

• U



C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Modelação de Sistemas Radiantes em EnergyPlus

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

Autor

Francisco José Lourenço Pimenta

Orientadores

Adélio Manuel Rodrigues Gaspar (DEM, FCTUC)

Eugénio Miguel de Sousa Rodrigues (ADAI, LAETA)

Júri

Presidente Álvaro Filipe Peixoto Cardoso de Oliveira Gomes

Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais Francisco José Craveiro Bispo Pocinho Lamas

Engenheiro

Orientador Adélio Manuel Rodrigues Gaspar

Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Setembro, 2015

“Acredito profundamente na sorte
e acho que quanto mais trabalho mais a tenho”

Thomas Jefferson

Aos meus pais e irmãos.

Agradecimentos

A realização da dissertação que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Ao Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar e ao Doutor Eugénio Miguel de Sousa Rodrigues pela sua orientação, disponibilidade, esclarecimentos e indicações preciosas.

Aos docentes desta instituição, que ao longo dos últimos anos, contribuíram direta e indiretamente para a realização da presente dissertação.

À minha família, especialmente aos meus pais e irmãos por todo o apoio, incondicional, que me deram, durante toda esta etapa.

Aos meus amigos e colegas que estiveram sempre presentes, pela ajuda e pelos bons momentos partilhados.

Resumo

A eficiência energética é atualmente considerada um dos aspetos fundamentais para a sustentabilidade do planeta e, sabendo que os edifícios são responsáveis por grande parte do consumo energético, torna-se importante prever corretamente o seu comportamento. Programas de simulação dinâmica são instrumentos eficazes nesse domínio. Para além de estimar o consumo energético, estes ajudam os projetistas a comparar e dimensionar os sistemas de climatização a implementar.

Os objetivos da presente dissertação são modelar, em simulação dinâmica, sistemas de climatização radiante, aplicar estes num caso-de-estudo de uma residência unifamiliar de um piso e comparar a sua aplicação em diferentes elementos da construção (pavimento, parede e teto). Pretende-se também que este trabalho resulte num guia de orientação à modelação de sistemas radiantes.

A primeira fase da dissertação resume-se à explicação e orientação da modelação de sistemas radiantes no programa *EnergyPlus*. Depois é analisado o Caso-de-Estudo instalado com sistemas radiantes.

O programa de simulação revelou-se versátil mas bastante complexo e, depois de analisados os resultados, concluiu-se que todas as localizações cumprem com as exigências de conforto mas a aplicação no pavimento e no teto através de painéis apresenta um menor consumo energético que nas paredes.

Palavras-chave: eficiência energética, *EnergyPlus*, sistemas radiantes, painéis radiantes, pavimento radiante, parede radiante.

Abstract

Knowing that buildings are responsible for one of the biggest shares of energy demands, efficiency is considered a main issue for the sustainability of planet resources placing building behavior predictions on a raising importance level.

Dynamic simulation software's are effective tools in this area. In addition to estimating energy consumptions, they help designers and engineers comparing and designing HVAC systems to be implemented.

The objective of this work is to modeling, in dynamic simulation, radiant systems, apply these on a case study of a low rise single-family house and compare the results under different constructions elements (floor, wall and ceiling).

It is intended that this work will result in a guidance document for modeling of such systems.

The first stage of the work concerns in the explanation and guidance of modeling radiant systems in EnergyPlus software. Then, the case study installed with radiant systems is analyzed.

The simulation software interface offered versatility but complexity and after analyzing the results, it was concluded that all locations reached the comfort requirements. Application on floor and ceiling through radiant panels had a lower energy consumption than in walls.

Keywords energy efficiency, EnergyPlus, radiant systems, radiant panels, radiant floor, radiant wall.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xv
Simbologia e Siglas	xvii
Simbologia.....	xvii
Siglas	xvii
1. Introdução.....	1
1.1. Objetivo	2
1.2. Estrutura.....	2
2. Revisão da Literatura.....	5
2.1. Origem	5
2.2. Sistema Radiante Hidráulico	5
2.2.1. Tipos de superfície radiante.....	6
2.2.2. Conceitos fundamentais.....	8
2.2.3. Parâmetros com impacto no sistema	8
2.2.4. Vantagens e desvantagens	10
2.3. Simulação dinâmica de edifícios	11
3. Modelação de Sistemas Radiantes.....	13
3.1. Introdução	13
3.1.1. Introdução de dados.....	13
3.1.1. Ficheiro climático	14
3.1.2. Execução da simulação.....	14
3.1.3. Tratamento de dados.....	15
3.2. Modelação de um sistema de climatização radiante	15
3.2.1. Modelação das superfícies radiantes	16
3.2.2. Sistema radiante.....	17
3.2.3. Bombas	23
3.2.4. Equipamento de produção de água quente e refrigerada.....	24
3.2.5. Circuito e componentes	24
4. Caso-de-Estudo.....	31
4.1. Geometria do edifício	31

4.2. Especificações do modelo de simulação	33
5. Análise de Resultados e Discussão	39
5.1. Temperaturas interiores	39
5.2. Temperatura de superfície	42
5.3. Necessidades energéticas.....	44
5.4. Ocorrência de condensados	45
5.5. Temperatura da água	46
6. Conclusões	49
Referências	51
Anexo A	53
Anexo B.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Exemplo do hipocausto Romano.	5
Figura 2.2. Exemplo da constituição do pavimento radiante.	7
Figura 2.3. Sistema de paredes radiantes em construção.	7
Figura 2.4. Exemplo de um painel radiante de teto.	8
Figura 3.1. IDF Editor	14
Figura 3.2. Fluxograma para a modelação de sistemas radiantes em EnergyPlus, com todos os objetos utilizados	16
Figura 3.3. Exemplo do objeto <i>Construction:InternalSource</i> para diferentes superfícies radiantes.....	17
Figura 3.4. Controlo do sistema para o modelo de caudal variável, para aquecimento.	18
Figura 3.5. Controlo do sistema para o modelo de caudal variável, para arrefecimento. ...	18
Figura 3.6. Exemplo da parametrização de um sistema radiante no modelo de caudal variável	19
Figura 3.7. Controlo do sistema para o modelo de caudal constante, para aquecimento. ...	21
Figura 3.8. Controlo do sistema para o modelo de caudal constante, para arrefecimento. .	21
Figura 3.9. Parametrização do modelo de caudal constante.....	22
Figura 3.10. Parametrização das bombas de circulação	23
Figura 3.11. Modo de produção de calor através do <i>DistrictHeating</i>	24
Figura 3.12. Modo de produção de frio através do <i>DistrictCooling</i>	24
Figura 3.13. Esquema do circuito do sistema radiante para aquecimento.....	25
Figura 3.14. Objeto <i>BranchList</i> utilizado no caso-de-estudo	25
Figura 3.15. Exemplo dos <i>Splitters</i> definidos no caso-de-estudo.....	26
Figura 3.16. Exemplo dos <i>Mixers</i> definidos no caso-de-estudo	26
Figura 3.17. Lista de conexões utilizada no caso-de-estudo	26
Figura 3.18. Exemplo da definição das características do circuito, no objeto <i>PlantLoop</i> ...	27
Figura 3.19. Lista de equipamentos por função (arrefecimento e aquecimento)	28
Figura 3.20. Equipamentos de produção e respetivos intervalos de carga: (a): arrefecimento; (b) aquecimento	29
Figura 3.21. Objeto <i>PlantEquipmentOperationSchemes</i> , onde é definido o horário de funcionamento dos equipamentos de produção.....	29
Figura 3.22. Exemplo da criação de um <i>setpoint</i> , num local específico.	29
Figura 4.1. Modelo 3D	32

Figura 4.2. Planta da solução	32
Figura 4.3. Paredes interiores, a azul, onde estão instalados os sistemas radiantes	35
Figura 4.4. Modo de controlo do sistema utilizado para o modelo de caudal variável: (a) aquecimento (Inverno); (b) arrefecimento (Verão).....	37
Figura 4.5. Modo de controlo do sistema utilizado para o modelo de caudal constante: (a) aquecimento (Inverno); (b) arrefecimento (Verão).....	37
Figura 5.1. Temperatura operativa a sala-de-estar, no dia 20 de Janeiro.	40
Figura 5.2. Temperatura operativa na sala-de-estar, no dia 11 de Agosto.	40
Figura 5.3. Temperatura operativa no corredor, no dia 20 de Janeiro.	41
Figura 5.4. Temperatura operativa no corredor, no dia 11 de Agosto.	41
Figura 5.5. Temperatura do pavimento radiante na sala-de-estar, no modelo de caudal variável.....	42
Figura 5.6. Temperatura do pavimento radiante na sala-de-estar, no modelo de caudal constante.....	43
Figura 5.7. Temperatura do pavimento radiante na sala-de-estar, sem climatização.....	43
Figura 5.8. Temperatura da água, em regime de aquecimento, ao longo do ano.....	46
Figura 5.9. Temperatura da água, em regime de arrefecimento, ao longo do ano.	47
Figura A.1 Temperatura interior operativa no Hall, no dia 20 de Janeiro.	53
Figura A.2. Temperatura interior operativa no Hall, no dia 11 de Agosto.	53
Figura A.3. Temperatura interior operativa na Cozinha, no dia 20 de Janeiro.	54
Figura A.4. Temperatura interior operativa na Cozinha, no dia 11 de Agosto.	54
Figura A.5. Temperatura interior operativa na Casa de Banho1, no dia 20 de Janeiro	55
Figura A.6. Temperatura interior operativa na Casa de Banho1, no dia 11 de Agosto.	55
Figura A.7. Temperatura interior operativa no Quarto1, no dia 20 de Janeiro.	56
Figura A.8. Temperatura interior operativa no Quarto1, no dia 11 de Agosto.	56
Figura A.9. Temperatura interior operativa no Quarto2, no dia 20 de Janeiro.	57
Figura A.10. Temperatura interior operativa no Quarto2, no dia 11 de Agosto.	57
Figura A.11. Temperatura interior operativa no Quarto3, no dia 20 de Janeiro.	58
Figura A.12. Temperatura interior operativa no Quarto3, no dia 11 de Agosto.	58
Figura A.13. Temperatura interior operativa na Casa de Banho2, no dia 20 de Janeiro. ...	59
Figura A.14. Temperatura interior operativa na Casa de Banho2, no dia 11 de Agosto. ...	59
Figura B.1. Temperatura do pavimento radiante na Cozinha, ao longo do ano.....	61
Figura B.2. Temperatura do pavimento radiante no Quarto1, ao longo do ano.....	61
Figura B.3. Temperatura do pavimento radiante no Quarto2, ao longo do ano.....	62

Figura B.4. Temperatura do pavimento radiante no Quarto3, ao longo do ano..... 62

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Campos, e respetivas funcionalidades, do objeto ZoneHVAC:Low TemperatureRadiant:VariableFlow	19
Tabela 3.2. Campos, e respetivas funcionalidades, do objeto ZoneHVAC:Low TemperatureRadiant:ConstantFlow.....	22
Tabela 3.3. Campos, e respetivas funcionalidades, do objeto PlantLoop	27
Tabela 4.1. Características dos materiais constituintes das paredes interiores.....	33
Tabela 4.2. Características dos materiais constituintes das paredes exteriores.....	33
Tabela 4.3. Características dos materiais constituintes do telhado.....	33
Tabela 4.4. Características dos materiais constituintes da laje térrea.....	34
Tabela 4.5. Ganhos internos em cada divisão.	34
Tabela 4.6. Área das superfícies com sistema radiante e respetivos comprimentos dos tubos.	36
Tabela 5.1. Energia total necessária em cada configuração, em kWh/ano.....	44
Tabela 5.2. Necessidades energéticas da habitação, em kWh/ano.m ²	45
Tabela 5.3. Necessidades energéticas, em kWh/ano.m ² , de outro estudo realizado (Silva, 2000).....	45
Tabela 5.4. Tempo, em horas por ano, que o sistema se encontra desligado devido à ocorrência de condensados.....	45

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

ACH - Renovações de ar por hora [1/h]

Cp - Calor específico [J/kg°C]

λ - Condutibilidade térmica [W/m°C]

e - Espessura [cm]

ρ - Densidade [kg/m³]

Ta - Temperatura Ambiente [°C]

TMR - Temperatura média radiante [°C]

To - Temperatura operativa [°C]

Siglas

ADAI - Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning

Engineers

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

EPW - EnergyPlus Weather File

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

IDF - Intermediate Data Format

INETI - Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação

RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos

Edifícios

LAETA - Laboratório Associado de Energia, Transportes e Aeronáutica

RSECE - Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos

Edifícios

1. INTRODUÇÃO

Segundo o inquérito ao consumo de energia no sector doméstico (*Inquerito ao consumo de energia doméstico*, 2010), realizado pelo Instituto Nacional de Estatística, em 2010 no território Português, assistiu-se a uma alteração dos hábitos de consumo de energia das famílias nos últimos 15 anos. O consumo energético doméstico apresenta uma taxa média de crescimento anual de 1,5% entre os anos de 1989 e 2009. Sendo que 22% do consumo energético deve-se à climatização de interiores (21,5% aquecimento e 0,5% arrefecimento).

Outro estudo refere que nos países industrializados os edifícios encontram-se ocupados 90% do tempo (Höppe & Martinac, 1998), pelo que se torna necessária a climatização destes para garantir as condições de conforto. Por essa razão é essencial a instalação de um adequado sistema de climatização, no sentido de minimizar os consumos energéticos.

Devido às crescentes preocupações ambientais e económicas tem-se dado cada vez mais valor a sistemas que sejam energeticamente eficientes, permitam um menor dispêndio de energia e que, preferencialmente, possam funcionar com energias renováveis e assim reduzir a emissão de gases poluentes.

Foram, inclusive, criadas legislações, nomeadamente o Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização de Edifícios (RSECE) e o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), que controlam o consumo energético nos edifícios e ao mesmo tempo assegurem as cada vez mais exigentes necessidades de conforto térmico, sejam elas de aquecimento, arrefecimento, ventilação ou necessidades de água quente sanitária.

Os sistemas radiantes são considerados um sistema ecológico (“SANITOP,” n.d.) e económico (B. W. Olesen, 2002) e têm vindo a ganhar notoriedade e sido usados como uma boa alternativa aos sistemas de climatização habituais, nomeadamente sistemas convectivos, devido a proporcionarem um ótimo conforto térmico e um baixo consumo energético.

Complementarmente à melhoria da eficiência dos sistemas de aquecimento e arrefecimento, tem-se verificado uma crescente exigência a nível do projeto de novos

edifícios. Ainda que poucas entidades em Portugal realizem simulações energéticas detalhadas, com a entrada das novas e cada vez mais apertadas legislações, e obrigatoriedade dos grandes edifícios em cumpri-lo, é uma área na qual se prevê um grande crescimento.

Existe uma grande variedade de programas de simulação dinâmica. Um exemplo desse tipo de programas é o *EnergyPlus*, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América. Este programa permite calcular as cargas de aquecimento e de arrefecimento necessárias para manter uma determinada zona dentro de um intervalo de temperatura, geralmente correspondente à banda de conforto térmico humano.

No presente trabalho, este programa será utilizado para o estudo do comportamento de uma habitação unifamiliar cuja planta é gerada automaticamente através de um algoritmo específico, desenvolvido por investigadores da Universidade de Coimbra, e sobre a qual é adicionado um sistema de climatização radiante hidráulico na modelação da simulação dinâmica.

1.1. Objetivo

A presente dissertação tem como objetivos adquirir conhecimentos práticos e avançados na utilização de um programa de simulação energética e que permitam orientar futuros utilizadores em modelar sistemas radiantes em *EnergyPlus*.

Como objetivo secundários, pretende-se analisar térmica e energeticamente um edifício equipado com um sistema de climatização radiante e comparar as diferenças em função do local de instalação (pavimento, paredes, ou ainda no teto através da instalação painéis).

1.2. Estrutura

A dissertação é dividida em seis capítulos. O primeiro corresponde à introdução, onde foi feito um enquadramento da situação energética dos edificadados em Portugal assim como um levantamento acerca das ferramentas de simulação energética e dos sistemas radiantes. Foram ainda enunciados os objetivos e estrutura da presente dissertação.

No segundo capítulo, é realizada uma revisão literária, na qual se apresentam alguns sistemas de climatização, com incidência nos sistemas radiantes. Também será contextualizada a utilização de ferramentas de simulação energética de edifícios.

No terceiro capítulo é apresentado o programa utilizado, o *EnergyPlus*. Será feito o levantamento de algumas características e funcionalidades relevantes do programa e serão apresentados, detalhadamente, todos os passos necessários à parametrização de um sistema radiante.

No capítulo quatro é introduzido o caso-de-estudo e respectivas características, ao qual é aplicado um sistema radiante hidráulico.

O quinto capítulo é destinado à análise e discussão de resultados obtidos no capítulo anterior.

Por fim, no sexto e último capítulo é feita a conclusão e são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Origem

O aquecimento radiante surgiu há milhares de anos. Por volta de 100 A.C., na Coreia, já se usava o fumo das fogueiras (utilizadas para cozinhar) para aquecer o piso em pedra das habitações. O fumo passava por baixo do piso e era libertado pela parede oposta, por uma chaminé (B. W. Olesen, 2002).

Na Europa os sistemas radiantes foram introduzidos pelos Romanos, por volta da mesma altura, num sistema denominado hipocausto (Figura 2.1), onde um forno estava ligado a uma rede de túneis sob o pavimento, por onde circulava o ar quente, aquecendo o piso e as paredes. Este sistema era também usado pelos Romanos para aquecer piscinas, surgindo as tão famosas, termas romanas (Bean, Olesen, & Kim, 2010a).

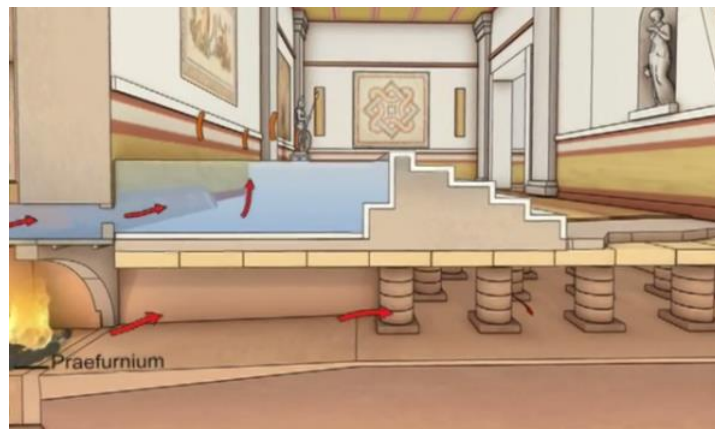


Figura 2.1. Exemplo do hipocausto Romano.

Fonte: <http://www.vimeo.com/10085418>

Há também referências à utilização de sistemas de arrefecimento radiante, no século 6 A.C., pelos Turcos que arrefeciam as suas casas fazendo circular água fresca dos rios através de canais sob o piso (Bean, Olesen, & Kim, 2010b).

2.2. Sistema Radiante Hidráulico

Atualmente, os sistemas radiantes mais comuns funcionam à base de água, a baixas temperaturas, sendo por isso denominados sistemas radiantes hidráulicos. Os

sistemas radiantes hidráulicos são um método de climatização utilizado em diversas tipologias de edifícios, desde habitacionais a escritórios entre outros.

O funcionamento de um sistema radiante baseia-se na energia radiante propagada por uma superfície através de ondas eletromagnéticas que aquecem os objetos à sua volta sem ser necessário o contacto.

Nestes sistemas, existe uma rede de tubagens no interior das superfícies que se querem radiantes, na qual circula água a temperatura diferente do espaço a climatizar. A água tem como objetivo irradiar ou absorver calor do ambiente, conforme a utilização desejada (aquecimento ou arrefecimento).

É necessário que exista um sistema de produção, que tem como objetivo aquecer ou arrefecer a água. Existem diversas opções de sistemas de produção, como é o caso de caldeiras, bombas de calor, *chillers*, ou painéis solares, uma vez que funciona a temperaturas relativamente baixas.

2.2.1. Tipos de superfície radiante

Um sistema radiante hidráulico pode ser aplicado em diferentes superfícies e com diferentes estruturas. Tanto pode ser aplicado no pavimento, paredes, tetos ou então através de painéis denominados radiantes, que são normalmente suspensos no teto mas que podem ser aplicados noutros locais.

O pavimento radiante é a solução mais comum. Este garante uma temperatura do piso adequada, causando a sensação de “pés quentes e a cabeça fria” e garantindo um ótimo conforto térmico. Ainda assim este tipo de superfície pode ser pouco eficaz caso haja no local obstruções, tais como tapetes, sofás, armários, etc.. O pavimento radiante implica que se façam alterações construtivas nos edifícios, de forma a integrar os tubos debaixo do piso. A Figura 2.2 ilustra um exemplo da composição característica deste tipo de piso.

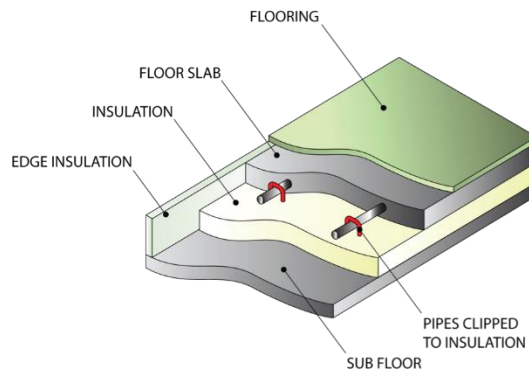


Figura 2.2. Exemplo da constituição do pavimento radiante.

Fonte: <http://www.underfloorheatingsystems.co.uk>

As paredes radiantes concedem uma propagação do calor menos homogénea, assemelhando-se a radiadores elétricos de parede.

Tal como o pavimento radiante as paredes radiantes necessitam que se façam alterações construtivas. Na Figura 2.3 é mostrado um exemplo de uma parede radiante.



Figura 2.3. Sistema de paredes radiantes em construção.

Fonte: <http://hydronicsmfg.com/history.html>

Normalmente não são aplicados sistemas radiantes diretamente na superfície do teto mas sim painéis radiantes. Estes são geralmente uma fina placa metálica, normalmente em alumínio, por dentro da qual existe uma rede de tubos na qual circula a água. A Figura 2.4 ilustra um exemplo de um painel radiante de instalar no teto.

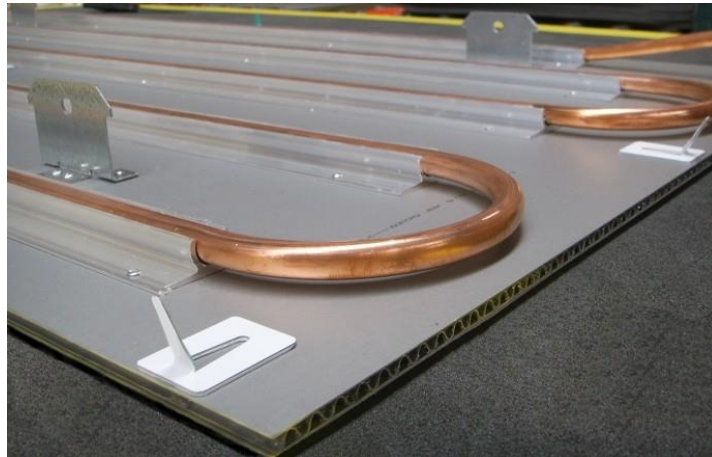


Figura 2.4. Exemplo de um painel radiante de teto.

Fonte: <http://www.spc coils.co.uk>

Os painéis têm a vantagem de poder ser instalados em qualquer local e em edifícios já existente. Permitem também temperaturas superficiais superiores, uma vez que se encontram afastados do utilizador.

2.2.2. Conceitos fundamentais

Termos fundamentais relacionados com os sistemas radiantes são (B. W. Olesen, 2002):

- Temperatura ambiente (T_a) é a temperatura do ar envolvente ao ocupante
- Temperatura média radiante (TMR) é a temperatura média à superfície dos elementos que envolvem um espaço.
- Temperatura operativa (T_o) é a média da temperatura média radiante e a temperatura do ar. Para velocidades do ar reduzidas esta temperatura é a média simples entre as duas temperaturas acima referidas.
- Conforto térmico é definido pela sensação de bem-estar, relacionada com a temperatura e humidade. Trata-se de equilibrar o calor produzido pelo corpo com o calor que perde para o ambiente envolvente.

2.2.3. Parâmetros com impacto no sistema

Sistemas radiantes de baixa temperatura, ou seja, que utilizam água a uma temperatura máxima de 45°C, são influenciados por vários parâmetros:

- Horário de funcionamento do sistema radiante (Chantrasrisalai, Ghatti, Fisher, & Scheatzle, 2003); Está relacionado com o tempo de funcionamento do sistema. Caso o sistema esteja ativo mais tempo que necessário pode ocorrer sobreaquecimento.
- Temperaturas de controlo (Chantrasrisalai et al., 2003); É um aspeto com grande influência, pois a temperatura desejada está diretamente relacionada com a capacidade do sistema. Caso se pretenda uma temperatura de controlo maior, o consumo será também maior.
- Perfil dos ganhos internos (Chantrasrisalai et al., 2003); Referem-se a ganhos térmicos com iluminação, ocupação ou outros equipamentos. Estes fatores influenciam a temperatura interior e conseqüentemente as necessidades térmicas.
- Propriedades térmicas dos materiais do edifício (Chantrasrisalai et al., 2003) estão diretamente relacionadas com a capacidade de um edifício em manter a temperatura interior e diminuir as perdas térmicas, que têm bastante influência nas condições interiores.
- A temperatura da água tem uma grande influência no sistema, mais propriamente no tempo necessário para atingir a temperatura operativa interior desejada (Djuric, Novakovic, Holst, & Mitrovic, 2007). Para aquecimento é, normalmente, usada uma temperatura de água entre os 30 e os 45°C (Isolani et al., 2008). Já para o período de arrefecimento, a água deve estar entre os 10 e os 15°C.
- A temperatura do pavimento também pode influenciar afetar o funcionamento de um sistema, pois esta, para que não haja desconforto numa zona com ocupantes, deve estar entre os 18 e os 29°C (B. Olesen, 2008). No entanto segundo as normas Europeias, é aceitável uma temperatura até 35°, em áreas da divisão não ocupadas, isto é, a menos de 1 metro de janelas ou paredes exteriores (B. Olesen, 2008). Para as superfícies em que não há contacto constante (paredes e teto), deve-se garantir uma temperatura que evite queimaduras, abaixo dos 40°C.

Existem também outros parâmetros, menos importantes, como as condições ambientais envolventes, infiltrações e ventilação (Chantrasrisalai et al., 2003).

2.2.4. Vantagens e desvantagens

Um sistema de climatização radiante tem como vantagens:

- Económico: Permite grandes poupanças energéticas na ordem dos 30% em comparação com os sistemas tradicionais. Isto deve-se principalmente às baixas temperaturas utilizadas (“Aquecimento central por piso radiante a água - SolarWaters,” n.d.);
- Invisível: É invisível pois fica no interior das superfícies, o que facilita a limpeza e não ocupa espaço interior (“Aquecimento central por piso radiante a água - SolarWaters,” n.d., “SANITOP,” n.d.);
- Seguro: Não existe possibilidade de queimaduras, principalmente em crianças e idosos, ao contrário de outros sistemas (“Aquecimento central por piso radiante a água - SolarWaters,” n.d., “SANITOP,” n.d.);
- Conforto térmico: Permite um conforto térmico superior a outros sistemas tanto no verão como no inverno. Evita o efeito das paredes frias, proporciona uma distribuição uniforme do calor e elimina as desconfortáveis correntes de ar, originadas por sistemas de ar-condicionado (“Aquecimento central por piso radiante a água - SolarWaters,” n.d., “SANITOP,” n.d.; Batista, 2012; Tzoulis, 2014);
- Limpeza: É um sistema considerado limpo, pois não provoca turbulência no ar, o que evita o transporte e acumulações de pó (“SANITOP,” n.d.);
- Versátil: Pode ser aplicado em diversos tipos de edifícios e habitações assim como em qualquer superfície disponível. Pode ainda ser usado com uma variedade enorme de materiais desde a madeira à cerâmica (Batista, 2012);
- Silencioso: Não produz qualquer tipo de ruído, tirando o sistema de produção de calor, mas que normalmente está instalado no exterior (“SANITOP,” n.d.);

- Ecológico: Pode ser combinado com sistemas de energias alternativas e renováveis, como o caso da energia solar ou geotérmica (“SANITOP,” n.d.).

Por outro lado, as desvantagens conhecidas são:

- Investimento: O investimento inicial é elevado, o que pode afastar potenciais utilizadores. Também qualquer tipo de intervenção pode implicar um custo elevado (Batista, 2012; Tzoulis, 2014);
- Condensação: A possibilidade de ocorrer condensação durante o arrefecimento é uma das principais desvantagens. Isto acontece quando a superfície climatizada se encontra à temperatura de orvalho do ar ambiente. Para minimizar este problema é necessário que haja um sistema de renovação de ar (Batista, 2012; Raghuram Sunnam, Annie Martson, & Oliver Baumann, 2013);
- Lentos: É um sistema bastante lento a reagir e a ajustar a temperatura ambiente. Necessita de muito tempo para atingir as condições desejáveis. Isto leva a que este sistema não seja aconselhado em climas amenos, ou que tenham poucos dias frios por ano (Batista, 2012; Tzoulis, 2014).

2.3. Simulação dinâmica de edifícios

Existem vários programas de simulação de desempenho de edifícios. Um dos programas mais utilizados é o *EnergyPlus* desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (“EnergyPlus,” n.d.).

O programa *EnergyPlus* possibilita ao utilizador modelar várias características do edificado como a sua geometria, sistema construtivo com as propriedades físicas dos materiais, sistemas de climatização, horários, cargas internas e externas, entre outros. Com todos esses dados pode-se proceder à simulação, estando o programa capacitado para calcular as cargas térmicas necessárias para que a temperatura interior se mantenha nas condições desejadas.

Contudo, este programa possui um conjunto de desvantagens. Uma das principais desvantagens é não ser uma ferramenta de fácil e rápida utilização. Mesmo a modelação de um sistema simples requer bastante tempo e trabalho (Tzoulis, 2014).

É também complicado definir com pormenor sistemas de climatização (aqueles que não possuem o respetivo *template*), pois necessitam que muitos objetos sejam devidamente parametrizados (Tzoulis, 2014). Um *template* é uma versão pré-configurada dos sistemas de climatização, que os permite dimensionar com recurso a um único objeto de modelação.

3. MODELAÇÃO DE SISTEMAS RADIANTES

Neste capítulo é descrito como são modelados sistemas radiantes em *EnergyPlus* e é dada uma breve introdução às funcionalidades do programa.

3.1. Introdução

No *EnergyPlus* não existe interface gráfico, no entanto existe uma ferramenta, denominada *EP-Launch*, que serve como gerenciador daquilo que o utilizador pretende modelar.

Para que o programa possa correr é necessário um ficheiro da modelação do edifício (ficheiro *IDF*) e de um ficheiro climático (ficheiro *EPW*).

3.1.1. Introdução de dados

O *EnergyPlus* fornece um programa, denominado *IDF Editor* que facilita a introdução dos dados necessários à modelação e cria o ficheiro *IDF* respetivo. Neste, todos os objetos necessários à modelação aparecem agrupados e devidamente identificados, sendo um objeto uma entrada de texto que define um conjunto de características específicas de um elemento ou sistema.

Na Figura 3.1 é mostrado o *IDF Editor* aberto no objeto *Building* do grupo *Simulation Parameter*, onde são definidos alguns parâmetros do edifício necessários à simulação.

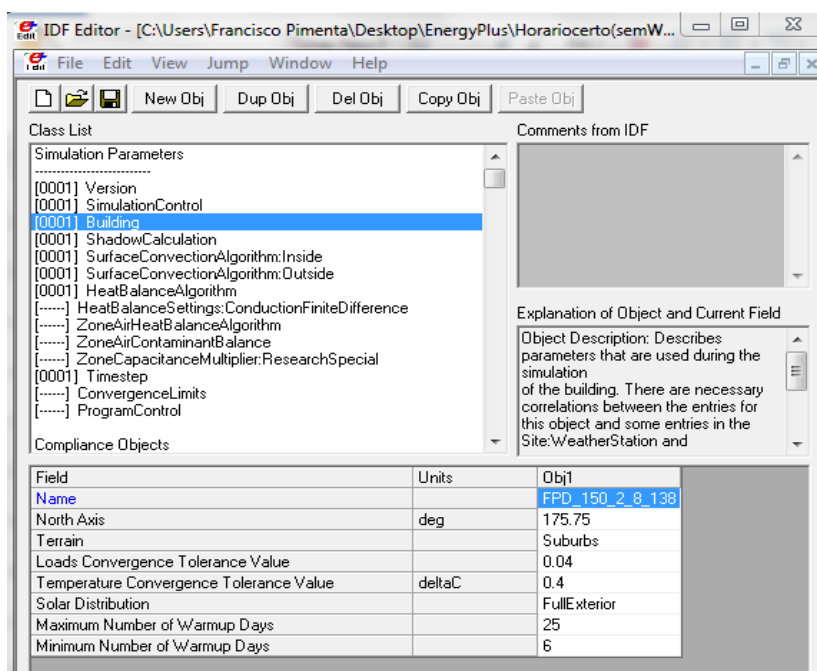


Figura 3.1. IDF Editor

3.1.1. Ficheiro climático

O ficheiro climático indica quais os dados climatéricos do local de implantação do edifício. A página de internet oficial do *EnergyPlus* fornece vários ficheiros climáticos de vários locais do mundo, incluindo Portugal.

Os ficheiros climáticos referentes a Portugal foram desenvolvidos pelo já extinto Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI) e pelo International Weather for Energy Calculations (IWEC) que resultou do projeto de pesquisa 1015 da Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar-Condicionado (ASHRAE).

3.1.2. Execução da simulação

Após a introdução de todos os ficheiros necessários é possível correr a simulação, também no programa principal, o *EP-Launch*.

Depois da simulação é gerado um ficheiro que descreve os erros detetados. Os erros são classificados consoante a sua gravidade. Um aviso “*Warning*” não influencia a simulação, no entanto, é recomendável sua eliminação. O erro de tipo “*Severe*” pode influenciar os resultados e como tal terá de ser obrigatoriamente corrigido. Por fim um erro

do tipo “*Fatal*” resulta da associação de diversos erros do tipo “*Severe*” e impede a simulação, interrompendo-a (“Getting Started with EnergyPlus,” 2013).

3.1.3. Tratamento de dados

Ocorrida a simulação é possível consultar os resultados. É o utilizador que escolhe o tipo de dados (outputs) que quer. Existem diferentes variáveis que permitem analisar o sistema, alguma delas são a temperatura interior, temperaturas de superfícies, humidade ou energia consumida. Os resultados das variáveis pretendidas são gravados num ficheiro *comma separated values* (CSV). A integridade geométrica do modelo pode ser consultada num ficheiro tipo *drawing interchange format* (DXF).

3.2. Modelação de um sistema de climatização radiante

Para modelar sistemas radiantes em *EnergyPlus* é necessário definir um grande número de objetos, que se torna numa tarefa complicada. Para além do sistema radiante é necessário definir bombas de circulação, equipamento de produção, componentes e o circuito. A Figura 3.2 apresenta um fluxograma para a modelação de sistemas radiantes, com todos os objetos necessários e respetivas funções.

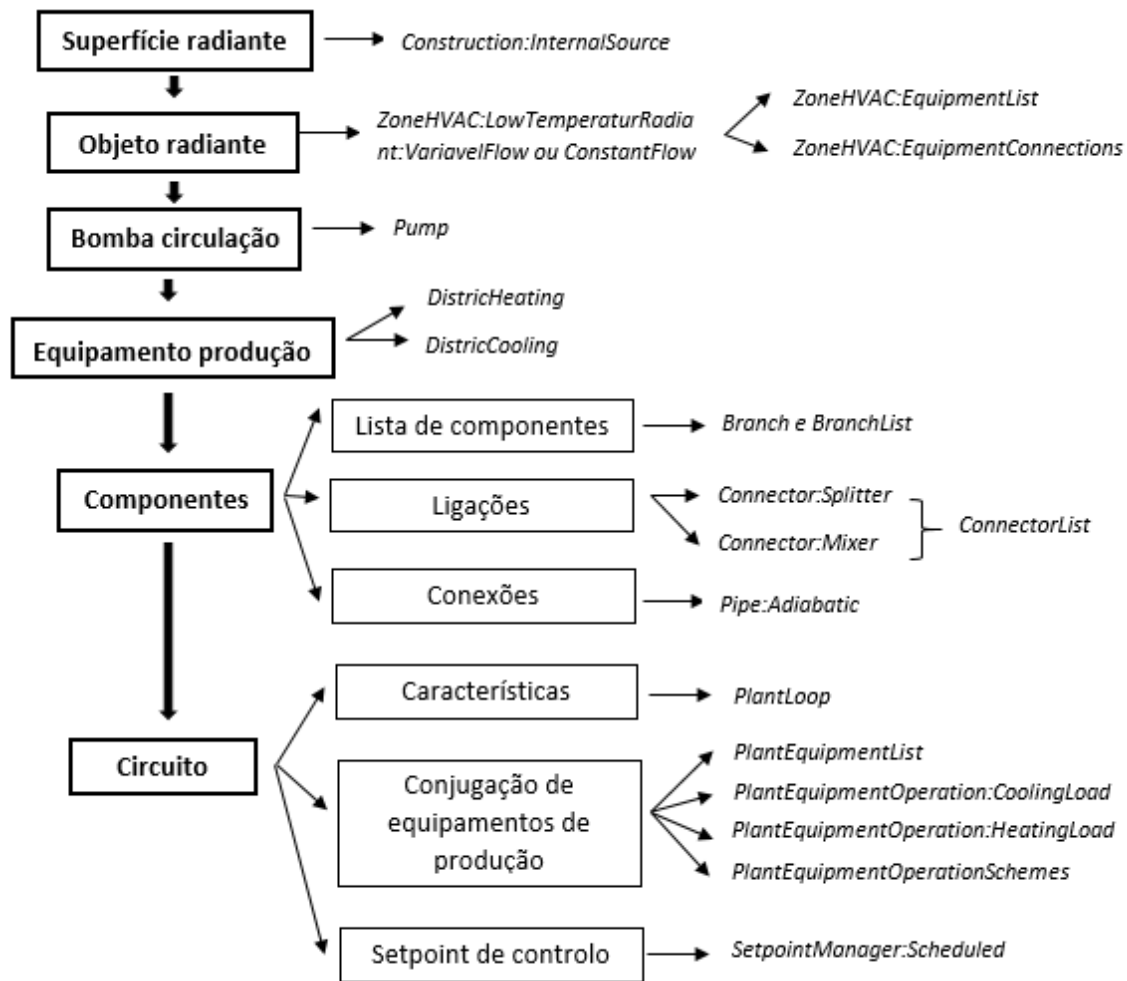


Figura 3.2. Fluxograma para a modelação de sistemas radiantes em EnergyPlus, com todos os objetos utilizados

Para além destes objetos, existe um bastante utilizado denominado *Schedule:Compact* onde são definidos perfis. Estes perfis servem para controlar diversas variáveis ao longo do ano, como por exemplo temperatura, ocupação, iluminação, entre outras.

3.2.1. Modelação das superfícies radiantes

Inicialmente, é necessário definir a construção das superfícies que se pretendem radiantes, incluindo os tubos interiores. Em *EnergyPlus*, isso é feito no objeto *Construction:InternalSource*, presente no grupo *Surface Construction Elements*, onde se define os elementos construtivos, distância entre tubos e em que camada é que se encontram os tubos. A construção é depois aplicada à superfície respetiva.

Na Figura 3.3 são apresentadas as configurações do pavimento, paredes e tetos radiantes referentes ao Caso-de-Estudo apresentado no Capítulo 4.

Os painéis radiantes são modelados através da criação de superfícies comuns no local e com o tamanho pretendido, à qual é aplicada a construção.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		Chao Radiante	Parede radiante	PainelRadiante
Source Present After Layer Number		2	2	1
Temperature Calculation Requested After Layer Number		2	2	1
Dimensions for the CTF Calculation		1	1	1
Tube Spacing	m	0.15	0.15	0.15
Outside Layer		High Weight Concre	PlasterGypsumBoar	Aluminium 2mm
Layer 2		INS 3cm	Concrete Block_0.0	Aluminium 2mm
Layer 3		PlasterLime_0.02m	PlasterGypsumBoar	
Layer 4		Wood - Hardwood_		
Layer 5				

Figura 3.3. Exemplo do objeto *Construction:InternalSource* para diferentes superfícies radiantes

3.2.2. Sistema radiante

Depois é necessário definir o sistema de climatização radiante propriamente dito. É neste objeto que são definidas as principais características do sistema.

Existem dois objetos válidos, em *EnergyPlus*, para a modelação de sistemas radiantes hidráulicos de baixa temperatura. São eles o *ZoneHVAC:LowTemperatureRadiant:VariableFlow* (caudal variável) e o *ZoneHVAC:LowTemperatureRadiant:ConstantFlow* (caudal constante), ambos do grupo *Radiative/Convective Units*.

Estes objetos diferem no tipo de caudal, temperatura da água e consequentemente, modo de controlo da temperatura interior e são explicados nos subcapítulos 3.2.2.1 e 3.2.2.2.

Associado à instalação de sistemas radiantes existem ainda dois objetos necessários e relacionados com o sistema radiante instalado, são eles o *ZoneHVAC:EquipmentList* e o *ZoneHVAC:EquipmentConnections*.

No primeiro são listadas todos os equipamentos de climatização que servem cada zona térmica e a sua ordem sequencial de simulação. No segundo objeto são definidos os nós de entrada e saída de ar para cada zona.

Estes objetos elucidam a complexidade do programa de simulações, pois apesar de parecerem inúteis e desenquadrados, são indispensáveis para uma correta simulação.

3.2.2.1. Caudal variável

O objeto *VariableFlow*, tal como o nome indica, usa um caudal de água variável nos tubos. Neste modelo a temperatura é controlada através da variação do caudal, sendo que este aumenta à medida que aumentam as necessidades de climatização.

A Figura 3.4 e a Figura 3.5 mostram como é feito o controlo da temperatura interior neste modelo para aquecimento e arrefecimento, respetivamente. Na Figura 3.6 é apresentado um exemplo de uma parametrização usada no caso-de-estudo e são descritos todos os campos na Tabela 3.1.

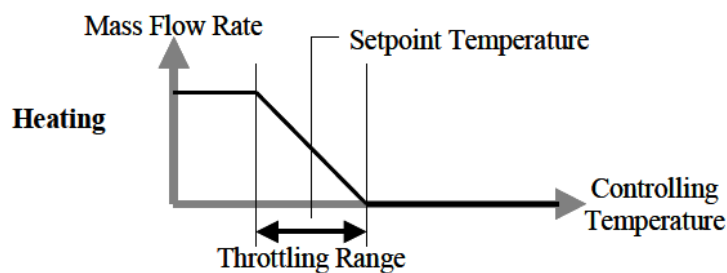


Figura 3.4. Controlo do sistema para o modelo de caudal variável, para aquecimento.

Fonte: *EnergyPlus EngineeringReference (EnergyPlus Engineering Reference: The Reference to EnergyPlus Calculations, 2010)*

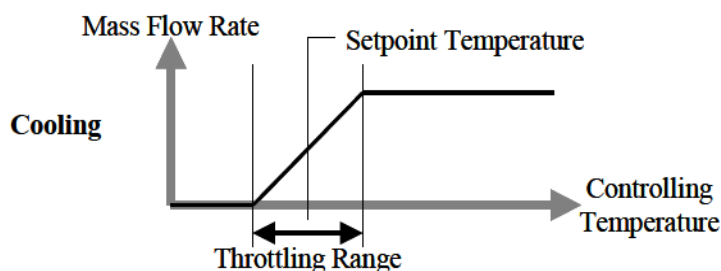


Figura 3.5. Controlo do sistema para o modelo de caudal variável, para arrefecimento.

Fonte: *EnergyPlus EngineeringReference (EnergyPlus Engineering Reference: The Reference to EnergyPlus Calculations, 2010)*

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		Kitchen Radiant Flo	Living Room Radiar
Availability Schedule Name		RADIANTSYSVAI	RADIANTSYSVAI
Zone Name		ZN_0_1_Kitchen	ZN_0_2_Living Roc
Surface Name or Radiant Surface Group Name		ZN_0_1_F_0_0	ZN_0_2_F_0_0
Hydronic Tubing Inside Diameter	m	0.013	0.013
Hydronic Tubing Length	m	95	150
Temperature Control Type		OperativeTemperatu	OperativeTemperatu
Maximum Hot Water Flow	m3/s	0.0001	0.0001
Heating Water Inlet Node Name		Kitchen Radiant inle	living room radiant ir
Heating Water Outlet Node Name		kitchen radiant outle	living room radiant o
Heating Control Throttling Range	deltaC	2	2
Heating Control Temperature Schedule Name		HEATING SETPOIN	HEATING SETPOIN
Maximum Cold Water Flow	m3/s	0.0001	0.0001
Cooling Water Inlet Node Name		kitchen CW inlet	living room CW inlet
Cooling Water Outlet Node Name		kitchen CW outlet	living room CW outle
Cooling Control Throttling Range	deltaC	2	2
Cooling Control Temperature Schedule Name		COOLING SETPOIN	COOLING SETPOIN
Condensation Control Type		SimpleOff	SimpleOff
Condensation Control Dewpoint Offset	C	1	1
Number of Circuits			
Circuit Length	m		

Figura 3.6. Exemplo da parametrização de um sistema radiante no modelo de caudal variável

Tabela 3.1. Campos, e respetivas funcionalidades, do objeto
ZoneHVAC:LowTemperatureRadiant:VariableFlow

Name	Nome do sistema
Availability Schedule Name	Escolher o perfil correspondente ao tempo de funcionamento do sistema
Zone Name	Zona térmica onde será instalado o Sistema
Surface Name	Superfície onde é instalado
Hydronic Tubing Inside Diameter	Diâmetro interior dos tubos
Hydronic Tubing Length	Comprimento dos tubos
Temperature Control Type	Pode ser escolhida entre cinco tipos de controlo de temperatura: a temperatura média do ar interior, temperatura média radiante, temperatura operativa, temperatura exterior de bolbo seco e temperatura exterior de bolbo húmido. Como se trata de um sistema radiante, a temperatura operativa é o tipo de controlo mais adequado
Maximum Hot Water Flow	Caudal máximo de água quente nos tubos
Heating Water Inlet Node Name	Nome do nó de entrada de água quente

Heating Water Outlet Node Name	Nome do nó de saída de água quente
Heating Control Throttling Range	Intervalo de temperatura, no qual o caudal do sistema varia de zero até ao caudal máximo, para aquecimento
Heating Control Temperature Schedule Name	Perfil correspondente à temperatura de controlo para aquecimento
Maximum Cold Water Flow	Caudal máximo de água fria nos tubos
Cooling Water Inlet Node Name	Nome do nó de entrada de água fria
Cooling Water Outlet Node Name	Nome do nó de saída de água fria
Cooling Control Throttling Range	Intervalo de temperatura, no qual o caudal do sistema varia de zero até ao caudal máximo, para arrefecimento.
Cooling Control Temperature Schedule Name	Perfil correspondente à temperatura de controlo para arrefecimento
Condensation Control Type	Controlar a ocorrência de condensados. Neste campo existe duas opções, a <i>Off</i> e a <i>Simple-Off</i> . A primeira permite ao sistema continuar ligado mesmo que se atinja a temperatura superficial de condensação, fornecendo apenas uma mensagem a avisar, enquanto a segunda permite que o sistema desligue quando o programa prevê a ocorrência de situações de condensação
Condensation Control Dewpoint Offset	Diferença entre a temperatura de condensação e a temperatura da superfície, a partir da qual o sistema desliga
Number of Circuits	Permite a escolha entre duas opções que definem o número de circuitos. <i>OnePerSurface</i> , define apenas um circuito por superfície e <i>CalculateFromCircuitLength</i> que define o número de circuitos paralelos consoante o comprimento destes
Circuit Length	Comprimento de cada circuito paralelo na superfície

3.2.2.2. Caudal constante

Ao contrário do objeto VariavelFlow, o ConstantFlow utiliza um caudal de água dentro dos tubos constante, sendo o controlo da temperatura interior feito através da variação da temperatura da água. O modo como a temperatura é controlada está representado na Figura 3.7 e Figura 3.8. A temperatura da água varia consoante o intervalo da temperatura de controlo definido.

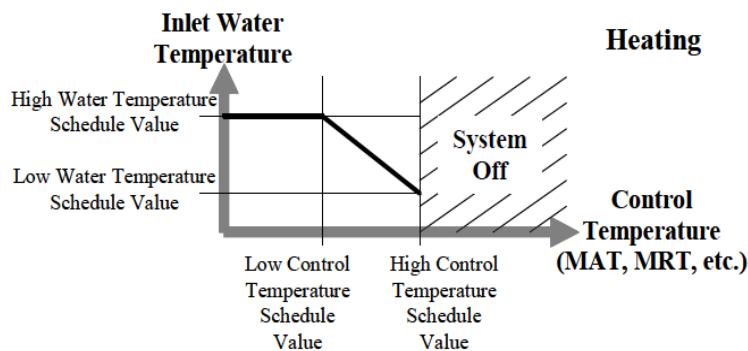


Figura 3.7. Controlo do sistema para o modelo de caudal constante, para aquecimento.

Fonte: EnergyPlus EngineeringReference (EnergyPlus Engineering Reference: The Reference to EnergyPlus Calculations, 2010)

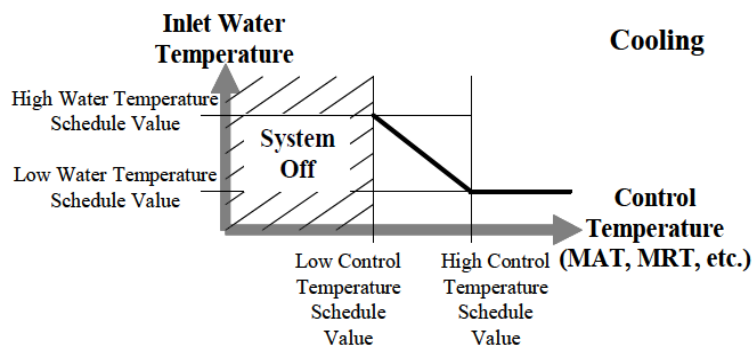


Figura 3.8. Controlo do sistema para o modelo de caudal constante, para arrefecimento.

Fonte: EnergyPlus EngineeringReference (EnergyPlus Engineering Reference: The Reference to EnergyPlus Calculations, 2010)

A Figura 3.9 mostra a modelação do objeto de caudal constante. Muitos dos campos deste objeto são idênticos ao anterior e parametrizados de maneira igual. Ainda assim, como a forma de controlo é diferente, existem campos específicos, que são descritos na Tabela 3.2.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		Kitchen Radiant Flo	Living Room Radiar
Availability Schedule Name		RADIANTSYSVAI	RADIANTSYSVAI
Zone Name		ZN_0_1_Kitchen	ZN_0_2_Living Roc
Surface Name or Radiant Surface Group Name		ZN_0_1_F_0_0	ZN_0_2_F_0_0
Hydronic Tubing Inside Diameter	m	0.013	0.013
Hydronic Tubing Length	m	95	150
Temperature Control Type		OperativeTemperatu	OperativeTemperatu
Rated Flow Rate	m3/s	0.0001	0.0001
Pump Flow Rate Schedule Name			
Rated Pump Head	Pa	75000	75000
Rated Power Consumption	W	50	50
Motor Efficiency		0.87	0.87
Fraction of Motor Inefficiencies to Fluid Stream		0.1	0.1
Heating Water Inlet Node Name		Kitchen Radiant inle	living room radiant ir
Heating Water Outlet Node Name		kitchen radiant outle	living room radiant o
Heating High Water Temperature Schedule Name		RADHEATHIGHW//	RADHEATHIGHW//
Heating Low Water Temperature Schedule Name		RADHEATLOWW//	RADHEATLOWW//
Heating High Control Temperature Schedule Name		RADHEATHIGHCO	RADHEATHIGHCO
Heating Low Control Temperature Schedule Name		RADHEATLOWCOI	RADHEATLOWCOI
Cooling Water Inlet Node Name		kitchen CW inlet	living room CW inlet
Cooling Water Outlet Node Name		kitchen CW outlet	living room CW outle
Cooling High Water Temperature Schedule Name		RADCOOLHIGHW//	RADCOOLHIGHW//
Cooling Low Water Temperature Schedule Name		RADCOOLLOWW//	RADCOOLLOWW//
Cooling High Control Temperature Schedule Name		RADCOOLHIGHCO	RADCOOLHIGHCO
Cooling Low Control Temperature Schedule Name		RADCOOLLOWCOI	RADCOOLLOWCOI
Condensation Control Type		SimpleOff	SimpleOff
Condensation Control Dewpoint Offset	C	1	1
Number of Circuits			
Circuit Length	m		

Figura 3.9. Parametrização do modelo de caudal constante

Tabela 3.2. Campos, e respetivas funcionalidades, do objeto ZoneHVAC:LowTemperatureRadiant:ConstantFlow

Rated Flow Rate	Caudal ao longo do sistema
Pump Flow Rate Schedule Name	Apesar do caudal ser constante, este pode tomar diferentes valores. Isso é controlado por um perfil.
Rated Pump Head	Altura da bomba
Rated Power Consumption	Potência consumida pela bomba
Motor Efficiency	Eficiência da bomba
Fraction of Motor Inefficiencies to Fluid Stream	Fracção da potência da bomba perdida para o fluido
Heating High Water Temperature Schedule Name	Perfil correspondente à temperatura máxima da água para aquecimento
Heating Low Water Temperature Schedule Name	Perfil correspondente à temperatura mínima da água para aquecimento

Name	
Heating High Control Temperature Schedule Name	Perfil correspondente à temperatura máxima de controlo para aquecimento
Heating Low Control Temperature Schedule Name	Perfil correspondente à temperatura mínima de controlo para aquecimento
Cooling High Water Temperature Schedule Name	Perfil correspondente à temperatura máxima da água para arrefecimento
Cooling Low Water Temperature Schedule Name	Perfil correspondente à temperatura mínima da água para arrefecimento
Cooling High Control Temperature Schedule Name	Perfil correspondente à temperatura máxima de controlo para arrefecimento
Cooling Low Control Temperature Schedule Name	Perfil correspondente à temperatura mínima de controlo para arrefecimento

3.2.3. Bombas

É indispensável a instalação de uma bomba de circulação para cada circuito (aquecimento e arrefecimento). Isso é feito no grupo *Pumps*, onde é escolhido o seu tipo e as suas características.

A descrição da bomba usada no caso-de-estudo é ilustrada na Figura 3.10, sendo esta semelhante à apresentada num exemplo fornecido pelo *EnergyPlus*.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		Circ Pump	HW Circ Pump
Inlet Node Name		CW Supply Inlet No	HW Supply Inlet No
Outlet Node Name		CW Pump Outlet No	HW Pump Outlet No
Rated Flow Rate	m ³ /s	0.004	0.004
Rated Pump Head	Pa	300000	300000
Rated Power Consumption	W	2000	2000
Motor Efficiency		0.87	0.87
Fraction of Motor Inefficiencies to Fluid Stream		0	0
Coefficient 1 of the Part Load Performance Curve		0	0
Coefficient 2 of the Part Load Performance Curve		1	1
Coefficient 3 of the Part Load Performance Curve		0	0
Coefficient 4 of the Part Load Performance Curve		0	0
Minimum Flow Rate	m ³ /s	0	0
Pump Control Type		INTERMITTENT	INTERMITTENT

Figura 3.10. Parametização das bombas de circulação

3.2.4. Equipamento de produção de água quente e refrigerada

Num sistema radiante, é impreterível, a instalação de um sistema que seja capaz de aquecer ou arrefecer a água, de maneira a que esta circule pelo sistema à temperatura desejada.

No grupo *Plant Heating and Cooling Equipment* existem várias hipóteses, desde caldeiras, *chillers* ou bombas de calor.

Existe ainda uma outra opção que é o *DistrictCooling* (água arrefecida) e *DistrictHeating* (água quente). Estes objetos, simples, funcionam como fornecedores ideais de água refrigerada e aquecida, sendo apenas é necessário definir a potência nominal. É um objeto útil para efeitos de dimensionamento e facilita a modelação. Estes objetos são exemplificados na Figura 3.11 e Figura 3.12.

Field	Units	Obj1
Name		Purchased Heating
Hot Water Inlet Node Name		Purchased Heat Inl
Hot Water Outlet Node Name		Purchased Heat Ou
Nominal Capacity	W	1000000
Capacity Fraction Schedule Name		

Figura 3.11. Modo de produção de calor através do *DistrictHeating*

Field	Units	Obj1
Name		Purchased CW
Chilled Water Inlet Node Name		Purchased Cooling I
Chilled Water Outlet Node Name		Purchased Cooling I
Nominal Capacity	W	1000000
Capacity Fraction Schedule Name		

Figura 3.12. Modo de produção de frio através do *DistrictCooling*

3.2.5. Circuito e componentes

Um dos aspetos mais complexos em *EnergyPlus* é a modelação de todo o circuito com os respetivos componentes e conexões. É necessária a criação de um circuito aquecimento e outro para arrefecimento.

Para melhor compreensão será aplicado o exemplo do Caso-de-Estudo do Capítulo 4, cujo esquema de circuito para aquecimento é apresentado na Figura 3.13. Nesta figura estão representados todos os componentes necessários.

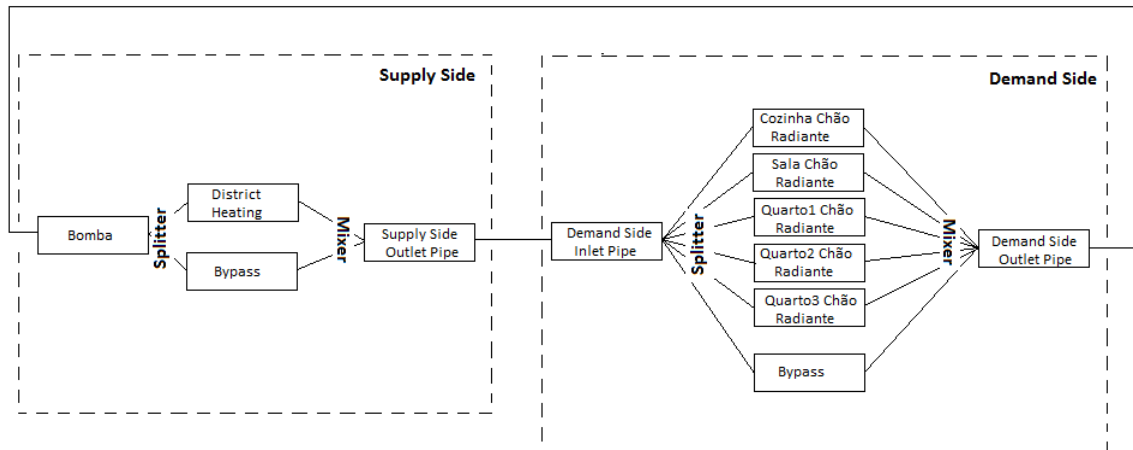


Figura 3.13. Esquema do circuito do sistema radiante para aquecimento

De notar que nesta ferramenta o circuito é separado em dois lados: o *demand side* e o *supply side*. O *demand side* refere-se ao lado do sistema radiante e o *supply side* corresponde ao lado do equipamento de produção donde a energia é obtida.

Todos os componentes utilizados na simulação são listados no objeto *Branch*. No caso do exemplo cada retângulo corresponde a um componente

Depois é necessário ordenar todos esses componentes em listas, no objeto *BranchList*. É necessário uma lista por cada lado do circuito (*demand e supply side*), e uma para cada circuito (aquecimento e arrefecimento). Na Figura 3.14 é mostrado o *BranchList* utilizado, na qual estão todos os componentes inseridos no campo *Branch*.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		Cooling Supply Side	Cooling Demand Sic	Heating Supply Side	Heating Demand Si
Branch 1 Name		CW Pump Branch	Cooling Demand Inl	Heating Supply Inlet	Heating Inlet Branch
Branch 2 Name		Purchased Cooling l	kitchen cooling brar	Heating Purchased	kitchen radiant bran
Branch 3 Name		Supply Bypass Bran	living room cooling t	Heating Supply Byp	living room radiant b
Branch 4 Name		Cooling Supply Outl	bedroom5 cooling b	Heating Supply Outl	bedroom5 radiant br
Branch 5 Name			bedroom6 cooling b		bedroom6 radiant br
Branch 6 Name			bedroom7 cooling b		bedroom7 radiant br
Branch 7 Name			Demand Bypass Bra		Heating Bypass Bra
Branch 8 Name			Cooling Demand Ou		Heating Outlet Bran

Figura 3.14. Objeto *BranchList* utilizado no caso-de-estudo

É também necessário definir as ligações, neste caso *splitters* e *mixers* (visíveis na Figura 3.13) que têm o objetivo de dividir e misturar correntes, respetivamente. Os objetos utilizados são o *Connector:Splitter* e o *Connector:Mixer* e estão representadas na Figura 3.15 e Figura 3.16 respetivamente.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		CW Supply Splitter	CW Demand Splitte	Heating Splitter	Heating Supply Spli
Inlet Branch Name		CW Pump Branch	Cooling Demand Inli	Heating Inlet Brancl	Heating Supply Inlet
Outlet Branch 1 Name		Purchased Cooling l	bedroom5 cooling b	bedroom5 radiant br	Heating Purchased
Outlet Branch 2 Name		Supply Bypass Bran	kitchen cooling brar	kitchen radiant bran	Heating Supply Byp
Outlet Branch 3 Name			living room cooling b	living room radiant b	
Outlet Branch 4 Name			bedroom6 cooling b	bedroom6 radiant br	
Outlet Branch 5 Name			bedroom7 cooling b	bedroom7 radiant br	
Outlet Branch 6 Name			Demand Bypass Bra	Heating Bypass Bra	

Figura 3.15. Exemplo dos *Splitters* definidos no caso-de-estudo

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		CW Loop Mixer	CW Demand Mixer	Heating Demand Mi	Heating Supply Mixe
Outlet Branch Name		Cooling Supply Outli	Cooling Demand Du	Heating Outlet Bran	Heating Supply Outli
Inlet Branch 1 Name		Purchased Cooling l	bedroom5 cooling b	bedroom5 radiant br	Heating Purchased
Inlet Branch 2 Name		Supply Bypass Bran	kitchen cooling brar	kitchen radiant bran	Heating Supply Byp
Inlet Branch 3 Name			living room cooling b	living room radiant b	
Inlet Branch 4 Name			bedroom6 cooling b	bedroom6 radiant br	
Inlet Branch 5 Name			bedroom7 cooling b	bedroom7 radiant br	
Inlet Branch 6 Name			Demand Bypass Bra	Heating Bypass Bra	

Figura 3.16. Exemplo dos *Mixers* definidos no caso-de-estudo

Também deve ser utilizado o objeto *ConnectorList* que lista as conexões de cada lado e de cada circuito. A Figura 3.17 representa as listas utilizadas.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		Cooling Supply Side	Cooling Demand Sic	Heating Supply Side	Heating Demand Si
Connector 1 Object Type		Connector:Splitter	Connector:Splitter	Connector:Splitter	Connector:Splitter
Connector 1 Name		CW Supply Splitter	CW Demand Splitte	HW Supply Splitter	HW Demand Splitte
Connector 2 Object Type		Connector:Mixer	Connector:Mixer	Connector:Mixer	Connector:Mixer
Connector 2 Name		CW Supply Mixer	CW Demand Mixer	HW Supply Mixer	HW Demand Mixer

Figura 3.17. Lista de conexões utilizada no caso-de-estudo

Os únicos componentes que falta definir são o *Supply Side Outlet Pipe*, o *Demand Side Outlet Pipe*, *Demand Side Inleto Pipe* e os dois *Bypass* que são tubos, sendo criados no objeto *Pipe:Adiabatic*.

Depois de definidos todos os componentes é fundamental definir as características de todo o circuito de passagem do fluido de transporte, neste caso a água. É necessário definir um circuito para cada regime de funcionamento, aquecimento e arrefecimento.

No objeto *PlantLoop* do grupo *Plant-Condenser Loops* são definidas as características do circuito.

Na Figura 3.18 está representada um exemplo da parametrização deste objeto e na Tabela 3.3 são descritos todos os campos do mesmo.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		Chilled Water Loop	Hot Water Loop
Fluid Type		Water	Water
User Defined Fluid Type			
Plant Equipment Operation Scheme Name		CW Loop Operation	HW Loop Operation
Loop Temperature Setpoint Node Name		CW Supply Outlet N	HW Supply Outlet N
Maximum Loop Temperature	C	100	100
Minimum Loop Temperature	C	1	10
Maximum Loop Flow Rate	m3/s	0.004	0.004
Minimum Loop Flow Rate	m3/s	0	0
Plant Loop Volume	m3	autocalculate	autocalculate
Plant Side Inlet Node Name		CW Supply Inlet No	HW Supply Inlet No
Plant Side Outlet Node Name		CW Supply Outlet N	HW Supply Outlet N
Plant Side Branch List Name		Cooling Supply Side	Heating Supply Side
Plant Side Connector List Name		Cooling Supply Side	Heating Supply Side
Demand Side Inlet Node Name		CW Demand Inlet N	HW Demand Inlet N
Demand Side Outlet Node Name		CW Demand Outlet	HW Demand Outlet
Demand Side Branch List Name		Cooling Demand Sic	Heating Demand Sic
Demand Side Connector List Name		Cooling Demand Sic	Heating Demand Sic
Load Distribution Scheme		Optimal	Optimal
Availability Manager List Name			
Plant Loop Demand Calculation Scheme			
Common Pipe Simulation			
Pressure Simulation Type			

Figura 3.18. Exemplo da definição das características do circuito, no objeto *PlantLoop*

Tabela 3.3. Campos, e respetivas funcionalidades, do objeto *PlantLoop*

Name	Nome do circuito
Fluid Type	Tipo de fluido do circuito, sendo as opções água, vapor ou um fluido definido pelo utilizador no campo “User Defined Fluid Type”
Plant Equipment Operation Scheme Name	Esquema de operação do equipamento (ver Figura 3.21)
Loop Temperature Setpoint Node Name	Nome do nó onde é medida a temperatura de controlo do circuito
Maximum Loop Temperature	Temperatura máxima permitida no circuito
Minimum Loop Temperature	Temperatura mínima permitida no circuito
Maximum Loop Flow Rate	Caudal máximo permitido no circuito
Minimum Loop Flow Rate	Caudal mínimo permitido no circuito
Plant Side Inlet Node Name	Nome do nó de entrada do supply side
Plant Side Outlet Node Name	Nome do nó de saída do supply side
Plant Side Branch List Name	Nome da lista de componentes do supply side
Plant Side Connector List	Nome da lista de conectores do supply side

Name	
Demand Side Inlet Node Name	Nome do nó de entrada do demand side
Demand Side Outlet Node Name	Nome do nó de saída do demand side
Demand Side Branch List Name	Nome da lista de componentes do demand side
Demand Side Connector List Name	Nome da lista de conectores do demand side
Load Distribution Scheme	Permite escolher a forma de controlo do equipamento de produção entre três opções, <i>Sequential</i> , <i>Optimal</i> , <i>Uniform</i> . A primeira utiliza cada equipamento até ao seu máximo, na segunda cada equipamento é utilizado da forma mais eficiente, e na última os equipamentos são usados todos de maneira igual.

Ainda do mesmo grupo de objetos são utilizados os seguintes: *PlantEquipmentList*, *PlantEquipmentOperation:CoolingLoad*, *PlantEquipmentOperation:HeatingLoad* e *PlantEquipmentOperationSchemes*. Estes objetos servem para controlar e conjugar os equipamentos de produção. Mesmo existindo apenas um equipamento de produção estes objetos são indispensáveis para correr a simulação.

No *PlantEquipmentList* são listados os equipamentos de produção, por ordem de funcionamento, para cada circuito. Na Figura 3.19 é mostrado o exemplo do caso-de-estudo, onde só existe um equipamento em cada circuito.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		cooling plant	heating plant
Equipment 1 Object Type		DistrictCooling	DistrictHeating
Equipment 1 Name		Purchased Cooling	Purchased Heating

Figura 3.19. Lista de equipamentos por função (arrefecimento e aquecimento)

Nos objetos *PlantEquipmentOperation:CoolingLoad*, e *PlantEquipmentOperation:HeatingLoad* são definidos os intervalos de carga para o funcionamento de cada lista de equipamentos.

Na Figura 3.20 é exemplificado o objeto, para um caso onde apenas existe um equipamento de produção.

Field	Units	Obj1	Field	Units	Obj1
Name		cooling	Name		Heating
Load Range 1 Lower Limit	W	0	Load Range 1 Lower Limit	W	0
Load Range 1 Upper Limit	W	1000000	Load Range 1 Upper Limit	W	1000000
Range 1 Equipment List Name		cooling plant	Range 1 Equipment List Name		heating plant

(a) (b)

Figura 3.20. Equipamentos de produção e respetivos intervalos de carga: (a): arrefecimento; (b) aquecimento

No objeto *PlantEquipmentOperationSchemes* é definido esquema de operação para cada circuito, é identificado o grupo de equipamentos e definido o horário de funcionamento correspondente. A Figura 3.21 ilustra um exemplo onde o horário do circuito é *On*, ou seja, disposto a arrancar a qualquer momento.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		CW Loop Operation	Hot Loop Operation
Control Scheme 1 Object Type		PlantEquipmentOpe	PlantEquipmentOpe
Control Scheme 1 Name		cooling	Heating
Control Scheme 1 Schedule Name		ON	ON

Figura 3.21. Objeto *PlantEquipmentOperationSchemes*, onde é definido o horário de funcionamento dos equipamentos de produção.

Para controlar o circuito é necessário definir um *setpoint*, que é utilizado no objeto *PlantLoop*. Este *setpoint* tem como objetivo definir a temperatura à saída do sistema de produção. O tipo de *setpoint* utilizado é o *SetpointManager:Schedule*. No modelo de caudal variável e temperatura constante, este *setpoint* serve para controlar a temperatura da água do sistema.

A Figura 3.22 exemplifica o objeto.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		CW loop Setpoint M	Hot Water Loop Sel
Control Variable		Temperature	Temperature
Schedule Name		CW Loop Temp Scl	H/W Loop Temp Scl
Setpoint Node or NodeList Name		CW Supply Outlet N	H/W Supply Outlet N

Figura 3.22. Exemplo da criação de um *setpoint*, num local específico.

4. CASO-DE-ESTUDO

O caso-de-estudo utilizado corresponde a uma residência unifamiliar constituída por três quartos, duas casas-de-banho, cozinha, sala-de-estar, hall e corredor. Esta residência localiza-se em Coimbra, Portugal, e possui como característica particular o facto de a sala-de-estar possuir dois grandes vãos envidraçados. Para modelação no programa *EnergyPlus* foi utilizada a versão 8.1.0.

4.1. Geometria do edifício

Investigadores da Universidade de Coimbra desenvolveram um protótipo de um programa que faz a geração automática de plantas de arquitetura de acordo com os requisitos e preferências do utilizador (Rodrigues, Gaspar, & Gomes, 2013a, 2013b, 2013c). Este tipo de ferramenta é importante pois permite obter um conjunto de dados sobre vários tipos de edifícios que ajudam a identificar e analisar características dos edifícios (Rodrigues, Amaral, Gaspar, & Gomes, 2015).

Resumindo, o utilizador define o programa funcional com as suas preferências e requisitos, tais como o número de divisões, número de andares, orientações de vãos, conectividade de espaços interiores, áreas máximas de construção e implantação, entre outras restrições. O algoritmo irá procurar satisfazer o programa funcional e produzir soluções alternativas para o projetista comparar. Estas são avaliadas de acordo com o seu comportamento térmico (graus-hora de desconforto) e posteriormente otimizadas usando um segundo algoritmo que altera a geometria das plantas, tal como orientação e dimensão dos vãos, orientação do edifício, inclusão de palas horizontais e verticais, e transladação perpendicular das paredes (Rodrigues, Gaspar, & Gomes, 2014a, 2014b).

A residência deste caso-de-estudo foi escolhida entre um conjunto de soluções geradas automaticamente por um algoritmo (Rodrigues et al., 2014a, 2014b). Posteriormente, esta solução foi otimizada no sentido de minimizar os graus-hora de desconforto térmico. A parametrização do ficheiro *IDF* base, a ser fornecido ao *EnergyPlus*, foi gerada automaticamente pelo algoritmo. Nele se acrescentou toda a parametrização relativa ao sistema radiante hidráulico descrita neste trabalho.

A solução escolhida é apresentada na Figura 4.1, modelo tridimensional, e na Figura 4.2, em planta.

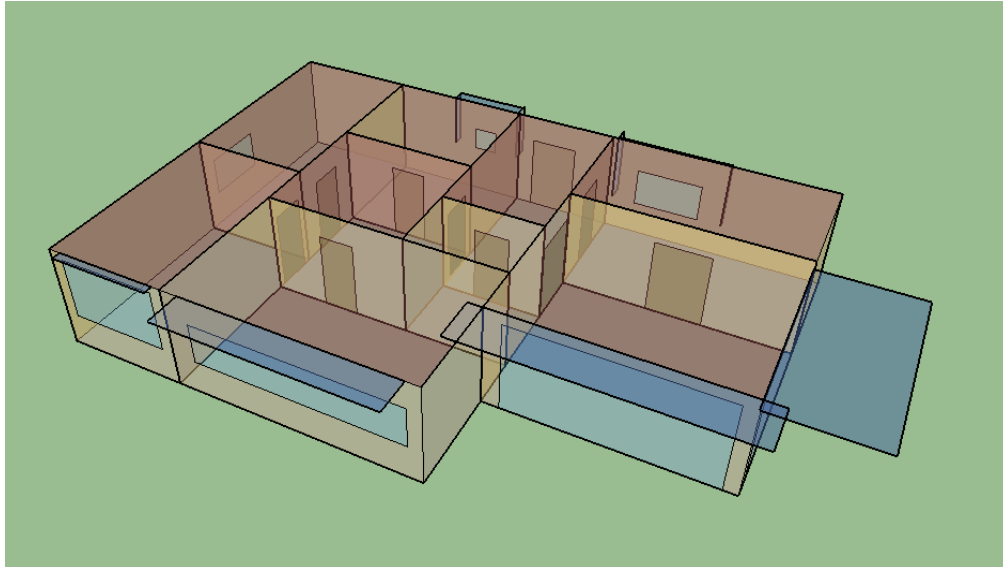


Figura 4.1. Modelo 3D

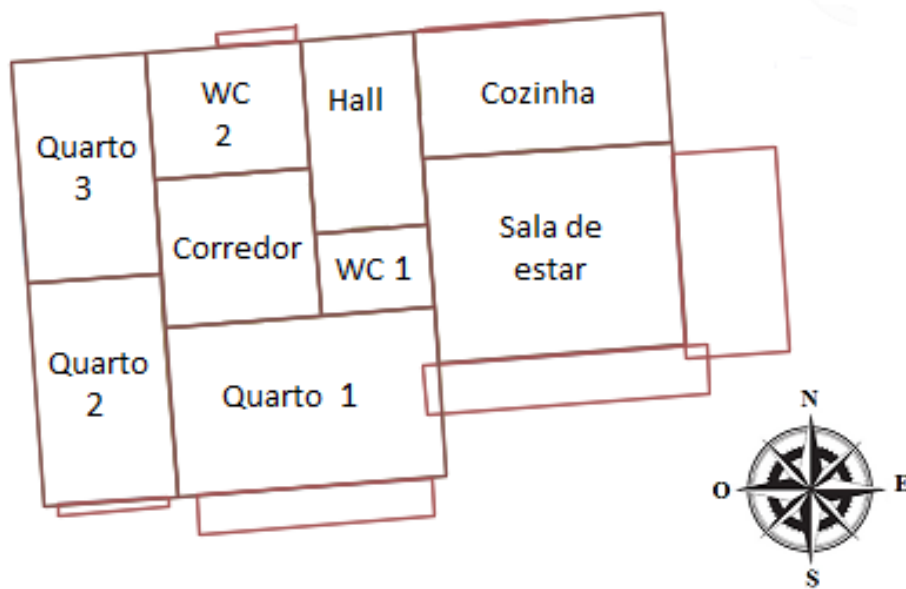


Figura 4.2. Planta da solução

4.2. Especificações do modelo de simulação

O sistema construtivo utilizado corresponde a alvenaria dupla de tijolo, comum na construção em Portugal. As Tabela 4.1, Tabela 4.2, Tabela 4.3 e Tabela 4.4 listam os materiais e propriedades físicas de cada elemento construtivo original.

Tabela 4.1. Características dos materiais constituintes das paredes interiores.

	e (cm)	λ (W/m°C)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg°C)
<i>Painel Pladur</i>	2	0.22	950	840
<i>Tijolo Cimento Furado</i>	7	1.73	2242.59	836.8
<i>Painel Pladur</i>	2	0.22	950	840

Tabela 4.2. Características dos materiais constituintes das paredes exteriores.

	e (cm)	λ (W/m°C)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg°C)
<i>Reboco</i>	2	0.431	1250	1088
<i>Tijolo Cimento Maciço</i>	11	1.245	2082.4	920.48
<i>Isolante</i>	8	0.0432	32.037	836.8
<i>Tijolo Cimento Furado</i>	15	1.73	2242.59	836.8
<i>Painel Pladur</i>	2	0.22	950	840

Tabela 4.3. Características dos materiais constituintes da placa.

	e (cm)	λ (W/m°C)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg°C)
<i>Escória</i>	1.5	1.436	881.02	1673.6
<i>Tela Isolante</i>	1	0.19	1121.292	1673.6
<i>Isolante</i>	10	0.0432	91.305	836.8
<i>Betão</i>	20	1.7296	2242.585	836.8
<i>Painel Pladur</i>	2	0.22	950	840

Tabela 4.4. Características dos materiais constituintes da laje térrea.

	e (cm)	λ (W/m°C)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg°C)
<i>Betão</i>	20	1.7296	2242.585	836.8
<i>Isolante</i>	8	0.0432	32.037	836.8
<i>Reboco</i>	2	0.8	1600	840
<i>Soalho (madeira)</i>	1.5	0.2	825	2385

A infiltração de ar pelos envidraçados foi definida com 0.6 renovações de ar por hora (ACH) acrescida de 1.5 ACH para a ventilação natural resultante da abertura das janelas. Os ganhos internos devido ao tipo e períodos de ocupação e iluminação correspondem aos valores comuns neste tipo da habitação (ver Tabela 4.5).

Tabela 4.5. Ganhos internos em cada divisão.

	<i>Ocupação</i> (pessoas)	<i>Iluminação</i> (Watt/m ²)
<i>Hall</i>	2	7
<i>Cozinha</i>	2	10
<i>Sala de estar</i>	5	10
<i>Wc1</i>	1	7
<i>Corredor</i>	2	7
<i>Quarto1</i>	1	7
<i>Quarto2</i>	2	7
<i>Quarto3</i>	2	7
<i>Wc2</i>	1	7

Os dados climáticos são referentes a Coimbra, Portugal, e encontram-se disponíveis na página oficial do Departamento de Energia dos Estados Unidos da América. Após analisados, definiu-se que existiriam quatro meses com necessidades de

arrefecimento (Verão - Junho, Julho, Agosto e Setembro) e os restantes com necessidades de aquecimento (Inverno).

O edifício foi equipado com seis diferentes configurações que foram alvo de análise, consoante o sítio onde foram colocados (pavimento, paredes e painéis no teto) e ao tipo de modelo do sistema radiante (caudal variável ou constante).

Decidiu-se por não os instalar em todas as divisões, assim, apenas a cozinha, sala-de-estar e os quartos foram equipados com um circuito de sistemas radiantes.

Para instalar o sistema no pavimento, optou-se por manter a solução construtiva da Tabela 4.4, introduziu-se apenas os tubos entre o isolante e o reboco.

Também as paredes mantiveram a solução construtiva, na qual foi inserido a rede de tubagens. Uma vez que o *EnergyPlus* não permite que haja sistemas radiantes em paredes contíguas, foi escolhida apenas uma parede por divisão, todas elas interiores. A Figura 4.3 mostra as paredes interiores escolhidas para acolher o sistema radiante.

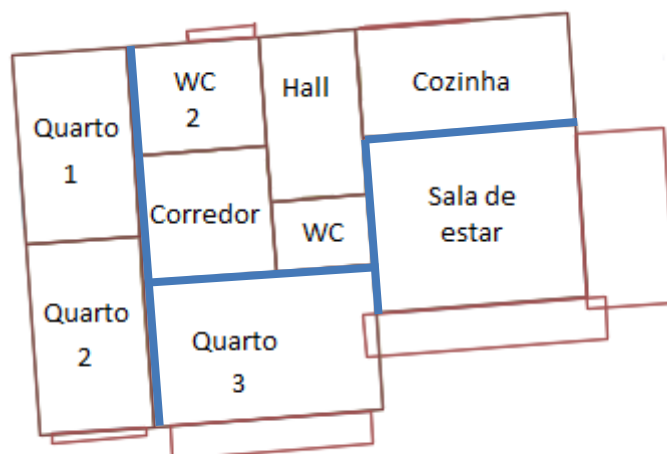


Figura 4.3. Paredes interiores, a azul, onde estão instalados os sistemas radiantes

Já os painéis são compostos por duas placas de alumínio (no *EnergyPlus* uma superfície radiantes tem de ter duas camadas) na qual passa a rede de tubagens, e foram instalados na totalidade da área do teto.

Na Tabela 4.6 é apresentada a área das superfícies equipadas com sistemas radiantes e respetivos comprimentos dos tubos interiores para a modelação do sistema radiante. O comprimento dos tubos é estimado consoante a área, distância entre tubos e

diâmetro dos tubos e o valor apresentado é aproximado. A área dos painéis radiantes é igual à do pavimento.

Tabela 4.6. Área das superfícies com sistema radiante e respetivos comprimentos dos tubos.

	Área Pavimento (m ²)	Comprimento dos tubos interiores (m)	Área Paredes (m ²)	Comprimento dos tubos interiores (m)
Cozinha	17.00	95	15.525	85
Sala de estar	27.50	150	12.744	70
Quarto1	24.42	140	16.91	95
Quarto2	16.05	90	13.99	80
Quarto3	15.89	90	13.81	80

O diâmetro dos tubos radiantes é 13 milímetros. O caudal de água nos tubos foi escolhido com auxílio ao exemplo fornecido pelo *EnergyPlus*, e definiu-se um caudal máximo de 0,0001 m³/s, correspondente a uma velocidade de escoamento de 0,75 m/s. Este valor foi também adotado como constante no modelo de caudal constante. Também a bomba de circulação, indispensável, foi modelada de acordo com o exemplo. As suas características estão descritas na Figura 3.10.

Para facilitar a modelação, o sistema de produção de calor e frio adotado foi o *DistrictHeating* e *DistrictCooling*, respetivamente, caracterizados na Figura 3.11 e Figura 3.12.

Será utilizada a temperatura operativa como temperatura de controlo e pretende-se que no período de Verão a temperatura não ultrapasse os 26°C e no Inverno não baixe dos 20°C.

O modo de controlo de cada modelo já apresentado (Figura 3.4, Figura 3.5, Figura 3.7 e Figura 3.8) é agora adaptado ao caso-de-estudo e às temperaturas de controlo definidas.

A Figura 4.4 e a Figura 4.5 apresentam o modo de controlo para os diferentes modelos e para os regimes de aquecimento e arrefecimento.

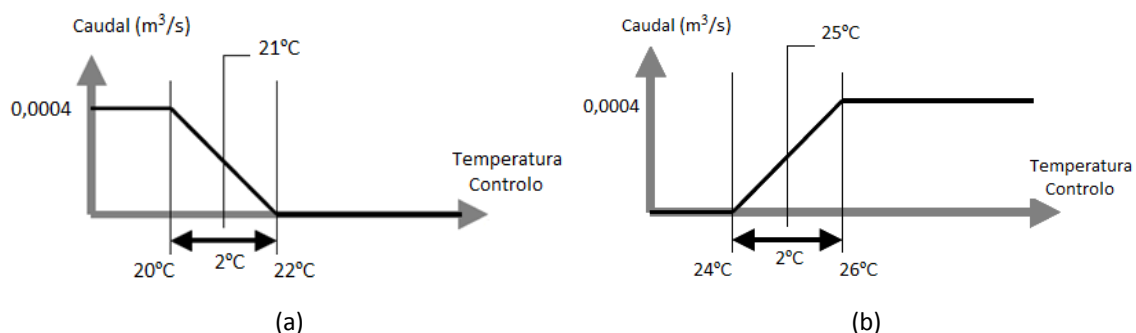


Figura 4.4. Modo de controlo do sistema utilizado para o modelo de caudal variável: (a) aquecimento (Inverno); (b) arrefecimento (Verão)

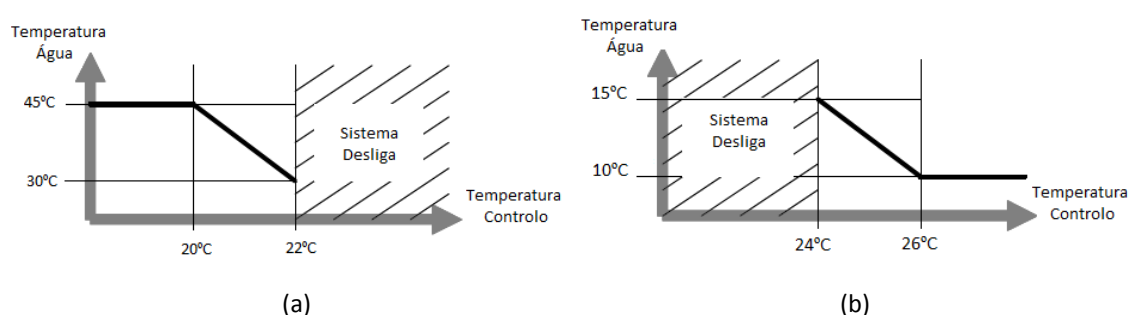


Figura 4.5. Modo de controlo do sistema utilizado para o modelo de caudal constante: (a) aquecimento (Inverno); (b) arrefecimento (Verão)

Para minimizar o desperdício e aumentar a eficiência do sistema radiante, pretende-se evitar que ocorra aquecimento no Verão e arrefecimento no Inverno. Definiram-se modos de controlo para evitar esse fenómeno, mas que garantem o funcionamento em condições extremas. Assim, pretende-se que o aquecimento só arranque, no Verão, caso a temperatura baixe dos 14°C e que o arrefecimento arranque, no Inverno, para temperaturas operativas interiores acima de 31°C.

O último parâmetro com influência no sistema é a temperatura da água. No modelo de caudal variável e temperatura da água constante definiu-se uma temperatura de 35°C para aquecimento e de 15°C para arrefecimento. Já no modelo de caudal constante e temperatura da água variável, utilizaram-se intervalos, entre os 30 e os 40°C para aquecimento e entre os 10 e os 15°C para arrefecimento.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão analisados os resultados fornecidos pelo *EnergyPlus*, acerca do comportamento da habitação. Existem vários dados que poderiam ser alvo de comparação, neste caso vão ser analisadas as temperaturas operativas interiores, a temperatura das superfícies radiantes, a energia consumida, a ocorrência de condensados e temperatura da água pois são variáveis com impacto no sistema.

Como a divisão da sala-de-estar é caracterizada por dois grandes vãos, esta torna-se na divisão onde existe uma maior variação climática e aquela que apresentou resultados mais desfavoráveis, sendo por isso alvo de maior análise.

5.1. Temperaturas interiores

Para analisar as temperaturas operativas interiores, identificaram-se os dois dias, um para o Inverno e outro para o Verão, onde a temperatura interior, sem sistema de climatização instalado, era mais desfavorável. Os dias escolhidos foram o 20 de Janeiro e o 11 de Agosto.

Na Figura 5.1 é apresentado o gráfico da temperatura operativa ao longo do dia 20 de Janeiro e na Figura 5.2 é apresentado do gráfico da temperatura operativa no dia 11 de Agosto, na sala-de-estar.

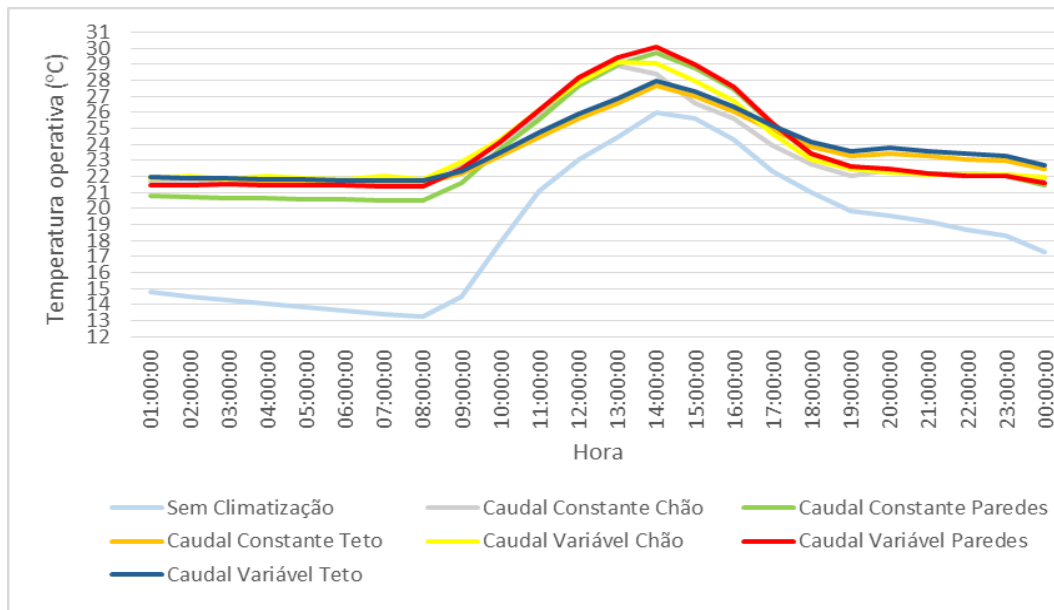


Figura 5.1. Temperatura operativa a sala-de-estar, no dia 20 de Janeiro.

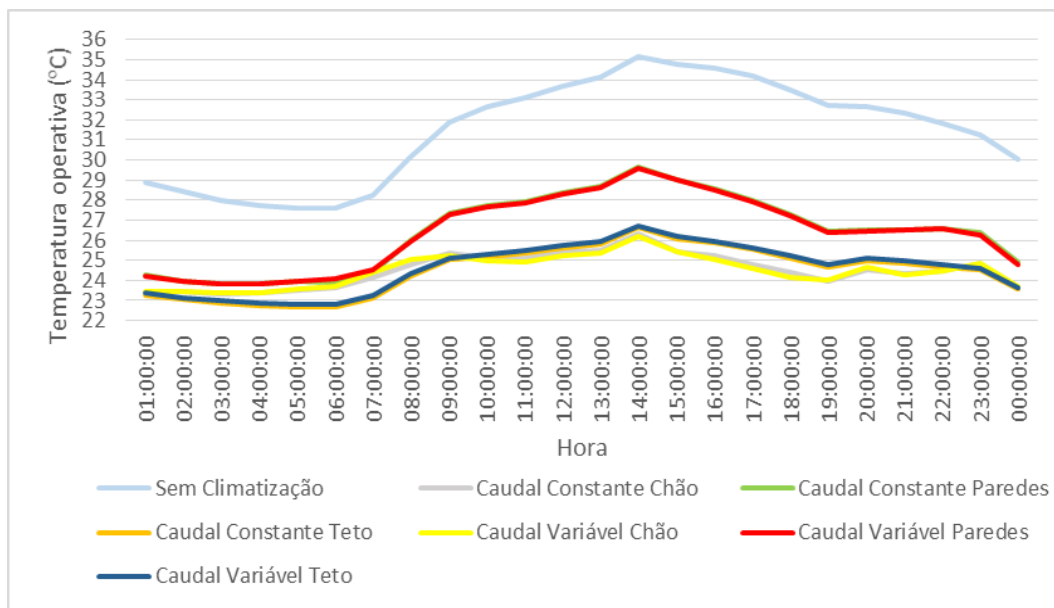


Figura 5.2. Temperatura operativa na sala-de-estar, no dia 11 de Agosto.

É visível a influência dos sistemas radiantes na temperatura interior operativa, sendo que se verifica sobreaquecimento em Janeiro (a temperatura excede os 26°C definidos como limite) durante as horas de maior radiação solar, devido à influência das grandes janelas e da otimização sofrida pela planta. A temperatura atinge os 30°C, temperatura aceitável para uma habitação familiar.

Nas restantes divisões, o intervalo pretendido para as temperaturas interiores é igualmente respeitado (ver Anexo A), verificando-se funcional os sistemas radiantes instalados.

Na Figura 5.3 é apresentada a temperatura operativa, no corredor, que é uma divisão sem qualquer sistema de climatização, durante o dia 20 de Janeiro. A Figura 5.4 corresponde à temperatura operativa, no corredor, no dia 11 de Agosto.

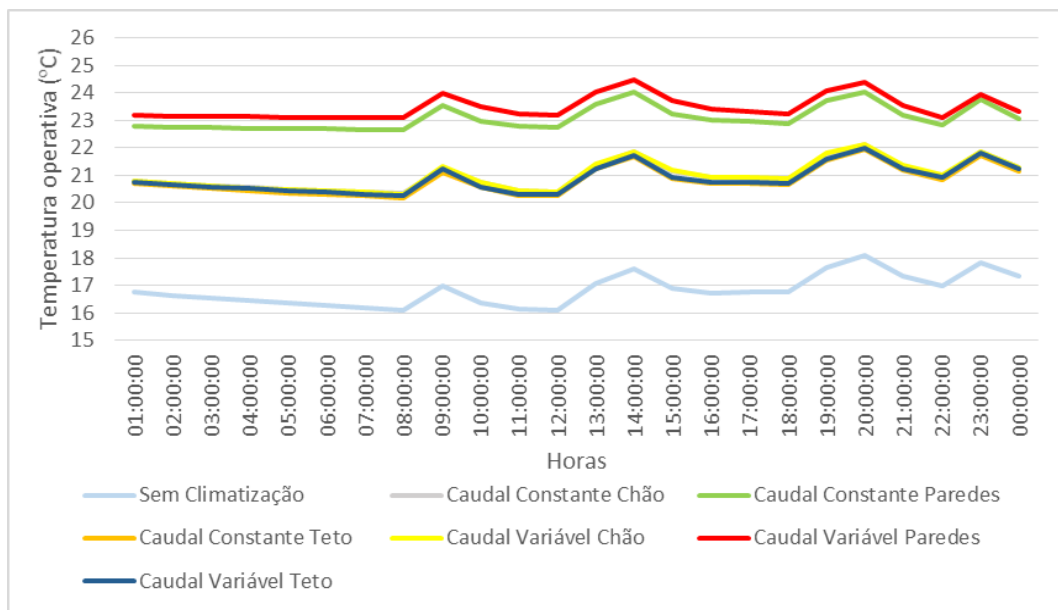


Figura 5.3. Temperatura operativa no corredor, no dia 20 de Janeiro.

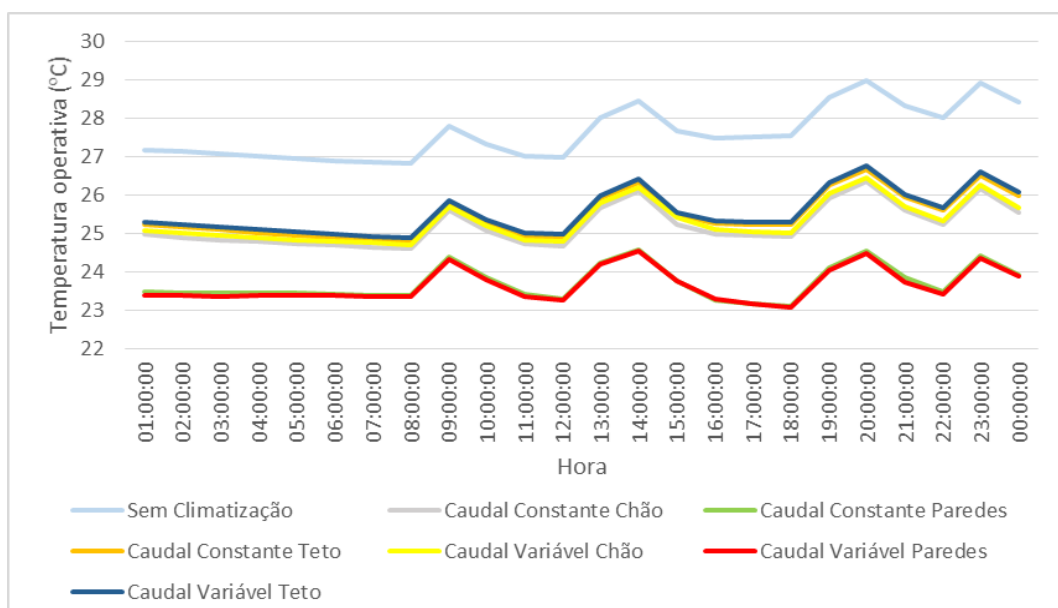


Figura 5.4. Temperatura operativa no corredor, no dia 11 de Agosto.

Analisando a Figura 5.3 e a Figura 5.4, nota-se que mesmo nas divisões sem sistema de climatização independente, a divisão beneficia de climatização. Sendo que quando o sistema radiante está instalado nas paredes interiores, as divisões adjacentes sofrem uma maior variação de temperatura. Também nestas divisões, apesar da ausência de um sistema climático, a temperatura operativa interior respeita, normalmente, o intervalo desejado. É visível a existência de diversos picos, explicados com a ocupação definida no corredor.

Este fenómeno acontece em todas as divisões adjacentes que não estão equipadas com sistema de climatização (Anexo A).

5.2. Temperatura de superfície

Tal como foi referido na Secção 2.2.3, existe um intervalo de temperatura no qual deve estar a temperatura das superfícies em contacto direto e constante com a pele. É importante garantir que quando o sistema radiante é instalado no pavimento, esse intervalo é cumprido. Na Figura 5.5 é mostrada a temperatura do pavimento ao longo do ano na sala-de-estar e no modelo de caudal variável e na Figura 5.6 é apresentada a temperatura do pavimento no modelo de caudal constante.

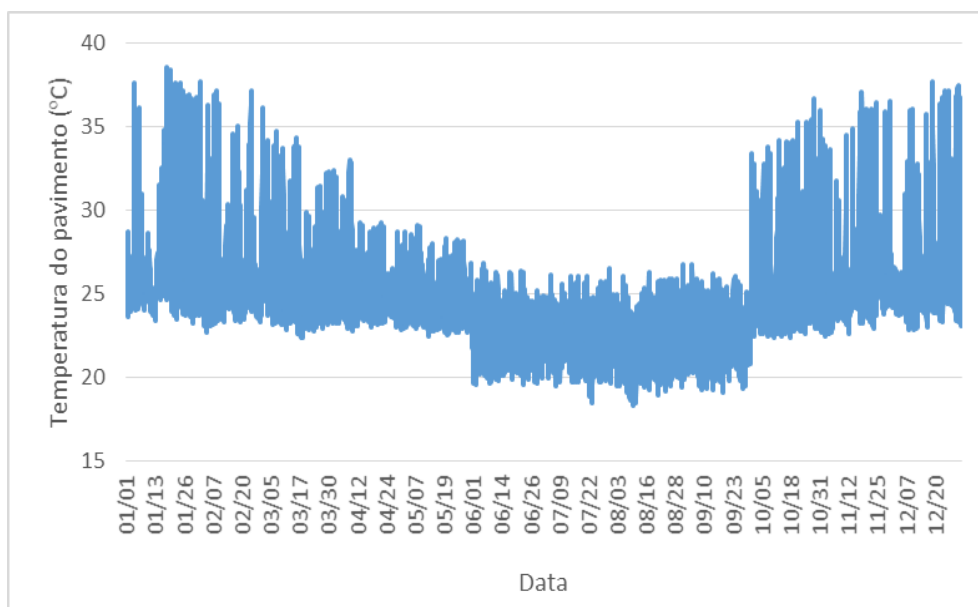


Figura 5.5. Temperatura do pavimento radiante na sala-de-estar, no modelo de caudal variável.

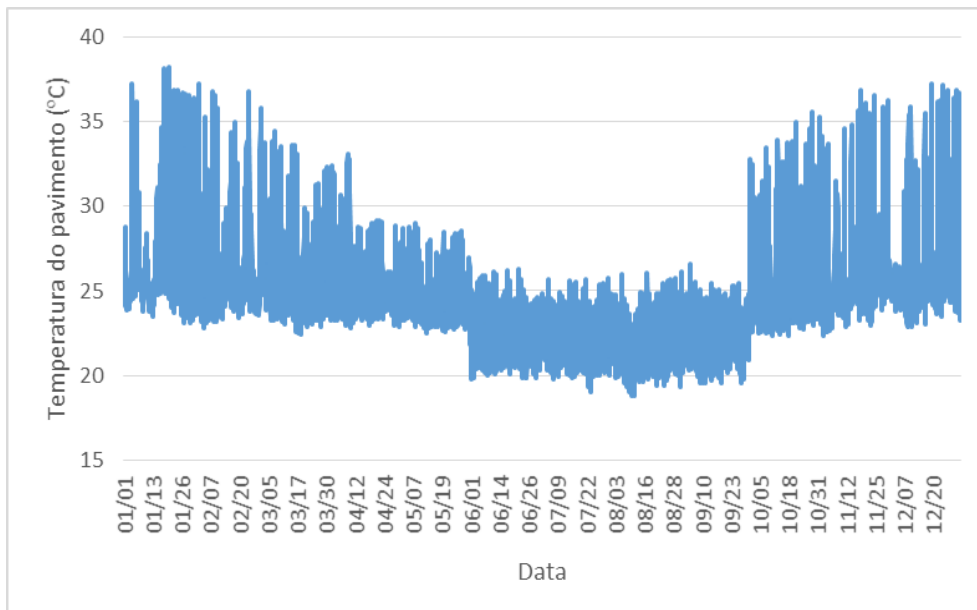


Figura 5.6. Temperatura do pavimento radiante na sala-de-estar, no modelo de caudal constante.

Nota-se que a temperatura da superfície atinge, variadas vezes, uma temperatura superior aos 29°C desejados.

Ainda assim, este fenómeno, não se deve à instalação do pavimento radiante, pois o mesmo é observado sem climatização na Figura 5.7.

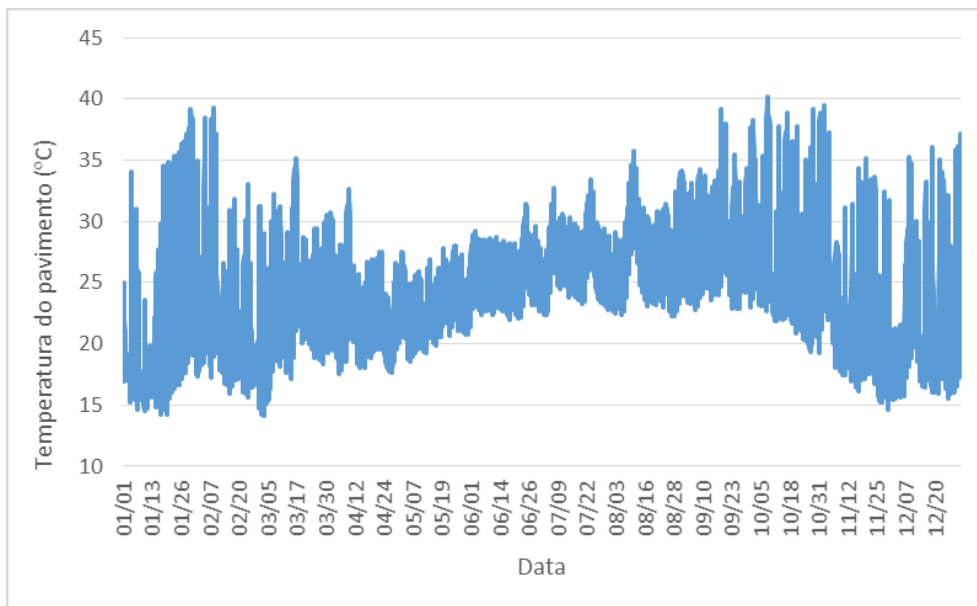


Figura 5.7. Temperatura do pavimento radiante na sala-de-estar, sem climatização.

Mais uma vez, este fenómeno, que acontece nas horas de maior radiação, é explicado devido à existência dos grandes vãos, porque mesmo sem climatização a temperatura superficial excede a temperatura pretendida.

As temperaturas chegam a atingir 38°C, nos períodos de maior radiação devido à existência dos grandes vãos. Este problema poderia ser resolvido com recurso a um sistema que bloqueasse a entrada de raios solares. Não se regista diferença entre os objetos radiantes, pois os gráficos de ambos são idênticos. O mesmo fenómeno ocorre em divisões com maiores vãos, ainda que com menor frequência e temperatura, como é visível no Anexo B.

5.3. Necessidades energéticas

Outro fator importante na avaliação dos sistemas é a energia necessária por cada configuração, no aquecimento e no arrefecimento que reflete os custos das diferentes configurações.

Na Tabela 5.1 é apresentado todo o gasto energético anual, com o sistema radiante, para todas as configurações analisadas.

Tabela 5.1. Energia total necessária em cada configuração, em kWh/ano.

	<i>Caudal Variável</i>			<i>Caudal Constante</i>		
	<i>Pavimento</i>	<i>Paredes</i>	<i>Teto</i>	<i>Pavimento</i>	<i>Paredes</i>	<i>Teto</i>
<i>Aquecimento</i>	6455	9363	6996	6725	9885	5392
<i>Arrefecimento</i>	2460	3231	3062	2830	4095	3354
<i>Total (kWh/ano)</i>	8915	12594	10058	9555	13980	8746

De acordo com a energia total gasta em cada configuração, é visível que os sistemas instalados em paredes apresentam consumos de 12594 e 13980 kWh/ano bastante superiores aos apresentados pelo pavimento (8915 e 9555 kWh/ano) e teto (10058 e 8746 kWh/ano).

As configurações mais eficientes são o pavimento no modelo de caudal variável (8915 kWh/ano) e o teto no modelo de caudal constante (8746 kWh/ano). Nestas configurações pavimento revela-se menos eficiente, no aquecimento, que o teto (6455 e 5392 kWh/ano), mas mais eficiente no arrefecimento (2460 e 3354 kWh/ano).

Uma vez que é conhecida a área útil das divisões com sistema de climatização (100.86m²), torna-se possível comparar a intensidade energética, em kWh/ano.m² (Tabela 5.2), com outro estudo já realizado e equipado com pavimento radiante (Silva, 2000).

Tabela 5.2. Necessidades energéticas da habitação, em kWh/ano.m².

	<i>Caudal Variável</i>			<i>Caudal Constante</i>		
	<i>Pavimento</i>	<i>Paredes</i>	<i>Teto</i>	<i>Pavimento</i>	<i>Paredes</i>	<i>Teto</i>
<i>Aquecimento</i>	64,00	92,83	69,36	66,68	98,01	53,46
<i>Arrefecimento</i>	24,39	32,03	30,36	28,06	40,60	33,25
<i>Total (kWh/ano.m²)</i>	88,39	124,86	99,72	94,74	138,61	86,71

Tabela 5.3. Necessidades energéticas, em kWh/ano.m², de outro estudo realizado (Silva, 2000).

<i>Aquecimento</i>	62,62
<i>Arrefecimento</i>	18,57
<i>Total (kWh/ano.m²)</i>	81,19

Analisando, verifica-se que a intensidade energética total nas configurações mais eficientes (88,39 e 86,71 kWh/ano.m²) é semelhante à apresentada na Tabela 5.3 (81,19 kWh/ano.m²).

5.4. Ocorrência de condensados

Uma das principais desvantagens do arrefecimento radiante é a ocorrência de condensados nas superfícies, é portanto, necessário ter em conta este fenómeno.

Na Tabela 5.4 é apresentado o tempo total, de todas as superfícies, em horas/ano que o sistema se encontra desligado devido à condensação.

Tabela 5.4. Tempo, em horas por ano, que o sistema se encontra desligado devido à ocorrência de condensados.

	<i>Caudal Variável</i>			<i>Caudal Constante</i>		
	<i>Pavimento</i>	<i>Paredes</i>	<i>Teto</i>	<i>Pavimento</i>	<i>Paredes</i>	<i>Teto</i>
<i>Total (h/ano)</i>	256,625	130,258	130,658	559,267	913,583	696,66

De acordo com a ocorrência de condensados, o modelo de caudal variável apresenta um valor bastante menor, devido à temperatura da água. Neste modelo a temperatura da água é constante a 15°C, enquanto no modelo de caudal constante, a temperatura varia entre os 10 e os 15°C, baixando assim a temperatura superficial atingindo a temperatura de condensação durante mais tempo.

Para evitar este fenómeno deve-se aumentar a temperatura da água que circula nos tubos, para que as temperaturas superficiais não atinjam as temperaturas de condensação.

5.5. Temperatura da água

Uma vez que no modelo de caudal constante a temperatura da água varia entre os 30° e os 40°C no Inverno e entre os 10° e os 15°C no Verão, é importante saber qual o valor que água toma ao longo do ano.

Sendo a divisão da sala-de-estar, aquela que requer maiores necessidades de climatização, na Figura 5.8 é apresentado o gráfico da temperatura da água, em regime de aquecimento, ao longo do ano.

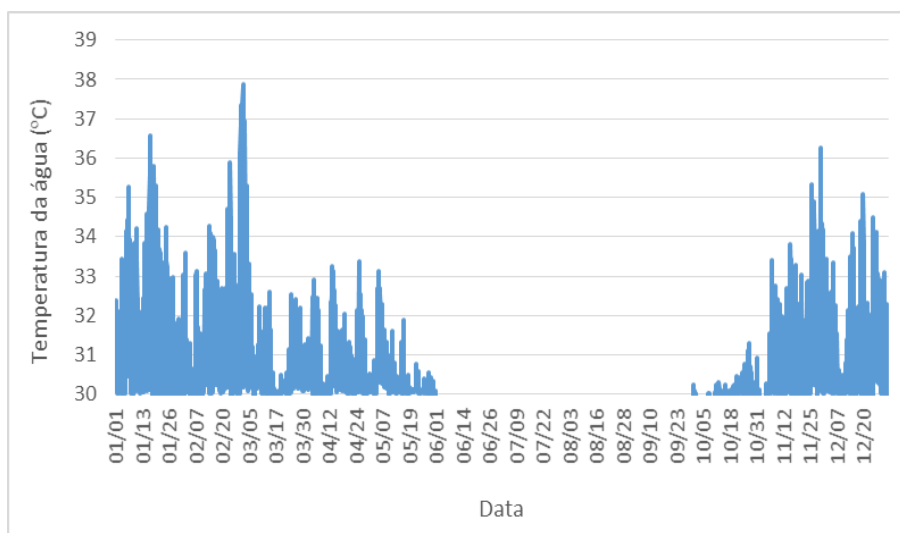


Figura 5.8. Temperatura da água, em regime de aquecimento, ao longo do ano.

É visível que a água nunca atinge o valor limite (40°C), atingindo um valor máximo de 38°C. Isto demonstra, que a temperatura da água de 35°C, utilizada no objeto de caudal variável, foi acertada.

Na Figura 5.9 é apresentada a temperatura da água, ao longo do ano, quando é necessário arrefecimento.

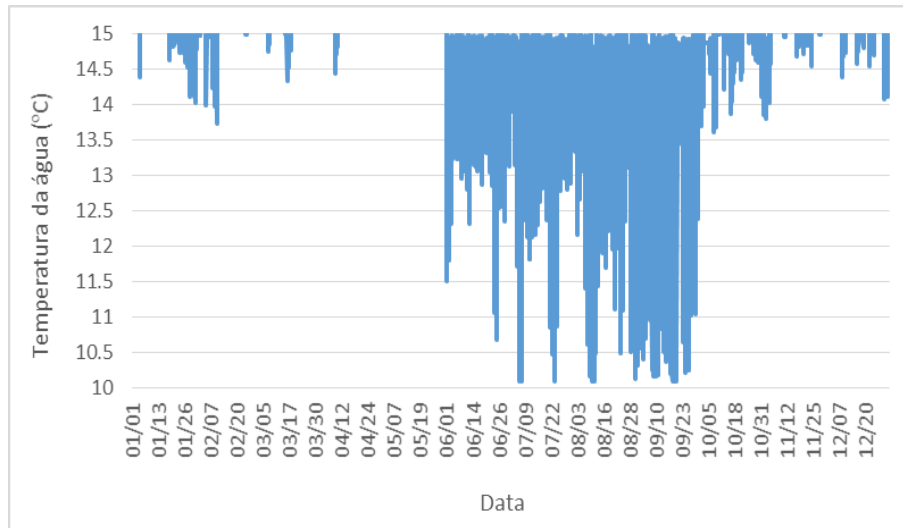


Figura 5.9. Temperatura da água, em regime de arrefecimento, ao longo do ano.

Neste caso, a temperatura da água oscila, entre os 10° e os 15°C definidos, verificando-se que o intervalo escolhido foi correto.

6. CONCLUSÕES

Concluída a dissertação pode-se afirmar que o programa se revelou uma ferramenta bastante versátil e útil no dimensionamento de sistemas de climatização, nomeadamente sistemas radiantes.

No entanto, surgiram algumas dificuldades. A ausência de interface gráfico torna o programa pouco intuitivo e pouco apelativo, sendo necessário bastante tempo para que o utilizador se familiarize com o programa. Para além disso, a modelação de sistemas radiantes revelou-se bastante demorada e complexa devido ao grande número de objetos necessário de definir, uma vez que não existe nenhum *template* específico, como há para outros sistemas de climatização. Outro obstáculo identificado foi a interpretação dos erros ocorridos durante a simulação. Isto deve-se ao grande número de variáveis que torna a tarefa de verificação e correção minuciosa e demorada.

Relativamente aos sistemas radiantes modelados, concluiu-se que todas as configurações estudadas cumprem a sua função de climatização do espaço interior, verificando-se que a temperatura operativa interior se encontra no intervalo pretendido, entre os 20 e os 26°C ao longo de todo o ano, salvo pontuais exceções, nomeadamente na sala-de-estar devido aos vãos envidraçados. Estes sistemas revelaram-se também eficazes na climatização de divisões adjacentes, uma vez que estas, mesmo sem sistema radiante, beneficiaram de climatização pelas paredes adjacentes.

A aplicação de sistemas radiantes no pavimento e no teto através de painéis revelaram-se mais eficientes, pois apresentam um menor consumo energético que nas paredes. Estas duas são, de facto, as configurações mais utilizadas atualmente.

As características do edificado confirmaram ter bastante influência no comportamento do sistema climático. É visível que a sala-de-estar apresenta maiores necessidades de aquecimento, devido à grande área, e de arrefecimento, devido aos dois vãos envidraçados. Os grandes vãos influenciam também a temperatura superficial nesta divisão, fazendo com que os limites sejam ultrapassados, podendo por em causa a integridade física. Esta situação pode ser contrariada com recurso a um sistema que bloqueia a radiação solar.

Confirma-se, também, a probabilidade de ocorrência de condensados nas superfícies radiantes, estando o sistema desligado entre 130 e 913 horas por ano, consoante o objeto e o local de aplicação.

Este fenómeno é maior nas superfícies do modelo de caudal contante, uma vez que a temperatura da água atinge os 10°C e conseqüentemente baixa a temperatura da superfície para níveis abaixo do ponto de condensação. Como o modelo de caudal variável utiliza uma temperatura constante de 15°C, a ocorrência de condensados é menor. A solução deste problema passa pelo aumento da temperatura da água, ou pelo controlo consoante a temperatura de condensação (não aplicável em EnergyPlus).

Acerca dos dois diferentes modelos estudados, não é possível concluir qual é mais eficiente energeticamente, no entanto a maior ocorrência de condensação no modelo de caudal constante leva a que este modelo seja preterido pelo de caudal variável.

Os possíveis trabalhos futuros consistem na otimização de vários fatores que podem influenciar o funcionamento dos sistemas radiantes, como a temperatura da água ou a dimensão dos painéis radiantes.

Outro trabalho útil será desenvolver um *template* que facilite a modelação de sistemas radiantes em *EnergyPlus*, à semelhança do que já acontece para outros sistemas de climatização.

REFERÊNCIAS

- Aquecimento central por piso radiante a água - SolarWaters. (n.d.). Retrieved August 13, 2015, from <http://www.solarwaters.pt/aquecimento-central-por-piso-radiante-a-agua>
- Batista, G. C. A. (2012). *Sistema de controlo , regulação e comando de pisos radiantes hidráulicos*. Universidade da Beira Interior.
- Bean, R., Olesen, B. W., & Kim, K. W. (2010a). History of Radiant Heating & Cooling Systems: Part 1. *ASHAE Journal*, 2010(Jan), 40–49. Retrieved from <http://tinyurl.com/nu2doqu>
- Bean, R., Olesen, B. W., & Kim, K. W. (2010b). History of Radiant Heating & Cooling Systems: Part 2. *ASHRAE Journal*, 52(1), 40–47.
- Chantrasrisalai, C., Ghatti, V., Fisher, D. E., & Scheatzle, D. G. (2003). Experimental Validation of the EnergyPlus Low-Temperature Radiant Simulation. *ASHRAE Transactions*, 109(2), 614–623.
- Djuric, N., Novakovic, V., Holst, J., & Mitrovic, Z. (2007). Optimization of energy consumption in buildings with hydronic heating systems considering thermal comfort by use of computer-based tools. *Energy and Buildings*, 39(4), 471–477. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.08.009>
- EnergyPlus. (n.d.). Retrieved from <https://energyplus.net/>
- EnergyPlus Engineering Reference: The Reference to EnergyPlus Calculations*. (2010). US Department of Energy. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:EnergyPlus+Engineering+Reference,+The+Reference+to+EnergyPlus+Calculations#1>
- Getting Started with EnergyPlus. (2013). US Department of Energy.
- Höppe, P., & Martinac, I. (1998). Indoor climate and air quality. *International Journal of Biometeorology*. Estocolomo. <http://doi.org/10.1007/s004840050075>
- Inquerito ao consumo de energia doméstico*. (2010).
- Isolani, T. P., Adiconsum, R. C., Ademe, F. C., Escan, F. P., Adiconsum, A. O., & Deco, I. O. (2008). *Eficiência energética nos edifícios residenciais*. Lisboa.

- Olesen, B. (2008). Radiant floor cooling systems. *ASHRAE Journal*, 50(9).
- Olesen, B. W. (2002). Radiant floor heating in theory and practice. *ASHRAE Journal*, 44(7), 19–26.
- Raghuram Sunnam, Annie Martson, & Oliver Baumann. (2013). *Analysis of a chilled ceiling performance to control temperature in a data control center using EnergyPlus: A case study*.
- Rodrigues, E., Amaral, A. R., Gaspar, A. R., & Gomes, Á. (2015). *How reliable are geometry-based building indices as thermal performance indicators? Energy Conversion and Management* (Vol. 101).
- Rodrigues, E., Gaspar, A. R., & Gomes, Á. (2013a). An approach to the multi-level space allocation problem in architecture using a hybrid evolutionary technique. *Automation in Construction*, 35, 482–498. <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.06.005>
- Rodrigues, E., Gaspar, A. R., & Gomes, Á. (2013b). An evolutionary strategy enhanced with a local search technique for the space allocation problem in architecture, Part 1: Methodology. *CAD Computer Aided Design*, 45(5), 887–897. <http://doi.org/10.1016/j.cad.2013.01.001>
- Rodrigues, E., Gaspar, A. R., & Gomes, Á. (2013c). An evolutionary strategy enhanced with a local search technique for the space allocation problem in architecture, Part 2: Validation and performance tests. *CAD Computer Aided Design*, 45(5), 898–910. <http://doi.org/10.1016/j.cad.2013.01.003>
- Rodrigues, E., Gaspar, A. R., & Gomes, Á. (2014a). Automated approach for design generation and thermal assessment of alternative floor plans. *Energy and Buildings*, 81, 170–181. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.016>
- Rodrigues, E., Gaspar, A. R., & Gomes, Á. (2014b). Improving thermal performance of automatically generated floor plans using a geometric variable sequential optimization procedure. *Applied Energy*, 132, 200–215. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.068>
- SANITOP. (n.d.). Retrieved August 12, 2015, from http://www.sanitop.pt/ins_contents.aspx?mc1=290&mc2=11621&mc3=11625
- Silva, P. M. A. (2000). *Aplicação do programa EnergyPlus como ferramenta do projecto de comportamento térmico de edifícios de habitação*. Universidade do Porto.
- Tzoulis, A. (2014). *Performance assessment of building energy modelling programs and control optimization of thermally activated building systems*. Delft University of Technology.

ANEXO A

Neste anexo são mostrados gráficos da temperatura operativa interior, para todas as divisões que não foram apresentadas no Capítulo 5.

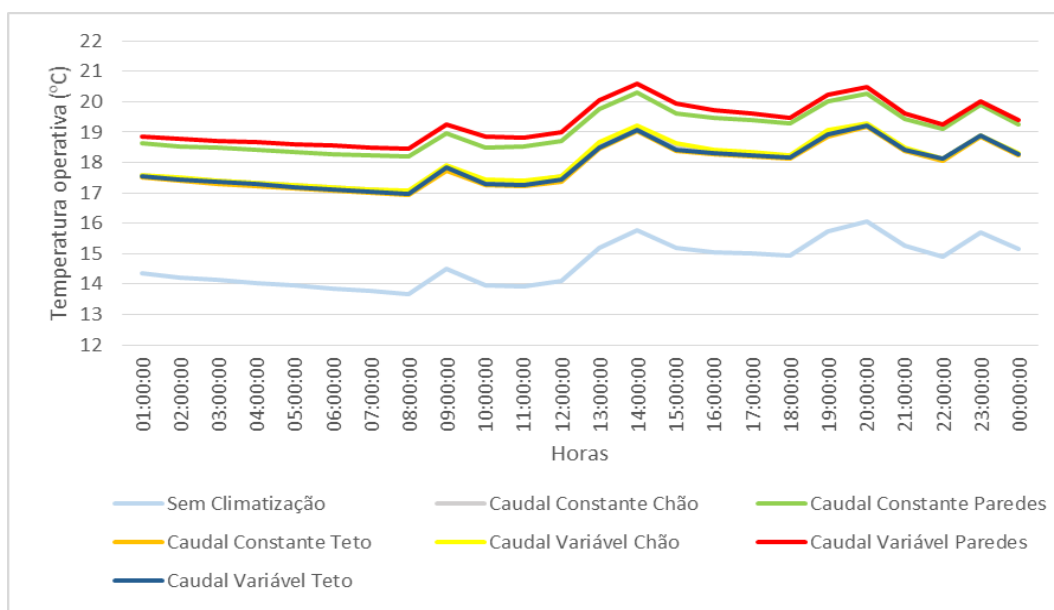


Figura A.1 Temperatura interior operativa no Hall, no dia 20 de Janeiro.

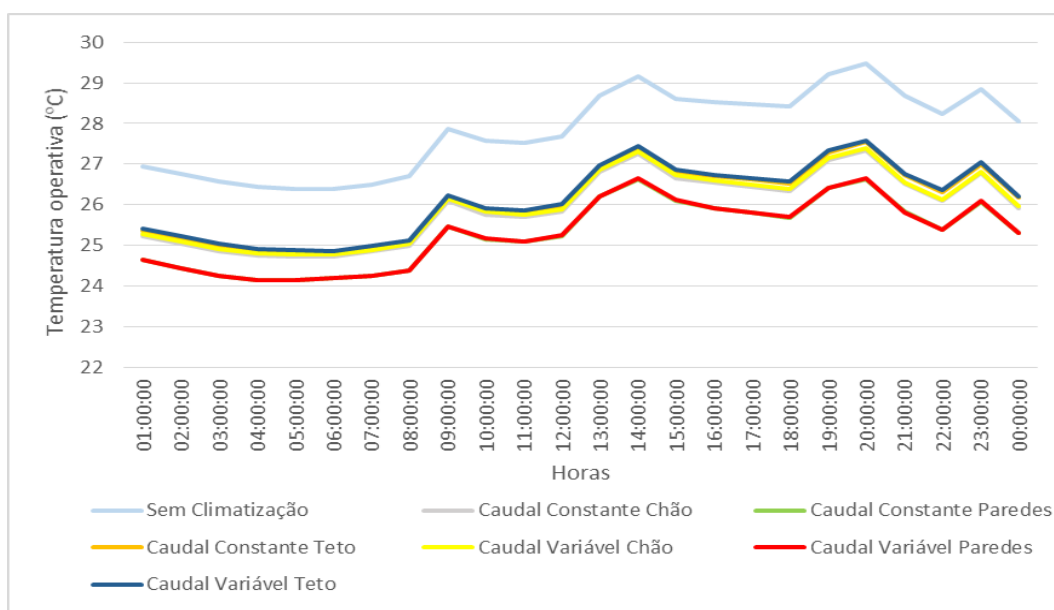


Figura A.2. Temperatura interior operativa no Hall, no dia 11 de Agosto.

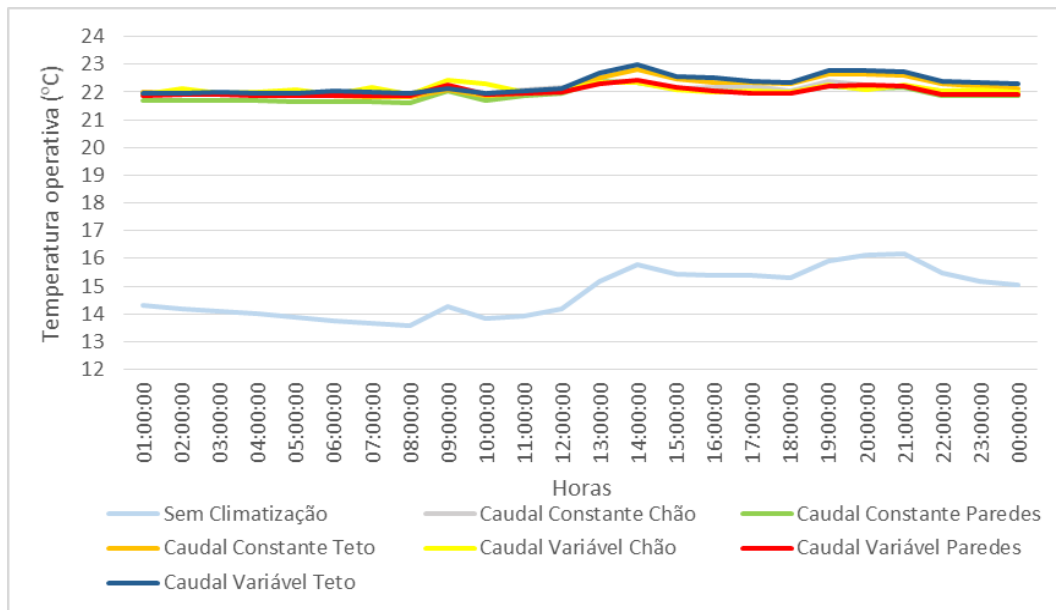


Figura A.3. Temperatura interior operativa na Cozinha, no dia 20 de Janeiro.

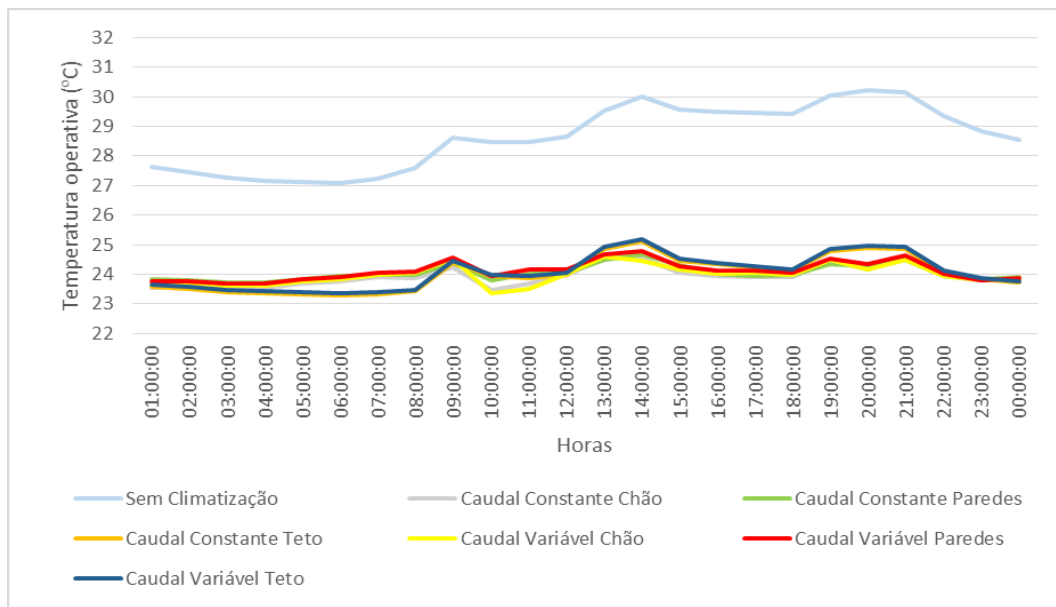


Figura A.4. Temperatura interior operativa na Cozinha, no dia 11 de Agosto.

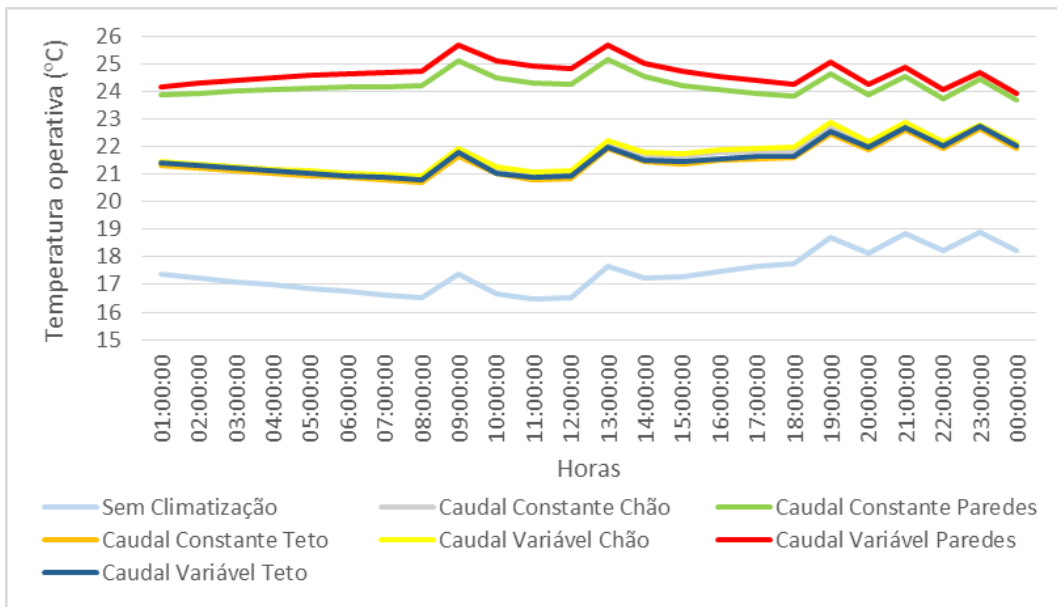


Figura A.5. Temperatura interior operativa na Casa de Banho1, no dia 20 de Janeiro

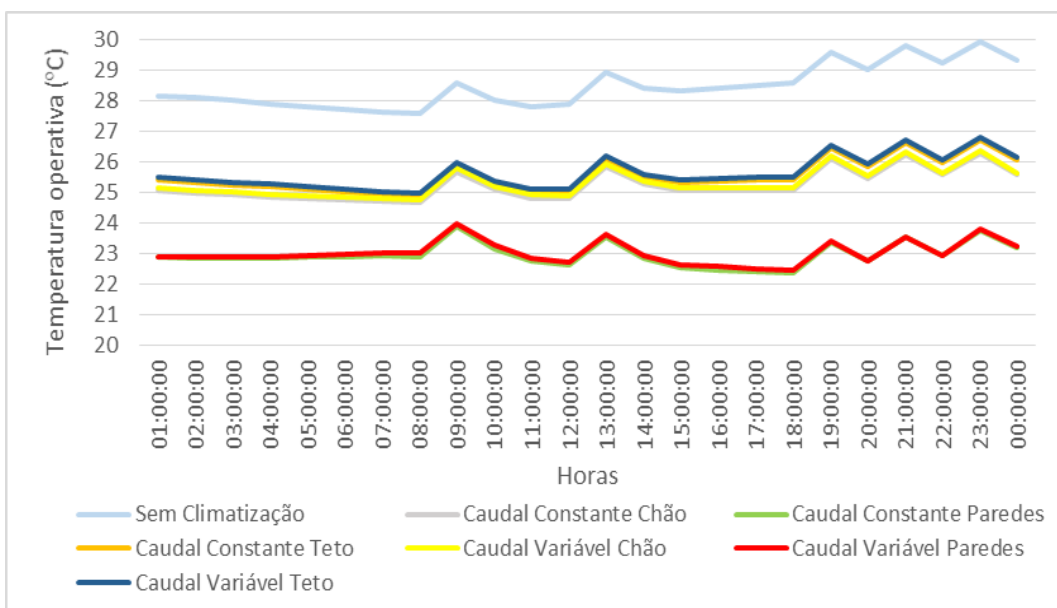


Figura A.6. Temperatura interior operativa na Casa de Banho1, no dia 11 de Agosto.

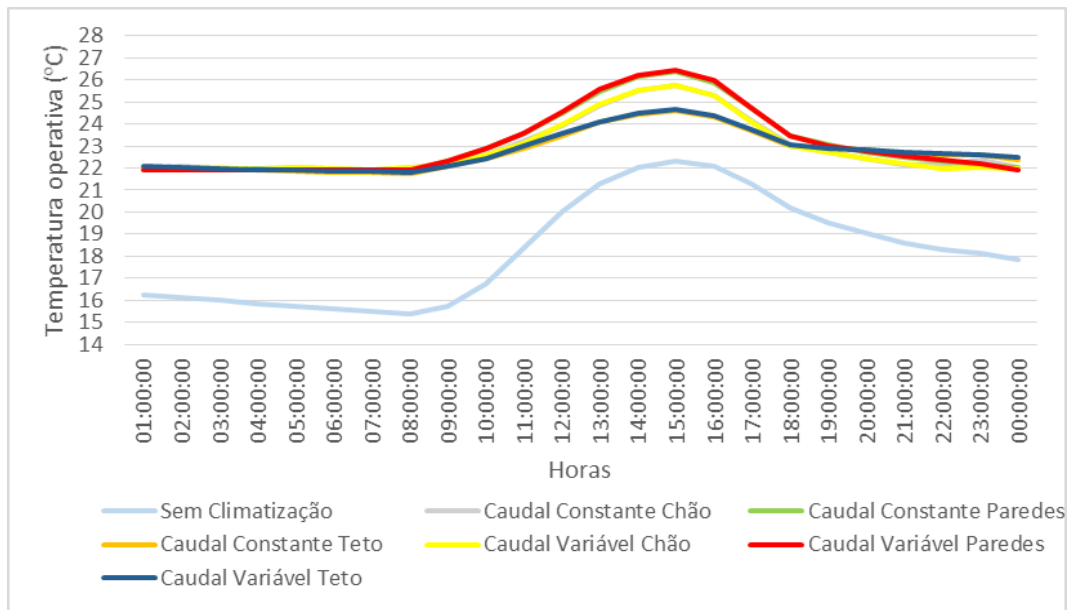


Figura A.7. Temperatura interior operativa no Quarto1, no dia 20 de Janeiro.

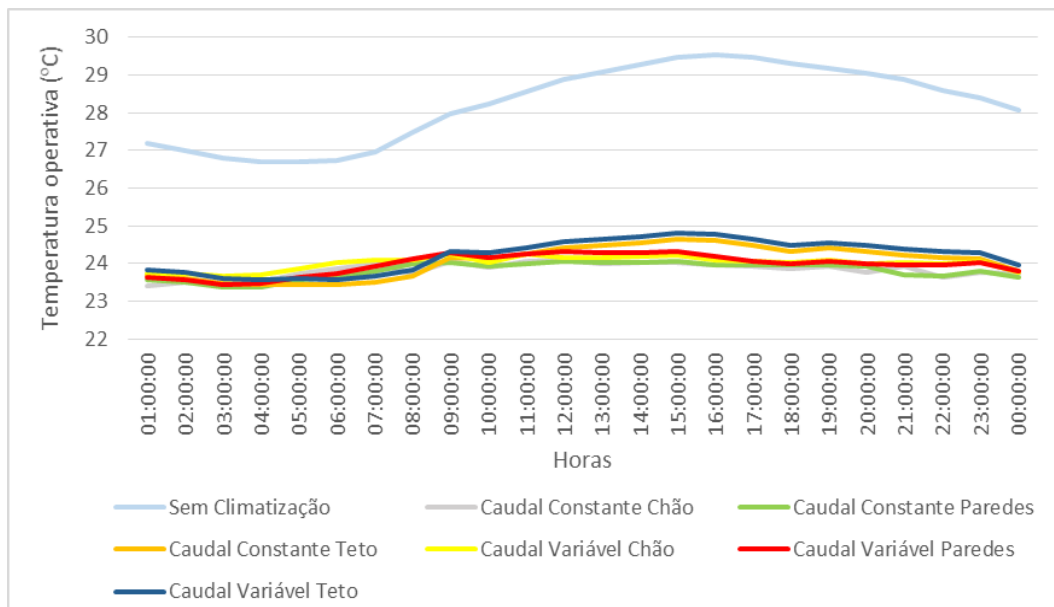


Figura A.8. Temperatura interior operativa no Quarto1, no dia 11 de Agosto.

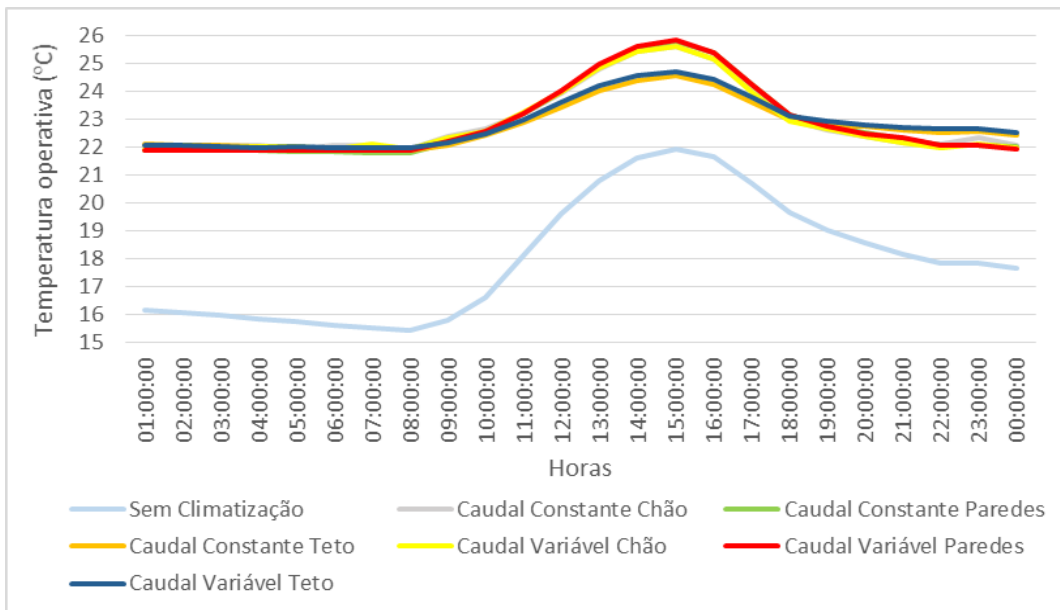


Figura A.9. Temperatura interior operativa no Quarto2, no dia 20 de Janeiro.

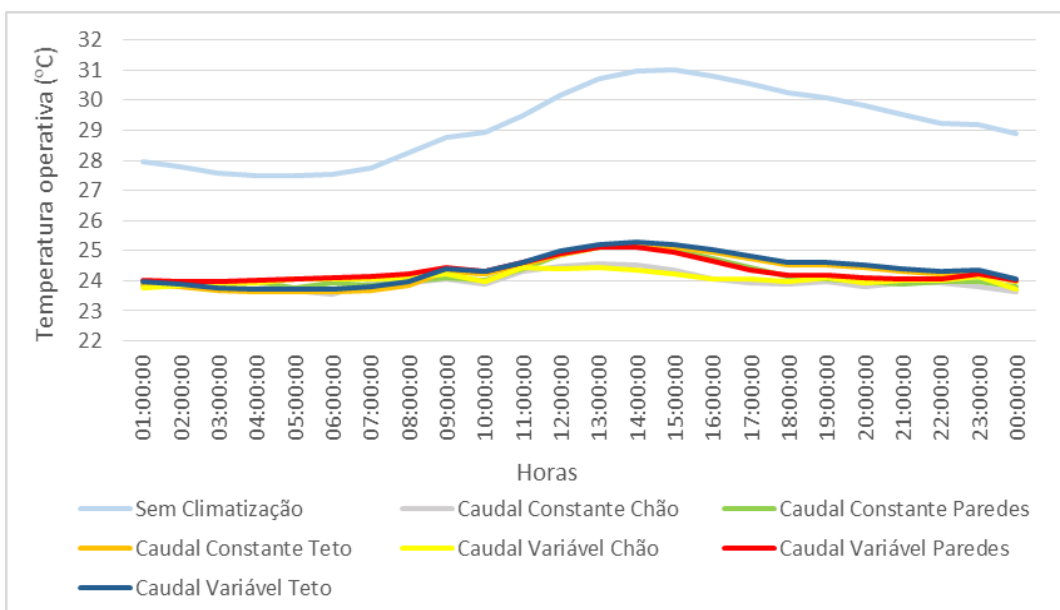


Figura A.10. Temperatura interior operativa no Quarto2, no dia 11 de Agosto.

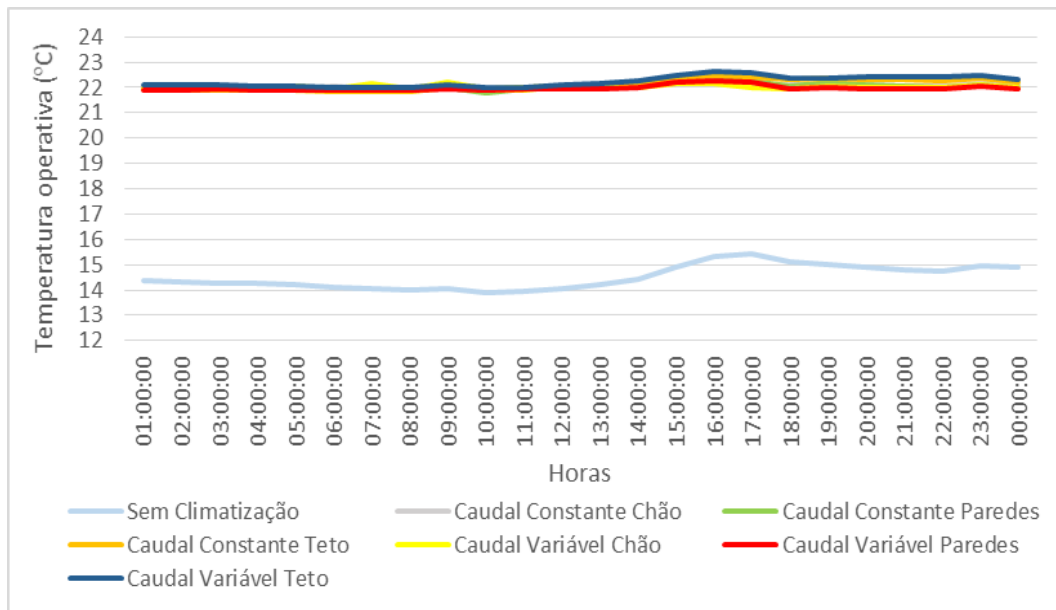


Figura A.11. Temperatura interior operativa no Quarto3, no dia 20 de Janeiro.

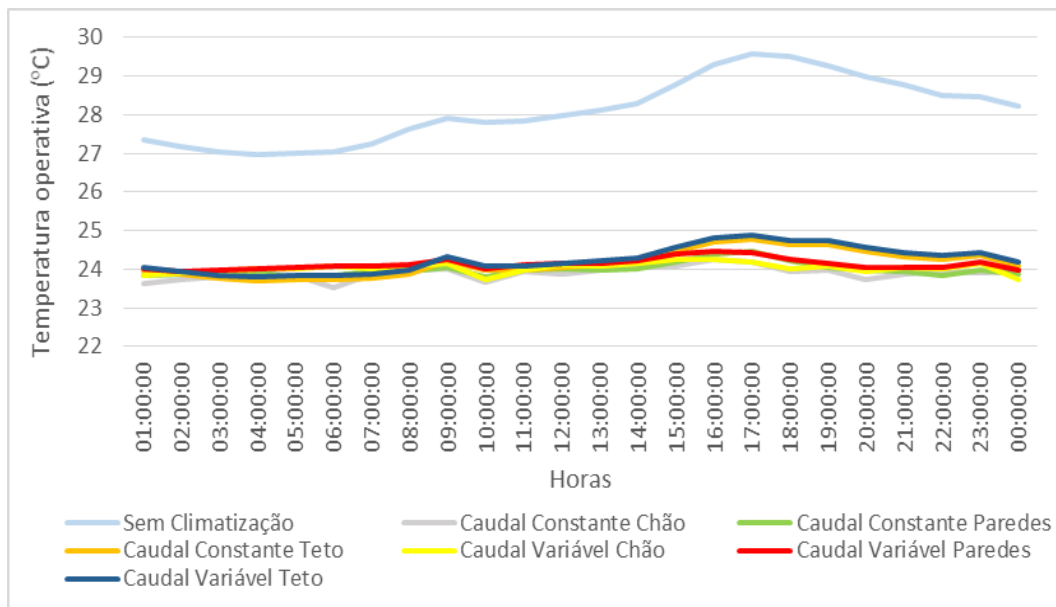


Figura A.12. Temperatura interior operativa no Quarto3, no dia 11 de Agosto.

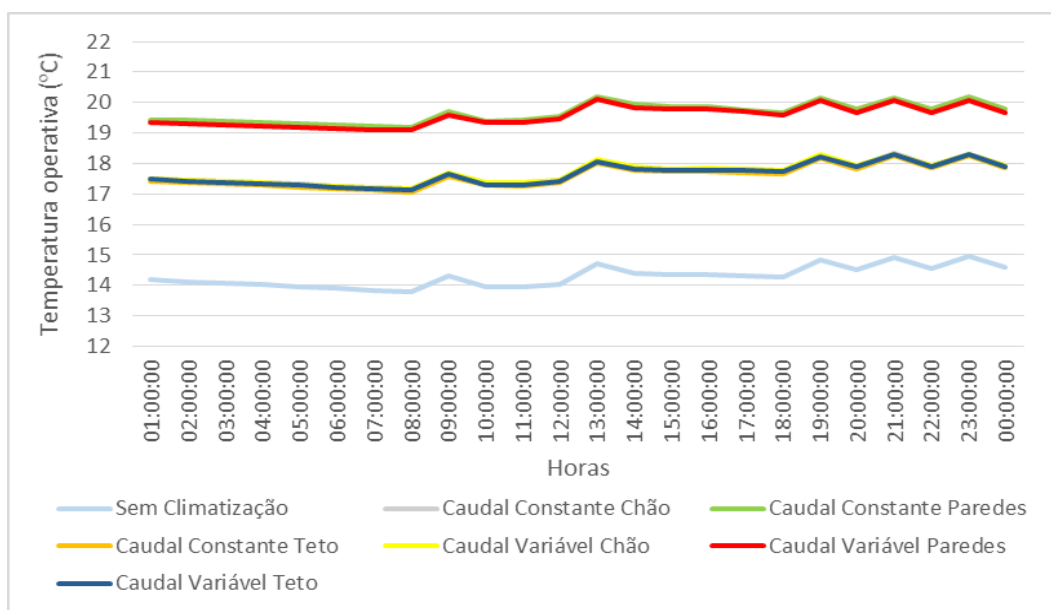


Figura A.13. Temperatura interior operativa na Casa de Banho2, no dia 20 de Janeiro.

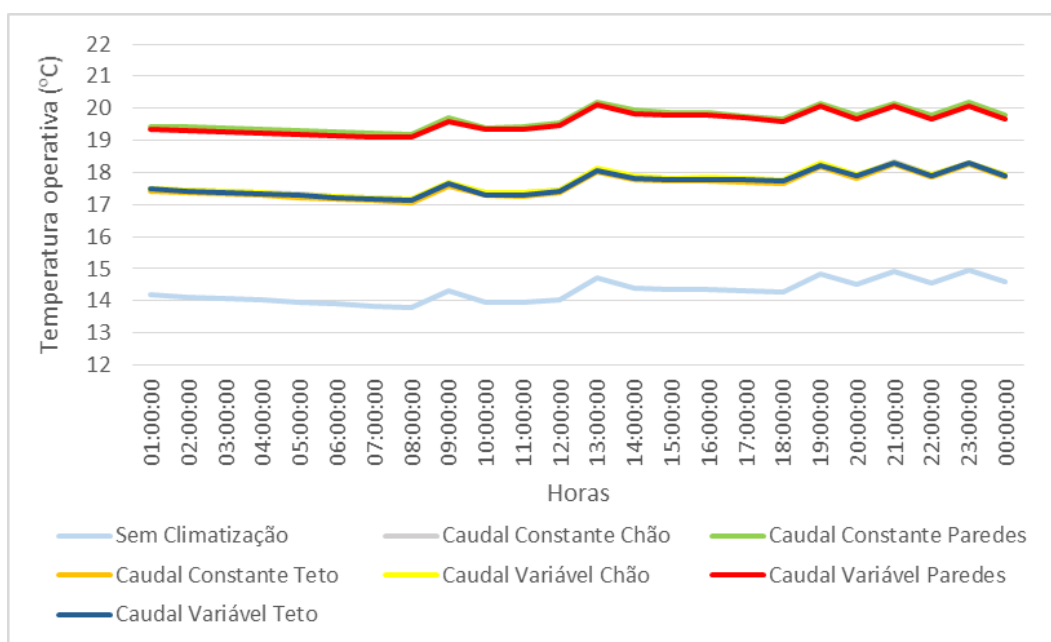


Figura A.14. Temperatura interior operativa na Casa de Banho2, no dia 11 de Agosto.

ANEXO B

Neste anexo são mostrados gráficos da temperatura do pavimento, quando tem instalado um sistema radiante.

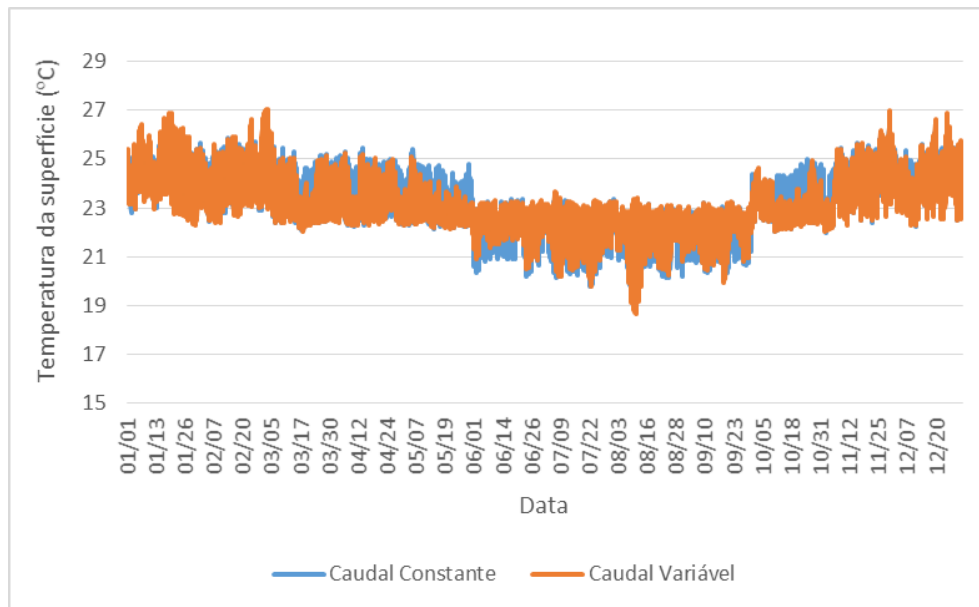


Figura B.1. Temperatura do pavimento radiante na Cozinha, ao longo do ano.

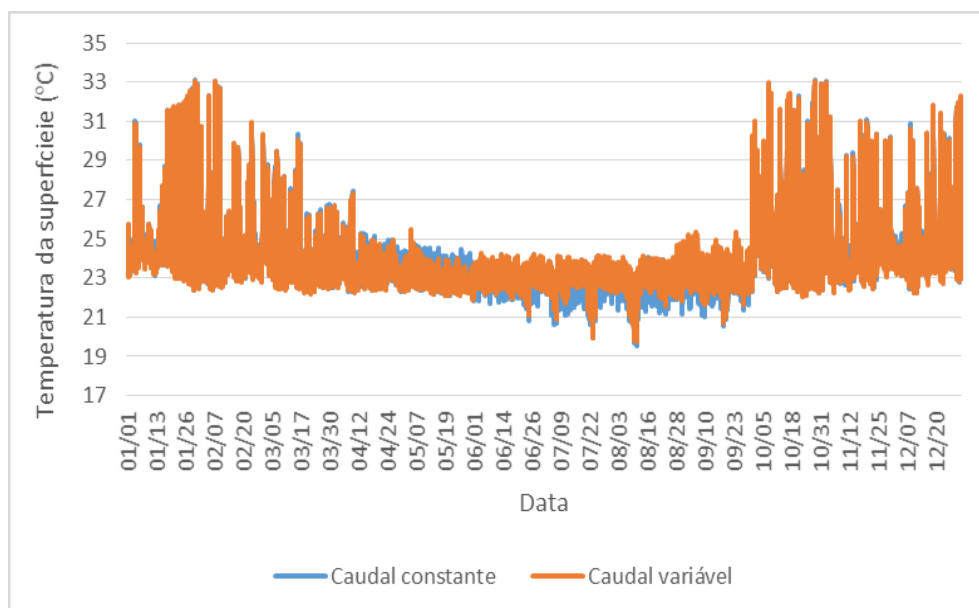


Figura B.2. Temperatura do pavimento radiante no Quarto1, ao longo do ano.

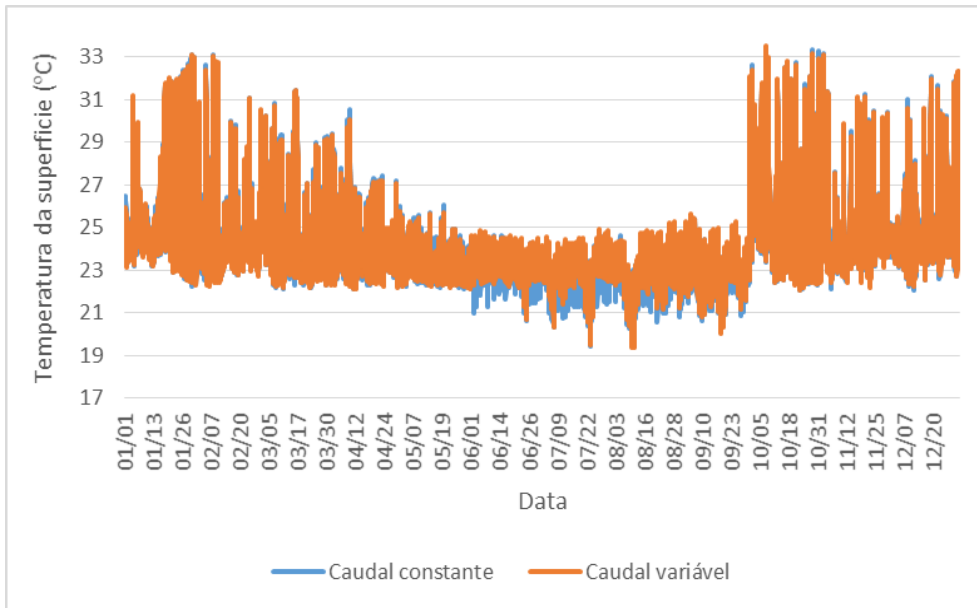


Figura B.3. Temperatura do pavimento radiante no Quarto2, ao longo do ano.

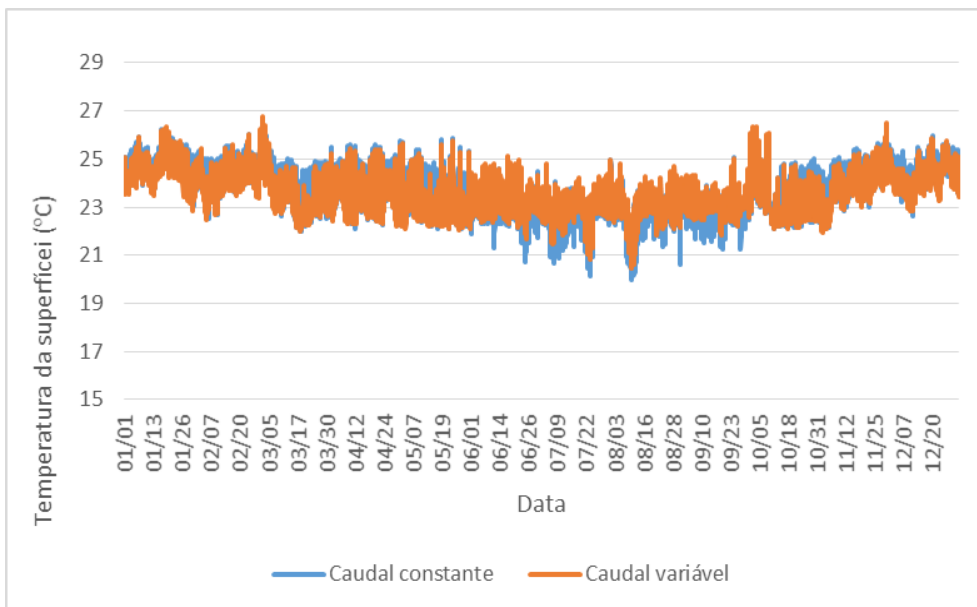


Figura B.4. Temperatura do pavimento radiante no Quarto3, ao longo do ano.