

Marcelo Salles Olinger

**PREDIÇÃO DE CONFORTO TÉRMICO EM ESCRITÓRIOS
VENTILADOS NATURALMENTE POR MEIO DE REDES NEURAIS
ARTIFICIAIS**

Dissertação submetida ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia
Civil da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do
Grau de Mestre em Engenharia de
Engenharia Civil.

Orientador: Profa. Ana Paula Melo, Dra.

Florianópolis

2019

1 RESULTADOS

1.1 PARÂMETROS DE ENTRADA

Ao analisar o banco de dados disponibilizado, obteve-se as distribuições de ocorrência em relação aos parâmetros observados (Figura 1.1).

Figura 1.1: Distribuições de ocorrência

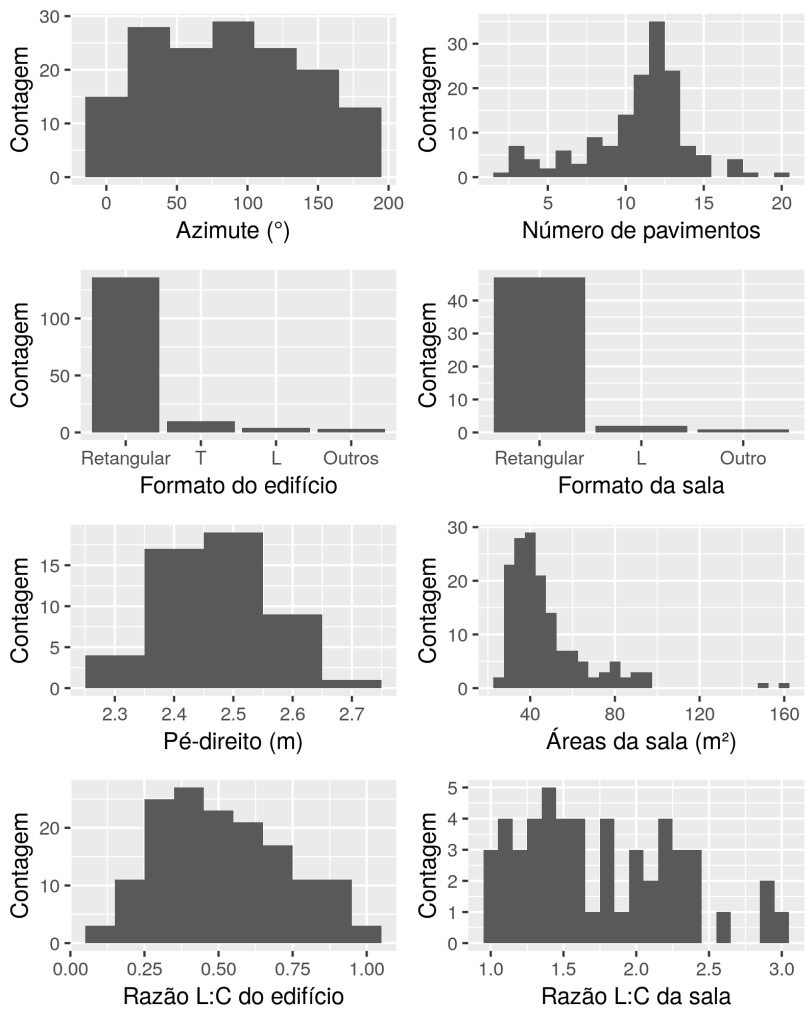
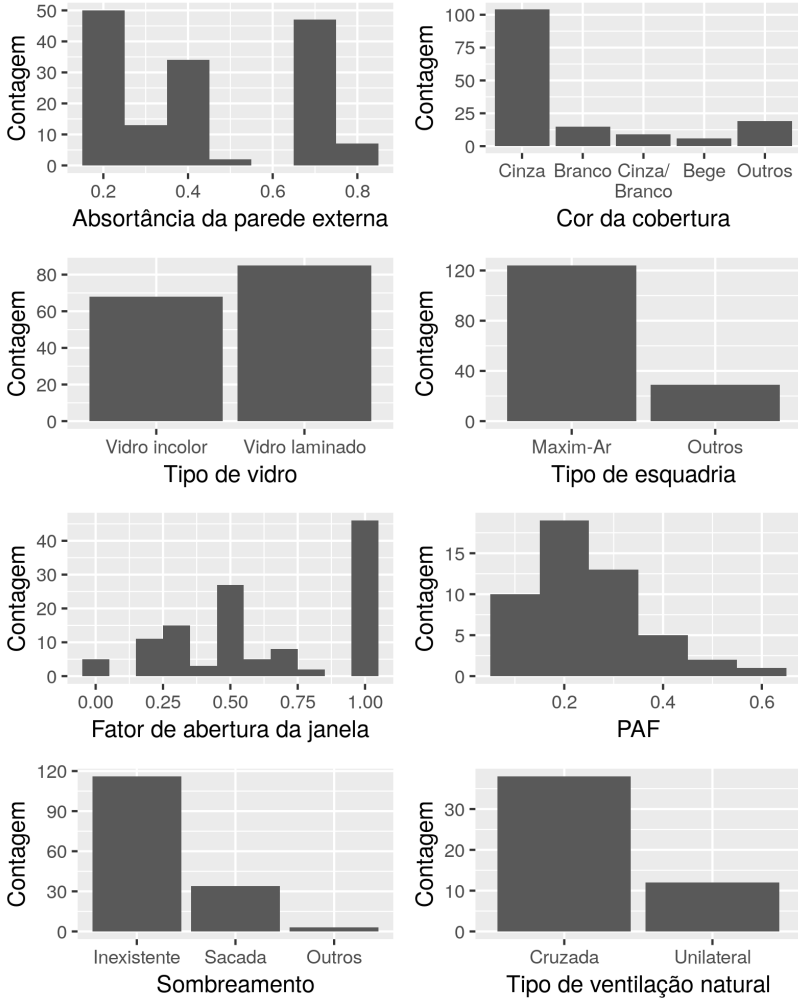


Figura 1.1: *Continuação*

Tanto os edifícios, quanto as salas existentes no banco de dados apresentam predominantemente formato retangular, a partir do qual considera-se que definir as simulações baseando-se em modelos de edificações retangulares, com salas retangulares, representa adequadamente as tipologias de edifícios encontradas na cidade de São Paulo. A absorvância da cobertura foi definida com o valor fixo de 0,7, valor aproximado para uma cobertura de cor cinza.

Observou-se que esquadrias do tipo maxim-ar são predominantes. Os objetos do *Airflow Network* não modelam especificamente este tipo de esquadria. Porém, optou-se por considerar as janelas como não pivotantes. Considerar uma janela como horizontalmente pivotante implicaria na consideração de que a abertura acontece simultaneamente em cima e embaixo da janela. No caso da janela maxim-ar, por mais que a abertura aconteça em um eixo horizontal, apenas a parte inferior da janela abre.

O uso de elementos de sombreamento é pouco explorado nas edificações existentes. De qualquer maneira, considerou-se a modelagem de sombreamento horizontal sobre as aberturas da edificação, por considerar o potencial do sombreamento para bloquear a entrada de radiação nas zonas térmicas simuladas. Esse parâmetro foi variado a partir do ângulo de sombreamento formado entre a base da abertura e a proteção solar, localizada no topo da abertura. A maioria das salas observadas possuem ventilação cruzada, mas a ventilação unilateral é uma estratégia com ocorrência considerável.

As informações relacionadas ao tipo de vidro não permitem definir valores relacionados ao fator solar (FS). Observa-se apenas a ocorrência de vidros laminados e vidro comum incolor. Optou-se por variar o fator solar dos vidros nas simulações para avaliar o impacto deste parâmetro nos resultados de conforto térmico.

Como as simulações de referência foram modeladas como pavimentos da edificação, o parâmetro relacionado ao número de pavimento das edificações foi transformado no parâmetro "altura do pavimento".

A Tabela 1.1 apresenta os limites mínimos e máximos atribuídos aos diferentes parâmetros contínuos variados nas simulações, assim como os parâmetros variados pela lógica "sim/não". A velocidade do ar foi variada com valores discretos, de acordo com a Tabela ?? do Capítulo ??.

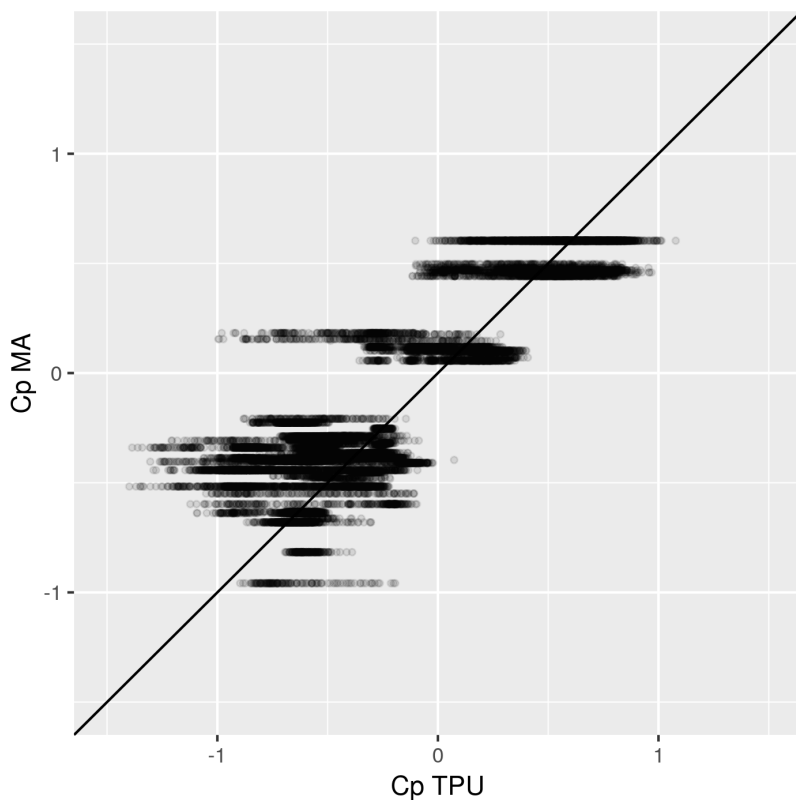
Tabela 1.1: Limites mínimos e máximos dos parâmetros

Parâmetro	Valores
Área da sala (m^2)	20 - 100
Razão L:C da sala (-)	0,4 - 2,5
Pé-direito (m)	2,3 - 3,2
Azimute ($^\circ$)	0 - 360
Altura do pavimento (m)	0 - 50
Absortância da parede (-)	0,2 - 0,8
Transmitância da parede (W/m^2K)	0,5 - 4,4
Capacidade térmica da parede (kJ/m^2K)	0,22 - 450,00
PAF (-)	0,1 - 0,6
Fator solar do vidro (-)	0,20 - 0,87
Sombreamento ($^\circ$)	0 - 80
Densidade de ocupação (pessoa/ m^2)	0,05 - 0,20
Fator de abertura da janela (-)	0,2 - 1,0
Razão L:C do edifício (-)	0,2 - 1,0
Cobertura exposta	Sim / Não
Piso exposto	Sim / Não
Ventilação	Cruzada / Unilateral
Velocidade do ar (m/s)	0,0 - 1,2

1.2 SIMULAÇÕES SIMPLIFICADAS

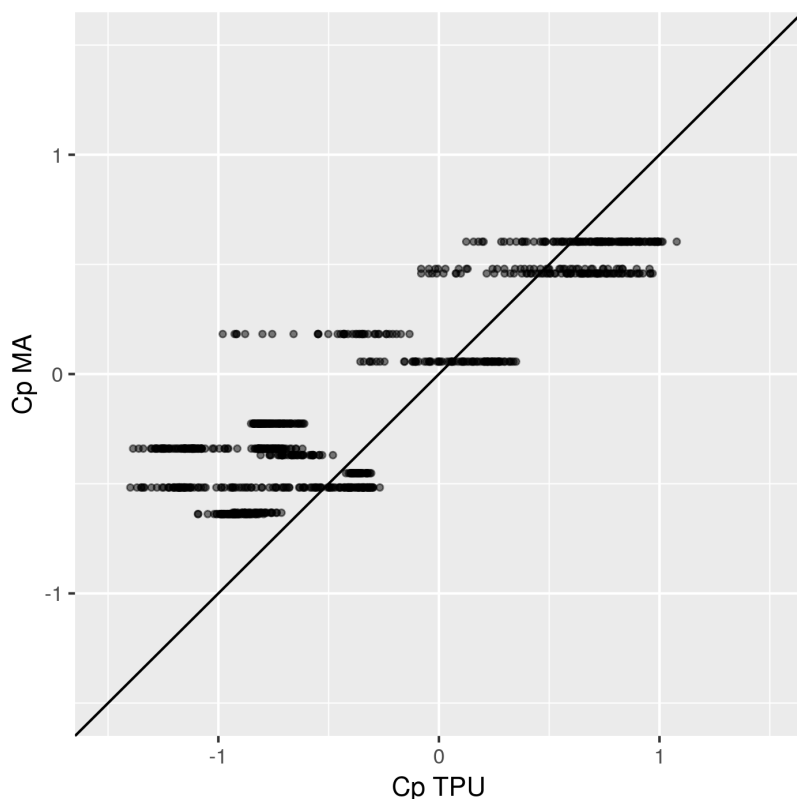
1.2.1 Cálculo do coeficiente de pressão pelo método analítico

Ao comparar os valores dos coeficientes de pressão (C_p 's) das medições em túnel de vento da Universidade Politécnica de Tóquio (TPU) e os valores dos C_p 's obtidos pelo método analítico (MA), obteve-se um gráfico de pontos. A Figura 1.2 apresenta a comparação para as 25 geometrias diferentes, para cada fachada, e para cada ponto disponibilizado pela TPU. Como os valores calculados pelo MA são únicos para cada fachada, e a TPU oferece valores diferentes para diversos pontos ao longo das fachadas, os pontos no gráfico da Figura 1.2 distribuem-se horizontalmente. É possível observar que a faixa de valores dos C_p 's disponibilizados pela TPU é maior do que faixa de valores calculados pelo MA. Enquanto o menor valor de C_p disponibilizado pela TPU é -1,40, e o maior valor é 1,08, pelo MA o valor mínimo é igual a -0,96 e o máximo é igual a 0,60.

Figura 1.2: Comparação entre os valores de C_p das 25 geometrias

Dentre as geometrias analisadas, a proporção com a maior diferença absoluta média entre os valores dos C_p 's foi igual a 0,344, para a geometria da edificação *highrise* com proporções de largura, profundidade e altura igual a 2:1:2 (Figura 1.3).

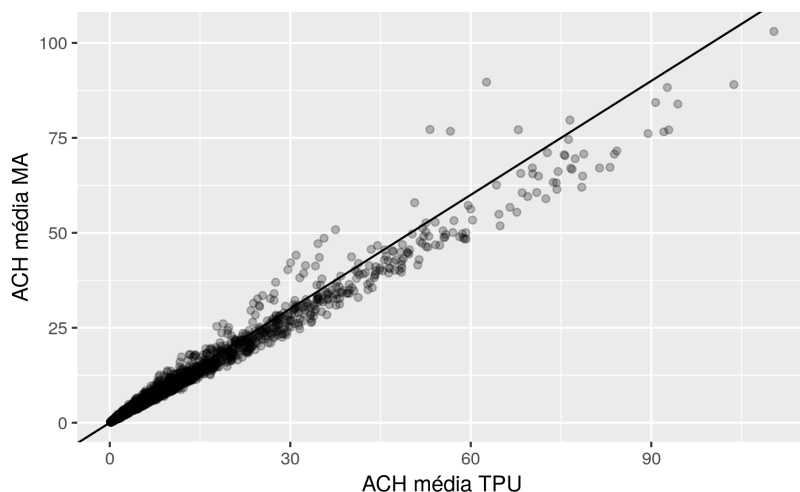
Figura 1.3: Comparação entre os valores de C_p da geometria de proporções 2:1:2



A partir da comparação conduzida, decidiu-se comparar as diferenças nos resultados de simulações termoenergéticas utilizando como base uma tipologia com proporções de largura, profundidade e altura igual a 2:1:2.

Os resultados das 1000 simulações foram comparados por gráficos de pontos. A comparação entre as médias anuais de trocas de ar por hora (ACH), apresentada na Figura 1.4, mostra que o MA faz com que as simulações subestimem as trocas de ar nas simulações, possivelmente devido aos menores valores dos C_p 's obtidos pelo método. A diferença média foi igual a -0,67 para o ACH, com o erro absoluto do 95º percentil (AE95) é igual a 5,23 ACH.

Figura 1.4: Comparação entre as médias anuais do ACH



Apesar dessas diferenças nas trocas de ar, a comparação entre as temperaturas operativas médias, apresentada na Figura 1.5, mostra que a diferença média da temperatura operativa é $0,04\text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo que o AE95 é igual a $0,31\text{ }^{\circ}\text{C}$. Essas diferenças são confirmadas como pouco significativas ao se analisar a Figura 1.6, com a comparação da fração de horas em desconforto (EHF). A média de diferença do EHF nos casos analisados foi igual a $0,0037$, com o AE95 igual a $0,0277$. Por tanto, considerou-se que a utilização do MA para calcular os valores dos Cp's é uma alternativa adequada para a simplificação das simulações termoenergéticas.

Figura 1.5: Comparação entre as médias das temperaturas operativas

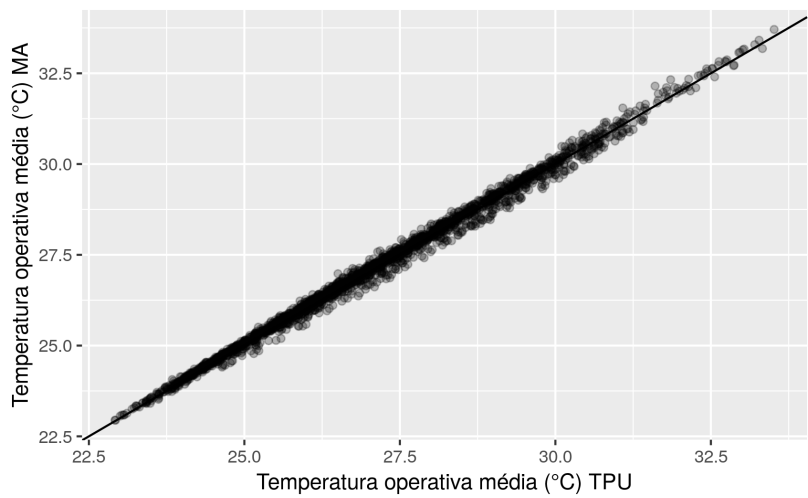
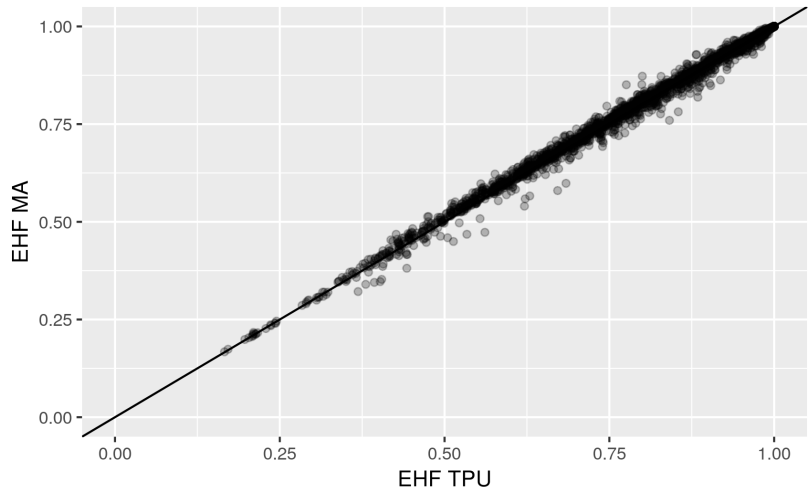


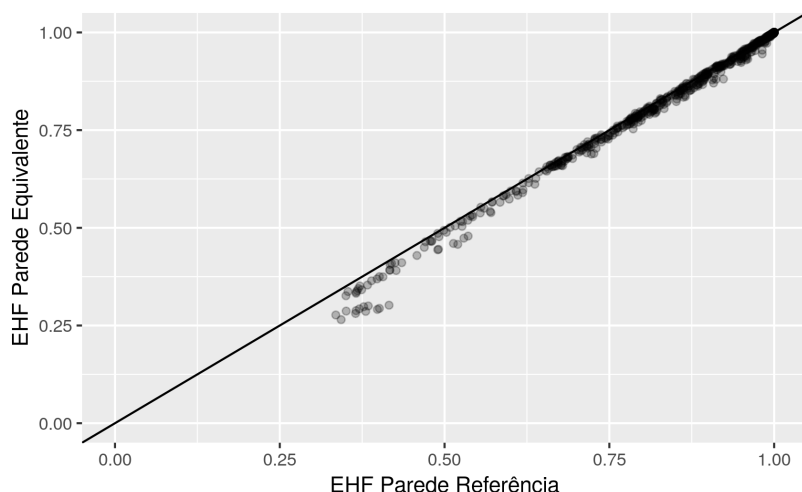
Figura 1.6: Comparação entre os resultados de EHF



1.2.2 Representação da envoltória com duas camadas

Os resultados das simulações com as paredes equivalentes subestimaram o EHF em 0,0107 na média, quando comparados aos resultados das simulações com as paredes de referência. Os resultados das simulações para a parede de gesso com isolamento resultaram em um erro absoluto médio igual a 0,0100, e um AE95 igual a 0,0604 para o EHF (Figura 1.7).

Figura 1.7: Comparação entre os resultados de EHF para a parede de gesso com isolamento



A representação da parede de alvenaria apresenta-se mais adequada considerando-se apenas metade da parede para definir a capacidade térmica. Enquanto que, para a parede com a capacidade térmica total o erro absoluto médio foi igual a 0,0209, e o AE95 foi igual a 0,0650, para a parede de alvenaria com metade da capacidade térmica considerada, o erro médio absoluto foi igual a 0,0189, e o AE95 foi igual a 0,0604.

Figura 1.8: Comparação entre os resultados de EHF para a parede de alvenaria com capacidade térmica total

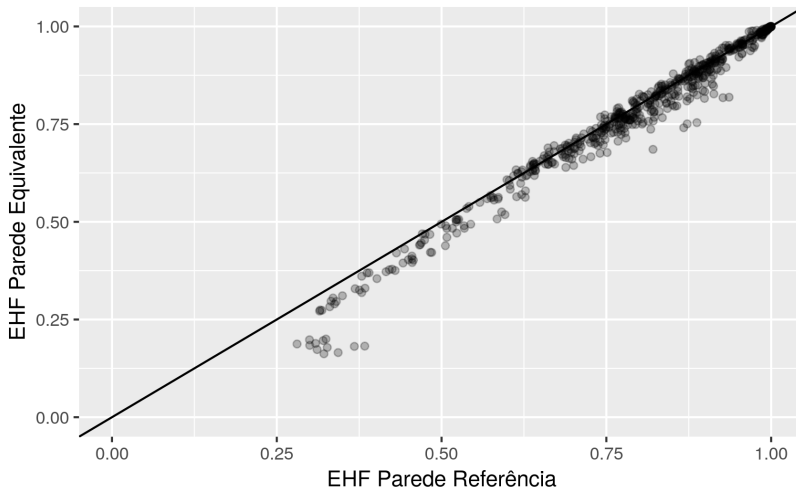
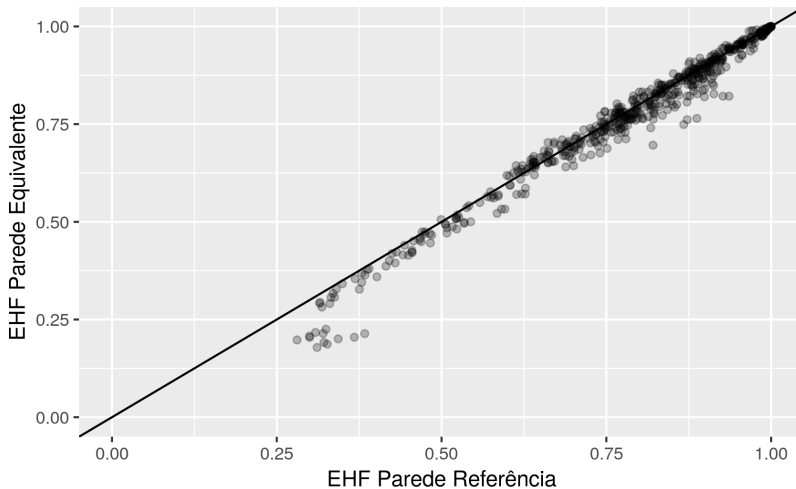


Figura 1.9: Comparação entre os resultados de EHF para a parede de alvenaria com metade da capacidade térmica

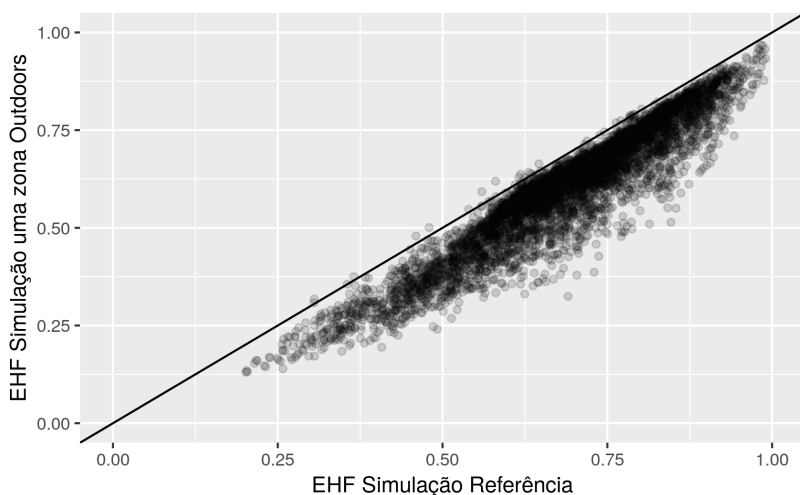


O caso com as maiores diferenças no EHF foi para uma edificação em contato com o solo, com cobertura exposta, e um fator de abertura da janela igual a 0,23. Apesar das diferenças nos resultados, o uso da parede equivalente facilita a parametrização da transmitância térmica e da capacidade térmica. Por esse motivo, considerou-se as diferenças pouco significativas, e a parede equivalente foi adotada para simplificar as simulações.

1.2.3 Condição de contorno das paredes adjacentes à edificação

A simplificação das simulações adotando-se apenas uma zona térmica foi avaliada para duas condições de contorno. Os resultados mostram que a maneira mais adequada de representar as paredes adjacentes à circulação da edificação é considerando-as como adiabáticas. Considerar as paredes adjacentes à circulação como *Outdoors*, faz com que os resultados do EHF sejam subestimados em 0,0868 em média, como AE95 igual a 0,1865 (Figura 1.10).

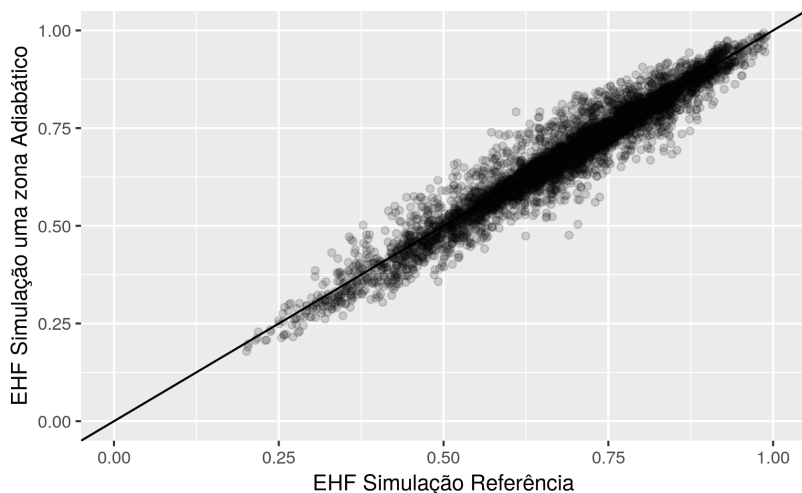
Figura 1.10: Comparação entre os resultados de EHF para parede *Outdoors*



Os resultados das simulações considerando-se as paredes voltadas para o corredor como adiabáticas subestimaram o EHF em

0,0051 na média, como AE95 igual a 0,0804 (Figura 1.11).

Figura 1.11: Comparação entre os resultados de EHF para parede adiabática



A partir dos resultados obtidos, definiu-se as paredes voltadas para a circulação como adiabáticas no desenvolvimento das simulações simplificadas.

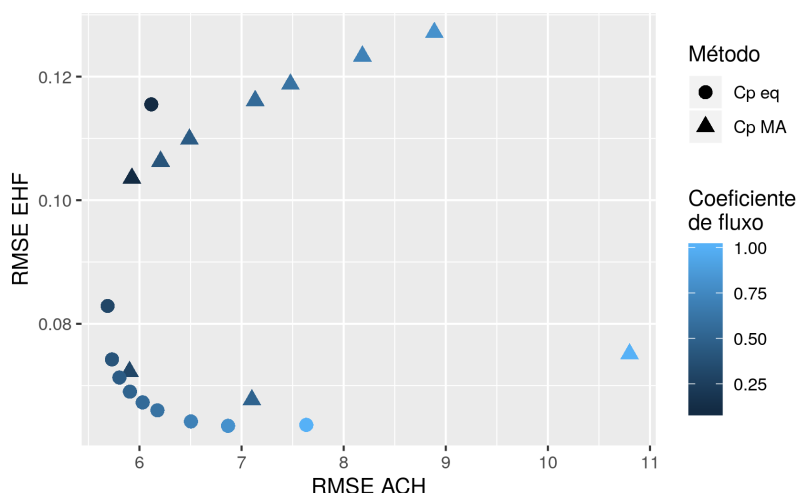
1.2.4 Modelagem da ventilação natural na simulação simplificada

Nesta etapa do trabalho as simulações foram conduzidas para se obter duas respostas: (1) se é adequado o uso do coeficiente de pressão equivalente (C_{peq}) para ser associado à porta da zona térmica; (2) qual deveria ser o coeficiente de fluxo mássico de ar adotado para o objeto *AirflowNetwork:MultiZone:Surface:Crack*.

Para analisar simultaneamente o desempenho do C_{peq} e dos coeficientes de fluxo mássico de ar, o gráfico da Figura 1.12 foi gerado, observando-se as raízes dos erros médios quadráticos (RMSE). É possível observar que as simulações desenvolvidas utilizando-se o C_{peq} obtiveram resultados com RMSE menores do que as simulações desenvolvidas utilizando-se o C_p obtido diretamente pelo MA. Para a definir o coeficiente de fluxo mássico de ar, levou-

se em conta inicialmente os erros relacionados ao ACH. No entanto, foi identificada uma fronteira de Pareto entre os erros analisados, que mostra como a busca por menores erros de ACH aumenta os erros relacionados ao EHF. O resultado dessa análise levanta duas suspeitas. A primeira é de que as diferenças maiores nas trocas de ar anulem erros relacionados à definição das paredes adjacentes à edificação como adiabáticas. A segunda hipótese, é de que os maiores erros relacionados ao MACH sejam em casos onde as diferenças nas trocas de ar não sejam relevantes para alterar a temperatura operativa nas zonas térmicas e, consequentemente, o EHF.

Figura 1.12: Eficiência de Pareto entre EHF e ACH médio



Como o desenvolvimento das simulações é voltado para obter a maior precisão possível para os resultados de EHF, optou-se por definir o coeficiente de fluxo mássico de ar com valor igual a 0,8, pois as simulações desenvolvidas utilizando-se este valor estão na fronteira de Pareto, e resultaram nos menores erros de EHF.

1.2.5 Análise de sensibilidade

As Figuras 1.13, 1.14 e 1.15 apresentam os resultados das análises de sensibilidade (AS) para efeitos de primeira ordem e efeitos totais, relacionados ao ACH, às temperaturas operativas das zo-

nas, e ao EHF. Os índices apresentados são proporcionais às influências entre os dados de entrada e saída.

Figura 1.13: AS de Sobol dos efeitos de primeira ordem e efeitos totais nas médias anuais de ACH

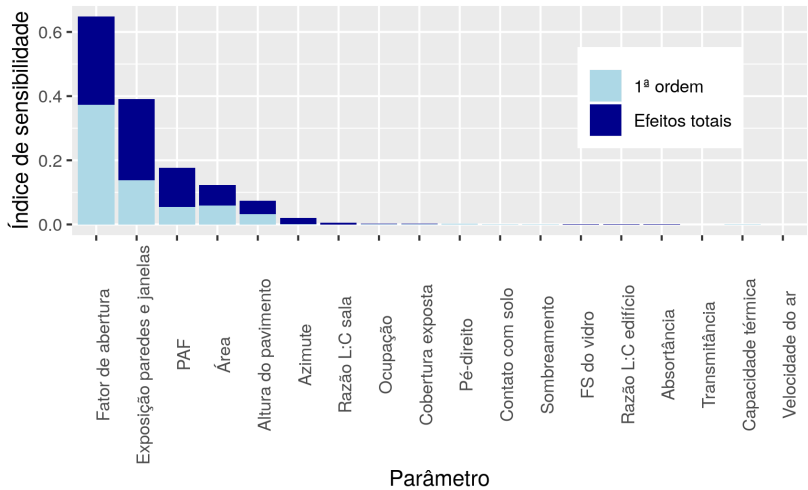


Figura 1.14: AS de Sobol dos efeitos de primeira ordem e efeitos totais nas temperaturas operativas

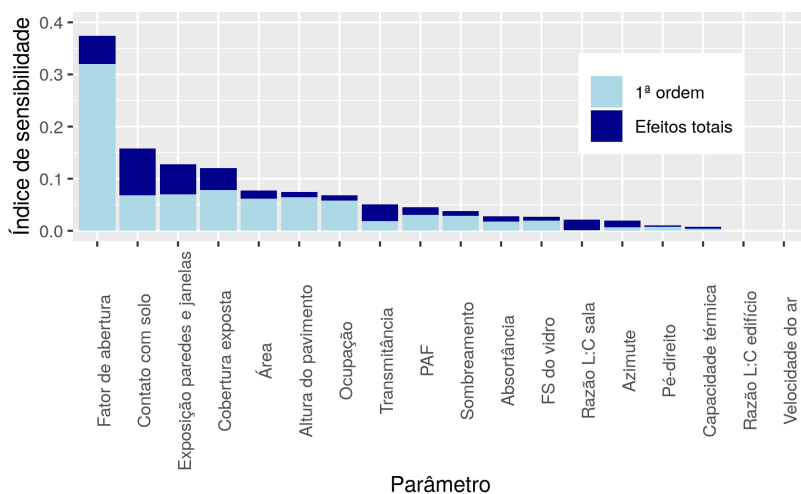
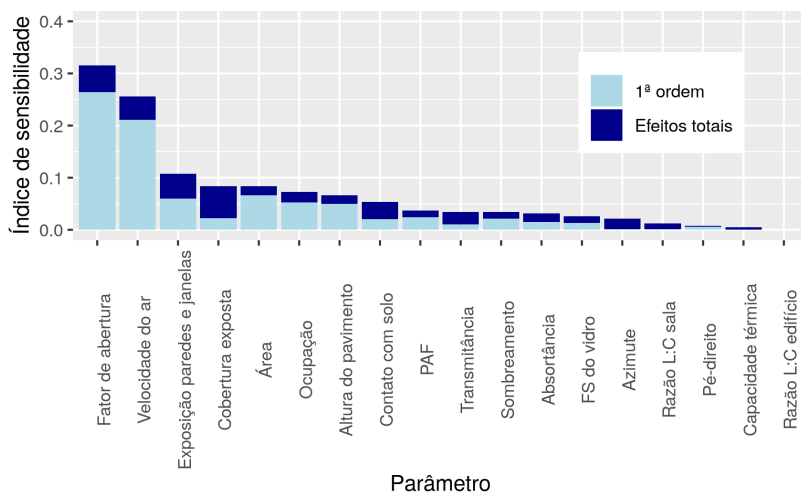


Figura 1.15: AS de Sobol dos efeitos de primeira ordem e efeitos totais no EHF



Os parâmetros mais influentes nas ACH, como esperado, são aqueles relacionados às aberturas da zona. O primeiro parâmetro de maior influência é o fator de abertura das janelas, seguido do parâmetro relacionado à exposição das paredes e à presença de VN cruzada ou unilateral. A área tem influência significativa, pois o cálculo das trocas de ar leva em conta o volume de ar na zona, que é diretamente relacionado à sua área. A altura do pavimento é determinante nos resultados do ACH, pois a velocidade do vento no EnergyPlus é calculada em função da altura da zona. A orientação da zona (azimute) não tem uma influência significativa de primeira ordem. No entanto, percebe-se uma influência mais significativa considerando-se os efeitos totais. O azimute é determinante para a definição dos coeficientes de pressão sobre as fachadas da edificação. Por isso, a influência deste parâmetro nos resultados das simulações depende de outros parâmetros, relacionados ao posicionamento e às áreas das aberturas na zona. A velocidade do ar não influencia os resultados relacionados ao ACH, pois é considerada apenas após o término das simulações, ao se calcular o EHF. A AS apresentou interações de segunda ordem significativas entre o fator de abertura das janelas e a presença de VN cruzada ou unilateral, com um índice de sensibilidade igual a 0,121. Contudo, o parâmetro com maiores interações de segunda ordem relacionados ao ACH foi o PAF, com a soma dos índices de segunda ordem igual a 0,300.

As análises relacionadas à temperatura operativa e ao EHF indicam relevância dos parâmetros relacionados à VN. Para ambas as análises, o parâmetro mais influente foi o fator de abertura da janela, enquanto o parâmetro relacionado à exposição das paredes e à presença de VN cruzada ou unilateral foi o terceiro mais influente. O contato com o solo apresentou-se como o segundo parâmetro mais influente nas médias anuais de temperatura operativa, considerando-se os efeitos totais. No entanto, a influência deste parâmetro não é tão significativa no EHF. Isso indica que a influência do contato com o solo nas temperaturas operativas das zonas é mais significativa em faixas de temperatura que não interferem no cálculo do EHF, ou seja, consideravelmente a cima ou abaixo dos limites superiores de aceitabilidade estabelecidos pelo método de conforto adaptativo. Observa-se que os efeitos totais entre o segundo (contato com o solo) e o quarto (exposição da cobertura) índice de sensibilidade com valores mais altos na AS relacionada à média anual da temperatura operativa são expressivos. A transmissão das paredes, o azimute, e a razão entre a largura e o comprimento da sala também apresentam efeitos totais relevantes, apesar

dos baixos índices de sensibilidade para primeira ordem. Isso indica que há interações significativas entre esses parâmetros e os demais.

O movimento do ar apresenta-se como o segundo parâmetro mais influente nos resultados de EHF, o que indica um grande potencial de uso de ventiladores na busca por conforto térmico nos ambientes. A área da zona e a densidade de ocupação apresentaram-se mais influentes nos resultados de EHF, comparando-se aos resultados relacionados às médias anuais de temperatura operativa. O azimuth, apesar de seu índice de sensibilidade baixo para a análise de primeira ordem, apresentou índices de segunda ordem expressivos. As interações de segunda ordem ocorrem relacionadas a parâmetros referentes à VN e a parâmetros referentes à radiação solar. A soma dos índices de segunda ordem do azimuth em relação ao EHF foi igual a 0,177.

A complexidade dos fenômenos representados junto às interações entre as diferentes variáveis exige um grande número de casos para reduzir incertezas, pois o método de AS utiliza uma base amostral. Por isso, existe uma incerteza associada aos índices de sensibilidade obtidos nas AS conduzidas, e a soma dos valores dos índices ultrapassa o valor 1. Entretanto, a aplicação da análise de sensibilidade global ofereceu resultados relevantes para o trabalho, com índices de sensibilidade condizentes aos comportamentos físicos representados pelas simulações.

Baseando-se nos resultados das AS, alguns dos parâmetros não foram considerados para o desenvolvimento do metamodelo. A Tabela 1.2 apresentam os parâmetros que tiveram seus valores fixos. O valor do pé-direito foi determinado considerando-se o valor encontrado com mais frequência na base de dados analisada. A capacidade térmica da parede foi estabelecida de acordo com o valor de uma parede de bloco cerâmico de dimensões 14x19x29 cm, e argamassa de 2,5 cm. Os parâmetros relacionados às proporções entre largura e profundidade das salas e edifícios foram determinados com valor igual a 1.

Tabela 1.2: Parâmetros com valores constantes.

Parâmetro	Valor fixo
Razão L:C do edifício (-)	1
Razão L:C da sala (-)	1
Pé-direito (m)	2,5
Capacidade térmica (kJ/m ² K)	161

1.2.6 Desenvolvimento do metamodelo

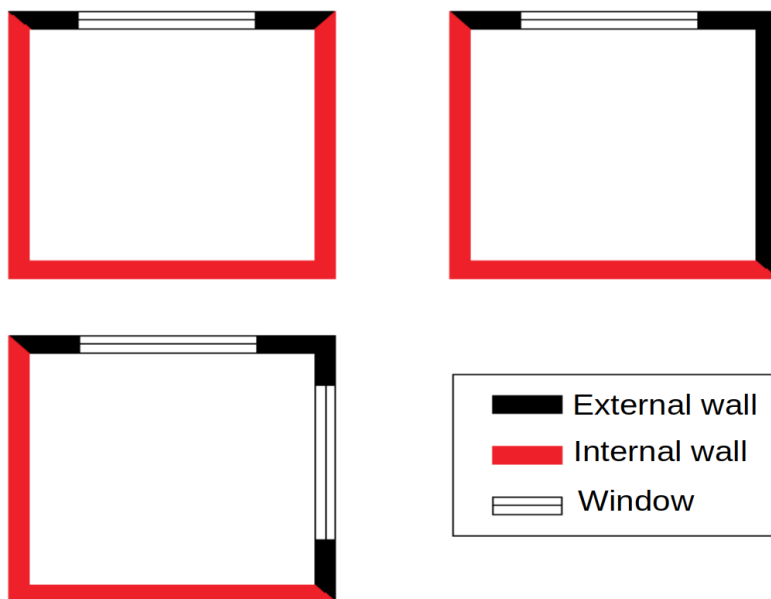
A partir das 20.000 simulações geradas para o treinamento da rede neural artificial (RNA). O metamodelo final foi definido com 14 parâmetros:

- Fator de abertura das janelas;
- Velocidade do ar;
- Condição de exposição das paredes e janelas;
- Área da sala;
- Densidade de ocupação;
- Altura do pavimento;
- Exposição da cobertura;
- Sombreamento horizontal;
- Contato com o solo;
- Transmitância das paredes;
- Absortância das paredes;
- Fator solar do vidro;
- Azimute da sala;
- PAF.

Os parâmetros variaram na mesma faixa de valores estabelecida na primeira etapa deste estudo. O ângulo do azimute da sala é determinado considerando-se o eixo entre a parede voltada para a circulação e a parede oposta.

O contato com o solo e a exposição da cobertura foram definidas como variáveis binárias, com o valor zero correspondendo à superfície adiabática, e 1 correspondendo à exposição. O parâmetro que representa a condição de exposição das paredes e janelas não foi representado com valores numéricos, e sim como uma variável de fatores, com cinco opções de exposição. Além das três opções apresentadas na Figura 1.16, considerou-se as exposições espelhadas. Os demais parâmetros foram normalizados com valores entre -1 e 1.

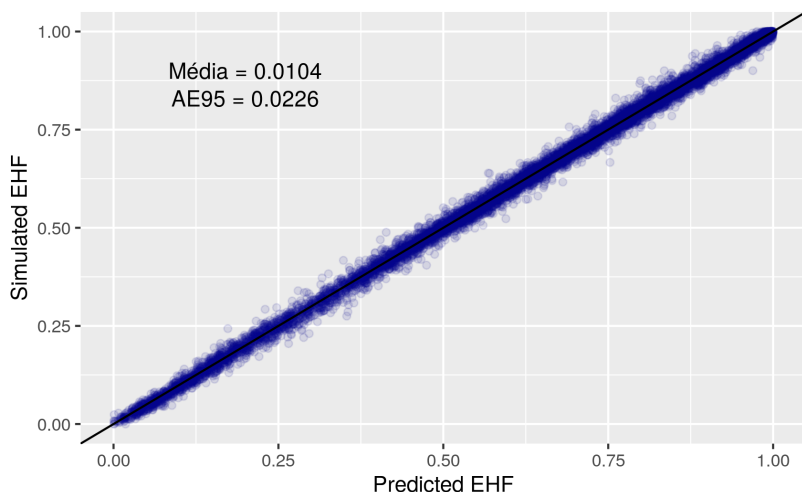
Figura 1.16: Condição de exposição das paredes e janelas.



O modelo de RNA final foi definido com duas camadas, umas de 50 nós, e a outra com 20. O algoritmo de otimização que obteve o melhor desempenho foi o *Adagrad's Optimizer*, disponibilizado pela biblioteca *TensorFlow*, com uma taxa de aprendizagem igual a 0,05.

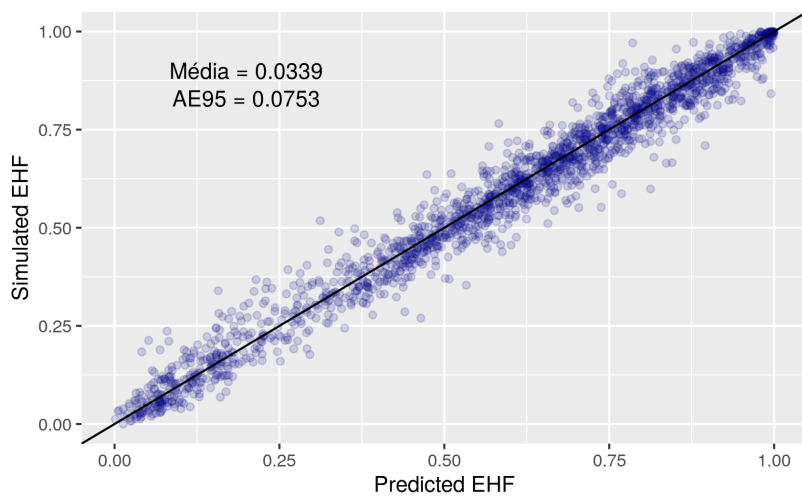
A Figura 1.17 apresenta um gráfico de pontos comparando os resultados de EHF obtidos para as simulações e para as estimativas da RNA, a partir da base de dados desenvolvida para a validação do metamodelo. A base de dados para a validação teve apenas os parâmetros incluídos no treinamento da RNA variados. O erro absoluto médio do EHF para os casos de validação foi 0,0104, com o AE95 igual a 0,0226.

Figura 1.17: Condição de exposição das paredes e janelas.



Outra comparação foi conduzida com a amostragem utilizada para a AS. Essa base de dados estava disponível, e não foi utilizada para o desenvolvimento da RNA, então ela foi escolhida para testar o desempenho da RNA quando todos os parâmetros avaliados neste estudo variam. A Figura 1.18 apresenta o gráfico de pontos comparando os resultados de EHF obtidos para as simulações e para as estimativas da RNA, a partir da base de dados da AS de sobol. O erro absoluto médio do EHF para os casos de validação foi 0,0104, com o AE95 igual a 0,0226.

Figura 1.18: Condição de exposição das paredes e janelas.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS