passo – cálculo da energia útil para aquecimento ou para arrefecimento

Energia útil fornecida (ou retirada) ao ar interior pelos sistemas de climatização (E_{hc}), durante o intervalo de tempo considerado (1 hora). Obviamente que: aquecimento $\rightarrow E_{hc}$ positivo e arrefecimento $\rightarrow E_{hc}$ negativo.

$$E_{hc} = Q_{hc} \cdot \Delta t \quad [J] \rightarrow E_{hc} = Q_{hc} \cdot \Delta t / (3,6 \times 10^6) \quad [kWh] \quad (23)$$

10.2 Cálculo dos consumos horários e totais de energia

Entre outros, podem ser determinados os consumos de energia neste intervalo de tempo E [em kWh] e os consumos totais de energia primária desde o início do cálculo Q [em kgep], que se apresentam a seguir.

a) Consumo de energia pelo sistema de aquecimento

$$E_h = + \Delta t \cdot \max [0, Q_{hc}] / (3,6 \times 10^6 \cdot \varepsilon_h) \quad e \quad Q_{aq} = Q_{aq} + F_{pu} \cdot E_h \quad (24)$$

ε_h – eficiência do sistema de aquecimento.

b) Consumo de energia pelo sistema de arrefecimento

$$E_c = - \Delta t \cdot \min [0, Q_{hc}] / (3,6 \times 10^6 \cdot \varepsilon_c) \quad e \quad Q_{arr} = Q_{arr} + F_{pu} \cdot E_c \quad (25)$$

ε_c – eficiência do sistema de arrefecimento.

c) Consumo de energia pelos ventiladores e bombas de circulação

$$E_{ventil} = \Delta t \cdot P_{ventil} \cdot R_{ventil} / (100 \times 3,6 \times 10^6) \quad (26.a)$$

P_{ventil} – soma da potência nominal dos ventiladores com a das bombas de circulação [W];

R_{ventil} – percentagem da potência dos ventiladores e bombas em utilização neste Δt [%].

O RSECE [4] exige que nos consumos anuais de energia primária para aquecimento e para arrefecimento têm de ser incluídos os correspondentes consumos de energia pelos ventiladores e pelas bombas de circulação:

$$Q_{hc} > 0 \rightarrow \text{aquecimento} \rightarrow Q_{aq} = Q_{aq} + F_{pu} \cdot E_{ventil} \quad (26.b)$$

$$Q_{hc} < 0 \rightarrow \text{arrefecimento} \rightarrow Q_{arr} = Q_{arr} + F_{pu} \cdot E_{ventil} \quad (26.c)$$

$$Q_{hc} = 0 \rightarrow \text{só ventilação} \rightarrow Q_{ventil} = Q_{ventil} + F_{pu} \cdot E_{ventil} \quad (26.d)$$

d) Consumo de energia pelos equipamentos

$$E_{equip} = \Delta t \cdot A_p \cdot D_{equip} \cdot R_{equip} / (100 \times 3,6 \times 10^6) \quad e \quad Q_{equip} = Q_{equip} + F_{pu} \cdot E_{equip} \quad (27)$$

D_{equip} – densidade de equipamentos [W/m²];

R_{equip} – percentagem de equipamentos em funcionamento neste intervalo de tempo [%].

e) Consumo de energia pelos sistemas de iluminação do espaço útil

$$E_{light} = \Delta t \cdot A_p \cdot D_{light} \cdot R_{light} / \left(100 \times 3,6 \times 10^6\right) \quad \text{e} \quad Q_{light} = Q_{light} + F_{pu} \cdot E_{light} \quad (28)$$

D_{light} – densidade de iluminação [W/m^2];

R_{light} – percentagem de iluminação em funcionamento neste intervalo de tempo [%].

O cálculo das necessidades de iluminação em função do uso dos espaços e dos respectivos consumos energéticos deve ser feito recorrendo à norma ISO 15193 [9].

10.3 Cálculo dos consumos anuais de energia primária

Os consumos anuais de energia correspondem aos consumos totais após um ano completo de simulação. A partir dos consumos anuais é possível calcular os consumos de energia primária [em kgep / ano] necessários para determinar o Indicador de Eficiência Energética (*IEE*) da FA/edifício, definido no Anexo IX do RSECE [4]:

$$\text{- consumo de energia para aquecimento} \quad \rightarrow \quad Q_{aq} = Q_{aq} - C_{renov,aq} \quad (29)$$

$$\text{- consumo de energia para arrefecimento} \quad \rightarrow \quad Q_{arr} = Q_{arr} - C_{renov,arr} \quad (30)$$

$$\text{- consumo de energia para outros fins} \quad \rightarrow \quad Q_{out} = Q_{ventil} + Q_{equip} + Q_{light} - C_{renov,out} \quad (31)$$

C_{renov} – contribuição anual das energias renováveis para o aquecimento (*aq*), para o arrefecimento (*arr*) e para outros processos (*out*), em kgep / ano.

Notas: (i) se $Q_{aq} < 0 \rightarrow Q_{aq} = 0$; (ii) se $Q_{arr} < 0 \rightarrow Q_{arr} = 0$; (iii) se $Q_{out} < 0 \rightarrow Q_{out} = 0$.

11 Referências

1. EPBD (Energy Performance of Buildings Directive), *Directiva da UE relativa ao desempenho energético dos edifícios*, Directiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, 16 de Dezembro de 2002.
2. SCE (Decreto-Lei nº 78/2006), *Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios*, Diário da República nº 67 - Série I - A, 4 de Abril de 2006.
3. RCCTE (Decreto-Lei nº 80/2006), *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios*, Diário da República nº 67 - Série I - A, 4 de Abril de 2006.
4. RSECE (Decreto-Lei nº 79/2006), *Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios*, Diário da República nº 67 - Série I - A, 4 de Abril de 2006.
5. ASHRAE 140-2004, *Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 156 páginas, 2004.
6. A. M. Raimundo, Metodologias de cálculo, *Módulo RSECE-energia dos cursos de formação SCE do DEM - FCTUC*, <https://woc.uc.pt/dem/2modulecursos.do?idcurso=8>, 2007.
7. Programa RCCTE-STE, INETI, http://www.ineti.pt/produtos_e_servicos/, 2007.
8. ISO 13790, *Energy performance of buildings – calculation of energy use for space heating and cooling*, International standard ISO, TC 163 / SC 2 / WG 10 & CEN TC 89 / WG 4 / N 284, 2006.
9. ISO 15193, *Energy performance of buildings – energy requirements for lighting*, International standard ISO, CEN/ TC 169, N 0618, 2006.