

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 1.2).

Figura 1.1: Distribuições de ocorrência

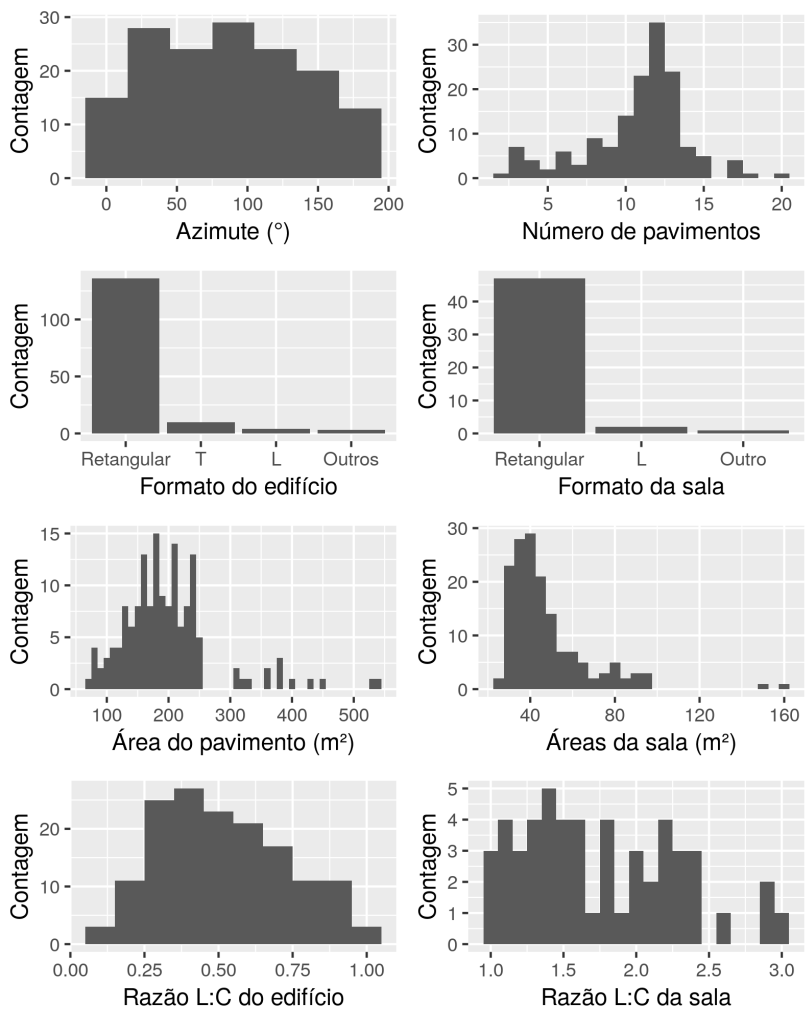
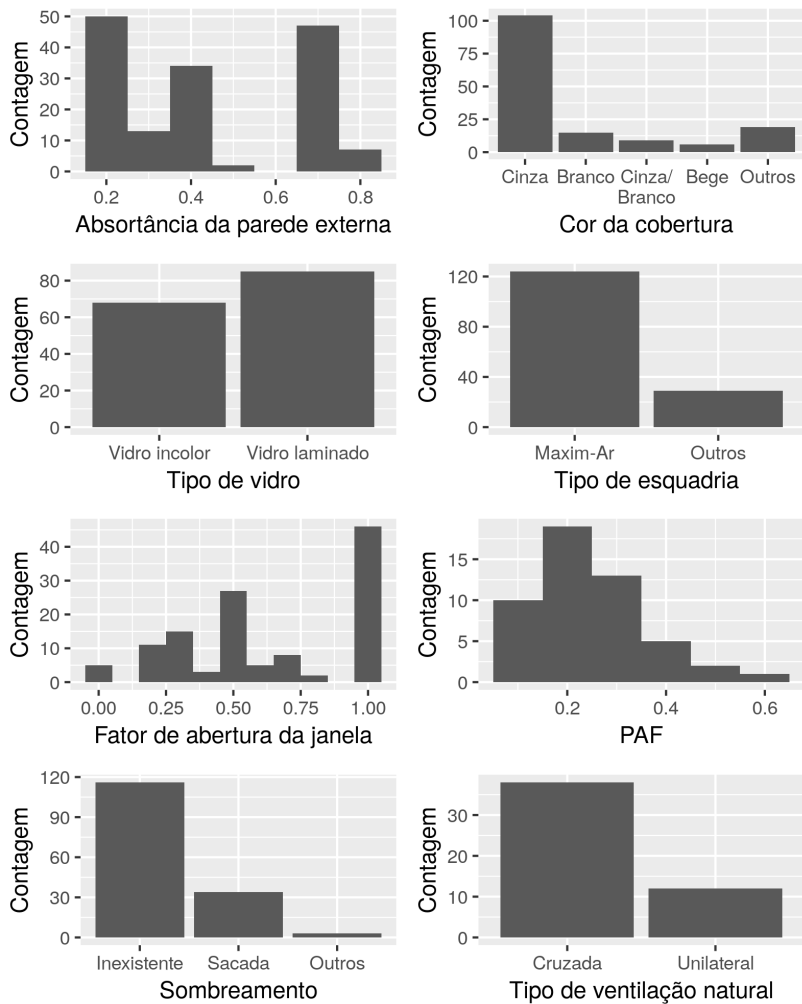


