

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

SIMULAÇÃO TERMOENERGÉTICA EM OPENMODELICA E ENERGYPLUS: CASO
DE TESTE DA NORMA VDI 2078

por

Diandra Garcia Braatz

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, outubro de 2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Braatz, Diandra Garcia
Simulação Termoenergética em OpenModelica e
EnergyPlus: Caso de Teste da Norma VDI 2078 / Diandra
Garcia Braatz. -- 2022.
25 f.
Orientadora: Leticia Jenisch Rodrigues.

Coorientador: Marcelo Schramm.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2022.

1. OpenModelica. 2. EnergyPlus. 3. Carga térmica.
4. Temperatura operativa. 5. VDI 2078. I. Rodrigues,
Leticia Jenisch, orient. II. Schramm, Marcelo,
coorient. III. Título.

Diandra Garcia Braatz

SIMULAÇÃO TERMOENERGÉTICA EM OPENMODELICA E ENERGYPLUS: CASO
DE TESTE DA NORMA VDI 2078

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Letícia Jenisch Rodrigues (UFRGS)

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Schramm (UFPEl)

Comissão de Avaliação:

Prof^ª. Dr^ª. Letícia Jenisch Rodrigues

Prof. Dr. Marcelo Schramm

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Prof. Dr. Felipe Roman Centeno

Porto Alegre, outubro de 2022

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais pelo apoio incondicional durante toda minha vida e enorme investimento não apenas em minha educação, como também em meu bem-estar. Outro agradecimento vai a meus orientadores, Profa. Dra. Leticia Jenisch Rodrigues e Prof. Dr. Marcelo Schramm, profissionais que fazem muito além de seu trabalho no auxílio e incentivo de seus alunos. Por último, agradeço ao meu chefe, Marcus Fuchs, pelo auxílio ao longo deste trabalho e por ser um exemplo de profissional e líder.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2022

SIMULAÇÃO TERMOENERGÉTICA EM OPENMODELICA E ENERGYPLUS: CASO DE TESTE DA NORMA VDI 2078

Braatz, Diandra Garcia

diandra.braatz@hotmail.com

Resumo. Neste trabalho, o caso de teste 1 da norma alemã VDI 2078 é utilizado para comparação entre os softwares OpenModelica e EnergyPlus. A referida norma fornece métodos de cálculo de carga térmica e temperatura e casos de teste para validação de modelos de zonas térmicas. O comportamento deste caso foi avaliado em ambos os softwares, mantendo-se os valores de referência fornecidos pela norma. Os coeficientes de correlação de Pearson calculados entre os valores obtidos pelo OpenModelica e EnergyPlus para temperatura do ar da zona, temperatura operativa e carga térmica da zona térmica tipo M são de, respectivamente, 0,98 (correlação muito forte), 0,87 (correlação forte) e 0,99 (correlação muito forte). Dentre os motivos para desvios nos resultados de ambos os programas estão o método de cálculo de resistências e capacitâncias térmicas e do coeficiente radiante, bem como o tratamento da massa interna à zona.

Palavras-chave: OpenModelica, EnergyPlus, carga térmica, temperatura operativa, VDI 2078

Thermo-energetic simulation in OpenModelica and EnergyPlus: test case from standard VDI 2078

Abstract. In this work, the test case 1 of german standard VDI 2078 is used to compare the softwares OpenModelica and EnergyPlus. The mentioned standard provides calculation methods of thermal load and temperature and test cases for validation of thermal zones' models. This case's behavior was evaluated in both softwares, keeping the reference values provided by the standard. Pearson's correlation coefficient calculated between the values obtained by OpenModelica and EnergyPlus for zone air temperature, operative temperature and thermal load for the thermal zone type M are, respectively, 0,98 (very strong correlation), 0,87 (strong correlation) and 0,99 (very strong correlation). Among the reasons for deviations in results from both programs are the calculation method of thermal resistances and capacitances and of radiative coefficient, as well as the treatment of zone's internal mass.

Keywords: OpenModelica, EnergyPlus, thermal load, operative temperature, VDI 2078

NOMENCLATURA

Símbolos

A	Área de transferência de calor	[m ²]
k	Condutividade térmica	[W/mK]
Nu	Número de Nusselt	
Re	Número de Reynolds	
Pr	Número de Prandtl	
T_{ex}	Temperatura do ambiente externo	[K]
C	Capacitância térmica	[J/K]
R	Resistência térmica	[K/W]
c	Calor específico	[J/kgK]
L	Espessura de parede	[m]
T_i	Temperatura interna do ar	[K]
T_{op}	Temperatura Operativa	[K]
T_r	Temperatura radiante média	[K]
p	Fração radiante	
α_{conv}	Coefficiente de transferência de calor por convecção	[W/m ² K]
ε	Emissividade	
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	[W/m ² K ⁴]
α_{rad}	Coefficiente de transferência de calor por radiação	[W/m ² K]
ρ	Massa específica	[kg/m ³]

Abreviaturas e acrônimos

VDI	Verein Deutscher Ingenieure
RC	Resistivo-capacitivo
ISO	International Standards Organization
TRY	Test Reference Year
IBPSA	International Building Performance Simulation Association
DIN	Deutsche Institut für Normung
TEASER	Tool for Energy Analysis and Simulation for Efficient Retrofit

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO	2
2.1. Arquivo climático - Test Reference Year	2
2.2. Transferência de calor por convecção	2
2.3. Transferência de calor por radiação	3
2.4. Temperatura externa equivalente	3
2.5. Circuito equivalente para modelagem de paredes	3
2.6. Temperatura operativa	6
2.7. OpenModelica e a biblioteca IBPSA	7
3. CASO DE ESTUDO E CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES	8
3.1. Tipos de zona térmica	8
3.2. Caso de teste	8
3.3. Parâmetros e hipóteses adotados	8
3.3.1. Hipóteses para ganhos internos	8
3.3.2. Coeficientes de transferência de calor	9
4. METODOLOGIA	9
4.1. Cálculo de parâmetros térmicos pela linguagem Python	9
4.2. Modelagem nos softwares EnergyPlus e OpenModelica	10
5. RESULTADOS	11
5.1. Comparação da temperatura do ar - zona térmica tipo M	11
5.2. Comparação da temperatura operativa - zona térmica tipo M	12
5.3. Comparação da carga térmica de resfriamento - zona térmica tipo M	13
5.4. Motivos para desvios entre EnergyPlus, OpenModelica e VDI 2078	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
8. ANEXOS	16
9. APÊNDICES	18

1. INTRODUÇÃO

O Brasil está entre os dez países que mais utilizam aparelhos de ar condicionado no mundo (TOCCHIO, 2020), dadas suas características climáticas. Além disso, se não houver ações de combate às mudanças climáticas, o aquecimento global fará com que o uso de condicionadores de ar dobre na próxima década (BEZERRA et al., 2021). Esse maior consumo de energia para resfriamento significa aumento nas emissões de carbono, o que também traz como efeito mais calor. Cohen et al. (2020) classifica o crescimento sem precedentes da demanda global por resfriamento como um ponto cego no debate sobre sustentabilidade.

O conceito de eficiência energética em edificações está relacionado com o fornecimento de energia necessário para alcançar condições térmicas desejáveis que reduzam o consumo de energia. O projeto de sistemas de aquecimento e resfriamento adequados é um dos melhores meios para reduzir o custo energético em edificações (OMER et al., 2008). Para tanto, a modelagem e a simulação energética são tarefas importantes, uma vez que permitem detalhada investigação de interações dentro do sistema e a otimização do projeto de climatização.

A VDI (*Verein Deutscher Ingenieure*, em português Associação de Engenheiros Alemães) fornece normas, como as: VDI 6020, *Requirements to be met by calculation methods for the simulation of thermal-energy efficiency of buildings and building installations*, em português, Requisitos a serem atingidos por métodos de cálculo para simulação de eficiência termoenergética de edificações e instalações; VDI 6007, *Calculation of transient thermal response of rooms and buildings*, em português, Cálculo da resposta transiente de ambientes e edificações; e VDI 2078, *Calculation of thermal loads and room temperatures (design cooling load and annual simulation)*, em português, Cálculo de cargas térmicas e temperaturas de ambiente (projeto de carga térmica e simulação anual). A última serviu como base para o presente trabalho. Os modelos térmicos devem ser testados para minimizar os erros e atestar a qualidade dos resultados. Assim, diferentes casos de teste são fornecidos pela norma para validação dos modelos.

Hua et al. (2016) aplicaram o pacote IBPSBuilding, o qual é uma ferramenta de simulação térmica na linguagem Modelica (MODELICA, 2022), em casos de teste da norma VDI 6007-1. Assim, compararam os resultados de temperatura interna, temperatura operativa e carga térmica de aquecimento e resfriamento com a referência fornecida pela norma. Valores iniciais, a resposta transiente e a consistência em estado de equilíbrio puderam ser avaliados. O trabalho concluiu que, para diminuir o desvio encontrado no cálculo de cargas térmicas, deve ser realizado um aumento no número de circuitos RC (resistivos-capacitivos) representando cada camada da edificação.

Fuchs et al. (2014) compararam os resultados de doze casos de teste de modelos de edificação propostos pela norma VDI 6007 e pela norma ISO 13790 na linguagem Modelica (MODELICA, 2022). O objetivo era analisar se o modelo proposto pela norma adequa-se à aplicação em redes distritais. A conclusão foi positiva nesse sentido, deixando como trabalho futuro medidas para introduzir variações estocásticas (para que perfis de ocupação e de uso tornem-se mais realistas) e habilitar fluxos de trabalho mais eficientes, com esforço de parametrização limitado.

A linguagem Modelica (MODELICA, 2022), apesar de ser muito difundida em países como a Alemanha, ainda é pouco utilizada no Brasil. O EnergyPlus, por outro lado, é uma ferramenta de simulação termoenergética consagrada no território brasileiro. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é a verificação dos *softwares* OpenModelica e EnergyPlus, utilizando um caso de teste da seção de validação da norma VDI 2078, para que os resultados das simulações obtidos por ambos os modelos pudessem ser comparados. O modelo de elementos

da edificação representados por circuitos RC simétricos e assimétricos utilizados nos trabalhos de Hua et al. (2016) e Fuchs et al. (2014) também foram utilizados no presente trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO

Nesta Seção são apresentadas definições de conceitos utilizados no desenvolvimento do trabalho. São contemplados assuntos fundamentais de transferência de calor, bem como informações importantes para a realização de simulações térmicas.

2.1. Arquivo climático - Test Reference Year

O arquivo climático de tipo TRY (*Test Reference Year*, em português Ano de Referência de Teste) fornece anos médios de dados do clima, com um passo temporal de uma hora. Ele descreve o histórico climático de uma região específica a partir de médias de longo prazo. Assim, flutuações acidentais de um ano em particular não são levadas em consideração (LAMBERTS e Duarte, 2016).

Conforme a norma VDI 6007, para o cálculo da resposta transiente de salas e edificações, o TRY deve conter, ao menos, os seguintes parâmetros: temperatura do ar externo, radiação solar direta - referente a uma superfície horizontal ou normal -, radiação difusa do céu - referente a uma superfície horizontal -, quantidade de nuvens, irradiação atmosférica - referente a uma superfície horizontal -, e emissão de calor radiante pela superfície da Terra.

2.2. Transferência de calor por convecção

A transferência de calor por convecção, Q_{conv} , em W, pode ser equacionada como

$$Q_{conv} = \alpha_{conv} A (T_1 - T_2), \quad (1)$$

na qual A é a área de transferência de calor, em m^2 , $(T_1 - T_2)$ é a diferença de temperatura entre os dois meios, em K, α_{conv} é o coeficiente de transferência de calor por convecção, em W/m^2K .

Segundo Holman (2010), α_{conv} é calculado a partir de propriedades do fluido e de seu escoamento sobre uma superfície. Assim, por exemplo, para um fluxo laminar, com velocidade constante, sobre uma placa plana, em que o fluxo de calor da placa para o fluido é mantido constante, α_{conv} é dado por

$$\alpha_{conv} = Nu \frac{k}{x}, \quad (2)$$

em que k é a condutividade térmica do fluido, em W/mK , x é a distância até o bordo de ataque da placa, em m, e Nu é o número de Nusselt. Este número é calculado a partir de

$$Nu = 0,453 Re^{1/2} Pr^{1/3}, \quad (3)$$

em que Re é o número de Reynolds, dependente do regime de escoamento do fluxo, e Pr é o número de Prandtl, dado pela razão entre a viscosidade cinemática e a difusividade térmica.

2.3. Transferência de calor por radiação

A taxa de calor radiante líquida, Q_{rad} , em W, entre uma superfície e seus arredores é

$$Q_{rad} = \varepsilon\sigma A(T_1^4 - T_2^4), \quad (4)$$

na qual ε é a emissividade da superfície, σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m²K⁴), T_1 é a temperatura da superfície, em K, e T_2 é a temperatura dos arredores, em K. Para linearizar a Equação (4), introduz-se o coeficiente de transferência de calor por radiação,

$$\alpha_{rad} = \varepsilon\sigma(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2). \quad (5)$$

Assim, a transferência de calor por radiação pode ser escrita como

$$Q_{rad} = \alpha_{rad} A(T_1 - T_2). \quad (6)$$

2.4. Temperatura externa equivalente

Para a consideração da radiação solar nas paredes externas de uma zona térmica, a norma VDI 6007 adiciona termos de correção à temperatura do ar externo, resultando na chamada temperatura externa equivalente. Essa temperatura pode ser calculada por

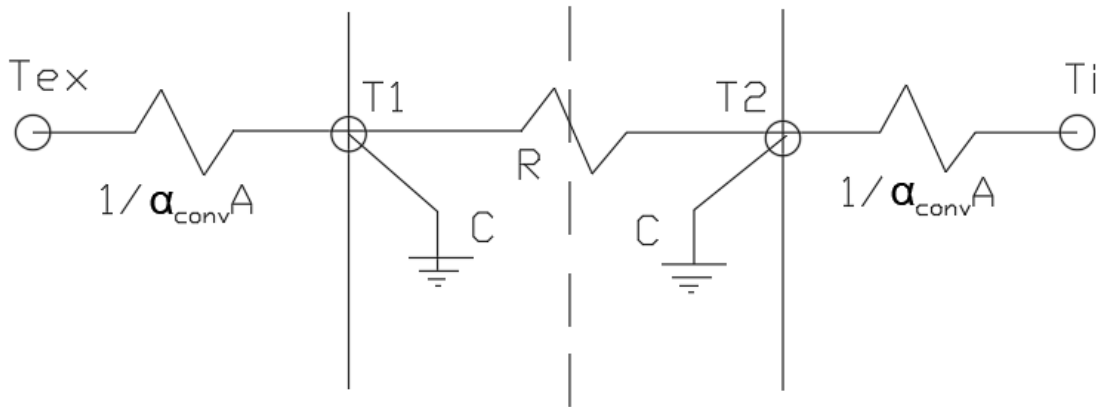
$$T_{ex,eq} = T_{ex} + \Delta T_{ex,eq,ol} + \Delta T_{ex,eq,oc}, \quad (7)$$

em que T_{ex} é a temperatura do ar externo, em K, $\Delta T_{ex,eq,ol}$ é a diferença na temperatura externa equivalente devido à troca de radiação de onda longa, em K, e $\Delta T_{ex,eq,oc}$ é a diferença na temperatura externa equivalente devido à troca de radiação de onda curta, em K. Ambas as temperaturas de correção, $\Delta T_{ex,eq,ol}$ e $\Delta T_{ex,eq,oc}$, dependem do coeficiente de transferência de calor por radiação, α_{rad} .

2.5. Circuito equivalente para modelagem de paredes

No presente trabalho, é considerado o modelo de circuito equivalente para representação da transferência de calor em paredes. Seem (1987) descreve a transferência de calor unidimensional em uma parede plana homogênea de propriedades térmicas constantes como um modelo de diferenças finitas de dois nós, ilustrado na Figura 1. O modelo considera uma parede de apenas uma camada e transferência de calor por convecção em ambos os lados.

Figura 1 - Modelo de diferenças finitas de dois nós de parede plana. Fonte: Adaptado de Seem (1987).



Assim, o balanço de energia feito em ambos os nós resulta nas equações diferenciais

$$C \frac{dT_1}{dt} = \alpha_{conv} A (T_{ex} - T_1) + \frac{A(T_2 - T_1)}{R}, \quad (8)$$

$$C \frac{dT_2}{dt} = \alpha_{conv} A (T_i - T_2) + \frac{A(T_1 - T_2)}{R}, \quad (9)$$

em que C é a capacitância térmica, em J/K, T_1 é a temperatura do nó 1, em K, T_2 é a temperatura do nó 2, em K, T_{ex} é a temperatura do ambiente externo, em K, T_i é a temperatura do ambiente interno, em K, e R é a resistência térmica por condução, em K/W. A resistência térmica por condução pode ser calculada por

$$R = \frac{L}{k}, \quad (10)$$

em que L é a espessura da parede, em m, e k é a condutividade térmica da parede, em W/mK. A capacitância térmica de cada nó pode ser calculada por

$$C = \frac{\rho c L}{2}, \quad (11)$$

em que ρ é a massa específica do material da parede, em kg/m³ e c é o calor específico do material da parede, em J/kgK.

O fluxo de calor no lado interno da parede pode ser calculado por

$$Q_i'' = \alpha_{conv} (T_i - T_2). \quad (12)$$

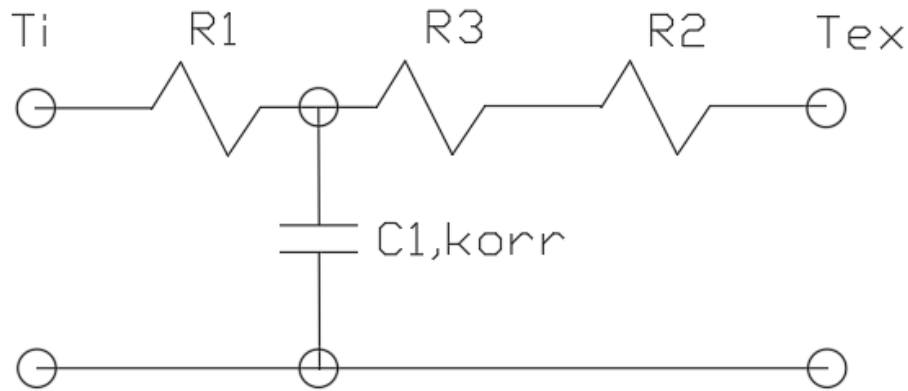
O fluxo de calor do lado externo da parede, por sua vez, pode ser calculado por

$$Q_{ex}'' = \alpha_{conv} (T_1 - T_{ex}). \quad (13)$$

O *software* EnergyPlus utiliza o formato matricial das Equações (8) a (13) em sua base de cálculo, com os dados de entrada sendo as temperaturas ambiente e os dados de saída sendo os fluxos de calor.

A norma VDI 6007, por outro lado, modela as paredes externas como componentes carregados termicamente de forma assimétrica, representadas por três resistências e um capacitor, como ilustra a Figura 2. A ferramenta TEASER, melhor explicada na Subseção 4.1, utiliza esse formato para o cálculo da condução de calor pelas paredes externas, sendo que o cálculo da convecção é feito separadamente, seguindo a Equação (1).

Figura 2 - Modelo de circuito RC equivalente proposto pela norma VDI 6007. Fonte: Adaptado de VDI 6007 (2015).



As resistências R_1 , R_2 , e R_3 são definidas como

$$R_1 = \frac{1}{A} \frac{(Re_{-a_{22}} - 1)Re_{-a_{12}} + Im_{-a_{22}} Im_{-a_{12}}}{(Re_{-a_{22}} - 1)^2 + Im_{-a_{22}}^2}, \quad (14)$$

$$R_2 = \frac{1}{A} \frac{(Re_{-a_{11}} - 1)Re_{-a_{12}} + Im_{-a_{11}} Im_{-a_{12}}}{(Re_{-a_{11}} - 1)^2 + Im_{-a_{11}}^2}, \quad (15)$$

$$R_3 = \left(\frac{1}{A} \sum_{v=1}^n \frac{L_v}{k_v} \right) - R_1 - R_2, \quad (16)$$

em que $Re_{-a_{ij}}$ e $Im_{-a_{ij}}$ são as partes real e imaginária, respectivamente, sendo

$$Re_{-a_{11}} = Re_{-a_{22}} = \cosh \sqrt{\frac{1}{2} \omega_{BT} RC} \cos \sqrt{\frac{1}{2} \omega_{BT} RC}, \quad (17)$$

$$Im_{-a_{11}} = Im_{-a_{22}} = \sinh \sqrt{\frac{1}{2} \omega_{BT} RC} \sin \sqrt{\frac{1}{2} \omega_{BT} RC}, \quad (18)$$

$$Re_{-a_{12}} = R \sqrt{\frac{1}{2 \omega_{BT} RC}} \left(\cosh \sqrt{\frac{1}{2} \omega_{BT} RC} \sin \sqrt{\frac{1}{2} \omega_{BT} RC} + \sinh \sqrt{\frac{1}{2} \omega_{BT} RC} \cos \sqrt{\frac{1}{2} \omega_{BT} RC} \right), \quad (19)$$

$$Im_{-a_{12}} = R \sqrt{\frac{1}{2 \omega_{BT} RC}} \left(\cosh \sqrt{\frac{1}{2} \omega_{BT} RC} \sin \sqrt{\frac{1}{2} \omega_{BT} RC} - \sinh \sqrt{\frac{1}{2} \omega_{BT} RC} \cos \sqrt{\frac{1}{2} \omega_{BT} RC} \right)$$

$$- \sinh\sqrt{\frac{1}{2}\omega_{BT}RC} \cos\sqrt{\frac{1}{2}\omega_{BT}RC}, \quad (20)$$

$$\begin{aligned} Re_{-a_{21}} = \frac{-1}{R}\sqrt{\frac{1}{2}\omega_{BT}RC} (\cosh\sqrt{\frac{1}{2}\omega_{BT}RC} \sin\sqrt{\frac{1}{2}\omega_{BT}RC} \\ - \sinh\sqrt{\frac{1}{2}\omega_{BT}RC} \cos\sqrt{\frac{1}{2}\omega_{BT}RC}), \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} Im_{-a_{21}} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{1}{2}\omega_{BT}RC} (\cosh\sqrt{\frac{1}{2}\omega_{BT}RC} \sin\sqrt{\frac{1}{2}\omega_{BT}RC} \\ - \sinh\sqrt{\frac{1}{2}\omega_{BT}RC} \cos\sqrt{\frac{1}{2}\omega_{BT}RC}), \end{aligned} \quad (22)$$

em que ω_{BT} é a frequência angular, em s^{-1} .

A capacitância $C_{1;korr}$ é definida como

$$C_{1;korr} = A \frac{1}{\omega_{BT} R_1 A} \frac{R_W A - Re a_{12} Re a_{22} - Im a_{12} Im a_{22}}{Re a_{22} Im a_{12} - Re a_{12} Im a_{22}}, \quad (23)$$

em que

$$R_W = R_1 + R_2 + R_3. \quad (24)$$

2.6. Temperatura operativa

Lamberts e Duarte (2016) definem que a temperatura operativa resume as perdas de calor do corpo que está submetido a um ambiente real com efeitos desiguais por todos os lados. Assim, é uma temperatura teórica que provoca uma perda de calor equivalente a todos os fenômenos que provocam essa perda caso o corpo estivesse em um ambiente imaginário submetido apenas a uma temperatura homogênea e pode ser calculada por

$$T_{op} = pT_i + (1 - p) T_r, \quad (25)$$

em que p é a fração radiante, estimada em função da velocidade do ar e T_r é a temperatura radiante média. A Equação (25) é utilizada pelo *software* EnergyPlus.

A temperatura operativa é definida, por outro lado, pela norma VDI 6007, como a média da temperatura do ar dentro do ambiente analisado e a temperatura radiante média das superfícies que delimitam o ambiente. ABRAVA (2003) a descreve como a temperatura uniforme de um recinto preto imaginário, no qual uma pessoa trocaria a mesma quantidade de calor por radiação e convecção que em um recinto não uniforme real. Além disso, atesta que, com velocidades do ar inferiores a 0,4 m/s, o cálculo da temperatura operativa se aproxima da média aritmética da temperatura do ar e da temperatura radiante média do recinto. Uma vez que o presente trabalho analisa ambientes fechados, a simplificação foi considerada no *software* OpenModelica, isto é,

$$T_{op} = \frac{T_i + T_r}{2}. \quad (26)$$

2.7. OpenModelica e a biblioteca IBPSA

A linguagem Modelica (MODELICA, 2022) é usada para modelagem de sistemas físicos. Possibilita a conexão de componentes governados por equações matemáticas e sua orientação a objeto permite a reutilização de modelos. Um exemplo de código em linguagem Modelica (MODELICA, 2022) para modelar a transferência de calor por convecção é mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Exemplo de fragmento de código em linguagem Modelica (MODELICA, 2022): modelagem da convecção. Fonte: IBPSA, 2022.

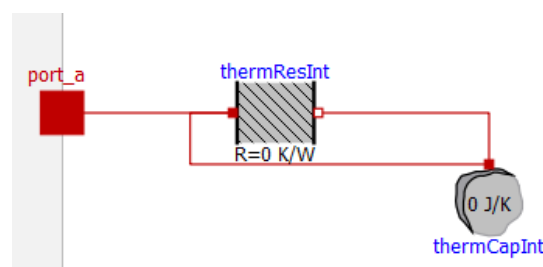
```

within Modelica.Thermal.HeatTransfer.Components;
model Convection
  "Lumped thermal element for heat convection (Q_flow = Gc*dT)"
  SI.HeatFlowRate Q_flow "Heat flow rate from solid -> fluid";
  SI.TemperatureDifference dT "= solid.T - fluid.T";
  Modelica.Blocks.Interfaces.RealInput Gc(unit="W/K")
  "Signal representing the convective thermal conductance in [W/K]"
  annotation (Placement(transformation( ... ));
  Interfaces.HeatPort_a solid annotation (Placement(transformation(extent={{ ... });
  Interfaces.HeatPort_b fluid annotation (Placement(transformation(extent={{ ... });
equation
  dT = solid.T - fluid.T;
  solid.Q_flow = Q_flow;
  fluid.Q_flow = -Q_flow;
  Q_flow = Gc*dT;
  annotation ( ... );
end Convection;

```

O OpenModelica é um ambiente *open-source* para simulação de sistemas físicos. Permite a visualização dos modelos em forma de diagramas, conforme ilustra a Figura 4. Além disso, após a compilação do código, permite a plotagem dos resultados em gráficos.

Figura 4 - Modelagem de uma parede interna como circuito RC simétrico no OpenModelica. Fonte: IBPSA, 2022.



A IBPSA (*International Building Performance Simulation Association*, em português, Associação Internacional de Simulação de Desempenho de Edifícios) é uma associação de pesquisadores, desenvolvedores e profissionais dedicados a melhorar o projeto, construção, operação e manutenção de edifícios novos e existentes ao redor do mundo (IBPSA, 2022). A biblioteca IBPSA para a linguagem Modelica (MODELICA, 2022) contém modelos térmicos básicos para edificações, como leitor de arquivo climático, controladores e modelos de zonas térmicas, como circuitos equivalentes RC.

3. CASO DE ESTUDO E CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES

O caso estudado é a modelagem e simulação de um caso de teste da norma VDI 2078 nos *softwares* OpenModelica e EnergyPlus, para comparação entre os resultados obtidos e análise dos motivos para possíveis desvios.

3.1. Tipos de zona térmica

A norma VDI 2078 define cinco tipos de zonas térmicas, classificadas conforme as características construtivas: *XL* (muito leve), *L* (leve), *M* (médio), *S* (pesada), *XS* (muito pesada). Os parâmetros espessura (em m), condutividade térmica (em W/mK), massa específica (em kg/m³) e calor específico (em J/kgK) são fornecidos para cada material construtivo de paredes externas e interna, piso, cobertura, janela e porta. Todas as zonas possuem uma janela de 5,13 m² orientada para Sul, parede interna e uma porta interna. As tabelas contendo os mencionados dados de construção são fornecidas no Anexo I.

3.2. Caso de teste

O caso de teste analisado no presente trabalho é o caso de teste 1. São solicitados os comportamentos da carga térmica de resfriamento e da temperatura operativa de uma zona térmica com temperatura interna constante de 295,15 K (22 °C). A simulação deve ser realizada para todos os tipos de zona térmica, de *XL* a *XS*. Demais informações a respeito do caso de teste 1 encontram-se no Anexo I.

3.3. Parâmetros e hipóteses adotados

Esta Subseção objetiva descrever os parâmetros e hipóteses fixados pela norma VDI 2078, os quais foram utilizados na modelagem dos casos de teste. Além disso, são aqui descritas simplificações feitas para o presente trabalho.

3.3.1. Hipóteses para ganhos internos

Os ganhos internos para o caso de teste aqui analisado consistem em calor emitido por três classificações: Pessoas, iluminação e outros. No presente trabalho, os ganhos por equipamentos foram inseridos nas simulações na categoria outros. A seguir estão elencadas as hipóteses utilizadas para cada categoria no caso de teste analisado:

- Pessoas: As pessoas dentro da zona realizam atividades sentadas, o que caracteriza atividade de nível II, em que são emitidos 125 W/pessoa. O calor sensível emitido por pessoas pode ser assumido como consistindo de iguais quantidades de calor radiante e convectivo.
- Iluminação e máquinas: A potência máxima de iluminação é 240 W e de máquinas, 300 W. O calor sensível emitido consiste de iguais quantidades de calor radiante e convectivo.

As zonas térmicas analisadas possuem ocupação de trabalho, podendo ser escritório, escola ou laboratório, por exemplo. No presente trabalho, foram considerados sete dias de trabalho por semana. As tabelas com informações sobre ganhos internos são fornecidas no Anexo II.

3.3.2. Coeficientes de transferência de calor

Os coeficientes de transferência de calor são divididos em: radiantes, convectivos, exteriores, interiores, verticais e horizontais. Assim, a Tab. 1 fornece os valores adotados para cada coeficiente.

Tab. 1 - Valores para os coeficientes de transferência de calor

Calor radiante (α_{rad}) (W/m ² K)	5,0
Calor convectivo, externo (α_a) (W/m ² K)	20,0
Calor convectivo, interno, superfície vertical ($\alpha_{i,vert}$) (W/m ² K)	2,7
Calor convectivo, interno, superfície horizontal ($\alpha_{i,hor}$) (W/m ² K)	1,7

4. METODOLOGIA

Para cumprimento do objetivo do trabalho, as cinco zonas térmicas citadas na Subseção 3.1 foram modeladas nos *softwares* EnergyPlus e OpenModelica para a localidade de Hamburgo. O EnergyPlus requer que o usuário forneça os parâmetros construtivos, calculando as resistências e capacitâncias térmicas conforme método detalhado na Subseção 2.5, enquanto que, no modelo feito em OpenModelica, parâmetros térmicos devem ser fornecidos. Assim, a Subseção 4.1 destina-se a ilustrar o processo de cálculo dos parâmetros térmicos realizado em linguagem Python.

4.1. Cálculo de parâmetros térmicos pela linguagem Python

Para o cálculo de parâmetros térmicos a partir de parâmetros construtivos, a ferramenta TEASER (*Tool for Energy Analysis and Simulation for Efficient Retrofit*, em português Ferramenta para Análise de Energia e Simulação para Eficiente Modernização) foi utilizada, a qual é implementada em linguagem Python. Assim, elementos da construção como paredes, piso, cobertura e janela são declarados e, como resultado, parâmetros necessários para a modelagem em OpenModelica são fornecidos. Os dados de entrada e saída são elencados a seguir:

- Dados de entrada: Coeficientes convectivo e radiante de transferência de calor para cobertura, porta e janela (W/m²K), massa específica (kg/m³), calor específico (J/kgK), condutividade térmica (kJ/mK) e espessura (m) de cada camada de material, fator solar do vidro da janela, orientação de cobertura, piso, paredes e janela (°), área (m²) e inclinação (°) de cobertura, piso, paredes, janela e porta.
- Dados de saída: Resistência térmica de cobertura, piso, paredes e janela (K/W), resistência remanescente de paredes externas (entre resistência da parede e capacitância da parede) (K/W), capacitância de cobertura, piso e paredes (J/K).

Para o cálculo das resistências e capacitâncias térmicas, o método detalhado na Subseção 2.5 é utilizado. Os coeficientes convectivos e radiante utilizados são conforme Subseção 3.3.2.

4.2. Modelagem nos *softwares* EnergyPlus e OpenModelica

Para a modelagem das zonas térmicas nos *softwares* EnergyPlus e OpenModelica, aspectos construtivos, climatológicos e térmicos precisaram ser considerados. Esta Subseção detalha o tratamento dado para cada aspecto em ambos os programas.

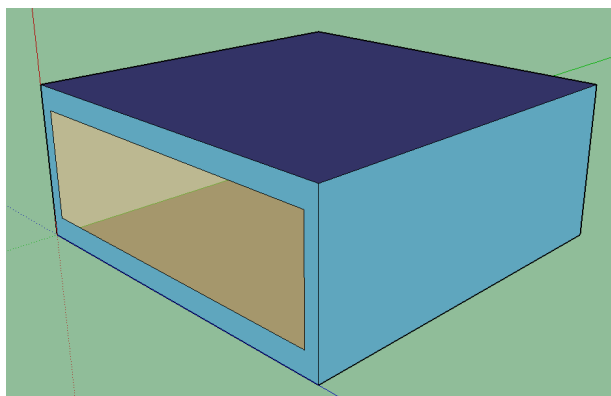
O arquivo climático utilizado em ambos os programas continha informações do arquivo TRY de Hamburgo, fornecido pela norma VDI 2078, e, para os campos faltantes, informações do arquivo EPW referente a Hamburgo foram utilizadas. Para os aspectos térmicos das zonas, os parâmetros construtivos descritos no Anexo I foram declarados na classe “*Material*” do EnergyPlus e os parâmetros resultantes da ferramenta TEASER (Subseção 4.1) foram utilizados no OpenModelica através do arquivo de propriedades da zona térmica. A Figura 5 ilustra a zona tipo *M* modelada em SketchUp para utilização no EnergyPlus. As temperaturas do solo de Hamburgo para cada mês do ano foram retiradas da norma DIN 4710 (2003) e usadas como valores de entrada em ambos os programas.

No EnergyPlus, *schedules* foram criados para representar a ocupação da zona e utilização de iluminação e equipamentos elétricos, conforme informações constantes no Anexo II. No OpenModelica, um arquivo TXT com as mesmas informações foi utilizado como dado de entrada para o cálculo dos ganhos internos.

Para aquecimento e resfriamento das zonas, uma bomba de calor PTHP foi declarada no EnergyPlus, enquanto que, no OpenModelica, blocos de calor prescrito foram utilizados, de forma que calor pode ser injetado ou retirado da zona conforme necessidade de aquecimento ou resfriamento. Para ambos os casos, *set points* de temperatura foram fornecidos, sendo de 295,05 K (21,90 °C) para aquecimento e 295,25 K (22,10 °C) para resfriamento, os horários de funcionamento do equipamento de aquecimento e resfriamento são conforme referência da norma VDI 2078.

Os coeficientes convectivos de transferência de calor mencionados na Subseção 3.3.2 foram declarados no EnergyPlus na classe *SurfaceProperty:ConvectionCoefficients*, enquanto que, no OpenModelica, foram adicionados ao arquivo de propriedades da zona térmica. O cálculo do coeficiente de transferência de calor por radiação é feito, no EnergyPlus, conforme Equação (5), enquanto que, no OpenModelica, é inserido como dado de entrada conforme valor da Subseção 3.3.2.

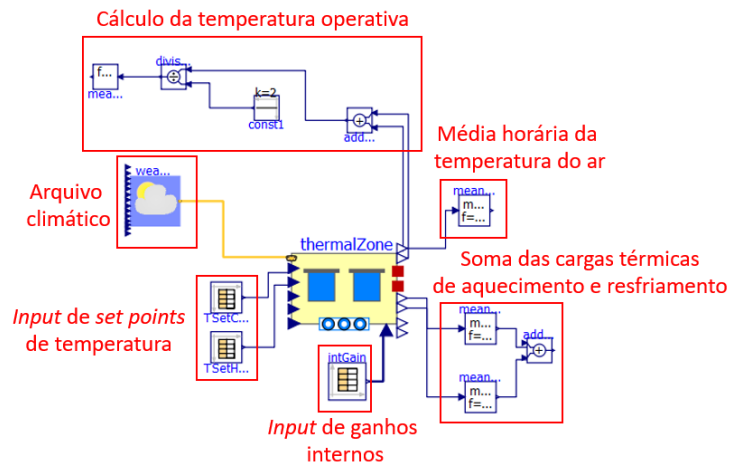
Figura 5 - Representação de uma das zonas térmicas no *software* SketchUp¹. Fonte: A Autora.



¹ Usada a versão *trial*, disponível por 30 dias.

O OpenModelica é uma ferramenta que utiliza blocos para definição de diferentes classes e a conexão entre elas é feita por linhas, conforme ilustra a Figura 6. Cada bloco possui as equações necessárias e pode possuir portal de entrada para os dados de entrada e/ou portal de saída para os dados de saída.

Figura 6 - Modelo de uma zona térmica com dados de entrada no OpenModelica. Fonte: A Autora.



5. RESULTADOS

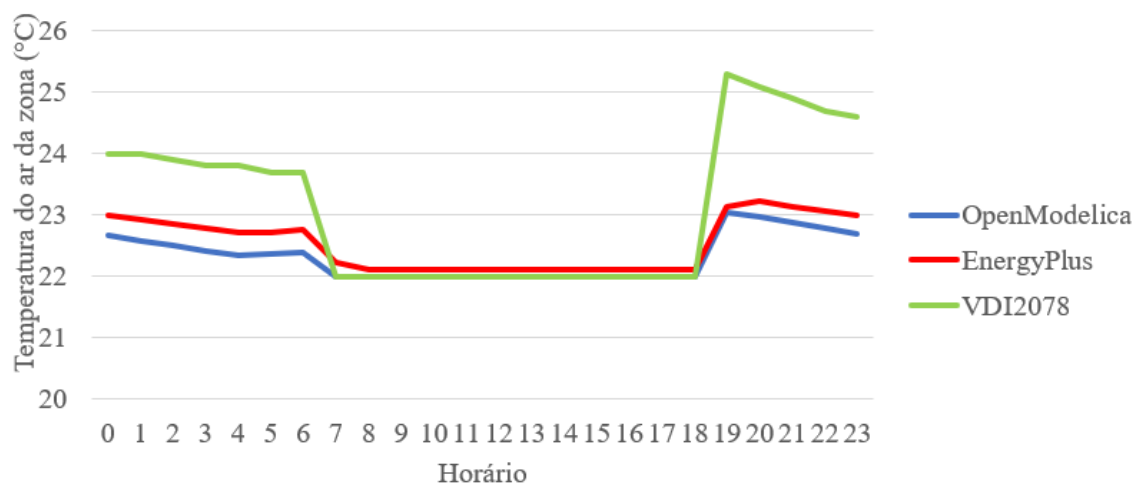
As simulações foram realizadas para as cinco zonas térmicas citadas na Subseção 3.1, para o dia 01/07. Na sequência, foi realizada uma análise dos resultados de temperatura do ar, temperatura operativa e carga térmica das simulações em EnergyPlus e OpenModelica para a zona térmica tipo *M*, bem como uma comparação com os resultados esperados pela norma VDI 2078 para esse dia. Os resultados das demais zonas térmicas encontram-se no Apêndice A.

5.1. Comparação da temperatura do ar - zona térmica tipo *M*

A Figura 7 ilustra a comparação dos resultados de temperatura do ar simulados pelo EnergyPlus e OpenModelica, bem como os valores esperados pela norma VDI 2078. Percebe-se que, entre 7h e 18h, a temperatura do ar é de 22 °C, uma vez que este é o valor objetivo do sistema de aquecimento/resfriamento da zona para o período de ocupação. Além disso, observa-se que, no EnergyPlus, o ar da zona é mais quente no período da noite, o que causaria uma maior demanda por resfriamento ao longo do começo do dia.

A maior diferença entre valores obtidos pelo EnergyPlus e pelo OpenModelica é de 0,38 °C às 4h, enquanto a maior diferença entre os valores obtidos pelos dois programas e os valores da norma é de 2,26 °C às 19h, logo após os equipamentos de climatização serem desligados. O coeficiente de correlação de Pearson calculado com os valores obtidos pelo OpenModelica e pelo EnergyPlus é de 0,98, o que, segundo Parreira (2018) caracteriza uma correlação muito forte entre as duas curvas.

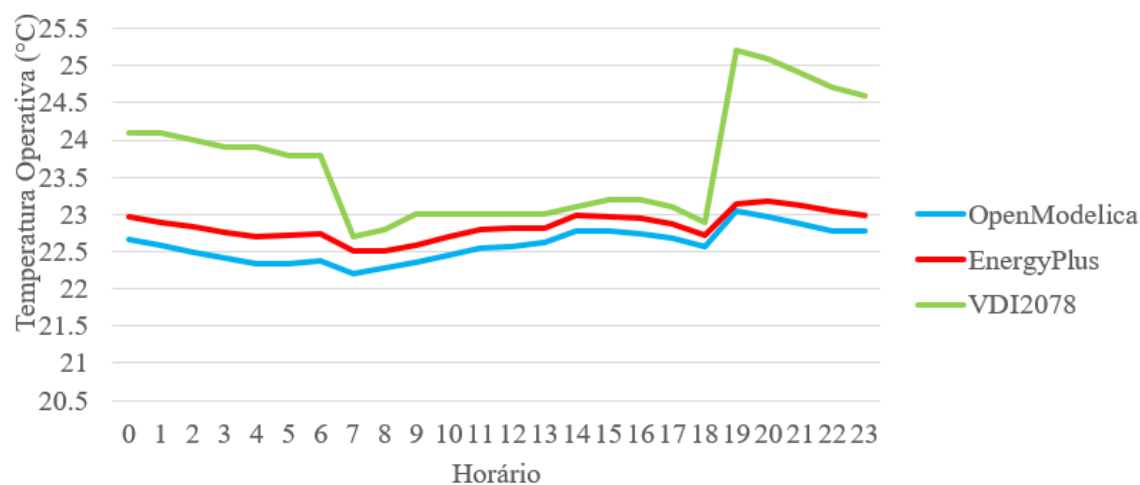
Figura 7 - Comparação da temperatura do ar entre EnergyPlus, OpenModelica e VDI 2078 para zona térmica tipo *M*. Fonte: A Autora.



5.2. Comparação da temperatura operativa - zona térmica tipo *M*

A temperatura operativa é calculada diferentemente entre OpenModelica e EnergyPlus, como mencionado na Subsecção 2.6. Percebe-se, apesar disso, que, ao longo de todo o dia, os valores obtidos pelo EnergyPlus são ligeiramente superiores aos do OpenModelica (a maior diferença é de 0,37 °C às 6h, ou seja, logo antes de o sistema de resfriamento ser acionado), e que, nos horários de não funcionamento do sistema de climatização, os valores de referência da norma superam em grande medida os resultados de ambos os programas, principalmente ao final do dia, sendo a maior diferença de 2,15 °C. Além disso, o coeficiente de correlação de Pearson calculado com os valores obtidos pelo OpenModelica e pelo EnergyPlus é de 0,87, o que, segundo Parreira (2018) caracteriza uma correlação forte entre as duas curvas.

Figura 8 - Comparação da temperatura operativa entre EnergyPlus, OpenModelica e VDI 2078 para zona térmica tipo *M*. Fonte: A Autora.

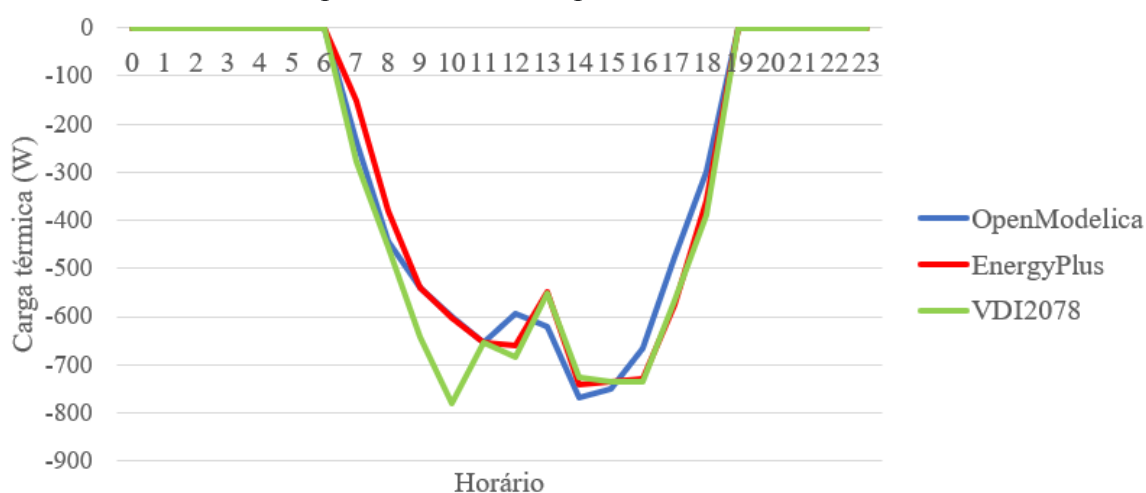


5.3. Comparação da carga térmica de resfriamento - zona térmica tipo M

A carga térmica de resfriamento é influenciada, dentre outros, pela temperatura externa, insolação, ocupação e uso da zona. Assim, é representativa para análise de diferentes aspectos das simulações, como aspectos construtivos e cálculos de parâmetros térmicos.

A Figura 9 demonstra valores semelhantes entre ambos os *softwares*, porém o comportamento de redução na carga térmica de resfriamento no meio do dia se mostra diferente para a simulação em OpenModelica em comparação com o EnergyPlus e a VDI 2078. A maior diferença de carga térmica entre ambos os programas é de 99,78 W, às 17h, e entre os programas e a norma, é de 179,70 W, às 10h. O coeficiente de correlação de Pearson calculado com os valores obtidos pelo OpenModelica e pelo EnergyPlus é de 0,99, o que, segundo Parreira (2018) caracteriza uma correlação muito forte entre as duas curvas.

Figura 9 - Comparação da carga térmica de resfriamento entre EnergyPlus, OpenModelica e VDI 2078 para zona térmica tipo M. Fonte: A Autora.



5.4. Motivos para desvios entre EnergyPlus, OpenModelica e VDI 2078

Como foi demonstrado nas Subseções de 5.1 a 5.3, existem desvios entre os resultados das simulações em OpenModelica e EnergyPlus. Há, porém, uma maior divergência entre esses e os valores de referência fornecidos pela norma VDI 2078. Uma razão clara para a divergência entre resultados das simulações e valores da norma é a não utilização de um procedimento previsto pela última: o *Cooling Design Period*. Trata-se de um período de estabilização, em que momentos de clima extremo são considerados, dividido em períodos de cálculo preliminar, cálculo inicial e cálculo do *Cooling Design Day*, dia de projeto. Os valores utilizados para cada período devem ser retirados da norma DIN 4710. Assim, uma vez que, ao invés desse processo, foi utilizado o arquivo climático TRY, diferenças entre a norma e os resultados de ambos programas são esperadas.

Para os desvios encontrados entre os resultados obtidos pelas duas ferramentas de simulação, existem algumas possíveis explicações. São elas:

- O coeficiente de transferência de calor por radiação é um valor de entrada no OpenModelica (conforme Subseção 3.3.2), utilizado diretamente no cálculo da temperatura externa equivalente, enquanto isso, no EnergyPlus, ele é calculado

conforme a Equação (5), ou seja, utilizando a emissividade dos materiais declarados e temperaturas dos arredores e da superfície. Portanto, no EnergyPlus são calculados valores horários para o mencionado coeficiente, enquanto que, no OpenModelica, ele é um valor constante.

- O cálculo da resistência de condução e da capacitância é feito diferentemente pelo processo TEASER e pelo EnergyPlus, conforme comentado na Subseção 2.5.
- O modelo criado em OpenModelica utiliza a temperatura externa equivalente, a qual depende do coeficiente de transferência de calor por radiação e resume a influência da radiação de onda longa e onda curta nas superfícies externas da zona térmica. Essa temperatura é utilizada no cálculo da troca de calor convectiva entre as superfícies externas e o ambiente. No EnergyPlus, por outro lado, a troca de calor convectiva e radiante são calculadas separadamente, conforme Equações (1) e (6).
- O EnergyPlus, por padrão, não considera a capacitância das massas internas declaradas. Assim, no presente caso, a parede interna e porta interna não contribuem para a inércia térmica da zona. O modelo implementado em OpenModelica, por outro lado, considera a capacitância das massas internas em sua base de cálculo.

6. CONCLUSÃO

As análises realizadas tiveram como objetivo averiguar as diferenças existentes na simulação termoenergética com os programas OpenModelica e EnergyPlus. Um caso de teste para validação conforme a norma VDI 2078 foi utilizado como base. Assim, resultados de temperatura operativa, temperatura do ar da zona e carga térmica puderam ser comparados entre ambos os *softwares* e com os valores de referência fornecidos pela norma.

Os mencionados resultados tiveram boa aproximação entre as ferramentas de simulação, e hipóteses foram feitas para os desvios encontrados, conforme Subseção 5.4. Para as divergências encontradas entre os valores dos programas e os esperados pela norma, a não utilização dos procedimentos *Cooling Design Period* e *Cooling Design Day* é uma provável explicação. Observa-se que o EnergyPlus é um programa que utiliza a linguagem C++, implementado especificamente para simulação termoenergética de edificações, enquanto que o Modelica (MODELICA, 2022) é uma linguagem de simulação para diferentes sistemas físicos, que, com os pacotes adequados, pode também realizar simulações termoenergéticas.

O presente trabalho é inédito, uma vez que possibilitou a verificação de um caso de teste da VDI 2078 em dois *softwares* de simulação consagrados. Isso representa o cumprimento de uma demanda existente. Como resultado, existe a possibilidade de ampliação das análises realizadas, como a modelagem e simulação dos casos de teste de 2 a 16 da norma VDI 2078.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

TOCCHIO, G. G.; **“Projeção da Demanda por Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro”**, Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2020.

BEZERRA, P., Cruz, T., da Silva, F., de Cian, Enrica, Lucena, A. F. P., Magalar, L., Mistry, M., Schaeffer, R., Vasquez-Arroyo, E. **“Impacts of a warmer world on space cooling demand in Brazilian households”**, Energy and Buildings, 2021.

COHEN, F., Jani, A., Khosla, R., Mazzone, A., McCulloch, M., McElroy, C., Miranda, N. D., Perera-Salazar, R., Renaldi, R., Trotter, P. A. **“Cooling for sustainable development”**, Nature Sustainability, 2020.

OMER, A. M. **“Energy, environment and sustainable development”**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008.

VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. VDI 2078 Blatt 1:2003-02: Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation). Düsseldorf: VDI, 2015.

VDI - VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. VDI 6007 Blatt 1:2003-12: Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden. Düsseldorf: VDI, 2015.

DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN4710:1982-11: Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumluftechnischen Anlagen in Deutschland. Berlin: DIN, 2003.

HUA, S., Lindauer, M., Reuss, F., Stopper, J., van Treeck, C. **“Validated Modelica Building Package for Energy Performance Simulation for Educational and Teaching Purposes”**, Alemanha, 2016.

FUCHS, M., Lauster, M., Mueller, D., Teichmann, J. **“Low order thermal network models for dynamic simulations of buildings on city district scale”**, RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center, Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate, Alemanha, 2014.

LAMBERTS, R. e Duarte V.C.P. **“Desempenho Térmico de Edificações (Apostila da disciplina ECV 5161)”**. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis, p. 239. 2016. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ApostilaECV5161_v2016.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2022

HOLMAN, J.P. **Heat Transfer**. 10ª edição. Nova York: McGraw-Hill, 2010.

SEEM, J.E. **“Modeling of heat transfer in buildings”**. Tese de doutorado - University of Wisconsin-Madison, 1987.

ABRAVA - Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento. RN 03 - 2003: Sistemas de condicionamento de ar para conforto, parâmetros de conforto térmico. 2003.

IBPSA - International Building Performance Simulation Association, 2022. Disponível em: <<http://www.ibpsa.org/>>. Acesso em: 21 jul. 2022.

MODELICA - The Modelica Association, 2022. Disponível em: <<https://modelica.org/>>. Acesso em: 15 jul. 2022.

PARREIRA, G. Coeficiente de correlação de Pearson, 2018. Disponível em: <<https://gpestatistica.netlify.app/blog/correlacao/>>. Acesso em: 04 set. 2022.

8. ANEXOS

ANEXO I - Parâmetros construtivos das zonas térmicas simuladas

Tab. 2 - Parâmetros construtivos da zona tipo *XL*. Fonte: Adaptado de VDI 2078 (2015).

Elemento construtivo	Área (m ²)	Camadas	Espessura (m)	Condutividade (W/mK)	Massa específica (kg/m ³)	Calor específico (kJ/kgK)	Fator g	Fator U
Piso	18,75	Carpete	0,008	0,060	1300,000	0,200		
		Painel de fibras	0,030	0,180	800000	1,700		
		Isolamento acústico 040	0,030	0,040	75,000	1,030		
		Concreto armado 2400	0,100	2,500	2400,000	1,000		
		Camada de ar	0,255	1,627	1,200	1,000		
		Isolamento acústico 040	0,030	0,040	75,000	1,030		
		Teto metálico	0,001	50,000	7800,000	0,450		
Cobertura	19,15	Teto metálico	0,001	50,000	7800,000	0,450		
		Isolamento acústico 040	0,030	0,040	75,000	1,030		
		Camada de ar	0,255	1,627	1,200	1,000		
		Concreto armado 2400	0,100	2,500	2400,000	1,000		
		Vidro celular	0,080	0,040	105,000	1,000		
		Telha de membrana de betume	0,005	0,230	1100,000	1,000		
		Cascalho, areia, preenchimento	0,200	0,700	1638,000	1,000		
Parede interna	36,51	Placa de aço	0,001	50,000	7800,000	0,450		
		Isolamento	0,080	0,060	100,000	1,030		
		Placa de aço	0,001	50,000	7800,000	0,450		
Porta interna	2,00	Contraplacado de madeira	0,025	0,13	500,000	1,600		
Parede externa	7,39	Placa de aço	0,001	50,000	7800,000	0,450		
		Isolamento térmico 035	0,090	0,035	10,000	1,030		
		Placa de aço	0,001	50,000	7800,000	0,450		
Janela	5,13	Vidro					0,640	1,400

Tab. 3 - Parâmetros construtivos da zona tipo *L*. Fonte: Adaptado de VDI 2078 (2015).

Elemento construtivo	Área (m ²)	Camadas	Espessura (m)	Condutividade (W/mK)	Massa específica (kg/m ³)	Calor específico (kJ/kgK)	Fator g	Fator U
Piso	18,75	Carpete	0,004	0,170	1200,000	1,400		
		Betonilha	0,040	1,400	1000,000	2,000		
		Camada de ar	0,080	0,434	1,200	1,000		
		Concreto armado 2400	0,140	2,500	2400,000	1,000		
		Camada de ar	0,300	1,627	1,200	1,000		
		Isolamento acústico 040	0,020	0,040	75,000	1,030		
		Teto metálico	0,001	50,000	7800,000	0,450		
Cobertura	19,45	Teto metálico	0,001	50,000	7800,000	0,450		
		Isolamento acústico 040	0,020	0,040	75,000	1,030		
		Camada de ar	0,255	1,627	1,200	1,000		
		Concreto armado 2400	0,140	2,500	2400,000	1,000		
		Vidro celular	0,095	0,040	105,000	1,000		
		Telha de membrana de betume	0,005	0,230	1100,000	1,000		
		Cascalho, areia, preenchimento	0,200	0,700	1638,000	1,000		
Parede interna	36,51	Placa de gesso	0,023	0,250	900,000	1,000		
		Isolamento	0,060	0,060	100,000	1,030		
		Camada de ar	0,035	0,190	1,200	1,000		
		Placa de gesso	0,023	0,250	900,000	1,000		
Porta interna	2,00	Contraplacado de madeira	0,025	0,130	500,000	1,600		
Parede externa	7,86	Concreto 2000	0,080	1,350	2000,000	1,000		
		Isolamento térmico 035	0,080	0,035	10,000	1,030		
		Camada de ar	0,030	0,163	1,200	1,000		
		Folha de revestimento	0,012	0,600	1650,000	1,000		
		Janela	5,13	Vidro				

Tab. 4 - Parâmetros construtivos da zona tipo M. Fonte: Adaptado de VDI 2078 (2015).

Elemento construtivo	Área (m ²)	Camadas	Espessura (m)	Condutividade (W/mK)	Massa específica (kg/m ³)	Calor específico (kJ/kgK)	Fator g	Fator U
Piso	18,75	Carpete	0,004	0,170	1200,000	1,400		
		Betonilha	0,040	1,400	1000,000	2,000		
		Camada de ar	0,080	0,434	1,200	1,000		
		Concreto armado 2300	0,200	2,300	2300,000	1,000		
		Camada de ar	0,255	1,627	1,200	1,000		
		Isolamento acústico 040	0,020	0,040	75,000	1,030		
Cobertura	19,45	Teto metálico	0,001	50,000	7800,000	0,450		
		Isolamento acústico 040	0,020	0,040	75,000	1,030		
		Camada de ar	0,255	1,627	1,200	1,000		
		Concreto armado 2300	0,200	2,300	2300,000	1,000		
		Vidro celular	0,095	0,040	105,000	1,000		
		Telha de membrana de betume	0,005	0,230	1100,000	1,000		
		Cascalho, areia, preenchimento	0,200	0,700	1638,000	1,000		
		Reboco 1300	0,015	0,570	1300,000	1,000		
Parede interna	36,51	Tijolo 1400	0,115	0,580	1400,000	1,000		
		Reboco 1300	0,015	0,570	1300,000	1,000		
		Madeira	0,025	0,200	800,000	1,600		
Porta interna	2,00	Concreto 2200	0,080	1,650	2200,000	1,000		
		Isolamento térmico 035	0,080	0,035	10,000	1,030		
Parede externa	7,86	Camada de ar	0,030	0,163	1,200	1,000		
		Folha de revestimento	0,012	0,600	1650,000	1,000		
		Janela	5,13	Vidro				0,640

Tab. 5 - Parâmetros construtivos da zona tipo S. Fonte: Adaptado de VDI 2078 (2015).

Elemento construtivo	Área (m ²)	Camadas	Espessura (m)	Condutividade (W/mK)	Massa específica (kg/m ³)	Calor específico (kJ/kgK)	Fator g	Fator U
Piso	18,75	Carpete	0,004	0,170	1200,000	1,400		
		Betonilha	0,045	1,400	2000,000	1,000		
		Isolamento acústico 045	0,030	0,045	135,000	1,030		
		Concreto armado 2300	0,240	2,300	2300,000	1,000		
		Reboco 1300	0,015	0,570	1300,000	1,000		
Cobertura	19,45	Reboco 1300	0,015	0,570	1300,000	1,000		
		Concreto armado 2300	0,240	2,300	2300,000	1,000		
		Vidro celular	0,120	0,040	105,000	1,000		
		Telha de membrana de betume	0,005	0,230	1100,000	1,000		
		Cascalho, areia, preenchimento	0,200	0,700	1638,000	1,000		
Parede interna	36,51	Reboco 1300	0,015	0,570	1300,000	1,000		
		Contraplacado de madeira 1400	0,175	0,580	1400,000	1,000		
		Reboco 1300	0,015	0,570	1300,000	1,000		
Porta interna	2,00	Madeira	0,025	0,200	800,000	1,600		
Parede externa	7,86	Concreto 2200	0,120	1,650	2200,000	1,000		
		Isolamento 035	0,085	0,035	10,000	1,030		
		Folha de revestimento	0,012	0,600	1650,000	1,000		
Janela	5,13	Vidro					0,640	1,400

Tab. 6 - Parâmetros construtivos da zona tipo XS. Fonte: Adaptado de VDI 2078 (2015).

Elemento construtivo	Área (m ²)	Camadas	Espessura (m)	Condutividade (W/mK)	Massa específica (kg/m ³)	Calor específico (kJ/kgK)	Fator g	Fator U
Piso	18,75	Carpete	0,004	0,170	1200,000	1,400		
		Concreto armado 2300	0,300	2,300	2300,000	1,000		
		Reboco 1300	0,015	0,570	1300,000	1,000		
Cobertura	19,45	Reboco 1300	0,015	0,570	1300,000	1,000		
		Concreto armado 2300	0,300	2,300	2300,000	1,000		
		Vidro celular	0,1200	0,040	105,000	1,000		
		Telha de membrana de betume	0,005	0,230	1100,000	1,000		
		Cascalho, areia, preenchimento	0,200	0,700	1638,000	1,000		
Parede interna	36,51	Arenito	0,400	2,300	2600,000	1,000		
Porta interna	2,00	Madeira	0,025	0,200	800,000	1,600		
Parede externa	7,86	Arenito	1,000	2,300	2600,000	1,000		
Janela	5,13	Vidro					0,640	1,400

ANEXO II - Cargas internas horárias

Tab. 7 - Valores de cargas internas por hora do dia. Fonte: Adaptado de VDI 2078 (2015).

Hora	Número de pessoas	Potência de iluminação (W)	Fração convectiva da iluminação	Potência de outros (W)	Fração convectiva de outros
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0
8	1	240	0.5	150	0.5
9	2	240	0.5	300	0.5
10	2	240	0.5	300	0.5
11	2	240	0.5	300	0.5
12	2	240	0.5	300	0.5
13	1	240	0.5	150	0.5
14	2	240	0.5	300	0.5
15	2	240	0.5	300	0.5
16	2	240	0.5	300	0.5
17	1	240	0.5	150	0.5
18	0	120	0.5	0	0
19	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0

9. APÊNDICES

APÊNDICE A - Resultados da simulação das zonas térmicas tipo *XL*, *L*, *S* e *XS*

Figura 10 - Resultados de temperatura operativa para zonas térmicas tipo *XL* (a), *L* (b), *S* (c) e *XS* (d). Fonte: A Autora.

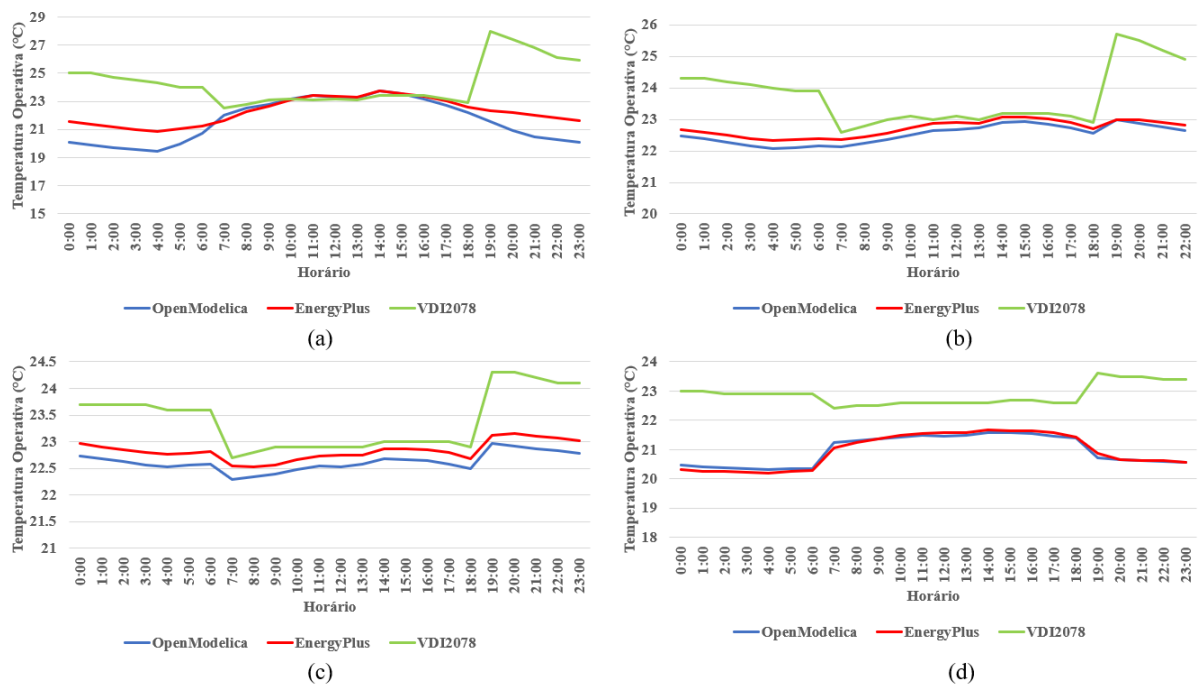


Figura 11 - Resultados de temperatura do ar da zona para zonas térmicas tipo *XL* (a), *L* (b), *S* (c) e *XS* (d). Fonte: A Autora.

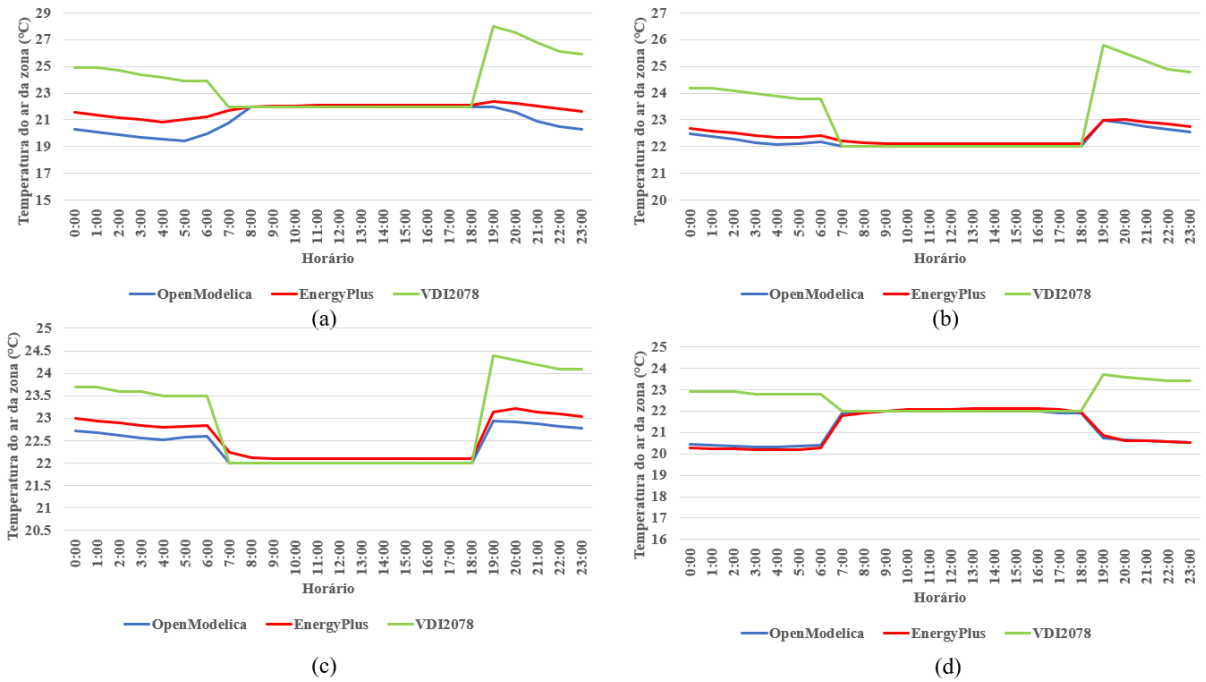


Figura 12 - Resultados de carga térmica para zonas térmicas tipo *XL* (a), *L* (b), *S* (c) e *XS* (d). Fonte: A Autora.