Figura 1.2: Continuação



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 baseadas em modelos de edificações retangulares, como 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 predominante. 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, ela abre apenas por baixo.

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.

As informações relacionadas ao tipo de vidro não permitem definir valores relacionados ao fator solar. 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.

A maioria das salas observadas possuem ventilação cruzada, mas a ventilação unilateral é uma estratégia com ocorrência considerável.

Os demais parâmetros observados variaram continuamente de acordo com as distribuições obtidas. Como modelou-se apenas um pavimento nas simulações de referência, 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

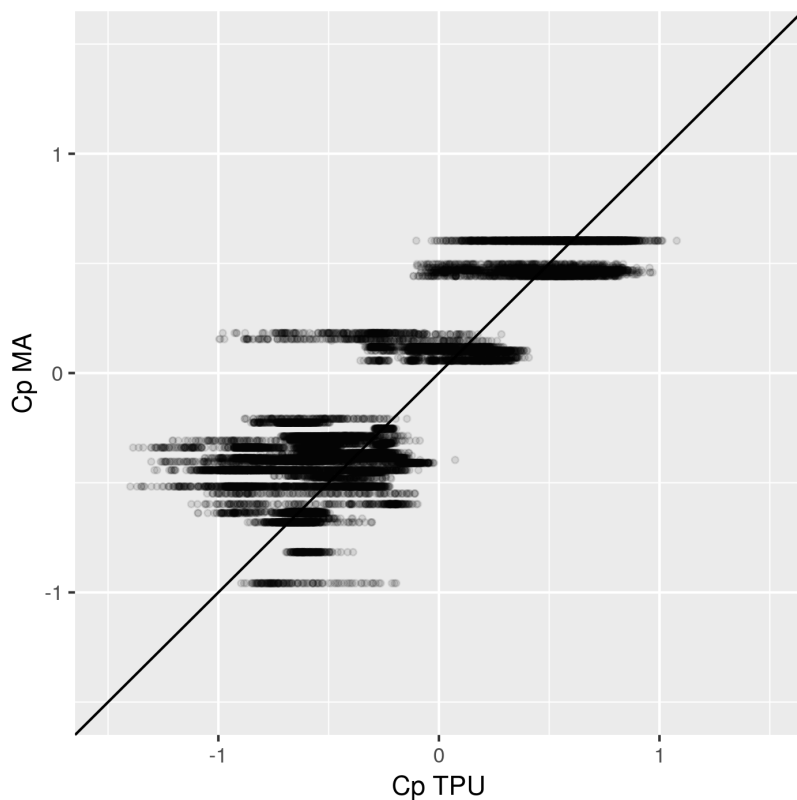
Parâmetro	Valores
Área da sala (m ²)	20 - 100
Razão L:C da sala (-)	0,4 - 2,5
Pé-direito (m)	2,3 - 3,2
Azimute (°)	0 - 360
Altura do pavimento (m)	0 - 50
Absortância da parede (-)	0,2 - 0,8
Transmitância da parede (W/m ² K)	0,5 - 4,4
Capacidade térmica da parede (kJ/m ² K)	0,22 - 450,00
PAF (-)	0,1 - 0,6
Fator solar do vidro (-)	0,20 - 0,87
Sombreamento (°)	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

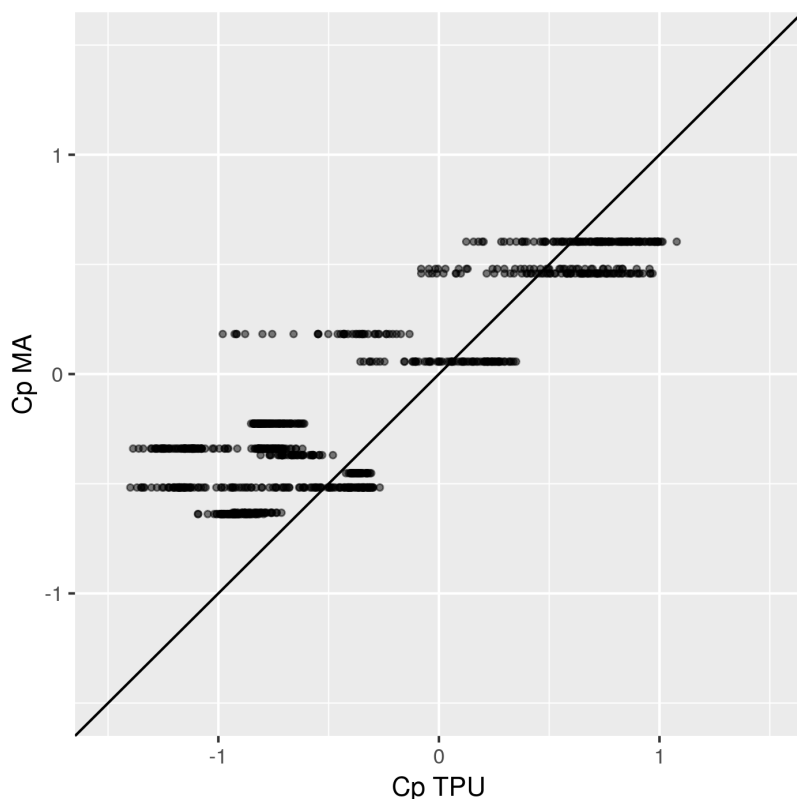
Ao comparar os valores dos coeficientes de pressão (C_p 's) das medições em túnel de vento da Universidade Politécnica de Tóquio (TPU) e os valores dos C_p 's obtidos pelo método analítico (MA), obteve-se o gráficos de pontos. A Figura 1.3 apresenta a comparação para as 25 geometrias diferentes, para 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 1.3 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 1.3: Comparação entre os valores de Cp das 25 geometrias



Dentre as geometrias analisadas, a proporção com a maior diferença absoluta média entre os valores dos Cp's obtidos pela base da TPU e obtidos pelo MA foi igual a 0,344, para a geometria da edificação *highrise* com proporções de largura, profundidade e altura igual a 2:1:2 (Figura 1.4).

Figura 1.4: Comparação entre os valores de C_p da geometria de proporções 2:1:2

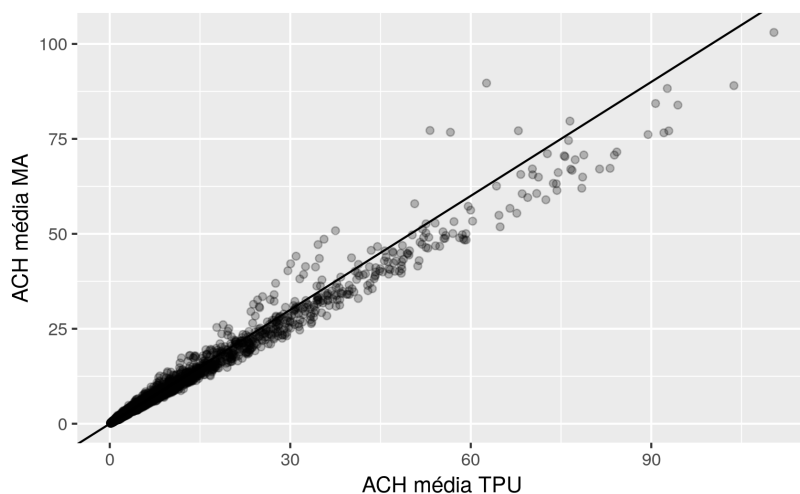


A partir da comparação conduzida, decidiu-se comparar as diferenças nos resultados de simulações termoenergéticas utilizando como base uma tipologia com proporções de largura, profundidade e altura igual a 2:1:2.

Os resultados das 1000 simulações foram comparados por gráficos de pontos. A comparação entre as médias das trocas de ar, apresentada na Figura 1.5, 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 das trocas de ar foi igual a -0,67 trocas de ar por hora (ACH), com o erro absoluto do 95º percentil (AE95) é igual a

5,23 ACH.

Figura 1.5: Comparação entre as médias das ACH



Apesar dessas diferenças nas trocas de ar, a comparação entre as temperaturas operativas médias, apresentada na Figura 1.6, 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 o a Figura 1.7, 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 1.6: Comparação entre as médias das temperaturas operativas

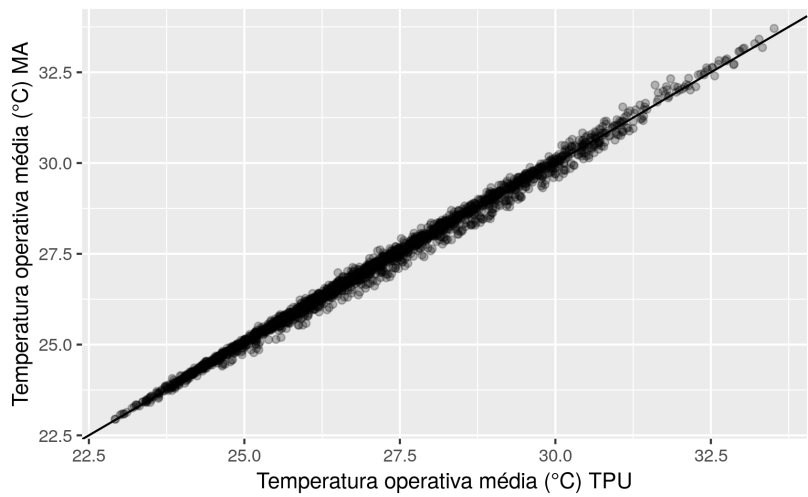
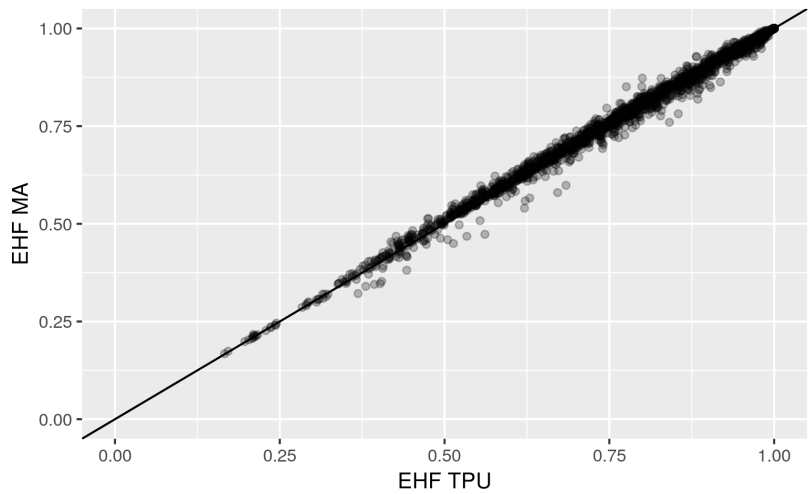


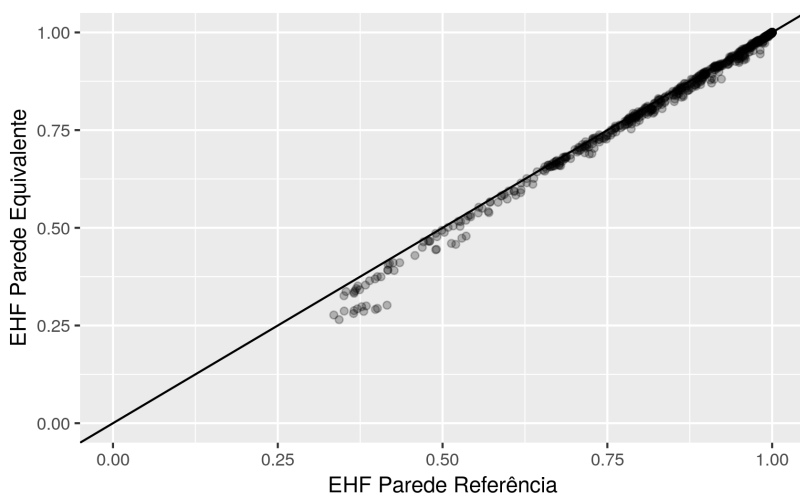
Figura 1.7: Comparação entre os resultados de EHF



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 mostram que o EHF é subestimado em um valor médio de 0,0099. Os resultados de EHF obtiveram um erro absoluto médio igual a 0,0100, e um AE95 igual a 0,0604 (Figura 1.8).

Figura 1.8: 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 1.9: Comparação entre os resultados de EHF para a parede de alvenaria com capacidade térmica total

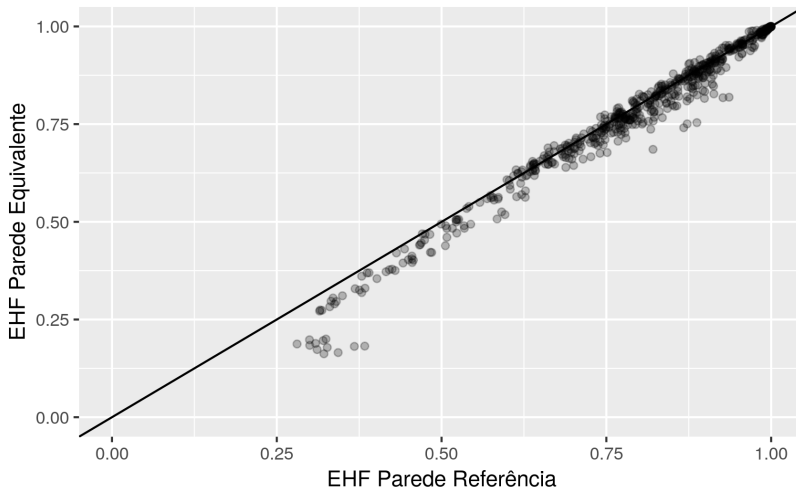
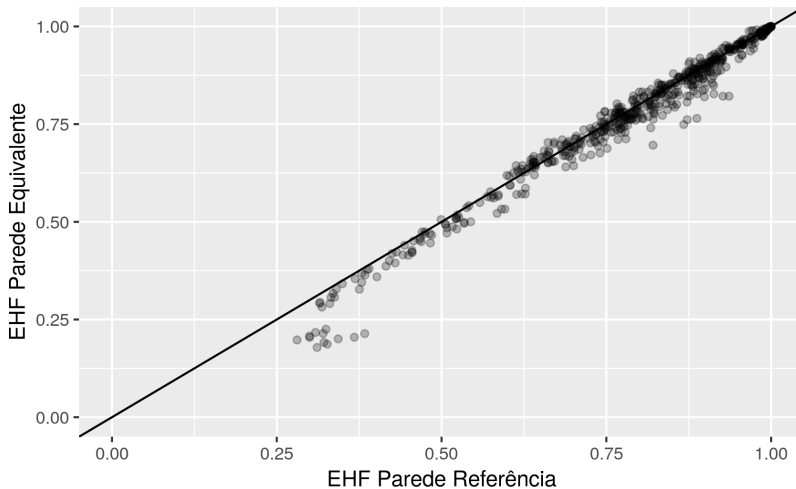


Figura 1.10: Comparação entre os resultados de EHF para a parede de alvenaria com metade da capacidade térmica

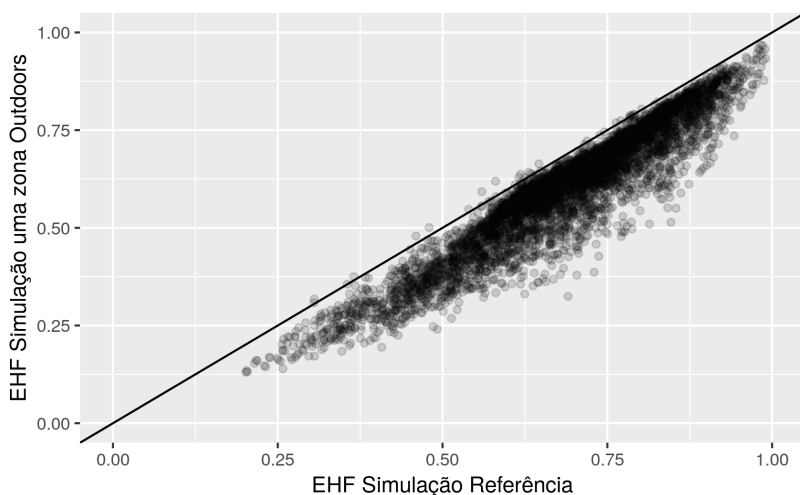


O caso com as maiores diferenças no EHF foi para uma edificação em contato com o solo, com cobertura exposta, e um fator de abertura da janela igual a 0,23. Apesar das diferenças nos resultados, o uso da parede equivalente facilita a parametrização da transmitância térmica e da capacidade térmica. Por 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 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 seja subestimados em 0,0868 em média, como AE95 igual a 0,1865 (Figura 1.11).

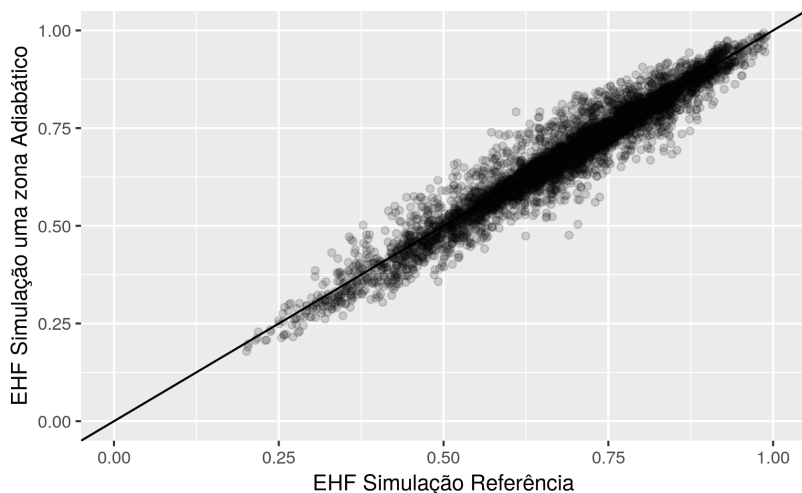
Figura 1.11: Comparação entre os resultados de EHF para parede *Outdoors*



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 1.12).

Figura 1.12: 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.

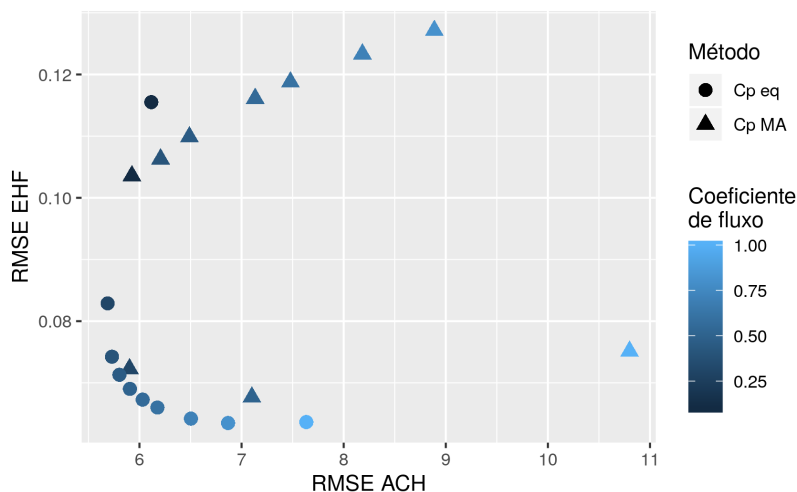
1.2.4 Modelagem da ventilação natural na simulação simplificada

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 1.13 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 às médias dos ACH. No entanto, foi identificada uma fronteira de Pareto entre os erros analisados, que mostra como a busca por menores erros de ACH aumento os erros relacionados ao EHF. O resultado dessa análise levanta duas hipóteses. 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 ACH sejam em casos onde as diferenças nas trocas de ar não sejam relevantes para alterar a temperatura operativa das zonas térmicas e, consequentemente, o EHF.

Figura 1.13: Eficiência de Pareto entre EHF e ACH



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 1.14, 1.15 e 1.16 apresentam os resultados das análises de sensibilidade (AS) para efeitos de primeira ordem e efei-

tos totais, relacionados às médias anuais de ACH, temperaturas operativas das zonas, e EHF. Os índices apresentados são proporcionais às influências entre os dados de entrada e saída.

Figura 1.14: AS de Sobol dos efeitos de primeira ordem e efeitos totais nas médias anuais de ACH

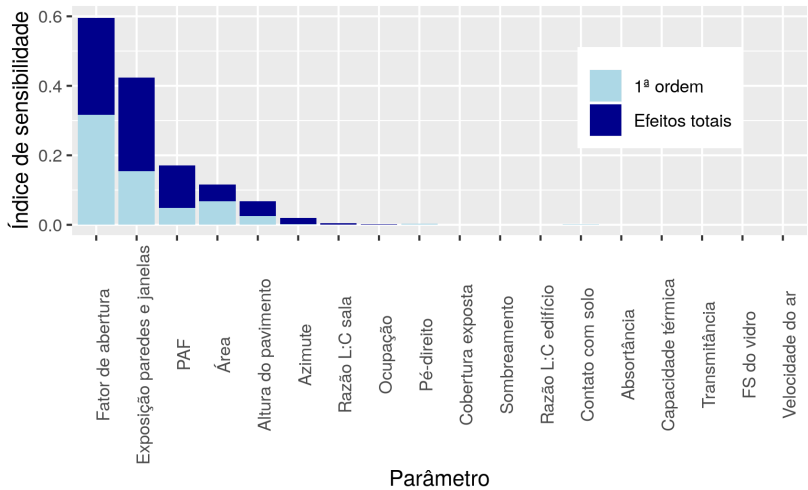


Figura 1.15: AS de Sobol dos efeitos de primeira ordem e efeitos totais nas temperaturas operativas

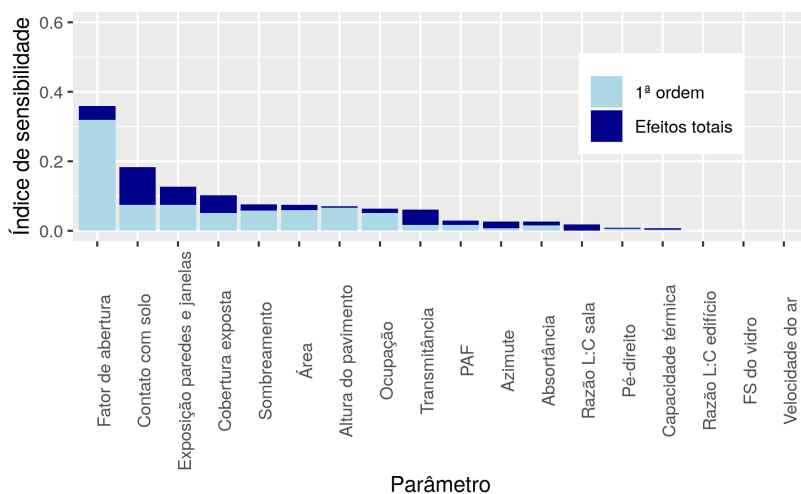
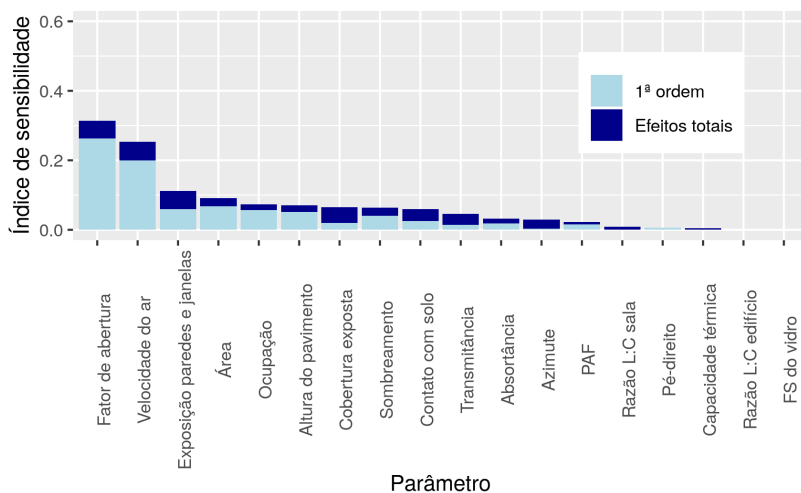


Figura 1.16: AS de Sobol dos efeitos de primeira ordem e efeitos totais no EHF



Os parâmetros mais influentes nas médias anuais de 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 determinar os coeficientes de pressão sobre as fachadas da edificação. Por isso, a influência deste parâmetro depende de outros parâmetros, relacionados às áreas e ao posicionamento das aberturas na zona. A velocidade do ar não influencia os resultados, pois é considerada apenas após o término das simulações, ao se calcular o EHF.

As análises relacionadas à temperatura operativa e ao EHF indicam a relevância dos parâmetros relacionados à ventilação natural. 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. Observa-se que os efeitos totais entre o segundo (contato com o solo) e o quarto (exposição da cobertura) parâmetro definidos como mais influentes na média anual de temperatura operativa são determinantes. Se fossem considerados apenas efeitos de primeira ordem, os índices de sensibilidade seriam muito semelhantes entre o segundo e o nono parâmetro mais influente. A transmitância das paredes, o azimute, e a razão entre a largura e o comprimento da sala apresentam baixos índices de sensibilidade para primeira ordem, porém têm efeitos totais relevantes. Isso indica que há colinearidade significativa 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.

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. Os valores fixos foram determinados a considerando-se os valores encontrados com mais frequência, com exceção dos parâmetros relacionados às proporções entre largura e profundidade das salas e edifícios, que 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
Fator solar do vidro (-)	0,87

1.2.6 Desenvolvimento do metamodelo

A partir das 100.000 simulações geradas para o treinamento da rede neural artificial (RNA), obteve-se resultados de EHF variando entre 0,00 e 1,00.

O metamodelo final foi definido com 13 parâmetros:

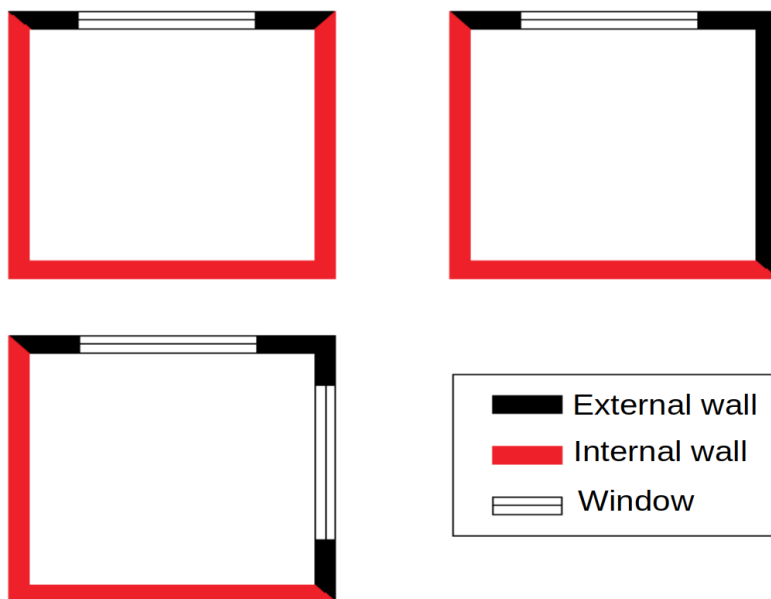
- Fator de abertura das janelas;
- Velocidade do ar;
- Condição de exposição das paredes e janelas;
- Área da sala;
- Densidade de ocupação;
- Altura do pavimento;
- Exposição da cobertura;
- Sombreamento horizontal;

- Contato com o solo;
- Transmitância das paredes;
- Absortância das paredes;
- 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 porta e a janela em frente à porta.

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 1.17, considerou-se as exposições espelhadas. Os demais parâmetros foram normalizados com valores entre -1 e 1.

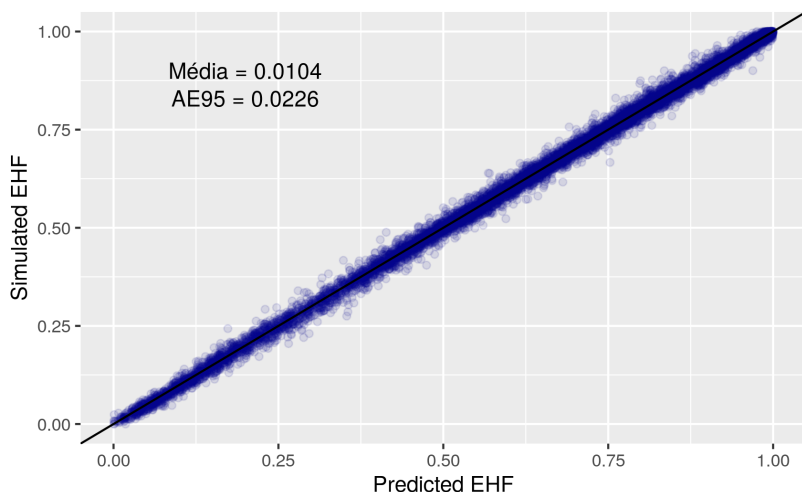
Figura 1.17: Condição de exposição das paredes e janelas.



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.

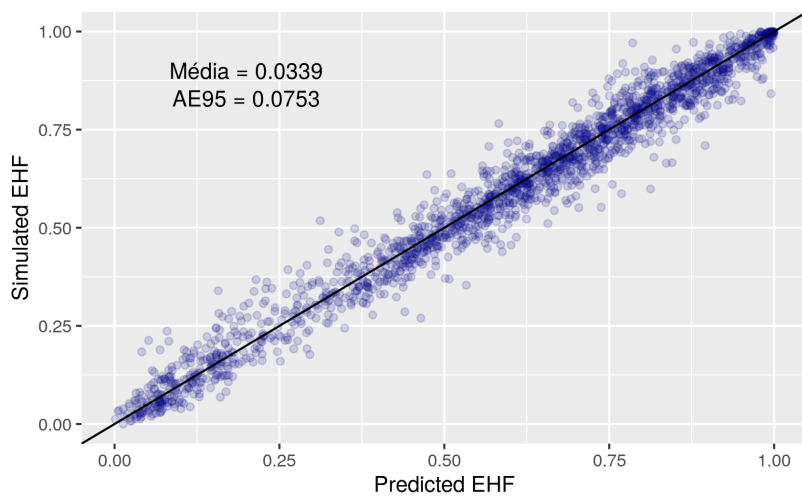
A Figura ?? apresenta um gráfico de pontos comparando os resultados de EHF obtidos para as simulações e para as estimativas da RNA, a partir da base de dados desenvolvida para a validação do metamodelo. A base de dados para a validação teve apenas os parâmetros incluídos no treinamento da RNA variados.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

Figura 1.18: 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 ?? 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 1.19: Condição de exposição das paredes e janelas.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS