

FACHADAS DUPLAS

Análise do Desempenho Termoenergético em Edifícios Comerciais no Contexto Climático de Brasília - DF



Thiago Montenegro Góes

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO**

FACHADAS DUPLAS

**Análise do Desempenho Termoenergético em Edifícios Comerciais no Contexto
Climático de Brasília - DF**

THIAGO MONTENEGRO GÓES

ORIENTADOR: CAIO FREDERICO E SILVA

MESTRADO EM ARQUITETURA E URBANISMO

BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO – 2018

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO**

FACHADAS DUPLAS

**Análise do Desempenho Termoenergético em Edifícios Comerciais no Contexto
Climático de Brasília - DF**

THIAGO MONTENEGRO GÓES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO DA FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO REQUISITO OBRIGATÓRIO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ARQUITETURA E URBANISMO.

APROVADA POR:

Dr. Prof. Caio Frederico e Silva, Dr. (FAU/UnB)
(Orientador)

Dra. Prof^a Cláudia Naves David Amorim, Dra. (FAU/UnB)
(Examinador Interno)

Dra. Prof^a. Veridiana Atanasio Scalco, Dra. (PósARQ/UFSC)
(Examinador Externo)

Dra. Prof^a. Joára Cronemberger Ribeiro Silva, Dra. (FAU/UnB)
(Suplente)

BRASÍLIA/DF, 14 DE DEZEMBRO 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

GÓES, THIAGO MONTENEGRO
FACHADAS DUPLAS: Análise do Desempenho Termoenergético em Edifícios Comerciais no Contexto Climático de Brasília - DF [Distrito Federal] 2018.
xvi, 133 p., 210 x 297 mm (PPG-FAU/UnB, Mestre, Arquitetura e Urbanismo, 2018).
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo.
1. Desempenho Termoenergético 2. Fachada Dupla
3. Simulação Termoenergética 4. Clima Quente
I. FAU/UnB II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GÓES, T. M. (2018). **Fachadas Duplas: Análise do Desempenho Termoenergético em Edifícios Comerciais no Contexto Climático de Brasília - DF**. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 133 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Thiago Montenegro Góes

TÍTULO: Fachadas Duplas: Análise do Desempenho Termoenergético em Edifícios Comerciais no Contexto Climático de Brasília – DF.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta qualificação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Thiago Montenegro Góes
SQS 408, Bloco R, ap. 303
CEP: 70.257-180 Brasília-DF - Brasil
e-mail: tgoes@hotmail.com

Todo o conhecimento é uma resposta a uma pergunta.

Thomas Henry Huxley

AGRADECIMENTOS

O caminho percorrido durante a realização desse mestrado não foi solitário. De fato, sua concretização não seria possível sem inúmeras contribuições.

Primeiramente, agradeço a minha família, especialmente aos meus pais, Martha e José Eduardo, a minha madrastra, Marialice, e aos meus avós, Dora, Evandro e Maria Aparecida, que sempre me dão grande suporte, tanto nos bons, como especialmente nos maus momentos. A vocês, devo tudo que tenho hoje.

Em segundo lugar, agradeço a oportunidade de participar do curso de especialização *lato sensu* REABILITA, sem o qual, não teria ingressado no mestrado na UnB. Sou muito grato a toda a equipe, à professora Marta Romero, ao meu tutor, professor Gustavo Luna, ao coordenador, Ederson Teixeira, entre tantos outros. Em especial, ao Valmor Pazos, que foi quem me convenceu a fazer a especialização e sem esse pequeno passo nada disso seria possível.

Também me sinto muito honrado por toda companhia e apoio que tive durante a realização do mestrado. Todos os colegas com quem tive a oportunidade de conviver contribuíram muito na minha formação, tanto acadêmica quanto como pessoa. São muitos colegas, mas não posso deixar de agradecer aos colegas de SiCAC, Rafael Rios, João Renato, Paulo Cabral Neto, Fernanda Moreira; do LASUS, Abner Calixter, Ana Carolina Sant'Ana e Daniela Werneck; e do LACAM, Ayanna Dantas e João Walter. Em especial aos colegas com quem compartilhei as orientações esse ano e muito contribuíram nessa caminhada, Adriano Lopes e Bárbara Gomes.

Aos mestres com quem tive o privilégio de receber diversos ensinamentos tanto dentro como fora da sala de aula, meu eterno agradecimento. Especialmente aos professores que puderam contribuir de forma direta à realização desta dissertação: Vanda Zanoni, Raquel Blumenschein, Cláudia Amorim, Joára Cronemberger, além dos professores mencionados anteriormente, Marta Romero e Gustavo Luna.

Não posso deixar de agradecer à Universidade de Brasília, que me acolheu tão bem, e à CAPES, pelo apoio financeiro à realização desta pesquisa.

Por último, agradeço ao meu orientador, professor Caio Frederico e Silva, que esteve ao meu lado em toda essa caminhada, com seus conselhos e conhecimentos. Mas, mais do que isso, compartilhou sua amizade. Sou muito grato pelo companheirismo e exemplo de professor e pessoa, que muito me inspiram.

RESUMO

A nova agenda da construção civil exige edificações mais eficientes e com menor dependência energética. Nesse sentido, as fachadas duplas representam soluções que visam contribuir à melhoria do desempenho energético das edificações. Diante desse contexto, esta pesquisa propõe-se a analisar o desempenho termoenergético do emprego de fachada dupla em edifícios verticais de uso comercial, considerando-se o clima de Brasília. Alinhado a isso, investiga-se o impacto de parâmetros de projeto de fachada dupla no consumo energético do sistema de condicionamento, por meio da análise da carga térmica de resfriamento. O método deste trabalho baseia-se em estudos paramétricos por meio da ferramenta de simulação termoenergética *EnergyPlus* versão 8.5 e da interface gráfica *DesignBuilder* versão 5.2. Essa etapa é composta de quatro ciclos de simulações, nas quais se analisa isoladamente o impacto da variação de cada parâmetro. Especificamente, analisam-se parâmetros relativos aos materiais, permeabilidade da pele externa, a largura, altura e tipo da cavidade e orientação da fachada, assim como o emprego do condicionamento híbrido. Os resultados mostram que o emprego de fachada dupla no contexto climático de Brasília pode melhorar o desempenho termoenergético da edificação em até 30,6%. Observa-se que a orientação da fachada possui grande relevância no desempenho e possibilita melhores resultados no quadrante norte. O desempenho de fachadas duplas envidraçadas do tipo de *shaft-box* apresenta-se significativamente inferior ao dos demais tipos. Já na fachada dupla híbrida, as menores taxas de permeabilidade — inferiores a 50% — possuem melhor desempenho. Conclui-se que o emprego da fachada dupla híbrida possibilita isoladamente uma melhoria média superior a 6% em comparação com o caso de referência — sem fachada dupla, enquanto nas situações mais favoráveis a melhoria atinge 10%. Por outro lado, com emprego do condicionamento híbrido, há uma melhoria do desempenho termoenergético em média de 20% em comparação com os mesmos cenários sem o emprego do condicionamento híbrido. Além disso, as fachadas duplas híbridas possuem desempenho significativamente superior às alternativas envidraçadas no contexto climático de Brasília, com uma diferença média aproximada de 7%. Dessa forma, não se recomenda a utilização de fachadas duplas envidraçadas no contexto climático de Brasília, contudo percebe-se o grande potencial de melhoria relativo a intervenções adequadas ao clima, como sombreamento e ventilação controlada no contexto climático de Brasília.

Palavras-chave: Fachada dupla. Clima quente. Edifício comercial. Desempenho termoenergético. Simulação computacional. Estudo paramétrico.

ABSTRACT

The construction industry new agenda demands more efficient buildings with less energy dependency. In this sense, double skin façades represent solutions that aim to contribute especially to the improvement of building's energetic performance. In this context, this research purpose to analyze the double skin façade thermal energetic performance in commercial vertical buildings in Brasilia's climate. In accordance with, it is investigated the impact of many double skin façade design parameters in the air condition energy consumption, via the thermal cooling load. Especially, it is analyzed the materiality, the outer skin permeability ratio, the cavity width, height and type and the façade orientation, as the hybrid approach to space conditioning – or hybrid ventilation – application to aid the building HVAC system. A parametric study is carried with *EnergyPlus* version 8.5 and the graphical user interface *DesignBuilder* version 5.4. This study is divided in four simulation cycles, in which it is analyzed singly the parameter variation impact. The results show that the double skin façade application in Brasilia's climate can improve the thermal energetic performance up to 30,6%. It is observed that the façade orientation plays a major role in the performance and enables better results in the north quadrant. The shaft-box glazed double skin façade performance shows significantly inferior performance than the other cavity types. For the hybrid double skin façade, the lower permeability ratios – inferior than 50% – have better performance. In conclusion, the hybrid double skin façade sole application improves in average more than 6% in comparison with the reference case – without double skin façade; while in the favorable conditions, there is a 10% improvement. In the other hand, the hybrid ventilation can improve the thermal energetic performance 20% in average with the same scenarios without hybrid ventilation. Furthermore, hybrid double skin façades have significantly superior performance than their glazed counterparts in Brasilia's climate, with an approximated average difference of 7%. The glazed double skin façades only show superior performance than the reference case in special conditions of façade orientation, cavity width, height and type, and even there, there is only a 5,5% improvement. Thus, it is not recommended the glazed double skin façade employment in Brasilia's climate, however it is worth noting the great potential of improvement related to climate adequate solutions, like shading and controlled ventilation in Brasilia's climate.

Keywords: Double skin façade. Warm climate. Commercial buildings. Thermal energetic performance. Building performance simulation. Parametric study.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	PROBLEMÁTICA	4
1.2	JUSTIFICATIVA	6
1.3	OBJETIVOS	7
1.3.1	<i>Objetivo Geral</i>	7
1.3.2	<i>Objetivos Específicos</i>	7
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	8
2	FACHADAS DUPLAS	11
2.1	DA ENVOLTÓRIA ÀS FACHADAS DUPLAS	12
2.2	DEFINIÇÃO DE SISTEMA DE FACHADAS DUPLAS	13
2.3	BREVE HISTÓRICO DAS FACHADAS DUPLAS	14
2.4	O DESEMPENHO DE FACHADAS DUPLAS	18
2.4.1	<i>O Desempenho Termoenergético</i>	20
2.4.2	<i>Limitações das Fachadas Duplas</i>	21
2.5	CLASSIFICAÇÕES DAS FACHADAS DUPLAS	23
2.5.1	<i>Classificação pela Geometria</i>	24
2.5.2	<i>Classificação pela Forma de Ventilação da Cavidade</i>	28
2.6	FACHADAS DUPLAS EM CLIMAS QUENTES	32
2.7	FACHADAS DUPLAS NO CONTEXTO CLIMÁTICO DE BRASÍLIA	34
2.7.1	<i>Recomendações Bioclimáticas</i>	36
2.7.2	<i>Aplicabilidade das Fachadas Duplas em Brasília</i>	37
2.8	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1	MÉTODO	41
3.1.1	<i>Estudo Exploratório</i>	44
3.1.2	<i>Indicadores de Desempenho</i>	51
3.1.3	<i>Métodos de Simulação</i>	53
3.2	MATERIAIS	55
3.2.1	<i>Programa de Simulação Computacional</i>	55
3.3	PROCEDIMENTOS	56
3.3.1	<i>Caracterização Geral do Modelo</i>	59
3.3.2	<i>1º Ciclo: Definição do Tipo de Vidro das Fachadas Duplas</i>	61
3.3.3	<i>2º Ciclo: Avaliação das Fachadas Duplas Envidraçadas</i>	62
3.3.4	<i>Caracterização Geral do Modelo aos 3º e 4º Ciclos</i>	66
3.3.5	<i>3º Ciclo: Fachadas Duplas Híbridas</i>	67
3.3.6	<i>4º Ciclo: Avaliação da Ventilação Cruzada</i>	71
3.3.7	<i>Análise Estatística</i>	73
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
4.1	AVALIAÇÃO DO VIDRO DA PELE EXTERNA DAS FACHADAS DUPLAS	75
4.2	AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DAS FACHADAS DUPLAS ENVIDRAÇADAS	77
4.3	AVALIAÇÃO DAS FACHADAS DUPLAS	85
4.3.1	<i>Avaliação das Fachadas Duplas Envidraçadas e Híbridas</i>	85
4.3.2	<i>Avaliação do Emprego do Condicionamento Híbrido</i>	96
4.3.3	<i>Resultados Gerais</i>	107
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	110
5	CONCLUSÃO	113
5.1	SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	116
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	119
	APÊNDICE A	127
	APÊNDICE B	131

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Fábrica Steiff	14
Figura 2 Fachada do edifício Hooker Office, de Cannon Design e HOK	16
Figura 3 Átrio do edifício <i>Lloyds</i> de Richard Rogers	17
Figura 4 Fachada do edifício SUVA de Herzog e De Meuron	17
Figura 5 Fachada dupla tipo <i>box-window</i>	25
Figura 6 Fachada dupla tipo <i>shaft-box</i>	26
Figura 7 Fachada dupla tipo corredor	27
Figura 8 Fachada dupla tipo múltiplos andares	28
Figura 9 Corte esquemático do funcionamento da fachada dupla de armazenamento	29
Figura 10 Corte esquemático do funcionamento da fachada dupla com extração de ar	30
Figura 11 Corte esquemático do funcionamento da fachada dupla gêmea	31
Figura 12 Corte esquemático do funcionamento da fachada dupla híbrida	32
Figura 13 Mapa da divisão climática do Brasil	34
Figura 14 Serie da média mensal da precipitação	35
Figura 15 Serie da média mensal da umidade relativa do ar	35
Figura 16 Serie das médias máximas e mínimas mensais da temperatura	36
Figura 17 Fluxograma das etapas da pesquisa	42
Figura 18 Modelo virtual da tipologia simulada sem (esq.) e com (dir.) fachada dupla	45
Figura 19 Divisão das zonas térmicas dos pavimentos sem a aplicação da fachada dupla	47
Figura 20 Divisão das zonas térmicas dos pavimentos com a aplicação da fachada dupla	47
Figura 21 Diagrama entre os indicadores de desempenho e as variáveis arquitetônicas	52
Figura 22 Diagrama das possibilidades de divisão de zonas na cavidade da fachada dupla no modelo de rede de ventilação.	55
Figura 23 Diagrama das etapas do processo de coleta de dados, análise de dados e discussão dos resultados	57
Figura 24 Modelo virtual com somente um pavimento tipo para avaliação do tipo de vidro da pele externa da fachada dupla	61
Figura 25 Tipologia de fachada dupla envidraçada do 2º ciclo de simulações	62
Figura 26 Corte esquemático dos tipos de cavidade de fachadas duplas analisadas	64
Figura 27 <i>Designs</i> resultantes da combinação dos tipos de cavidade corredor e <i>shaft-box</i> pelas alturas de cavidade	65
Figura 28 Tipologia do 3º e 4º ciclos aberturas na fachada oposta a fachada dupla	67
Figura 29 Caracterização da geometria da pele externa das fachadas duplas híbridas	71
Figura 30 Densidade de ocupação e outras cargas do <i>template Domestic Lounge</i>	127
Figura 31 Rotina de ocupação do <i>template Domestic Lounge</i>	128
Figura 32 Densidade de ocupação e outras cargas do <i>template Domestic Circulation</i>	128
Figura 33 Rotina de ocupação do <i>template Domestic Circulation</i>	129
Figura 34 Densidade de ocupação e outras cargas do <i>template None e Zone type Cavity</i>	131
Figura 35 Rotina de ocupação do <i>template None e Zone type Cavity</i>	132
Figura 36 Densidade de ocupação e outras cargas do <i>template Generic Office Area</i>	132
Figura 37 Rotina de ocupação do <i>template Generic Office Area</i>	133

LISTA DE TABELA

Tabela 1 Porcentagem de horas de aplicabilidade de estratégia para mitigar o desconforto	37
Tabela 2 Caracterização dos materiais empregados na pele externa da fachada dupla no exercício exploratório	46
Tabela 3 Caracterização física dos sistemas de envoltória.....	48
Tabela 4 Propriedades térmicas dos sistemas construtivos por meio do modelo de camadas equivalentes	60
Tabela 5 Propriedades térmicas dos vidros	62
Tabela 6 Codificação do parâmetro da largura da cavidade.....	63
Tabela 7 Codificação do parâmetro da altura da cavidade.....	64
Tabela 8 Codificação do parâmetro de largura da cavidade de fachadas duplas envidraçadas	68
Tabela 9 Codificação do parâmetro de largura da cavidade de fachadas duplas híbridas	69
Tabela 10 Codificação do parâmetro de permeabilidade da pele externa de fachadas duplas híbridas	69
Tabela 11 Codificação geral dos cenários de fachadas duplas híbridas.....	70
Tabela 12 Propriedades físicas do CIBSE Guide A (2006) à madeira empregada como elemento de sombreamento	70
Tabela 13 Codificação do parâmetro de largura da cavidade de fachadas duplas envidraçadas com emprego de condicionamento híbrido	72
Tabela 14 Codificação do parâmetro de largura da cavidade de fachadas duplas híbridas com emprego de condicionamento híbrido	73
Tabela 15 Codificação do parâmetro de permeabilidade da pele externa de fachadas duplas híbridas com emprego de condicionamento híbrido	73
Tabela 16 Codificação geral dos cenários de fachadas duplas híbridas com emprego de condicionamento híbrido	73
Tabela 17 Teste Tukey às amostras de altura da cavidade.....	79
Tabela 18 Teste Tukey às amostras de tipo da cavidade	81
Tabela 19 Teste Tukey às amostras de design da cavidade	82
Tabela 20 Teste Tukey às amostras de largura da cavidade.....	83
Tabela 21 Teste Tukey da carga térmica de resfriamento pela largura da cavidade.....	87
Tabela 22 Teste Tukey da carga térmica de resfriamento pela permeabilidade da pele externa	90
Tabela 23 Teste Tukey da carga térmica de resfriamento pela largura da cavidade.....	91
Tabela 24 Teste Tukey da carga térmica de resfriamento pela largura da cavidade para fachadas duplas envidraçadas com condicionamento híbrido	98
Tabela 25 Teste Tukey da carga térmica de resfriamento pela permeabilidade da pele externa para fachadas duplas híbridas com condicionamento híbrido	101
Tabela 26 Teste Tukey da carga térmica de resfriamento pela largura da cavidade para fachadas duplas híbridas com condicionamento híbrido	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 Estrutura e conteúdo da dissertação	10
Quadro 2 Vantagens do emprego de fachada dupla	19
Quadro 3 Desvantagens do emprego de fachada dupla	23
Quadro 4 Codificação do parâmetro do tipo da cavidade	64
Quadro 5 Codificação do parâmetro de <i>designs</i> da cavidade	66
Quadro 6 Comparação entre fachadas duplas híbridas e envidraçadas sem condicionamento híbrido	96
Quadro 7 Comparação entre fachadas duplas híbridas e envidraçadas com condicionamento híbrido	107

GLOSSÁRIO DE TERMOS

Espaço intermediário: espaço que não se caracteriza totalmente como interno nem externo, possuindo atributos de ambíguos. Desempenha papel semelhante a envoltória por intermediar as relações entre os ambientes internos e externos. São ser por exemplo uma varanda ou átrio.

Fachada espacializada: adaptação das fachadas decorrente da desmaterialização dos tradicionais elementos construídos da arquitetura contemporânea, em que espaços desempenham função de intermediação e regulação entre o interior e exterior da edificação como um elemento de envoltória. São ser por exemplo *brise-soleil*, uma varanda, átrios, até mesmo elementos de fachadas responsivas, assim como as próprias fachadas duplas.

Fachadas duplas: sistema construtivo de vedação vertical que decorre da adição de uma camada (pele) sobre a fachada. Assim, constitui-se de uma pele interna, uma pele externa e uma cavidade entre elas que pode variar de alguns centímetros a poucos metros.

Fachadas duplas envidraçadas: solução de fachada dupla onde a pele externa do sistema é constituída totalmente de elemento translúcidos.

Fachadas duplas híbridas: variação da fachada dupla tradicional envidraçada onde a pele externa do sistema constitui-se de elementos opacos e aberturas sem a utilização de elementos translúcidos.

Cavidade da fachada dupla: espaço entre as duas peles (interna e externa) da fachada dupla.

Pele externa da fachada dupla: elemento do sistema da fachada dupla que se localiza entre o ambiente externo e a cavidade.

Permeabilidade da pele externa da fachada dupla: A taxa de permeabilidade da pele externa da fachada dupla é referente a porcentagem entre as áreas abertas – que permite a passagem de ar; e áreas fechadas, somente relativas a pele externa da fachada dupla.

Materialidade da pele externa da fachada dupla: refere-se ao tipo de solução de fachada dupla, envidraçada ou híbrida.

Condicionamento híbrido: Edifícios com condicionamento híbrido, ou modo misto de ventilação utilizam tanto a ventilação natural como sistemas mecânicos ao condicionamento do ambiente.

Retrofit: reforma ou intervenções para modernização de edificação com o intuito de melhoria do desempenho da mesma.

GLOSSÁRIO DE CÓDIGOS

CÓDIGOS RELATIVOS AO SEGUNDO CICLO DE SIMULAÇÕES

C0: caso de referência ou controle, sem o emprego de fachadas duplas relativo ao segundo ciclo de simulações.

L1: largura da cavidade de 0,50 metros.

L2: largura da cavidade de 1,00 metros.

L3: largura da cavidade de 1,50 metros.

L4: largura da cavidade de 2,00 metros.

L5: largura da cavidade de 2,50 metros.

H1: altura da cavidade de 10,50 metros, equivalente a 3 andares.

H2: altura da cavidade de 21,00 metros, equivalente a 6 andares.

H3: altura da cavidade de 31,50 metros, equivalente a 12 andares.

T1: cavidade tipo corredor.

T2: cavidade tipo *shaft-box*.

T3: cavidade tipo múltiplos andares.

D1: design da cavidade relativo a combinação do tipo de cavidade T1 e altura da cavidade H1.

D2: design da cavidade relativo a combinação do tipo de cavidade T1 e altura da cavidade H2.

D3: design da cavidade relativo a combinação do tipo de cavidade T1 e altura da cavidade H3.

D4: design da cavidade relativo a combinação do tipo de cavidade T2 e altura da cavidade H1.

D5: design da cavidade relativo a combinação do tipo de cavidade T2 e altura da cavidade H2.

D6: design da cavidade relativo a combinação do tipo de cavidade T2 e altura da cavidade H3.

D7: design da cavidade relativo a combinação do tipo de cavidade T3 e altura da cavidade H3.

CÓDIGOS RELATIVOS AO TERCEIRO CICLO DE SIMULAÇÕES

C0_sVN: caso de referência ou controle, sem o emprego de fachadas duplas relativo ao terceiro ciclo de simulações, sem o emprego de ventilação natural controlada.

V_L1: fachada dupla envidraçada com largura da cavidade de 0,50 metros.

V_L2: fachada dupla envidraçada com largura da cavidade de 1,00 metros.

V_L3: fachada dupla envidraçada com largura da cavidade de 1,50 metros.

V_L4: fachada dupla envidraçada com largura da cavidade de 2,00 metros.

V_L5: fachada dupla envidraçada com largura da cavidade de 2,50 metros.

H_L1: fachada dupla híbrida com largura da cavidade de 0,50 metros.

H_L2: fachada dupla híbrida com largura da cavidade de 1,00 metros.

H_L3: fachada dupla híbrida com largura da cavidade de 1,50 metros.

H_L4: fachada dupla híbrida com largura da cavidade de 2,00 metros.

H_L5: fachada dupla híbrida com largura da cavidade de 2,50 metros.

H_P1: fachada dupla híbrida com permeabilidade da pele externa de 66%.

H_P2: fachada dupla híbrida com permeabilidade da pele externa de 50%.

H_P3: fachada dupla híbrida com permeabilidade da pele externa de 33%.

CÓDIGOS RELATIVOS AO QUARTO CICLO DE SIMULAÇÕES

C0_cVN: caso de referência ou controle, sem o emprego de fachadas duplas relativo ao quarto ciclo de simulações, com o emprego de ventilação natural controlada.

V_NV_L1: fachada dupla envidraçada com o emprego de condicionamento híbrido com largura da cavidade de 0,50 metros.

V_NV_L2: fachada dupla envidraçada com o emprego de condicionamento híbrido com largura da cavidade de 1,00 metros.

V_NV_L3: fachada dupla envidraçada com o emprego de condicionamento híbrido com largura da cavidade de 1,50 metros.

V_NV_L4: fachada dupla envidraçada com o emprego de condicionamento híbrido com largura da cavidade de 2,00 metros.

V_NV_L5: fachada dupla envidraçada com o emprego de condicionamento híbrido com largura da cavidade de 2,50 metros.

H_NV_L1: fachada dupla híbrida com o emprego de condicionamento híbrido com largura da cavidade de 0,50 metros.

H_NV_L2: fachada dupla híbrida com o emprego de condicionamento híbrido com largura da cavidade de 1,00 metros.

H_NV_L3: fachada dupla híbrida com o emprego de condicionamento híbrido com largura da cavidade de 1,50 metros.

H_NV_L4: fachada dupla híbrida com o emprego de condicionamento híbrido com largura da cavidade de 2,00 metros.

H_NV_L5: fachada dupla híbrida com o emprego de condicionamento híbrido com largura da cavidade de 2,50 metros.

H_NV_P1: fachada dupla híbrida com o emprego de condicionamento híbrido com permeabilidade da pele externa de 66%.

H_NV_P2: fachada dupla híbrida com o emprego de condicionamento híbrido com permeabilidade da pele externa de 50%.

H_NV_P3: fachada dupla híbrida com o emprego de condicionamento híbrido com permeabilidade da pele externa de 33%.

1 INTRODUÇÃO

As edificações consomem aproximadamente um terço de toda a energia gerada no mundo somente na fase de operação, o que representa quase um quarto das emissões de CO₂ (IPCC, 2007). Nos países desenvolvidos, esse consumo chega a 40% de toda a energia gerada, o que representa 70% de toda a energia elétrica produzida; no Brasil, esses valores correspondem a 14% e 47%, respectivamente (PESSOA *et al.*, 2013). A construção civil é a principal indústria responsável pela degradação ambiental — tanto na fase de construção quanto nas de operação e manutenção — com consumo de mais de 50% de toda a matéria-prima extraída da natureza (RUUSKA, HÄKKINEN, 2014).

A atual preocupação com a pauta energética remonta à crise do petróleo dos anos 70 do século XX, quando este se torna tema prioritário de diversas iniciativas internacionais de mitigação dos impactos ambientais decorrentes da ação humana. Nesse contexto, elabora-se o conceito de desenvolvimento sustentável (WCED, 1987) — assim como diversas diretrizes nesse sentido — que atualmente influencia as atividades humanas.

Nas últimas décadas, têm ocorrido diversos avanços na indústria da construção a partir de um processo de inovação dos seus meios de produção, na busca de uma construção mais sustentável. Desenvolveram-se meios mais eficientes, como: o uso de materiais construtivos de menor impacto ambiental, a análise do ciclo de vida da edificação, a busca da conservação da água, entre outros. Contudo, apesar de o desenvolvimento sustentável estar relacionado à conservação ambiental, essa abordagem ainda é fundamentada no desenvolvimento econômico.

Assim, a conservação ambiental torna-se somente um meio¹ necessário para se atingir um novo estágio de desenvolvimento em que a ação humana não seja um risco a sua própria existência.

Essa preocupação ambiental, por sua vez, não pode se sobrepor a geração de energia, força motriz do desenvolvimento e progresso dentro do paradigma corrente. Assim, a eficiência energética pode ser considerada como um dos pilares na busca pela sustentabilidade, inclusive na construção civil.

Dentre os diversos campos de atuação, a área de projeto das edificações — quanto às escolhas sobre forma, técnicas construtivas e materiais empregados — é uma das áreas de maior impacto no desempenho energético da edificação (CATALINA *et al.*, 2011; NABONI *et al.*, 2015; OLGAYAY, OLGAYAY, 1963). Contudo, há grande interesse sobre a eficiência energética de sistemas ativos — como sistemas de condicionamento de ar — que, apesar de diminuírem os gastos energéticos, não lidam realmente com a diminuição da demanda energética.

Para equacionar as questões de eficiência energética na indústria da construção, as estratégias de conservação energética devem ser prioritárias. Essa situação demanda projetos adaptados ao clima no qual estão inseridos, que possam se manter condicionados com baixo consumo de energia, o que é fundamental na implantação de edificações de alto desempenho, pois quando se conciliam conservação e eficiência energética com geração de energias limpas², desenvolvem-se edificações com impacto energético baixo ou nulo, como os edifícios de balanço energético nulo, ou ZEBs³. Apesar do grande interesse em tais soluções, às vezes compromete-se esse conceito com o enfoque excessivo na geração energética — sem necessariamente abordar a conservação energética.

Dessa forma, não se aproveita o potencial da arquitetura, de intermediar as relações entre o espaço exterior e o interior e, assim, criar ambientes mais confortáveis e com maior eficiência. Essa falta de apreço à conservação energética fere um dos elementos cruciais da sustentabilidade: a redução do consumo.

No Brasil, as políticas de eficiência energética, embora tardias se comparadas com a vanguarda no tema, datam do início do século XXI, a partir da Lei da Eficiência Energética — Lei nº 10.295, de 2001. Nesse contexto, nas últimas décadas, ocorreram avanços estratégicos no Brasil liderados por um grupo de profissionais ligados às Universidades e a outros centros de Pesquisa⁴.

¹ Sem o suporte do meio ambiente não há como manter o projeto desenvolvimentista.

² No sentido de energias renováveis, como solar, eólica.

³ ZEB, do inglês *Zero Energy Building*.

⁴ Rede de Laboratórios de pesquisas em Eficiência Energética em Edifícios, coordenados pelo LabEEE.

A etiquetagem de equipamentos elétricos já é algo disseminado, o que contribui para a melhoria constante da eficiência dos equipamentos. Atualmente, as edificações também seguem o mesmo caminho, com a etiqueta ProcelEdifica, por meio das regulamentações técnicas, RTQ-C e RTQ-R (INMETRO, 2009). Além disso, há progresso em questões normativas, como a NBR 15.575 (ABNT, 2013), como por exemplo sob o aspecto do desempenho térmico e lumínico. Contudo, essas conquistas ainda são limitadas em relação ao desafio de melhorar a eficiência energética das edificações brasileiras.

Estratégias passivas de condicionamento são elementos que podem contribuir de maneira significativa à eficiência energética e ao desempenho térmico da edificação, especialmente porque minimizam o uso de soluções ativas e, assim, favorecem a conservação energética. Apesar de essas estratégias estarem presentes por toda a história da arquitetura, em pouco mais de meio século negligenciou-se essa prática em detrimento da dependência da eletricidade e das soluções ativas de condicionamento, amplamente utilizadas atualmente no ambiente construído.

As fachadas duplas representam soluções que se destacam por equacionar as demandas energéticas mediante estratégias passivas, que utilizam a própria concepção arquitetônica como estratégia de conservação energética. Além disso, o mercado imobiliário tem grande apreço pelas fachadas duplas, por conciliarem diversas demandas da sociedade atual (HENSEN *et al.*, 2002, KHOSHBAKHT *et al.*, 2017) — como urbanização, adensamento, verticalização, eficiência energética, sustentabilidade. Esses aspectos expressam-se principalmente em espaços corporativos, em arranha-céus envidraçados, ícones da arquitetura internacional.

Apesar do apelo sustentável das fachadas duplas, essa premissa quanto a seu desempenho termoenergético superior ainda necessita ser melhor demonstrada. Isso é ainda mais evidente no emprego das fachadas duplas em climas quentes, como o brasileiro. Tradicionalmente, o emprego da fachada dupla está associado a climas temperados, sendo amplamente adotada com soluções envidraçadas por inteiro. Diversos autores, como Boake *et al.* (2003), Barbosa (2012) e Gratia e De Herde (2007), apontam os benefícios da ventilação natural que as fachadas duplas proporcionam. Porém, em climas quentes também há a necessidade de evitar o ganho solar (BOAKE, 2014). Assim, é necessário buscar alternativas às fachadas totalmente envidraçadas, a qual Boake (2014) denomina fachadas duplas híbridas.

A aplicação de fachadas duplas adequadas às condições climáticas regionais brasileiras pode contribuir significativamente à redução do consumo energético de edificações novas e existentes. Devido à praticidade de aplicação dessas fachadas e à grande quantidade de edifícios envidraçados nas grandes cidades brasileiras, percebe-se um grande potencial de intervenções para modernização e melhoria do desempenho – ou *retrofit*; por meio da adição de uma nova camada envoltória em edifícios existentes no contexto brasileiro.

Ferramentas de simulação computacional podem ser recursos extremamente úteis para avaliar o desempenho de edificações já existentes ou mesmo em projeto, porque são capazes de equacionar questões de qualidade ambiental (ATHIENITIS, O'BRIEN, 2015; KEELER, BURKE, 2010). Sua utilização confere precisão e agilidade à aquisição dos resultados (SCALCO *et al.*, 2010). São ferramentas de natureza multidisciplinar, orientadas a problemas amplos e de escopo abrangente, que visam fornecer soluções aproximadas a problemas complexos por meio de um modelo simplificado, mas fidedigno (HENSEN, LAMBERTS, 2011).

Como as fachadas duplas compreendem diversos fenômenos físicos complexos, a compreensão e o entendimento de seu desempenho não é um exercício trivial (HENSEN *et al.* 2002). Não há uma abordagem que seja capaz de equacionar totalmente todas as diversas características de diferentes arranjos de fachadas duplas. Cada cenário, ou cada solução construtiva de fachada dupla, exige uma abordagem específica, haja vista a natureza parcial do processo de simulação. Para cada situação, precisa-se de uma abordagem que melhor responda ao problema mais relevante (MANZ, FRANK, 2005; SAELENS, 2002).

Dessa forma, a presente pesquisa aborda o desempenho termoenergético das fachadas duplas, especificamente no contexto climático de Brasília. Para isso, avalia-se o impacto de diversos parâmetros de projeto de fachadas duplas no aspecto diretamente correlacionado ao consumo de energia relativo ao condicionamento térmico, a carga térmica de resfriamento por meio de simulação termoenergética.

1.1 PROBLEMÁTICA

As estratégias passivas que tiram partido do conjunto arquitetônico têm o potencial de beneficiar o desempenho, a eficiência e a conservação energética da edificação. De todos os parâmetros da edificação, a envoltória possui papel fundamental, visto que atua como filtro, como um mediador das relações entre o espaço exterior e o interior (COCH, 2003). Estratégias como fachadas duplas colocam-se como soluções que conciliam essas demandas energéticas e sustentáveis com outras diversas necessidades atuais do mundo contemporâneo: urbano, adensado, verticalizado e corporativo. Contudo, o desempenho das fachadas duplas ainda é pouco conhecido.

As fachadas duplas, entretanto, são sistemas mais usuais em climas temperados, diferentes da realidade predominantemente tropical brasileira. Assim, necessitam de uma inserção adequada para que não ocorra simplesmente uma transposição de um sistema exógeno, que não responde adequadamente às demandas climáticas locais (BOAKE, 2014).

Diversos estudos mostram o potencial de indução de ventilação das soluções de fachada dupla, porém o conforto térmico ainda é muito dependente das condições de temperatura do ar

externo (BARBOSA, 2012; BARBOSA, IP, 2014). Esses estudos ainda se fundamentam em soluções exógenas, com fachadas totalmente envidraçadas, entretanto, em climas predominantemente quentes, como em muitos locais no Brasil, é necessário privilegiar, a redução da carga térmica proveniente da radiação solar.

Aponta-se para a necessidade de soluções mais adequadas à realidade climática brasileira, sobretudo a cidades com alto índice de radiação solar, como Brasília (PEREIRA *et al.*, 2006). Boake (2014) aponta para estratégias que conciliam soluções de fachada dupla com maior capacidade de sombreamento, com peles externas com maior taxa de opacidade, denominadas fachadas duplas híbridas.

Documentos como a Norma de Edificações Habitacionais — Desempenho (NBR 15.575) (ABNT, 2013) e o RTQ-C (INMETRO, 2009) — indicam estratégias similares ao controle térmico, como por exemplo o uso de materiais isolantes no exterior e massa térmica no interior. Entretanto, a maioria dos estudos sobre fachadas duplas ainda têm natureza pontual, relacionam-se ao sistema em si e não compreendem a natureza do conjunto arquitetônico que as fachadas duplas podem oferecer. Em parte, isso ocorre pela falta de uma maior compreensão teórica que concilie conceitos como o de envoltória espacializadas (TRUBIANO, 2013) e de espaço intermediário (COCH, 2003), e aponte como eles beneficiam o desempenho térmico. Isso dificulta maior apropriação de soluções de fachada dupla por arquitetos em suas práticas de projeto.

Quanto às ferramentas de simulação, é importante avaliar adequadamente a forma de seu emprego devido a não trivialidade da análise de desempenho das fachadas duplas (HENSEN *et al.* 2002). Diversos autores creditam grande confiança às avaliações de modelos simulados de fachada dupla e os consideram representativos da realidade (CHAN *et al.*, 2009; HAMZA, 2008; FALLAHI *et al.*, 2010). Contudo, devido aos diversos complexos fenômenos físicos que ocorrem nas fachadas duplas, outros autores questionam a relevância e precisão desses modelos (KIM, PARK, 2011; PAPPAS, ZHAI, 2008), inclusive ao ponto de desacreditar as ferramentas de simulação como estratégias à avaliação do desempenho de fachadas duplas (GERTIS, 1999). Entretanto, as ferramentas de simulação são instrumentos capazes de auxiliar a compreensão dos fenômenos físicos ainda na etapa de projeto e assim podem contribuir em uma tomada de decisão baseada em evidências.

Ademais, o desenvolvimento de soluções de fachadas duplas adequadas ao clima brasileiro pode ser excelente alternativa de *retrofit*. Em um cenário em que exista um grande parque construído com grande emprego de fachadas envidraçadas e carente de modernização e melhoria de desempenho, uma intervenção que não necessite da alteração do sistema de vedação existente, mas simplesmente da adição de uma nova camada de envoltória, pode ser muito prática e atrativa.

1.2 JUSTIFICATIVA

Estratégias passivas potencialmente auxiliam a conservação energética. Seu uso torna-se essencial à eficiência energética e, conseqüentemente, contribui à sustentabilidade. Atualmente, há grande interesse em prover desempenho e conforto térmicos por meio da conciliação de estratégias bioclimáticas com recursos tecnológicos atuais e diversas demandas contemporâneas, como são as fachadas duplas. Contudo, ainda há diversos questionamentos quanto ao seu desempenho termoenergético.

Tais questionamentos tornam-se ainda mais relevantes se as fachadas duplas são empregadas em climas tropicais, como o brasileiro. Isso se deve especialmente à mimetização de soluções exógenas, que importam tipologias pouco adequadas às demandas climáticas regionais, como as soluções altamente envidraçadas de fachada.

Muitos trabalhos abordam o uso dessas soluções em climas frios desde o início do século XXI (HAMZA, 2008; LANG, HERZOG, 2000; OESTERLE *et al.*, 2001; POLLARD, BEATTY, 2008; POMPONI *et al.*, 2016). Investigações que apontam os benéficos do desempenho termoenergético em fachadas duplas em climas quentes são mais recentes e normalmente avaliam o desempenho de soluções envidraçadas comumente empregadas em climas temperados (BARBOSA, 2012; BARBOSA, IP, 2014; BARBOSA *et al.*, 2015; HALAWA *et al.*, 2017; ZOMORODIAN, TAHSILDOOST, 2018). Há, portanto, a necessidade de investigações que apontem estratégias mais adequadas a esse tipo de clima, especialmente quanto ao controle de insolação, à taxa de opacidade e a estratégias de ventilação.

A avaliação do desempenho de sistemas de fachada dupla é realizada de diversas formas, desde abordagens experimentais até modelagens e simulações sofisticadas. Historicamente, houve uma crescente adoção das ferramentas de simulação computacional, em especial nos últimos 20 anos, devido principalmente ao aumento do poder de processamento dos computadores, que resultou em uma perceptível evolução dos modelos e métodos de simulação, desde sistemas meramente matemáticos e analíticos, sistemas de parâmetros concentrados, análises dimensionais, modelos de redes, modelos de volume controlado e dinâmica de fluidos (JIRU, HAGHIGHAT, 2008). Dessa forma, é necessário desenvolver estratégias de análise auxiliadas por simulação termoenergética que possam contribuir à investigação de soluções de fachadas duplas adequadas a determinados contextos climáticos.

Com isso, tornam-se necessários estudos que investiguem alternativas de soluções de fachadas duplas adequadas a climas tropicais, como o de Brasília. O desenvolvimento de recomendações de tipologias de fachada dupla possibilita a tomada de decisão mais bem fundamentada pelos projetistas. Aproximar a discussão sobre desempenho termoenergético ao

know-how da arquitetura favorece o engajamento e o protagonismo dos arquitetos no que diz respeito à tomada de decisão na produção de projetos de melhor desempenho.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar o desempenho termoenergético do emprego de fachadas duplas em edifícios comerciais no contexto climático de Brasília.

1.3.2 Objetivos Específicos

- I. Avaliar o impacto de parâmetros de projeto de fachadas duplas no desempenho termoenergético da edificação;
- II. Avaliar o impacto do condicionamento híbrido no condicionamento do ambiente interno no desempenho térmico de edificações com fachada dupla;
- III. Recomendar tipologias de fachada dupla adequadas ao clima de Brasília.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente pesquisa tem natureza quantitativa e baseia-se em um processo experimental apoiado em simulação computacional para o levantamento de dados. Ainda que essencialmente quantitativa, a pesquisa apresenta características qualitativas nas etapas preliminares, como o embasamento teórico, o desenvolvimento do tema e a problemática.

Em um primeiro momento, parte-se de um levantamento bibliográfico geral para propiciar a compreensão do tema e a definição das fachadas duplas como objeto de estudo. Posteriormente, engaja-se em uma revisão de literatura, de forma mais extensiva, para averiguar as lacunas de conhecimento no campo teórico do objeto de estudo, o que auxilia na definição dos objetivos e no desenvolvimento do método e dos procedimentos de coleta e tratamento de dados.

A atividade relacionada à execução da pesquisa em si, especificamente quanto à coleta e ao tratamento de dados, fundamenta-se na análise termoenergética, realizada por meio de simulação computacional com a interface gráfica *DesignBuilder* versão 5.4 e com a ferramenta de cálculo *EnergyPlus* versão 8.5. Essa atividade busca avaliar o desempenho do emprego de fachadas duplas em edificação vertical, condicionadas e de uso comercial de Brasília. Avalia-se a relevância de diversos parâmetros de projeto de fachadas duplas, tais como materialidade e taxa de permeabilidade da pele externa, largura, altura e tipo da cavidade, orientação da fachada e emprego do condicionamento híbrido no condicionamento interno da edificação.

Para esse fim, são realizados diversos ciclos de simulações paramétricas com o intuito de avaliar o impacto da variação de cada parâmetro no desempenho energético da edificação. No primeiro ciclo, analisa-se o tipo de vidro da pele externa das fachadas duplas envidraçadas. No seguinte, avaliam-se os parâmetros de largura, altura e tipo da cavidade assim como a orientação da fachada. No terceiro ciclo, realiza-se uma comparação entre soluções híbridas e envidraçadas e estudam-se a largura da cavidade e a orientação da fachada a ambas soluções bem como a taxa de permeabilidade à fachada dupla híbrida. Posteriormente, avaliam-se esses mesmos parâmetros, porém, quando há o emprego do condicionamento híbrido. No auxílio ao tratamento dos dados, realiza-se o tratamento estatístico para observar a significância da variância dos parâmetros. Por último, esses dados são compilados em representações gráficas para auxiliar sua interpretação, assim como tratados estatisticamente para melhor compreensão da significância dos resultados obtidos.

A dissertação divide-se em cinco capítulos: 1) Introdução 2) Fachadas Duplas 3) Materiais e Métodos 4) Resultados e Discussão e 5) Conclusão, como exposto no Quadro 1.

No capítulo 1, INTRODUÇÃO, expõem-se as premissas da presente pesquisa. Discorre-se sobre a relevância do tema, problemática, justificativa, além de apresentar os objetivos do

trabalho. Por fim, realiza-se uma breve apresentação do método empregado, assim como expõe-se a estrutura da dissertação.

Já no capítulo 2, FACHADAS DUPLAS, apresenta-se a fundamentação teórica do trabalho. Desenvolve-se por meio de revisão de literatura e, conseqüentemente, do desenvolvimento do referencial teórico sobre as fachadas duplas e temas correlatos, que culmina no seu emprego em climas quentes. Além disso, apresenta-se o contexto climático de Brasília, suas recomendações de estratégias bioclimáticas e a correlação entre tal contexto e o emprego das fachadas duplas.

O capítulo 3 é dedicado aos MATERIAIS E MÉTODOS da pesquisa. Quanto ao método em geral, explicam-se as etapas da pesquisa, com especial atenção à coleta e ao tratamento dos dados. Propõem-se e delinham-se o indicador de desempenho para avaliação dos resultados e as variáveis de projeto que o influenciam. Também se apresenta o estudo exploratório que auxiliou na elaboração do método, apresentado em congresso. E, além disso, realiza-se uma revisão das ferramentas de simulação e fluxos de trabalhos empregados na análise de fachadas duplas. Quanto aos materiais, são apresentados os programas utilizados nas simulações termoenergéticas, a interface gráfica *DesignBuilder* versão 5.4 e a ferramenta de cálculo *EnergyPlus* versão 8.5. Por último, detalham-se os procedimentos relativos a coleta de dados, análise dos dados e discussão dos resultados, com especial enfoque na caracterização dos modelos, nos parâmetros de projeto analisados, nos procedimentos de simulação e na análise estatística.

No capítulo 4, RESULTADOS E DISCUSSÃO, expõem-se os dados coletados, especialmente por meio de gráficos para auxiliar na compilação dos resultados. Realiza-se a avaliação dos parâmetros de projeto de fachada dupla no desempenho termoenergético, que é auxiliado pelos resultados da análise estatística. E, por último, discute-se a importância dos resultados, por meio de elementos da literatura que demonstrem concordância ou não para apontar consistência e/ou relevância da pesquisa realizada na presente dissertação.

Por fim, o capítulo 5, CONCLUSÃO, apresenta as considerações finais desta dissertação, assim como propostas de trabalhos futuros.

Quadro 1 Estrutura e conteúdo da dissertação.

Capítulo	Título	Conteúdo	Subtópicos
Capítulo 1	Introdução	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Introdução ▪ Problema ▪ Justificativa ▪ Objetivo ▪ Estrutura da Dissertação 	
Capítulo 2	Fachada Dupla	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Revisão Bibliográfica ▪ Referencial Teórico ▪ Levantamento de Dados 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Envoltória Especializada ▪ Espaço Intermediário ▪ Fachadas Duplas ▪ Clima de Brasília ▪ Recomendação de Estratégias Bioclimáticas ▪ Correlação com Fachadas Duplas
Capítulo 3	Materiais e Métodos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Método ▪ Materiais ▪ Procedimento 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Indicadores de Desempenho ▪ Revisão das Metodologias de Simulação ▪ Estudo Exploratório ▪ Apresentação dos Programas ▪ Fluxo das Atividades Metodológicas ▪ Definição dos Parâmetros Avaliados ▪ Descrição dos Procedimentos de Modelagem ▪ Descrição dos Procedimentos de Simulação ▪ Descrição dos Procedimentos de Análise dos Resultados ▪ Descrição da Análise Estatística
Capítulo 4	Resultados e Discussão	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Resultados ▪ Análise ▪ Discussão 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Exposição dos Dados ▪ Compilação dos Resultados ▪ Avaliação dos Parâmetros ▪ Análise Estatística ▪ Relação com a literatura ▪ Discussão
Capítulo 5	Conclusão	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Conclusões ▪ Sugestões de Trabalhos Futuros 	
	Referências Bibliográficas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Referências Bibliográficas 	
	Apêndices	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Detalhes sobre modelagem 	

2 FACHADAS DUPLAS

O presente capítulo apresenta os sistemas⁵ de fachada dupla com ênfase no seu desempenho termoenergético e sua aplicação em climas quentes. Está organizado em 8 itens: Da Envoltória às Fachadas Duplas, Definição de Sistema de Fachadas Duplas, Breve Histórico das Fachadas Duplas, O Desempenho de Fachadas Duplas, Classificações das Fachadas Duplas, Fachadas Duplas em Climas Quentes, Fachadas Duplas no Contexto Climático de Brasília e Considerações Finais do Capítulo. No primeiro item, explica-se, a partir de uma análise mais conceitual, a função da envoltória no desempenho termoenergético das edificações e aborda-se a relação das fachadas duplas com os conceitos de espaços intermediários e envoltórias espacializadas. No segundo, apresenta-se a definição do conceito de fachadas duplas para, depois, no terceiro item, realizar sua contextualização histórica. Na sequência, no quarto item, detalham-se as potencialidades e limitações das fachadas duplas, bem como o seu desempenho termoenergético. Já no quinto item, caracterizam-se as diversas formas de classificação dos tipos de sistemas de fachadas duplas. Posteriormente, no sexto item, apresenta-se o emprego de fachadas duplas em climas quentes, para em seguida, no sétimo item, caracterizar o contexto climático de Brasília, as estratégias bioclimáticas mais recomendadas a esse contexto e a relação entre essas estratégias e as soluções de fachadas duplas. E por fim, no oitavo item, têm-se uma recapitulação do que foi exposto e algumas considerações gerais.

⁵ Refere-se ao sistema de fachada dupla pois caracteriza-se como um sistema de vedação. Contudo, também não deixa de ser uma solução. Para todos os casos, utiliza-se sistema e solução de fachada dupla como sinônimos no presente trabalho.

2.1 DA ENVOLTÓRIA ÀS FACHADAS DUPLAS

A envoltória é o elemento que delimita e encerra o espaço arquitetônico, e assim separa os dois mundos: o espaço externo — hostil e incontrolável — e o espaço interno — de propriedade privada — moldado pelo homem e para ele mesmo. Usualmente, a envoltória é compreendida pelos três elementos que encerram o espaço interno: parede, piso e cobertura (GRAEFF, 1979; SEMPER, 1851; ZEVI, 1948). Mais do que somente oferecer abrigo e possibilitar segurança ao homem, a envoltória é responsável por intermediar as relações entre os meios interno e externo.

Por exemplo, quanto aos aspectos ambientais de um edifício, os materiais empregados, o número, posicionamento e característica das aberturas permitem usufruir as condições externas ou limitá-las. Mais que uma barreira ou conexão, a envoltória desempenha um papel de mediador entre as condições internas e externas, como um filtro (COCH, 2003; TRUBIANO, 2013).

Exercer a função de regular as trocas entre o interior e o exterior, entretanto, não é exclusividade dos elementos construídos em si. Além da materialidade de paredes, pisos e coberturas, a envoltória pode ser compreendida como qualquer elemento que envolva o espaço interno, inclusive um próprio espaço. Isso ocorre porque esses espaços desempenham funções semelhantes às dos elementos construídos. Por não se caracterizarem totalmente nem como um espaço interno nem como externo, caracterizam-se como espaços intermediários. Dessa forma, elas atuam na intermediação de diversas funções, como as de uso – de comunicações, estar e de relações sociais; simbólica – como de poder; e de conforto ambiental — térmico, acústico, lumínico, visual, de odor. Também são responsáveis pelas relações de dicotomias entre o doméstico e o público; o agradável e o agressivo; o bem ordenado e o desproporcional (COCH, 2003).

Essa flexibilidade da envoltória pode expressar-se de diversas formas e adaptações, inclusive ao assumir especializações espaciais. Segundo Trubiano (2013), fachadas espacializadas são um novo paradigma decorrente da desmaterialização dos tradicionais elementos construídos da arquitetura contemporânea, quando não só as paredes são responsáveis pela função de intermediação e regulação entre o interior e exterior da edificação, mas qualquer adaptação espacializada das fachadas que exerça essas funções. Esse tipo de solução varia desde um *brise-soleil*, uma varanda, átrios, até mesmo elementos de fachadas responsivas, assim como as próprias fachadas duplas (TRUBIANO, 2013). Essas soluções de envoltória espacializadas podem expressar a arquitetura de maneira marcante, intermediando as relações entre o interior e o exterior.

Dessa forma, as fachadas duplas caracterizam-se como um tipo específico de envoltória espacializada que configura um espaço intermediário perimetral na edificação. Além da responsabilidade de regular as relações entre o exterior e o interior, especialmente quanto às

condições ambientais, esse tipo de solução possui um aspecto simbólico de marcante expressão da arquitetura, especialmente marcante no ícone da sociedade contemporânea, o arranha-céu envidraçado.

2.2 DEFINIÇÃO DE SISTEMA DE FACHADAS DUPLAS

Fachadas duplas são compreendidas por três elementos principais: duas fachadas cortina distantes entre si e uma cavidade intermediária entre elas, preenchida por ar (ARONS, 2000; BOAKE *et al.*, 2003; OESTERLE *et al.*, 2001). A distância entre as fachadas pode variar de alguns centímetros a até poucos metros (UUTTU, 2001, BBRI, 2002). Normalmente, as fachadas são envidraçadas por inteiro, especialmente a pele exterior, porém não é mandatório (ARONS, 2000; BARBOSA, IP, 2014; BOAKE, 2014). Seus diversos graus de operação e a permeabilidade de suas peles possibilitam várias formas de ventilação, tanto da cavidade como do ambiente interno (BOAKE *et al.*, 2003; POLLARD, BEATTY, 2008). Também podem assumir diversas formas, quanto a geometria ou *design*, com diferentes configurações de compartimentação da cavidade (BOAKE *et al.*, 2003; LANG, HERZOG, 2000).

O sistema de fachada dupla desempenha importante função na intermediação e amortecimento das relações entre o meio interno e externo, em específico como isolante térmico, especialmente por meio do colchão de ar dentro da cavidade. Além disso, a própria pele externa também pode possuir isolante térmico ou ser composta de vidro duplo para ampliar esse efeito (BOAKE *et al.*, 2003). Por outro lado, o sistema também funciona como uma zona de armazenamento térmico, pois possibilita a retenção de calor dentro da cavidade. Isso é especialmente relevante em climas temperados — de onde são originárias e mais comumente empregadas; e o que em parte justifica a grande utilização de fachadas totalmente envidraçadas.

Em alguns casos, as fachadas duplas podem possuir sistemas de proteção solar para evitar o superaquecimento dentro da cavidade (BOAKE *et al.*, 2003; SAELENS, 2002; UUTTU, 2001). Os elementos sombreamento são normalmente instalados dentro da cavidade para evitar exposição aos agentes climáticos. Contudo, isso pode dificultar a manutenção em virtude das dimensões da cavidade (BOAKE, 2014).

As fachadas duplas ainda podem assumir diversas formas de ventilação e consequentemente possuir distintas características quanto à forma e operação das aberturas. O interior do edifício pode ser ventilado e climatizado mecanicamente, naturalmente ou de forma híbrida (POLLARD, BEATTY, 2008). Esse sistema ainda pode estar diretamente conectado ou não ao sistema de ventilação da cavidade. Por sua vez, esse também pode ser mecanicamente ou naturalmente condicionado, além de ser hermético ou permeável (BOAKE *et al.*, 2003; POLLARD, BEATTY, 2008). E isso depende diretamente das características e da forma de

operação das aberturas das fachadas e da cavidade — na base e no topo — além de estar atrelado a divisão e forma de compartimentação da cavidade (LANG, HERZOG, 2000).

As características dos materiais das fachadas também podem se diferenciar, principalmente quanto à opacidade e à permeabilidade a ventilação, especialmente em razão das condições climáticas locais. Em climas quentes, evitar o ganho de calor por radiação solar é a principal estratégia bioclimática às fachadas duplas. Isso sugere a utilização de fechamentos de natureza mais opaca, ao invés do tradicional uso do vidro enquanto elemento transparente. Em diversos locais, como nos países árabes, o elemento de proteção solar é a própria pele externa do sistema, solução que, de alguma forma, faz alusão às estratégias vernaculares, como o *muxarabi* (BOAKE, 2014).

2.3 BREVE HISTÓRICO DAS FACHADAS DUPLAS

Existem diversos sistemas que de alguma forma possuem atributos similares aos desempenhados pelas fachadas duplas. O mais antigo, remete há quase quinhentos anos, as janelas duplas suíças do século XVI (PANAGIOTIS, 2014). No século XIX há o desenvolvimento de fachadas ventiladas de múltiplas peles por Jean-Baptiste Jobard (SAELENS, 2002). Na mesma época, Edward Morse concebeu sistemas de armazenamento de calor por meio de pele de vidro e massa térmica, que, posteriormente, já no século XX, Felix Trombe aprimorou, tendo resultado no que atualmente se conhece como paredes trombe (BOAKE *et al.*, 2003).



Figura 1 Fábrica Steiff.
Fonte: Goethe Institute, 2018

Contudo, atribui-se o primeiro exemplar de fachada dupla ao edifício da fábrica de brinquedos *Steiff*, em Giengen, na Alemanha, construída no início do século passado, em 1903, e que até hoje se encontra em funcionamento (Figura 1). Com o objetivo de maximizar a iluminação natural, mas sem torná-las demasiadamente vulneráveis às condições climáticas, estruturam-se as duas peles de vidro em perfis metálicos. O sucesso do empreendimento garantiu que ainda na primeira década do século passado, duas novas fábricas fossem construídas pela empresa com o mesmo sistema, porém em estrutura de madeira, por questões orçamentárias (CRESPO, 1999).

Ainda no início do século XX, foram projetados e construídos alguns exemplares de fachada dupla, inclusive por grandes nomes da arquitetura, como Otto Wagner e Le Corbusier. Quase simultaneamente ao edifício da fábrica *Steiff*, Wagner vence o concurso para a construção da sede da Caixa Econômica dos Correios Postais de Viena, também em 1903, construída entre 1904 e 1912. No *hall* de entrada do edifício, Wagner emprega uma claraboia com pele dupla de vidro apoiado em estrutura metálica. Já Le Corbusier, a partir do final da década de 20, fez uso de um sistema de fachadas duplas ventiladas, o qual ele chamou de *mur neutralisant*⁶, nos projetos *Centrosoyus*, *Cité de Refuge* e *Immeuble Clarté*, os quais, por terem sido considerados caros e pouco eficientes, nunca chegaram a ser executados. Visto que os projetos *Cité de Refuge* e *Immeuble Clarté* não contemplavam tais sistemas *a priori*, acredita-se que o contato de Le Corbusier com o arquiteto russo Moisei Ginzburg, durante o projeto *Centrosoyus*, em Moscou, teve papel decisivo na adoção, ao menos em projeto, dos sistemas de fachadas duplas pelo arquiteto franco-suíço nos outros dois projetos. Ginzburg já havia começado a experimentar sistemas de fachadas duplas em projetos anteriores na Rússia, especialmente em blocos de habitação comunal (CRESPO, 1999).

Entretanto, após o início da Segunda Guerra Mundial, o emprego de fachadas duplas entrou em desuso, haja vista a grande demanda por novas construções da época, aliada ao questionamento de sua eficácia e seus custos adicionais. Somente a partir das últimas décadas do século XX, no final da década de 70, que há uma retomada pelo interesse nesse tipo de solução. Em grande parte, isso decorre da crescente preocupação ambiental frente ao desenvolvimento humano, que ganha força no período e é expressa pelo conceito do desenvolvimento sustentável (CRESPO, 1999, POIRAZIS, 2006). Além de serem capazes de oferecer maior conforto ambiental — térmico, acústico, luminoso e visual — ao usuário, as fachadas duplas também almejam proporcionar eficiência energética no uso da edificação. Isso decorre especialmente do emprego de fechamentos translúcidos de múltiplas peles, que oferecem luz natural em abundância – porém em excesso em alguns casos; e ao mesmo tempo diminuem as trocas térmicas se comparados a

6 Em tradução literal, parede neutralizante.

soluções similares com vidro simples. Contudo, não se pode menosprezar o peso do aspecto estético na adoção do sistema (POIRAZIS, 2006).

Considera-se o edifício *Hooker Office* (Figura 2), projetado por *Canon Design* e *HOK*, nos Estados Unidos, como o primeiro exemplar desse período. Utiliza-se uma solução próxima à do *mur neutralisant* proposto por Le Corbusier — uma fachada dupla ventilada — porém com diversos recursos de automação para o acionamento do sistema de proteção solar e ventilação da cavidade. O ar aquecido dentro da cavidade é recuperado no topo pelo sistema de ventilação interno no inverno e descartado no verão.



Figura 2 Fachada do edifício Hooker Office, de Cannon Design e HOK
Fonte: Niagara Falls Reporter (2018)

Na mesma época, executam-se projetos similares como o *Solar Dairy*, na Noruega e o edifício *Lloyds* (Figura 3), de Richard Rogers, em Londres (CRESPO, 1999). Nessa época, empregam-se fachadas duplas envidraçadas na prática de *retrofit* de prédios históricos — especialmente no Canadá, por Kirby Garden — visto que, além de melhorar o sistema de vedações e o desempenho térmico, permitem a apreciação das qualidades estéticas das edificações sem grandes alterações formais (BOAKE *et al.*, 2003). Pode-se notar estratégia similar de *retrofit* por parte dos arquitetos Herzog e De Meuron no edifício histórico SUVA (Figura 4), em Fuji (CRESPO, 1999).

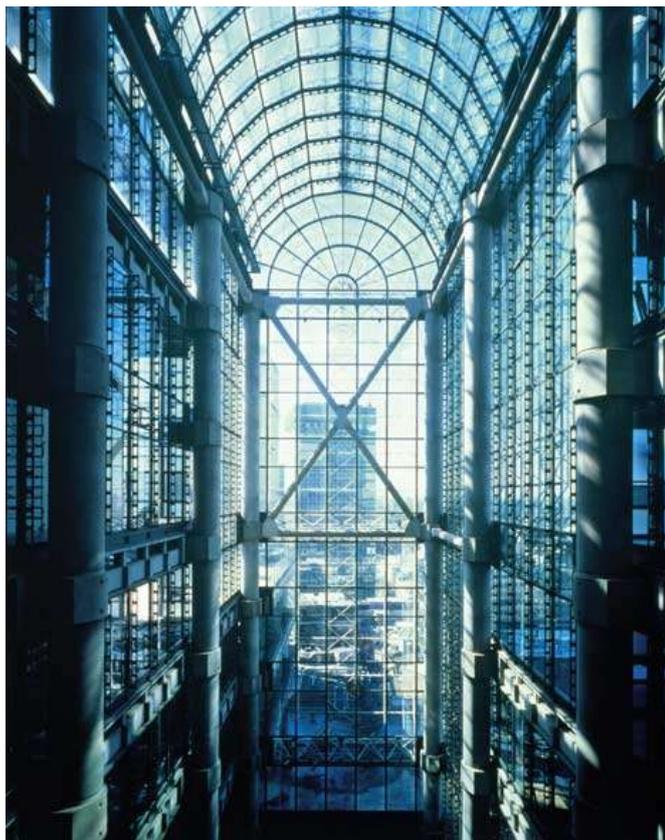


Figura 3 Átrio do edifício *Lloyds* de Richard Rogers
Fonte: Bryant (n.d.)



Figura 4 Fachada do edifício *SUVA* de Herzog e De Meuron
Fonte: Walti (n.d.)

Atualmente, fachadas duplas envidraçadas já constituem parte essencial do vocabulário arquitetônico (POIRAZIS, 2006). Esse tipo de solução é uma demanda bastante representativa do mundo contemporâneo, mais urbanizado, adensado e vertical, expresso especificamente pelos arranha-céus corporativos envidraçados, ícones da arquitetura internacional e presentes na maioria das grandes cidades do mundo.

Apesar de a disseminação do emprego de fachadas duplas estar atrelada ao apelo ambiental, a proliferação irrestrita de uma arquitetura desse tipo em diferentes condições climáticas não necessariamente colabora para a melhoria do desempenho da edificação. Isso é mais evidente no crescente emprego de fachadas duplas envidraçadas em climas quentes, o que contraria um princípio básico da arquitetura bioclimática: evitar os ganhos provenientes da irradiação solar (BOAKE, 2014).

Nas últimas duas décadas, há a realização de grandes esforços na investigação do desempenho dos sistemas de fachada dupla (POIRAZIS, 2006), o que coincide com a tendência de investigação da análise do desempenho na arquitetura (CLARKE, HENSEN, 2015; HENSEN, LAMBERTS, 2011). Apesar disso, o grande enfoque da maioria das pesquisas ainda se mantém em edificações em climas temperados. Só recentemente se realizaram estudos a outras realidades climáticas (ALIBABA, OZDENIZ, 2016; BARBOSA, 2012; BARBOSA, IP, 2014; BARBOSA *et al.*, 2015; HALAWA *et al.*, 2017; ZOMORODIAN, TAHSILDOOST, 2018), porém, nestes estudos, ainda há uma tendência de mimetizar solução envidraçada normalmente empregada em climas temperados.

2.4 O DESEMPENHO DE FACHADAS DUPLAS

Existem diversos motivos para o emprego das fachadas duplas, principalmente quanto a aspectos atualmente compreendidos como sustentáveis, especificamente do desempenho ambiental e da eficiência energética. Contudo, esses aspectos dependem de vários fatores, em especial da tipologia da fachada dupla empregada: altura e largura da cavidade, geometria da divisão da cavidade, operação das aberturas, tipo de ventilação; do material de fechamento da pele externa; e da tipologia da edificação e do clima local.

Tradicionalmente, os principais motivos ao uso de fachadas duplas são conforto ambiental — visual, lumínico, térmico e acústico — aliado ao desempenho térmico (GHAFFARIANHOSEINI *et al.*, 2016; POLLARD, BEATTY, 2008), como apresentado no primeiro exemplar de fachada dupla, a fábrica de brinquedos *Steiff*, na Alemanha (CRESPO, 1999). O desejo de grandes visuais externas e abundância luminosa conflita com o conforto térmico, já que há grandes perdas térmicas causadas pelos extensos panos de vidro. Assim, a tradicional solução de fachada dupla envidraçada possibilita conforto visual e luminoso por meio da transparência do fechamento de vidro, mas com maior isolamento para minimizar as perdas

térmicas. Portanto, além de ser capaz de preservar o conforto térmico, o emprego dessas fachadas duplas pode diminuir os gastos energéticos relativos à iluminação e ao condicionamento térmico.

As fachadas duplas com pele externa envidraçada por possuírem uma membrana adicional destacada e distante do restante da edificação, proporcionam melhor isolamento acústico entre o exterior e interior (POLLARD, BEATTY, 2008, GHAFARIANHOSEINI *et al.*, 2016). O emprego da membrana de vidro também impede a passagem direta de correntes de vento. Esse fenômeno é extremamente relevante em edifícios em altura — situação habitual de emprego das fachadas duplas —, em cujos andares superiores a velocidade do vento é mais alta, o que prejudica, e muitas vezes impede, a abertura de janelas. Assim, com essa membrana, o sistema de fachadas duplas cria um cenário onde é possível a abertura de janelas nos andares superiores, o que permite o uso de ventilação natural (BARBOSA, 2012; WONG *et al.*, 2008). Aliado a isso, o efeito chaminé ligado à altura da cavidade potencializa o emprego da ventilação natural.

O Quadro 2 sumariza as características apontadas como vantagem da utilização das fachadas duplas quando bem empregadas pela literatura. Contudo, esses aspectos normalmente estão relacionados ao uso de soluções de fachadas duplas envidraçadas em climas temperados. Apesar de os estudos citados investigarem o desempenho de fachadas duplas em condições específicas, há uma crença no seu potencial que leva a generalizações que induzem a utilizações inadequadas desse tipo de solução. E isso é notório quando há o emprego de soluções envidraçadas de fachadas duplas em climas quentes e esperam-se os mesmos benefícios encontrados em outros tipos de clima. Em parte, isso está intimamente ligado a preferências estéticas, especialmente atreladas à transparência que os panos de vidro proporcionam e a uma pressuposta sustentabilidade, e não propriamente ao alto desempenho na prática.

Quadro 2 Vantagens do emprego de fachada dupla

Vantagens
Isolamento Térmico
Conforto Visual
Isolamento Acústico Externo
Iluminação Natural
Transparência
Economia Energética
Ventilação Natural
Redução da Pressão de Vento
Controle de temperatura

2.4.1 O Desempenho Termoenergético

O principal argumento à aplicação de fachadas duplas normalmente gira em torno da sustentabilidade por elas propiciada, decorrente do desempenho térmico e, conseqüentemente, da economia energética. Sendo a dimensão termoenergética central à presente pesquisa, detalha-se o funcionamento dos processos físicos relativos ao desempenho térmico presente nas fachadas duplas — principalmente nas soluções envidraçadas — e a suas conseqüências energéticas.

Estudos desenvolvidos por Hamza (2008) – no Cairo, Egito; e Marcondes (2010) – em São Paulo, Brasil; apontam para desempenho termoenergético superior das fachadas duplas em comparação a soluções de vedação totalmente envidraçadas com vidro simples. Essa diminuição do gasto energético relativo ao desempenho térmico está relacionada à conservação térmica, mais especificamente ao isolamento térmico e ao armazenamento de calor. Fatores como o efeito de chaminé térmica por meio do controle das aberturas para propiciar a ventilação e extração de calor também são relevantes; por isso, a altura da cavidade é um dos principais aspectos que favorece o desempenho térmico.

Primeiramente, quando bem projetado, o colchão de ar existente entre as duas peles da fachada funciona como um elemento isolante que diminui as trocas de calor entre o interior e exterior (LANG, HERZOG, 2000; OESTERLE *et al.*, 2001; POLLARD, BEATTY, 2008). Além de aumentar a resistência térmica do sistema de vedação por meio do colchão de ar, a separação entre as peles da fachada divide o processo de transmissão do calor. Primeiro divide-se o processo de condução do calor, que ao invés do que ocorre em uma vedação tradicional, no sistema de fachada dupla a diferença de temperatura entre o interior e o exterior está dividida entre as duas peles da fachada. Assim, com menor diferença de temperatura aplicada em cada pele — em vez de uma maior aplicada em uma só — diminui-se a taxa de transmissão de calor. Em segundo lugar, divide-se um processo que basicamente ocorre por meio de condução em vedações tradicionais em outros fenômenos de transmissão de calor, convecção e radiação. Dessa forma é possível buscar meios mais adequados para minimizar a transmissão de calor, como barreiras radiantes e controle da exaustão do ar da cavidade.

A habitual utilização de fachadas duplas altamente envidraçadas permite o armazenamento de calor na cavidade por meio da radiação solar, quando bem projetada. O mesmo vidro que permite a transmissão de radiação de onda curta proveniente do sol funciona como uma barreira às demais formas de transmissão de calor que ocorrem após o aquecimento pela radiação solar. Dessa forma, o sistema funciona como uma estufa (BOAKE *et al.*, 2003; LANG, HERZOG, 2000). Esse fenômeno é particularmente relevante em climas temperados, onde, durante os períodos mais frios do ano, o calor armazenado diminui a diferença de temperatura na pele interior e, assim, auxilia na redução de perdas de calor do ambiente interno. Os sistemas de ventilação

mecânica e condicionamento de ar também podem se beneficiar das condições favoráveis da cavidade nos períodos mais frios e dela extrair o ar já preaquecido (POLLARD, BEATTY, 2008).

Contudo, mesmo em climas temperados, o superaquecimento do ar da cavidade é um problema comum nos períodos mais quentes do ano (GRATIA, DE HERDE, 2007). Para isso, o controle do ar da cavidade desempenha papel fundamental no desempenho térmico e é um dos principais atributos das fachadas duplas. A partir da operação das aberturas da fachada dupla — principalmente as situadas na base e no topo da fachada — é possível se beneficiar do efeito chaminé — por meio do qual o ar aquecido, por densidade, sobe — para a exaustão de ar e, conseqüentemente, para a extração de calor de dentro da cavidade (GRATIA, DE HERDE, 2007; SCIGLIANO, HOLLO, 2001). Mais do que retirar o calor da cavidade, a corrente de ar criada beneficia toda a edificação, pois permite ventilação cruzada — processo em que a fachada dupla extrai o ar do ambiente interno, fazendo com que e a tomada de ar ocorra na fachada oposta. Esse fenômeno é a principal justificativa do emprego de fachadas duplas envidraçadas em climas quentes, visto que propicia ventilação, mesmo em situações de calmaria, por meio do efeito chaminé (BARBOSA, 2012; BOAKE *et al.*, 2003; MARCONDES, 2010).

De forma similar à utilização de ar preaquecido no sistema de ventilação mecânica e condicionamento de ar em condições mais frias, o ar de retorno aquecido do sistema de condicionamento pode ser descartado na cavidade, o que aumenta a temperatura desta e intensifica o efeito chaminé (POLLARD, BEATTY, 2008).

Para reduzir o superaquecimento da cavidade, outra estratégia é controlar o ganho de calor por radiação solar. Sobretudo em climas quentes, essa questão não pode ser ignorada e deve ser contemplada no projeto de fachada dupla (BOAKE, 2014). Para esse fim, elementos de sombreamento são normalmente empregados. Em climas mais agressivos onde a neve tem papel relevante, os elementos de proteção solar normalmente são instalados dentro da cavidade para proteger das intempéries. Pode-se aproveitar sistemas automatizados que otimizem a radiação solar conforme as condições ambientais (BOAKE *et al.*, 2003).

Entretanto, a alta taxa de envidraçamento é uma incoerência em locais com climas quentes, onde a grande quantidade deve ser minimizada. Atualmente, em alternativa às fachadas totalmente envidraçadas, há uma crescente adoção de soluções de fachadas duplas em que a própria pele externa funciona como elemento de proteção solar (BOAKE, 2014).

2.4.2 Limitações das Fachadas Duplas

Apesar das vantagens do emprego de fachadas duplas, existem algumas limitações e questionamentos ainda não equacionados de maneira adequada, como aspectos relativos ao desempenho, custo, viabilidade econômica e comprovação de efetividade. Por outro lado, também

se questiona a formulação, avaliação e análise da forma de investigação do sistema de fachada dupla.

O emprego das fachadas duplas pode também prejudicar o desempenho de alguns outros aspectos da edificação. Apesar de, por um lado, a existência da pele externa melhorar o conforto acústico por bloquear os sons advindos do ambiente externo — como já citado anteriormente —, por outro lado, cria-se, com a cavidade, um ambiente propício à disseminação do som entre ambientes por ela conectados, o que pode prejudicar o conforto acústico (PANAGIOTIS, 2014). Outro aspecto afetado negativamente pela formação da cavidade da fachada dupla é a proteção contra incêndio. Sendo um ambiente confinado, a cavidade facilita a disseminação do fogo (BOAKE *et al.*, 2003; PANAGIOTIS, 2014; POLLARD, BEATTY, 2008).

A questão relativa aos custos envolvidos no emprego do sistema de fachada dupla talvez seja a limitação mais clara e que realmente condicione sua aplicação. Em primeiro lugar, o sistema de fachada dupla é uma solução que demanda maior investimento em sua construção, visto que é, em si, uma pele adicional. Mais do que a execução da própria pele extra, isso implica maior carga, o que também encarece a fundação do edifício — um dos sistemas mais caros da edificação. Outro aspecto que pesa contra a viabilidade econômica das fachadas duplas é a perda de área útil que a implementação da cavidade acarreta, já que em diversos casos esse espaço tem natureza meramente técnica, sem utilização prática pelos usuários.

Além do custo relacionado à construção dos sistemas de fachada dupla, os custos de operação e manutenção também devem ser considerados. A limpeza e manutenção dos aparelhos normalmente são mais caras por se tratar de espaço de difícil acesso. A operação dos sistemas de controle da cavidade também gera impacto. Dessa forma, a aplicação de sistemas de fachadas duplas fica restrita a empreendimentos com maiores orçamentos (BOAKE *et al.*, 2003, BOAKE, 2014)

Mesmo com a economia relativa à eficiência energética que o sistema de fachada dupla pode proporcionar durante a operação da edificação, todos estes custos adicionais recém-apontados colocam em risco a eficácia e a viabilidade das fachadas duplas. Quesada *et al.* (2012) atribuem *paybacks* aos sistemas de fachada dupla de até 80 anos, o que em alguns casos equivale ao próprio tempo de vida útil da edificação. Inclusive, há autores que chegam a atribuir valores de *payback* consideravelmente superiores à vida útil da edificação, com tempo de retorno financeiro de até 200 anos (STIGGE, ADIBI, 2008).

O Quadro 3 sintetiza as desvantagens técnicas apresentadas pela literatura.

Quadro 3 Desvantagens do emprego de fachada dupla

Desvantagens
Maior Custo de Construção
Maior Peso
Maiores Custos de Operação
Maiores Custos de Manutenção
Menor Proteção Contra Incêndio
Diminuição do Espaço Útil
Isolamento Acústico Interno
Ofuscamento
Superaquecimento

Os processos físicos envolvidos no desempenho termoenergético das fachadas duplas são complexos e representam outro aspecto que pode limitar a investigação e avaliação das fachadas. Isso ocorre porque são mais dificilmente equacionados em processos de simulação. O entendimento pouco adequado dos processos físicos presentes, assim como a falta de precisão na representação dos sistemas em ferramentas de simulação podem induzir os resultados por estas obtidos. O subitem 3.1.3, Métodos de Simulação, apresenta em maior detalhe as capacidades e limitações dos modelos de simulação computacional.

Além disso, outra importante questão a ser observada é quanto à forma como se conduzem as análises de desempenho das soluções de fachada dupla, muitas vezes ligadas à parâmetros de comparação questionáveis. Fachadas duplas possuem desempenho superior em comparação a diversos casos de fachadas simples totalmente envidraçadas (HAMZA, 2008; MARCONDES, 2010). Contudo, apesar de comumente empregadas, fachadas envidraçadas são normalmente soluções de baixo desempenho, pouco recomendadas em diversas situações, especialmente com soluções de vidro de baixo desempenho. Isso define um cenário para comparação de baixa relevância, visto que é facilmente superado. Fachadas totalmente envidraçadas com uma pele de vidro, porém com soluções de melhor desempenho — como com vidros duplos ou triplos — possuem, inclusive, resultados similares às fachadas duplas (POLLARD, BEATTY, 2008). Soluções mais adequadas são preteridas, como por exemplo, peles com maior taxa de opacidade. (BOAKE, 2014; YELLAMRAJU, 2004). Esse tipo de postura investigativa pode induzir conclusões em favor das soluções com altas taxas de envidraçamento.

2.5 CLASSIFICAÇÕES DAS FACHADAS DUPLAS

O presente item apresenta as principais classificações de fachadas duplas encontradas na literatura. Pode-se categorizá-las em dois tipos principais de classificações de fachadas duplas: 1)

pela forma, geometria ou *design* da cavidade e 2) pelas características físicas ou forma de ventilação da cavidade. Lou *et al.* (2012) classificam os sistemas pela geometria da solução empregada. Já a classificação de Lang e Herzog (2000), posteriormente adaptada e incrementada por Boake *et al.* (2003), diferencia as fachadas duplas pela forma de ventilação da cavidade e características das peles a esse respeito.

2.5.1 Classificação pela Geometria

A classificação por *design* ou geometria das fachadas duplas, desenvolvida por Lou *et al.* (2012), apresenta diferentes formas de compartimentação da cavidade e a disposição das entradas e saídas de ar. É dividida em quatro categorias: *box-window*, *shaft-box*, corredor e múltiplos andares; apresentadas a seguir, da mais à menos compartimentada. Quanto mais compartimentada for a fachada dupla, maior serão o controle quanto a prevenção de incêndios e o controle de fumaça, assim como o conforto acústico. Por outro lado, por normalmente reduzir a verticalidade, diminui-se a altura da cavidade e, conseqüentemente, o efeito chaminé, o que minimiza a capacidade de ventilação e extração do ar quente do interior da cavidade. A redução da altura da cavidade torna a temperatura dentro de cada módulo mais homogênea.

a. Tipo *Box-window*

A fachada dupla tipo *box-window*, além de ser o sistema mais compartimentado, também é o mais antigo das quatro classificações (BOAKE *et al.*, 2003). Nesse caso, a cavidade é dividida em diversas caixas, tanto no sentido vertical, quanto horizontal. Leva esse nome porque pode chegar a possuir um módulo por janela. A entrada e a saída de ar encontram-se na base e no topo da pele externa de cada módulo, respectivamente, como mostram de maneira esquemática as setas na Figura 5.

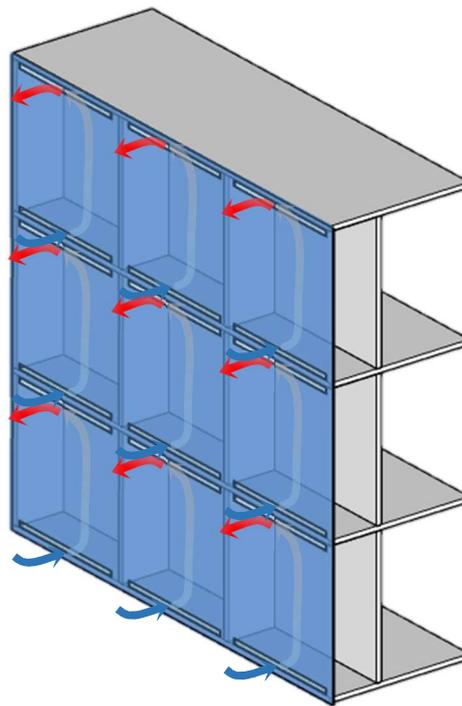


Figura 5 Fachada dupla tipo *box-window*

b. Tipo *Shaft-box*

As fachadas duplas do tipo *shaft-box* possuem módulos com maior dimensão vertical — normalmente por toda extensão da altura da edificação — como um *shaft*, adjacente a módulos de menores dimensões. Assim como o tipo *box-window*, a entrada de ar no tipo *shaft-box* ocorre pela base de cada um dos módulos menores. No entanto, diferentemente do *box-window*, a extração do ar quente nesses módulos ocorre pela ventilação ocasionada pelo efeito chaminé do módulo lateral em formato de *shaft*. Posteriormente, o ar quente sai pelo topo de sua cavidade do módulo em *shaft*, como mostra de maneira esquemática a seta na Figura 6.

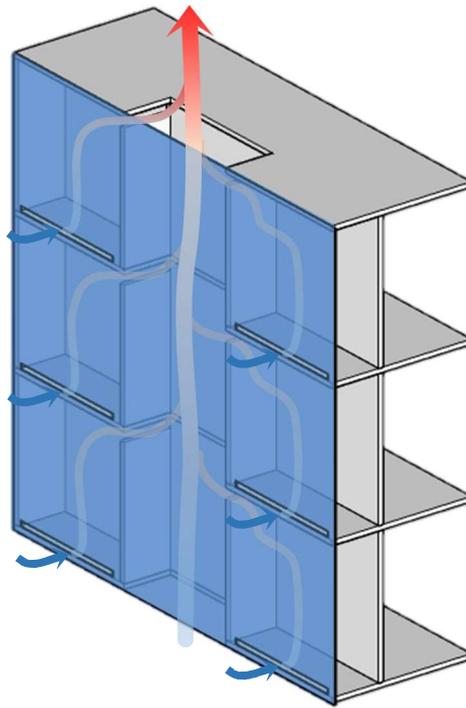


Figura 6 Fachada dupla tipo *shaft-box*

c. Tipo Corredor

A fachada dupla tipo corredor não possui divisões intermediárias verticais e seu módulo se estende normalmente por toda extensão horizontal da fachada. Habitualmente cada módulo corresponde a um andar, porém pode se estender por um conjunto de andares. Da mesma forma que na tipologia *box-window*, a tomada e a saída de ar do tipo corredor ocorrem na base e na parte superior da pele externa de cada módulo, respectivamente, como mostram de maneira esquemática as setas na Figura 7.

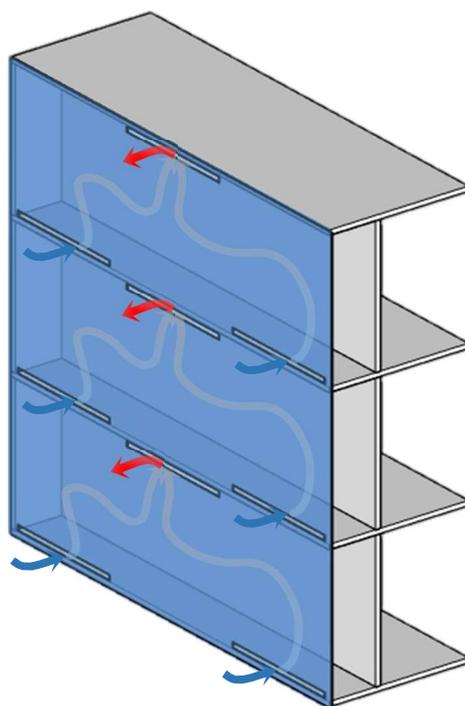


Figura 7 Fachada dupla tipo corredor

d. Tipo Múltiplos Andares

A tipologia de fachada dupla de múltiplos andares é, dentre as estudadas, a menos compartimentada, podendo inclusive constituir um único módulo para toda a fachada. Contudo, pode possuir mais compartimentações, desde que não se enquadre em nenhuma das categorias supracitadas. De forma similar às demais, a tomada de ar ocorre na base, enquanto a saída acontece na parte superior do módulo, como mostra a Figura 8. Como normalmente não possui módulos abaixo nem acima, essa troca pode ocorrer diretamente pela base e pelo topo da cavidade, e não através de aberturas na pele externa.

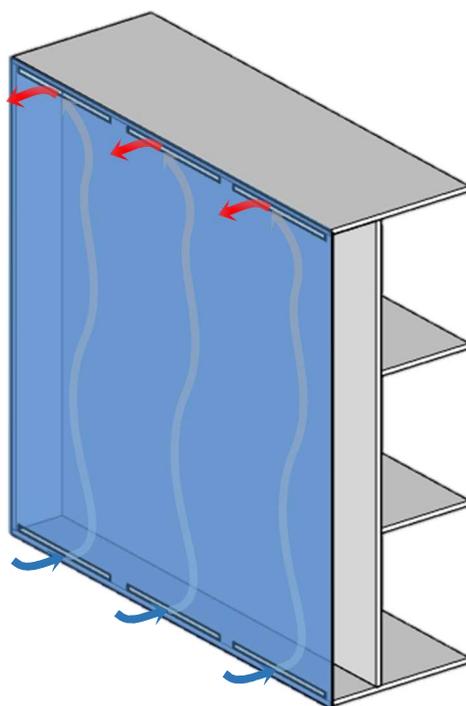


Figura 8 Fachada dupla tipo múltiplos andares

2.5.2 Classificação pela Forma de Ventilação da Cavidade

A classificação pela forma de ventilação da cavidade caracteriza a relação entre a troca de ar entre o exterior, a cavidade e o interior do edifício, além dos atributos das aberturas dos ambientes e operação das peles da fachada dupla. Segundo Lang e Herzog (2000), existem três categorias distintas: fachada dupla de amortecimento, fachada dupla com extração de ar e fachada dupla gêmeas. Posteriormente, Boake *et al.* (2003) contribuíram com a classificação ao sugerirem uma quarta categoria, a fachada dupla híbrida. São, portanto, quatro categorias, apresentadas a seguir.

a. Fachada Dupla De Armazenamento

O sistema de fachada dupla de armazenamento⁷ é o mais antigo dos tipos da classificação pela forma de ventilação da cavidade (BOAKE *et al.*, 2003). O sistema funciona como uma barreira de isolamento térmico, especialmente em virtude do colchão de ar existente na cavidade. Como o nome sugere, sua principal característica é a capacidade armazenar calor solar dentro da cavidade com o emprego de uma pele externa envidraçada. Assim, no inverno, armazena-se o ar aquecido

⁷ O termo “buffer”, utilizado em inglês tem o sentido literal de armazenar. Contudo como sugerem Pollard e Beatty (2008), no caso desse sistema de fachada dupla, há a ideia de amortecer ou minimizar as trocas térmicas, ou até mesmo de servir como forma de isolamento.

dentro da cavidade, que se mantém fechada e amortece as trocas térmicas entre o espaço externo e interno da edificação. No entanto, no verão, a partir da sua flexibilidade de operação, evita-se o superaquecimento ao abrir as aberturas na base e topo da cavidade, pois estas permitem a ventilação por meio de uma corrente convectiva do efeito chaminé, exposta na Figura 9. Contudo, os sistemas de ventilação da cavidade e do ambiente interno da edificação são mantidos separados (POLLARD, BEATTY, 2008).

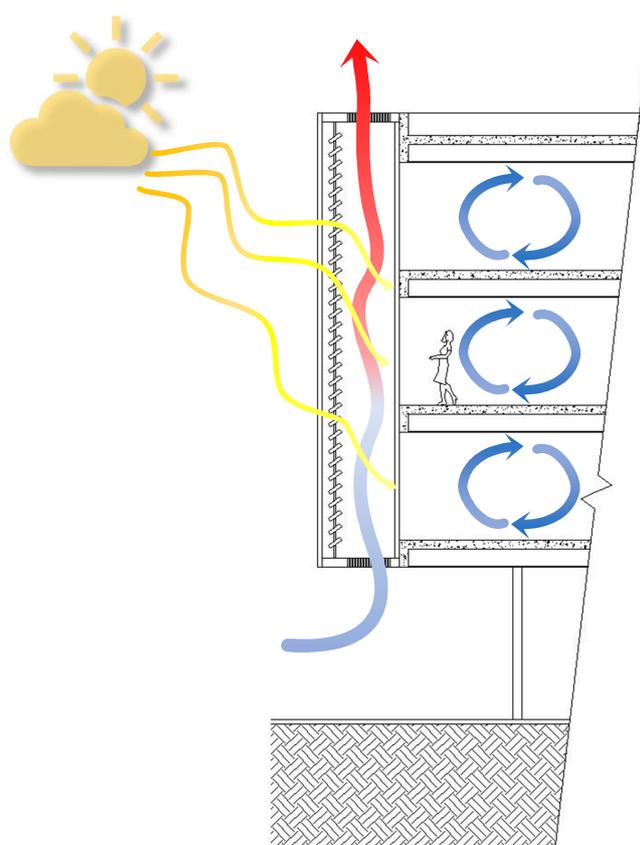


Figura 9 Corte esquemático do funcionamento da fachada dupla de armazenamento.

b. Fachada Dupla Com Extração De Ar

Nas fachadas duplas com extração de ar, o sistema de ventilação mecânica e condicionamento de ar dos ambientes internos utiliza a ventilação natural decorrente o efeito chaminé dentro da cavidade para auxiliar a retirada do ar quente, como mostram as setas vermelhas na Figura 10 (BOAKE *et al.*, 2009; POLLARD, BEATTY, 2008). Esse processo acentua o efeito convectivo dentro da cavidade, visto que o ar quente retirado do interior do edifício aumenta ainda mais a temperatura do ambiente. A cavidade tem funcionamento similar com a fachada dupla de amortecimento. De forma similar, a maior temperatura do ar da cavidade diminui a diferença de temperatura na pele interna quando a temperatura exterior é menor que a

interior e funciona como uma barreira isolante e um armazenador de calor, benéficos no inverno. Já nos períodos mais quentes, aproveita-se o efeito da chaminé térmica para induzir a ventilação e a retirada do calor.

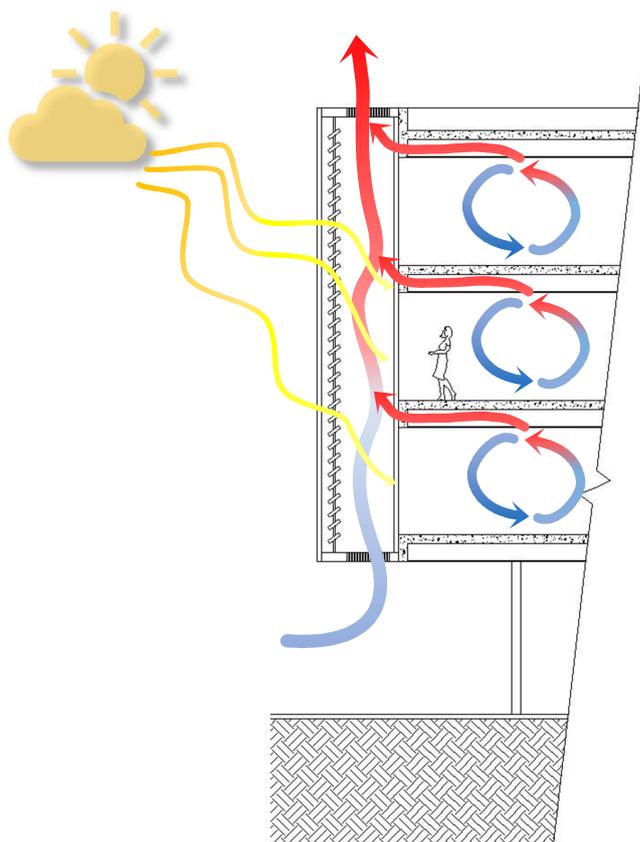


Figura 10 Corte esquemático do funcionamento da fachada dupla com extração de ar.

c. Fachada Dupla Gêmea

Nessa categoria de fachada dupla, tanto a pele interna quanto a pele externa são operáveis, por isso são chamadas de gêmeas (Figura 11). Contudo, isso não implica na utilização do mesmo material nas duas fachadas, sendo comum a externa ser de vidro e a interna composta de material com característica termoacumuladora. Este sistema possibilita grande flexibilidade de manuseio e permite diversas formas de ventilação (BOAKE *et al.*, 2003). As aberturas podem favorecer o resfriamento noturno e assim diminuir a demanda energética para condicionamento do edifício. Por outro lado, em condições climáticas mais frias, esta fachada pode-se manter totalmente fechada e funcionar como uma fachada dupla de armazenamento. A principal vantagem sobre os demais sistemas já mencionados é a facilidade para a extração de calor devido a sua grande flexibilidade de manuseio (POLLARD, BEATTY, 2008).

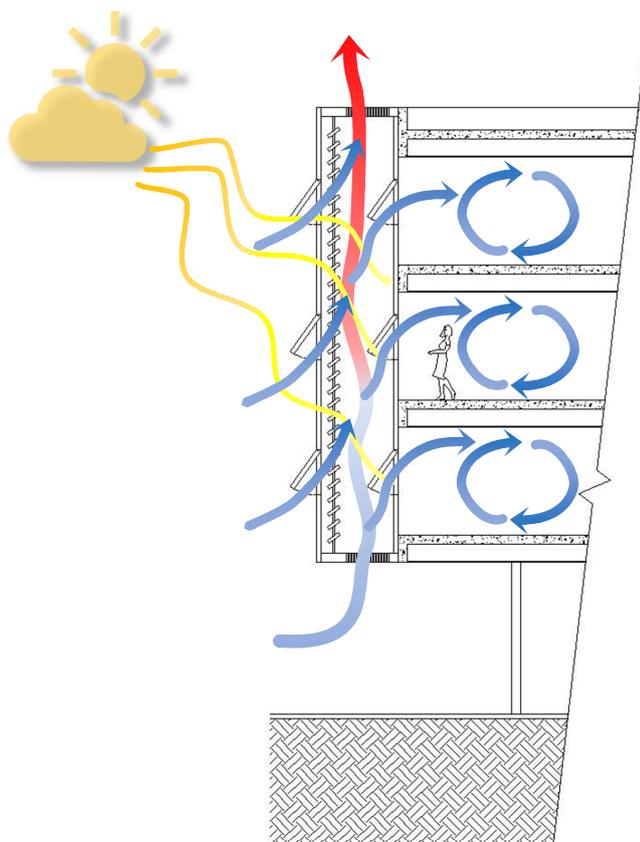


Figura 11 Corte esquemático do funcionamento da fachada dupla gêmea.

d. Fachada Dupla Híbrida

A fachada dupla híbrida é uma especialização das fachadas duplas de armazenamento, de extração de ar e gêmea com considerações específicas a condições climáticas diferentes da temperada. Isso é especialmente importante no emprego de fachadas duplas em locais com clima quente, pois, assim, se consideram mais adequadas as demandas bioclimáticas desses climas. Dessa forma, a própria pele externa assume o papel de proteção solar, especialmente por adotar características mais opacas, em oposição à fachada cortina envidraçada, que normalmente compõe a pele externa nos climas temperados. Além disso, a partir da maior permeabilidade da pele externa, possibilita-se maior ventilação (BOAKE, 2014). A Figura 12 mostra a entrada de ar da cavidade no ambiente interno, porém também pode ocorrer a extração do ar interno pela cavidade.

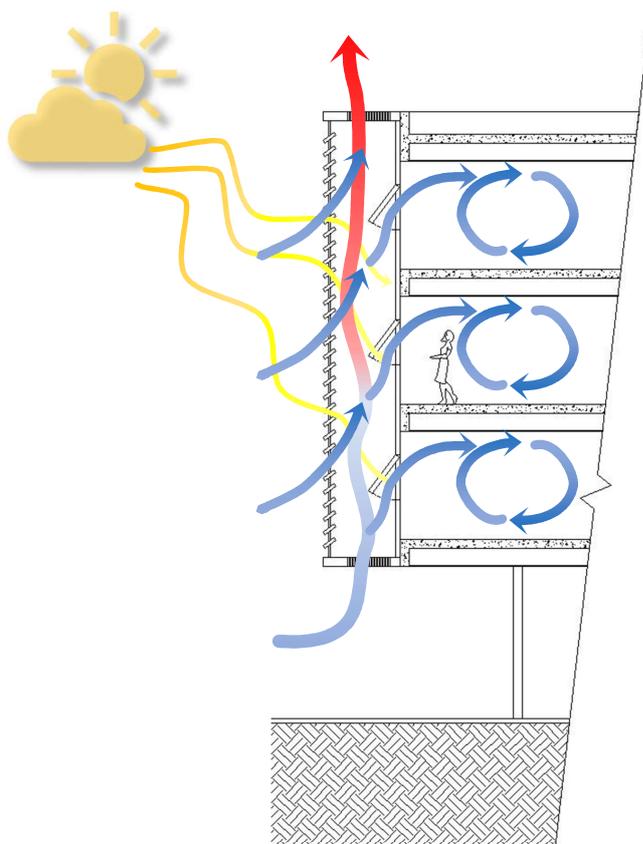


Figura 12 Corte esquemático do funcionamento da fachada dupla híbrida.

2.6 FACHADAS DUPLAS EM CLIMAS QUENTES

O emprego de fachadas duplas em regiões com climas quentes habitualmente mimetiza soluções exógenas e segue os mesmos padrões da arquitetura internacional, especialmente em edifícios corporativos em altura com alta taxa de envidraçamento, que são encontrados indistintamente em diversos locais do globo apesar das díspares características climáticas. Esse tipo de solução com alta taxa de envidraçamento é mais adequado aos climas temperados, aos quais foi desenvolvido e onde os maiores esforços de investigação sobre o desempenho de fachadas duplas são realizados.

Apenas recentemente pesquisadores têm dedicado maior atenção ao emprego de fachadas duplas em climas quentes. A maioria dos estudos aponta benefícios limitados e restritos aos períodos menos quentes (ALIBABA, OZDENIZ, 2016; BARBOSA, 2012; BARBOSA, IP, 2014). Essas análises são realizadas exatamente para esse tipo de solução menos adequada à natureza climática local, com alta taxa de envidraçamento. Entretanto, atualmente já é possível vislumbrar alternativas de sistemas de fachada dupla que propiciem um melhor desempenho térmico de edificações em climas quentes.

Diferentemente do emprego em climas temperados, onde os maiores benefícios são o isolamento térmico e o armazenamento de calor, o maior benefício que o sistema de fachadas duplas envidraçadas proporciona em climas quentes é a ventilação natural proveniente do efeito chaminé (BARBOSA, 2012). Apesar de ser uma abordagem contra intuitiva, o aumento de temperatura na cavidade da fachada dupla é o meio pelo qual se diminui o calor e melhora o conforto térmico da edificação. Isso ocorre, porque o fluxo de ar da cavidade propicia ventilação cruzada no interior do edifício, por extrair o ar nas aberturas voltadas à cavidade. Conseqüentemente, devido à pressão negativa existente no ambiente interno, ocorre a tomada de ar fresco pela fachada oposta. Esse fenômeno ocorre mesmo em situação de calma, já que o processo só depende da diferença de densidade do ar aquecido.

Contudo, como apresentam Barbosa e Ip (2014) para fachadas duplas de armazenamento e múltiplos andares para diversas capitais brasileiras, os melhores resultados do emprego de fachadas duplas ocorrem em locais com climas mais amenos – regiões sul e sudeste; ou pelo menos em períodos com temperaturas mais baixas – inverno e primavera nas demais regiões. Isso ocorre por dois motivos: primeiro, porque quando há maior diferença de temperatura entre a cavidade e o exterior se acentua o efeito chaminé e, assim, a ventilação; segundo, porque quando a temperatura externa já é demasiadamente elevada, o ar fresco que entra no edifício não é capaz de promover resfriamento de forma adequada (BARBOSA, IP, 2014).

Apesar de as tradicionais soluções de fachada dupla envidraçadas serem extremamente propícias ao fenômeno de chaminé solar e conseqüentemente fornecer ventilação a todo conjunto edificado, esse tipo de solução é conflitante com a demanda por proteção contra o ganho térmico por radiação solar, que é a estratégia mais importante ao desempenho termoenergético do sistema de fachada dupla em climas quentes (BOAKE, 2014). Evitar que se ganhe o calor é mais fácil do que ter de posteriormente retirá-lo. A diminuição da radiação pelo reduzido fator solar do vidro da fachada dupla envidraçada ainda é um aspecto de pouca relevância se comparada a toda carga térmica. Dessa forma, o emprego de sistema de fachada dupla envidraçada não é a estratégia mais recomendada para climas quentes, haja vista a relevância do ganho térmico por radiação solar nessas condições (POLLARD, BEATTY, 2008).

A utilização de elementos opacos na pele externa mostra-se uma prática eficiente nesse sentido. Estudos apontam melhores resultados para peles externas — com elemento opaco em alvenaria — com taxa de abertura em torno de 50% (YELLAMRAJU, 2004). Esse tipo de solução, além de evitar a transmissão direta de calor por radiação, se beneficia da massa térmica da alvenaria.

Apesar da insistência em soluções com alta taxa de envidraçamento, alternativas que conciliam maior taxa de opacidade, ventilação natural e massa térmica são empregadas em locais

de climas quentes hoje em dia. Por não se enquadrarem nas tradicionais categorias da classificação de ventilação da cavidade e características da pele externa, são denominadas de fachadas híbridas (BOAKE, 2014). Atualmente, têm seu maior campo de aplicação nos países do oriente médio e remetem a soluções vernaculares, como o *muxarabi*.

2.7 FACHADAS DUPLAS NO CONTEXTO CLIMÁTICO DE BRASÍLIA

Brasília é estrategicamente implantada no Planalto Central do Brasil, a 15,78° Sul de latitude e 47,92° Oeste de longitude, em posição central no território nacional. Possui altitude de 1.070 m, em média (GDF) e seu território está inserido no bioma Cerrado, caracterizado por verão chuvoso e inverno seco.



Figura 13 Mapa da divisão climática do Brasil.
 Fonte: IBGE (2002).

O IBGE (2002) caracteriza o clima local como subquente, semiúmido e tropical Brasil central, com médias entre 15 °C e 18 °C em pelo menos um mês do ano e período seco de 4 a 5 meses (Figura 13). Já Maciel (2002) e Ferreira (1965) definem o clima como tropical de altitude. Similarmemente, Köppen-Geiger caracteriza o Distrito Federal como três tipos de mesoclima: clima

tropical com inverno seco (Aw), clima temperado úmido com inverno seco e verão quente (Cwa), e clima temperado úmido com inverno seco e verão temperado (Cwb) (SILVA, 2013). Zanoni, (2015) ao atualizar as normais climatológicas, evidencia a sazonalidade com distinção dos períodos de seca, no outono e no inverno, e chuvas, na primavera e no verão. A precipitação chega a ter média próxima a zero entre os meses de junho a agosto, enquanto a umidade relativa do ar chega a atingir médias inferiores a 50% para o mês de agosto, como mostram os gráficos da Figura 14 e Figura 15 (INMET, 2016).

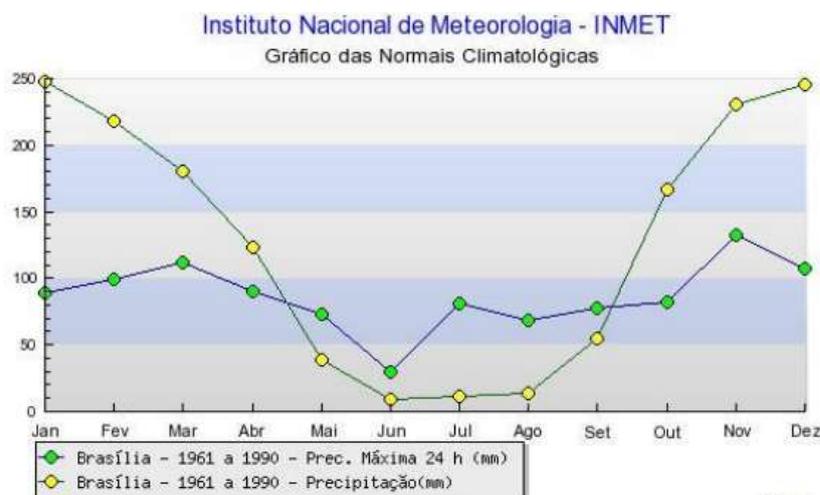


Figura 14 Série da média mensal da precipitação.
Fonte: INMET (2016)



Figura 15 Série da média mensal da umidade relativa do ar.
Fonte: INMET (2016)

A sazonalidade também é encontrada no padrão da ocorrência e intensidade dos ventos. O vento oriundo da direção leste predomina durante a maior parte do ano, de março a novembro,

enquanto nos meses de verão predominam os provenientes das direções noroeste e norte. O vento leste também é aquele com maior intensidade, contudo, mesmo assim, caracteriza-se predominantemente como no máximo brisa leve⁸. Os meses do final do período de seca — de junho a setembro — são os que possuem ventos mais intensos (ZANONI, 2015).

Por outro lado, a variação térmica anual segue padrão próprio de sazonalidade, distinto do habitual, como os meses mais frios e quentes muito próximos. Tanto o mês de maior quanto o de menor temperatura máxima média se encontram no período de seca: julho e setembro, respectivamente. Fevereiro é o segundo mês com maiores médias máximas. No período de chuvas a amplitude térmica diária é consideravelmente menor que no período de seca (ZANONI, 2015). Por exemplo, setembro, o mês com maiores médias máximas, também é o quinto com menores médias mínimas, em razão das altas temperaturas durante o dia e baixas durante a noite. A amplitude térmica diária é maior que 10 °C em aproximadamente 50% do ano (ZANONI, 2015). Esse fenômeno é responsável pela maior quantidade de horas de desconforto por frio, em 46% de todas horas do ano (PROJETEEE, n.d.). Contudo, esse desconforto ocorre durante a madrugada, logo sua influência e percepção são diminutas.

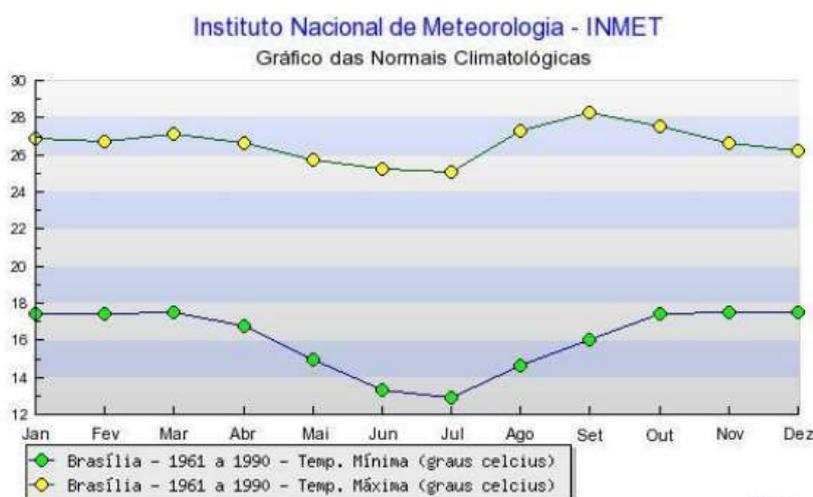


Figura 16 Serie das médias máximas e mínimas mensais da temperatura.
Fonte: INMET (2016).

2.7.1 Recomendações Bioclimáticas

Compilam-se as principais soluções bioclimáticas e de eficiência energética em edificações por meio da plataforma Projeteee, que utiliza a carta psicrométrica para apontar a porcentagem do total de horas do ano, estação ou período em que determinada estratégia de condicionamento é

⁸ Entre 1,6 m/s e 3,3 m/s

mais recomendada. A Tabela 1 expõe as porcentagens das principais estratégias para Brasília para todo ano, ou pelos períodos diários relativos ao uso de edificações comerciais — manhã, tarde e noite.

Tabela 1 Porcentagem de horas de aplicabilidade de estratégia para mitigar o desconforto

Estratégia	Geral	Manhã	Tarde	Noite
Inércia Térmica	52%	50%	7%	54%
Ventilação Natural	22%	18%	37%	38%
Sombreamento	10%	16%	34%	0%
Aquecimento Solar Passivo	8%	11%	0%	1%
Resfriamento Evaporativo	5%	5%	9%	8%

Fonte: Projeteee (n.d.), extraído da carta psicométrica com dados climáticos de Roriz (2012).

As três principais estratégias mais adequadas para mitigar o desconforto climático durante todo o ano em Brasília são, na respectiva ordem de importância: inércia térmica, ventilação natural controlada e sombreamento. A inércia térmica proporciona menor variação de temperatura, especialmente por meio do atraso térmico; visto que para o clima local o maior desconforto ocorre por frio, sua aplicação é mais relevante nos períodos matutino e noturno. A ventilação natural controlada e o sombreamento são essenciais ao controle do desconforto por calor. O sombreamento funciona de maneira a impedir que o calor em forma de radiação penetre na edificação, e assim, tem maior efeito quando há maior temperatura e radiação, no período da tarde. Já a ventilação natural controlada auxilia na retirada do calor do usuário e/ou do calor acumulado na massa térmica da edificação, sendo, dessa forma, mais eficiente durante e logo após os períodos em que há ganho de calor significativo, no período vespertino e no início da noite.

2.7.2 Aplicabilidade das Fachadas Duplas em Brasília

Fachadas duplas apresentam grande potencial de aplicação ao clima de Brasília por serem capazes de conciliar as estratégias mais adequadas para lidar com o desconforto e propiciar melhor desempenho da edificação. Como mencionado anteriormente, em climas quentes, os principais benefícios que os sistemas de fachada dupla podem oferecer são o controle da ventilação controlada e sombreamento. Além disso, a inércia térmica pode ser facilmente incorporada no sistema de fachada dupla, tanto na pele interna como na pele externa.

A capacidade de oferecer ventilação natural controlada mesmo em situação de calma, devido ao efeito chaminé, é apontada como o principal benefício que o sistema de fachada dupla pode propiciar em climas quentes, especialmente no emprego de peles externas com alta taxa de

envidraçamento. Visto que em Brasília a intensidade dos ventos não é considerada alta e a estratégia de ventilação controlada é a segunda mais recomendada para mitigar o calor, as fachadas duplas podem satisfazer papel relevante na melhora do desempenho termoenergético das edificações locais. Além do mais, a ventilação controlada tem maior importância nos períodos de pico de calor, o que pode ser fundamental na diminuição do consumo de sistema de condicionamento de ar, quando empregado.

A diminuição da incidência de radiação por meio de estratégias de sombreamento é a segunda estratégia mais recomendada para Brasília no que diz respeito à redução do desconforto por calor. Neste sentido, as fachadas duplas são capazes de reduzir a incidência de radiação até mesmo em situações de pele envidraçada. Com o aumento do número de camadas de vidro, aumenta-se o fator solar que diminui a incidência da radiação quando comparada a soluções com envidraçamento simples. Essa diminuição é ainda maior com o emprego de fachadas duplas híbridas, com peles externas compostas de elementos opacos, o que se almeja investigar no presente trabalho.

Por mais que não seja parte usualmente integrante dos sistemas de fachada dupla, a inércia térmica é uma estratégia que pode ser incorporada na composição dos sistemas. Especialmente nas peles internas, o que por sinal está em concordância com sugestões da NBR 15.575, para o emprego de massa térmica no interior de edificações residenciais.

2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Compostas por duas fachadas com uma cavidade de ar entre elas, usualmente com pele externa envidraçada, as fachadas duplas têm sido um tipo de solução muito presente na arquitetura, tendo sido frequentemente empregadas desde o final do século passado, com a crescente preocupação ambiental.

O emprego das fachadas duplas propõe-se a promover maior eficiência energética durante a operação da edificação aliada a maior conforto ambiental, especialmente pelo emprego de peles externas de vidro. Apesar de ser mais adequada a climas temperados, essa tipologia dissemina-se mundo a fora, inclusive em locais com climas tropicais, o que pode levar a sérios problemas de desempenho energético e conforto ambiental. Mesmo em climas temperados, de onde são originárias e mais adequadas, ainda existem diversos questionamentos relativos ao seu desempenho termoenergético.

Estudos apontam que, especificamente em climas quentes, os benefícios das fachadas duplas residem na capacidade de indução da ventilação pelo efeito chaminé, contudo esses resultados mostram-se restritos a épocas do ano ou localidades com climas mais amenos.

Para amenizar a carga térmica proveniente da radiação solar, percebe-se, assim, a necessidade de buscar abordagens alternativas a fachadas duplas envidraçadas, mais aptas às demandas do clima. Fachadas duplas híbridas, com maior taxa de opacidade e permeabilidade da pele externa ao vento, apresentam-se como soluções mais adequadas, especialmente quando aliadas à utilização de massa térmica no interior da edificação, como na pele interna da fachada dupla.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, descrevem-se os procedimentos metodológicos da pesquisa, sendo apresentadas as etapas da execução da pesquisa e também os recursos utilizados no trabalho. Subdivide-se em três partes:

1. Método: apresenta em linhas gerais as etapas da pesquisa;
2. Materiais: detalha os recursos; e
3. Procedimentos: explica de forma minuciosa todas as atividades das etapas de coleta e tratamento de dados.

3.1 MÉTODO

A presente pesquisa tem natureza descritiva e quantitativa, por aspirar compreender e descrever fenômenos físicos — mesmo que por meio de modelos virtuais — a partir da observação e por almejar quantificar esses resultados. Essa natureza é mais evidente na coleta de dados, especialmente por meio dos experimentos com as ferramentas de simulação. Contudo, cada etapa possui características próprias, que podem divergir, em parte, da proposta metodológica geral. A Figura 17 apresenta as diferentes etapas do método do desenvolvimento da pesquisa.

A definição do tema de pesquisa parte de uma investigação exploratória, que visa compreender melhor o atual cenário do amplo campo de pesquisa de arquitetura bioclimática e soluções passivas de condicionamento térmico, especialmente as estratégias voltadas a climas tropicais. Para esse fim, é realizado um vasto levantamento bibliográfico, principalmente por meio de artigos livremente disponíveis. A partir dessa análise inicial destaca-se o estudo do espaço como

elemento de envoltória, que intermedia as relações entre o interior e o exterior, que ocorre por meio de estudos mais aprofundados, com leituras inclusive de manuais, livros, dissertações e teses. Esse levantamento se baseia principalmente nos estudos do espaço intermediário, de Coch (2003), e fachadas espacializadas, de Trubiano (2013). Por se tratar de um tema correlato, de muito interesse no meio científico atualmente, e por ser um fenômeno razoavelmente recente e com investigações limitadas em climas tropicais, definiu-se pelo estudo das fachadas duplas como foco de investigação desta dissertação.

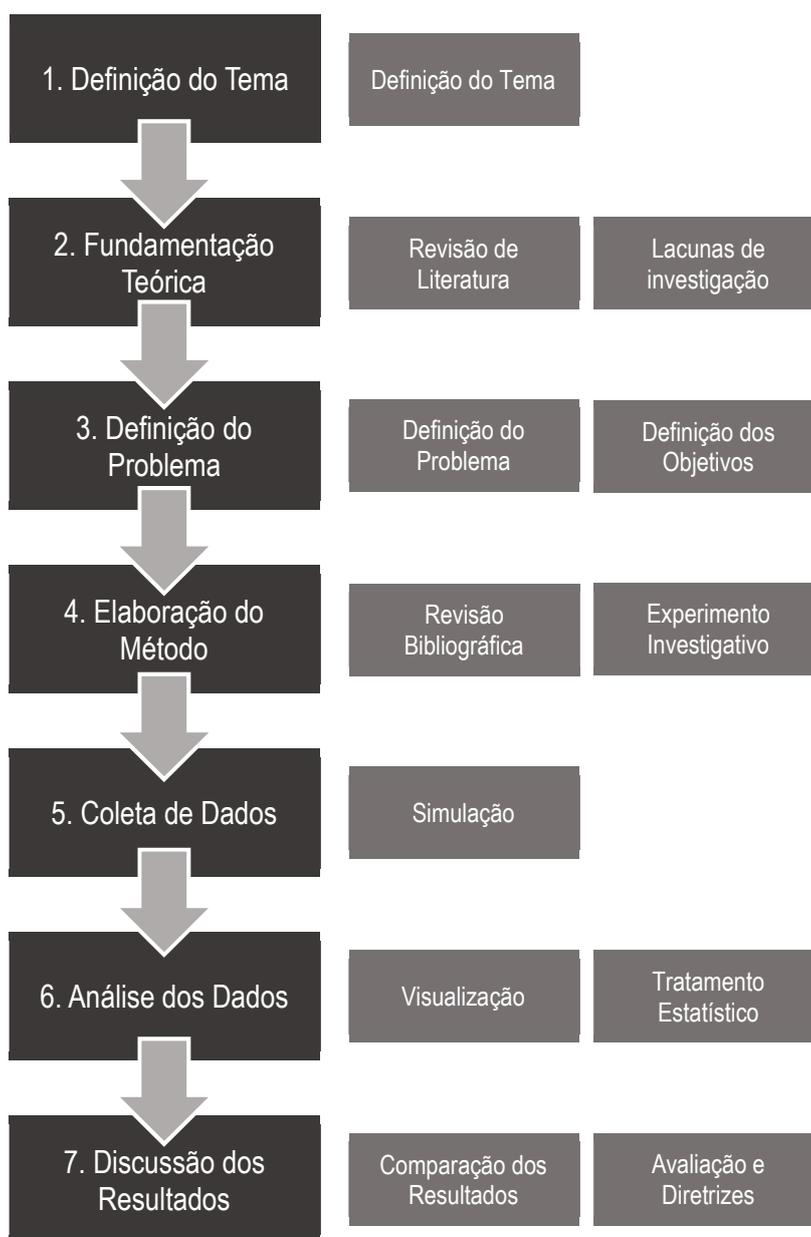


Figura 17 Fluxograma das etapas da pesquisa.

Dessa forma, em uma segunda etapa, parte-se para uma revisão de literatura sobre as fachadas duplas, especialmente quanto ao seu emprego em climas quentes. Isso permite compreender o estado da arte atual do campo de investigação e averiguar as lacunas existentes e potenciais ainda a serem exploradas. Essa etapa de revisão fundamenta-se na leitura de anais de congresso, artigos científicos, dissertações e teses. Em um primeiro momento, analisa-se o contexto global, para, num segundo momento, dar maior enfoque às regiões periféricas — com climas mais quentes — e especificamente no Brasil. Desses conteúdos analisados, destacam-se Oesterle *et al.* (2001), Boake *et al.* (2003), Boake (2014), Poirazis (2006), Barbosa (2012, 2016), Barbosa e Ip (2014) e Pollard e Betty (2008). Essa análise é resultado do trabalho de conclusão de cursos da pós-graduação *lato sensu* REABILITA.

A partir da revisão de literatura do emprego de fachadas duplas em climas tropicais procede-se à elaboração e concepção do processo de investigação da pesquisa propriamente dita. Isso compreende a terceira e quarta etapa do trabalho: definição do problema e elaboração do método.

A problemática da pesquisa nasce das lacunas observadas na revisão e são mais bem trabalhadas e refinadas durante as atividades da disciplina de Seminário do Programa de Pós-Graduação/FAU e o I Colóquio sobre Pesquisas em Simulação Computacional no Ambiente Construído. Essas contribuições dos pares auxiliaram na definição dos objetivos e no desenvolvimento do método de investigação de forma preliminar. Esse método é colocado a prova em um exercício piloto, em um experimento investigativo que resulta no trabalho apresentado em Congresso Científico – explicado detalhadamente em 3.1.1 Estudo Exploratório. Esse exercício representa um passo importante no refinamento do método de investigação da dissertação, pois apresenta na prática os potenciais e as limitações da estratégia de investigação adotada.

A partir dessas considerações, realiza-se uma nova imersão na literatura para melhor compreender os métodos de simulação utilizados para a análise de desempenho de fachadas duplas e, assim, realizar uma reformulação do método da dissertação. Destacam-se os trabalhos de Hensen *et al.* (2002), Manz e Frank, (2005), Pappas e Zhai (2008), Kim e Park (2011), Barbosa *et al.* (2015).

A quinta e a sexta etapas da pesquisa estão relacionadas ao próprio trabalho da investigação, tanto da coleta de dados — quinta etapa — como a análise desses dados — sexta etapa.

Realiza-se a coleta de dados basicamente por meio de simulação computacional e de simulação dinâmica termoenergética. Dessa forma, avaliam-se o desempenho energético e as condições térmicas do edifício modelado virtualmente, com o auxílio do programa *EnergyPlus* e

intermédio da interface gráfica *DesignBuilder*, apresentados no item 3.2.1 Programa de Simulação Computacional.

Como se busca entender a adequação e o desempenho das soluções de fachadas duplas ao contexto climático de Brasília, a etapa de coleta de dados analisa o impacto de diversos parâmetros de projeto de fachadas duplas, especificamente a materialidade e a taxa de permeabilidade da pele externa, a largura, o tipo e a altura da cavidade, a orientação da fachada e a estratégia de condicionamento do ambiente interno. Para tanto, divide-se o procedimento de coleta de dados em ciclos de simulações, cada um com propósitos específicos a serem avaliados. São quatro ciclos: o primeiro para avaliação de alternativas de vidro para pele externa; o segundo para avaliar os parâmetros de projeto de fachadas duplas envidraçadas; o terceiro para avaliar os parâmetros de projeto de fachadas duplas híbridas — que possuem elementos opacos na pele externa —; e o quarto e último para avaliar o emprego do condicionamento híbrido tanto nas fachadas duplas envidraçada como nas híbridas. Essas atividades relativas aos passos metodológicos do processo de coleta de dados são explicadas em maior detalhe no item 3.3 PROCEDIMENTOS..

A definição da tipologia básica, assim como a caracterização da sua geometria, sistemas construtivos e demais sistemas, baseia-se em levantamentos realizados por Lima (2010), Costa *et al.* (2017) e Costa (2018).

Na sexta etapa, à avaliação dos parâmetros de projeto investigados, resumam-se os resultados por meios de visualizações gráficas para facilitar a análise, a comparação e a compreensão destes. Além disso, a análise dos resultados apoia-se na análise estatística realizada por meio de análise de variância (ANOVA), acompanhadas de testes estatísticos de diferença significativa de Tukey, desenvolvidos por meio do programa Past versão 3.0.

Essas análises auxiliam na sétima etapa, avaliação e comparação dos resultados, que serve como fechamento do trabalho. Realiza-se a sintetização dos resultados, de forma a evidenciar a relevância e o impacto dos parâmetros de projeto e assim desenvolver considerações para auxiliar a tomada de decisão de projeto de fachada dupla ao contexto climático de Brasília.

3.1.1 Estudo Exploratório

Com o propósito de testar a metodologia proposta, realizou-se um estudo exploratório para avaliar os potenciais e limitações da abordagem estruturada até o momento. Apresentaram-se os resultados desse experimento no Congresso *Sustainability Laboratory 2017*, em Porto, Portugal,

com o título “*Hybrid Double-Skin Façade: Thermal and Energy Performance in Brasília, Brazil*”⁹ (GOES, SILVA, 2017).

Diferentemente da análise de edificações comerciais proposta na presente dissertação, optou-se, no experimento, pela análise de um edifício residencial, similar ao modelo das edificações das superquadras de Brasília, apartamentos vazados, sobre *pilotis*. Utilizou-se a tipologia com 6 pavimentos, como mostra a Figura 18. O objetivo do estudo foi averiguar o impacto do emprego de fachadas duplas híbridas – com materiais opacos na pele externa; tanto quanto ao consumo de energia elétrica pelo ar condicionado como quanto ao conforto térmico quando não houvesse sistema de climatização ativo. Dessa forma, propôs-se a criação de fachada dupla por meio da adição de um espaço intermediário a uma das fachadas da edificação (Figura 18 à direita), algo semelhante a uma varanda ou circulação. Essa solução caracteriza esse espaço como uma cavidade de uma fachada dupla tipo corredor de natureza híbrida, com pele externa opaca e permeável.

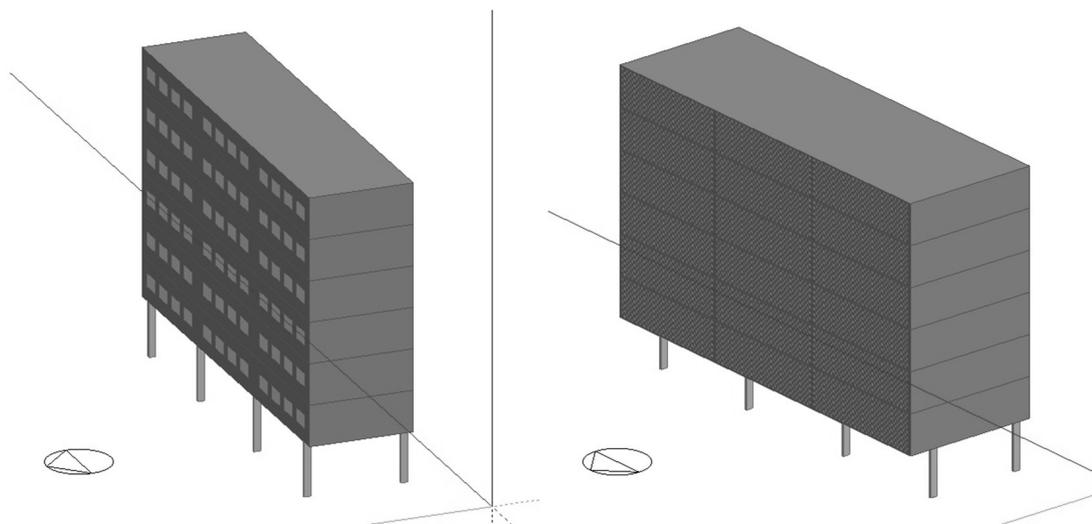


Figura 18 Modelo virtual da tipologia simulada sem (esq.) e com (dir.) fachada dupla

a. Método

Assim, a pesquisa possui duas vertentes: uma da análise do desempenho termoenergético e outra relativa ao conforto térmico. A primeira avalia o consumo de energia em kWh/ano, enquanto a segunda mede o conforto térmico por meio do percentual de horas ocupadas em

⁹ Artigo prestigiado com o prêmio de melhor trabalho no tópico de eficiência energética das edificações do congresso.

conforto (POC), segundo a condição de conforto — Equação 1 — a partir da temperatura neutra — Equação 2 — de Auliciems (1981).

Equação 1 – Temperatura Neutra (AULICIEMS, 1981)

$$TO < TN$$

Em que:

TN é a temperatura neutra (°C);

TO é a temperatura operativa (°C).

Equação 2 – Temperatura Neutra (AULICIEMS, 1981)

$$TN = 17,6 + T_{ar}.0,341$$

Em que:

TN é a temperatura neutra (°C);

Tar é temperatura do ar (°C).

Testam-se 5 tipos diferentes de materiais para pele externa da fachada dupla, conforme a caracterização da Tabela 2. Além disso, avaliam-se 5 larguras de cavidade, de 1,00 m até 3,00 m com incrementos de 0,50 m. A permeabilidade da pele externa é fixa, com uma taxa de permeabilidade de 50%. Assim, totalizam-se 25 cenários avaliados mais um cenário de referência, como controle — aqui chamado de *baseline* —, o que totaliza 26 cenários. Entretanto, realiza-se o dobro de simulações, visto que existem cenários modelados com condicionamento artificial e natural. Dessa forma, têm-se 52 simulações.

Tabela 2 Caracterização dos materiais empregados na pele externa da fachada dupla no exercício exploratório

Sistema	Materiais	Espessura (cm)	Transmitância (W/m².K)
Alvenaria	Alvenaria com reboco	15,0	2,64
Concreto	Concreto	10,0	3,87
Madeira	Carvalho	7,5	1,57
Metal	Alumínio	0,5	5,88
Têxtil	PVC	0,1	5,57

A tipologia possui orientação longitudinal Leste-Oeste, e a fachada dupla é empregada na fachada Norte, como mostram a Figura 19 e a Figura 20. Há três unidades habitacionais por pavimento, com planta de 7,50 m x 10,00 m, o que totaliza o pavimento tipo com 7,50 m x 30,00

m. Contudo, essa divisão de unidades habitacionais só ocorre nos pavimentos em que, a princípio, realiza-se a análise de conforto térmico: primeiro, terceiro e sexto¹⁰. Nos demais pavimentos, não há divisão das unidades em zonas térmicas. Nas fachadas norte e sul, há a colocação de janelas, quatro por cada fachada de cada unidade, com medidas de 1,00 m x 1,60 m.

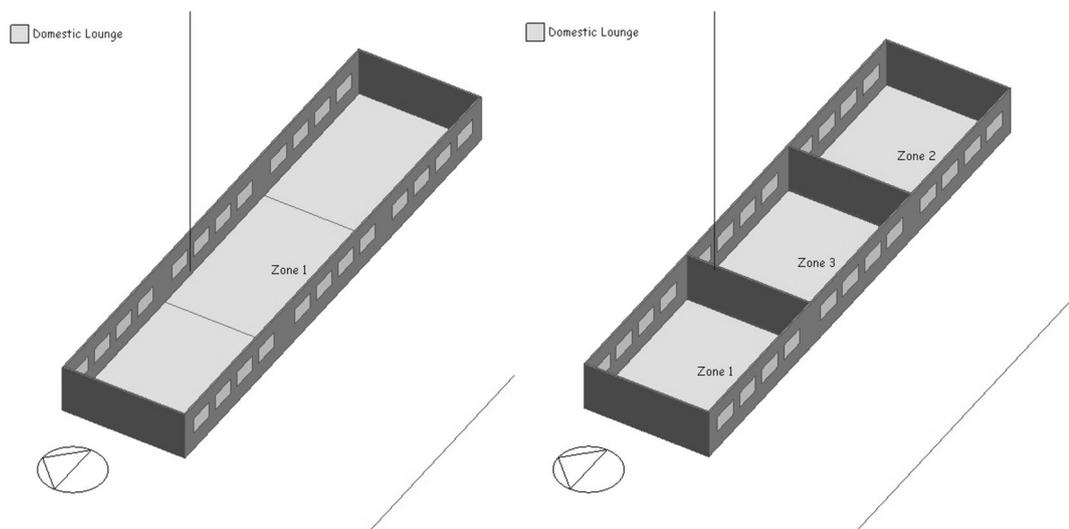


Figura 19 Divisão das zonas térmicas dos pavimentos sem a aplicação da fachada dupla

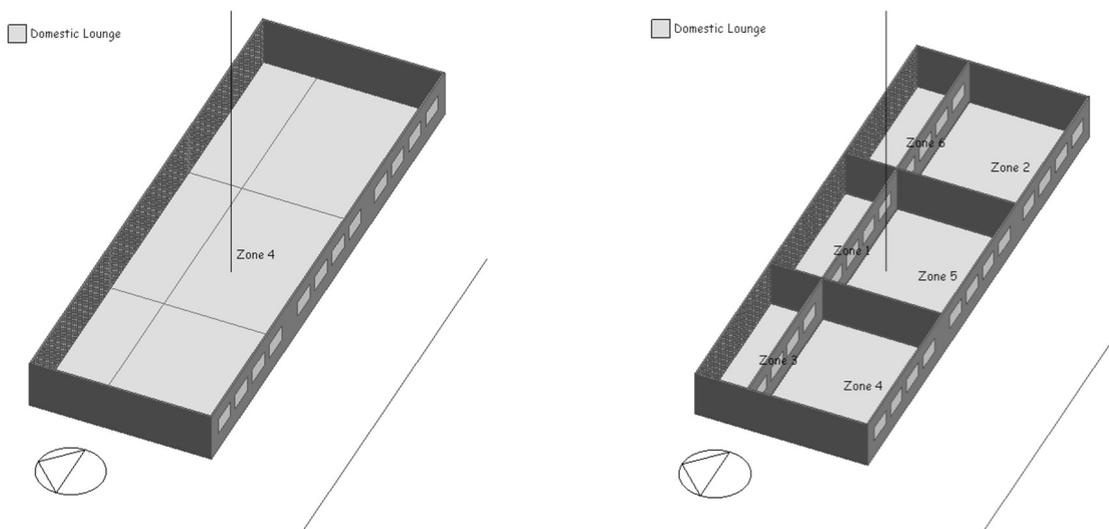


Figura 20 Divisão das zonas térmicas dos pavimentos com a aplicação da fachada dupla

¹⁰ A princípio, realizar-se-ia a análise de uma unidade com maior exposição à radiação – pavimento superior com fachada oeste; outra com menor exposição – pavimento inferior com fachada leste; e uma terceira intermediária – a unidade de gaveta do terceiro pavimento. Contudo, como o principal ponto a ser avaliado era o desconforto por calor, optou-se posteriormente por somente avaliar o caso de maior exposição.

A caracterização geral dos sistemas construtivos base — comuns a todos os modelos — segue a especificação da Tabela 3. Quanto às atividades, define-se o *template DesignBuilder domestic lounge* aos ambientes internos das unidades habitacionais, enquanto os espaços intermediários, que formam a cavidade da fachada dupla, são definidos como *domestic circulation*, ambos presentes na biblioteca do programa. O APÊNDICE A na página 127 apresenta maiores detalhes quanto as densidades, cargas e rotinas dos *templates*. Quanto ao arquivo climático, emprega-se o disponível no sítio eletrônico do Labeee, desenvolvido a partir dos dados do INMET (2009).

Tabela 3 Caracterização física dos sistemas de envoltória

Sistema	Espessura (mm)	Materiais	Transmitância (W/m ² .K)	Fator Solar (SHGC)	PAF (%)
Parede	150	Alvenaria com reboco	2,64	-	-
Piso	120	Laje de concreto	2,50	-	-
Cobertura	120	Laje de concreto	2,50	-	-
Janela	3	Vidro simples	6,26	0,86	21,3

Legenda:

PAF: percentual de área de abertura

Nos cenários com ventilação natural, a taxa de renovação do ar é de 5 renovações por hora, similar à análise da norma de desempenho (NBR 15.575). Nos cenários com condicionamento artificial, utiliza-se o sistema *Simple HVAC* no *DesignBuilder* que se apropria do *Ideal Loads* do *EnergyPlus*, com CoP do sistema de refrigeração *default* do programa, de 1,65. Em ambos os casos, a taxa de infiltração é a *default* sugerida pelo *DesignBuilder*, de 0,70 renovações de ar por hora.

b. Resultados

Quanto ao conforto térmico, há uma melhora significativa entre o *baseline* e os casos com o emprego da fachada dupla híbrida, como nota-se no Gráfico 1, que mostra os resultados à solução de fachada dupla híbrida com pele externa de concreto. Apesar de haver diferenças entre os materiais empregados na pele externa, o padrão é similar. Em todos os casos, há melhoria significativa do POC em todos os meses do ano, inclusive com a obtenção de 100% de horas confortáveis — quando se analisa somente a questão do calor — nos meses de junho e julho, para praticamente todos os materiais empregados na pele externa e todas as larguras da cavidade — somente uma largura do PVC não obteve esse valor em um dos meses. Além disso, percebe-se que não há muita distinção dos resultados com a variação da largura. A partir do Gráfico 2, observa-se que, em linhas gerais, para todos os materiais há uma leve diminuição das horas de desconforto

conforme aumenta-se a largura da cavidade. Além disso, observa-se que, a depender da largura da cavidade, a madeira e alvenaria — seguidas pelo concreto — são os materiais que possuem melhores resultados de conforto.

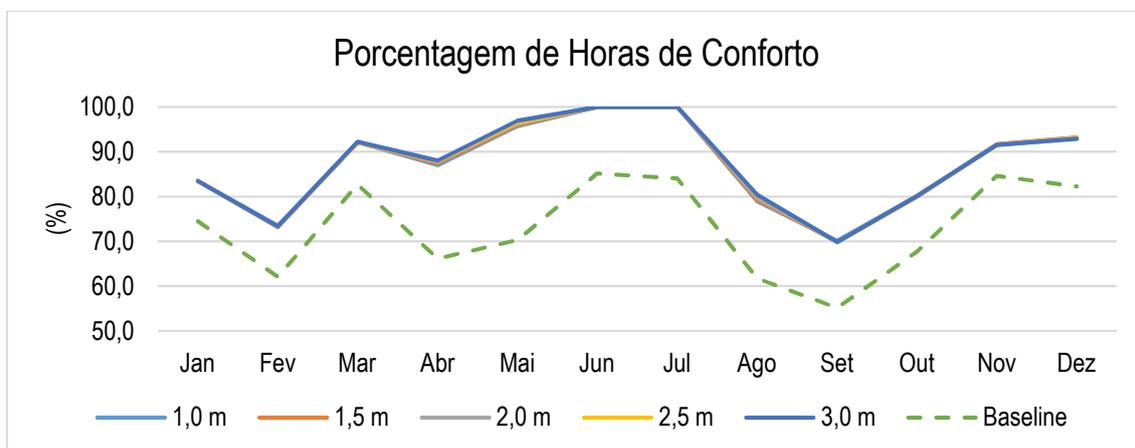


Gráfico 1 Série mensal do POC por largura da cavidade para o concreto

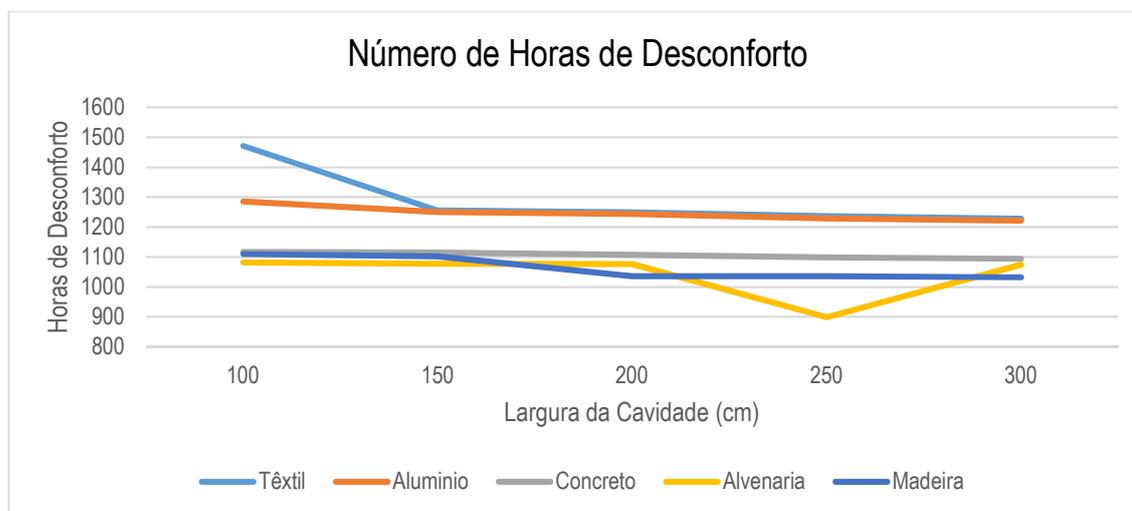


Gráfico 2 Série do número de horas em desconforto de material pela largura da cavidade

Já quanto ao consumo energético pelo sistema de condicionamento de ar de toda a edificação, observa-se tendência oposta, como mostra o Gráfico 3. Nota-se que para todos os diferentes materiais de pele externa da fachada dupla híbrida, há um aumento do consumo com o aumento da largura da cavidade. Mesmo assim, em praticamente todos os cenários — com exceção do alumínio e do PVC com a maior largura de cavidade — o emprego da fachada dupla possibilita uma redução significativa do consumo de energia de até 25%. Contudo, é importante salientar que esse padrão pode estar associado ao condicionamento da cavidade, e assim o aumento de área da cavidade significa mais energia para condicionamento. Entretanto, ao se analisar o Gráfico 4, que

avalia somente a unidade habitacional com maior exposição solar — sem a área de cavidade da fachada dupla — observa-se que há uma diminuição do consumo de energia com o aumento da largura da cavidade. Nessa circunstância, todos os cenários com o emprego de fachada dupla têm melhor desempenho em comparação ao *baseline*, e obtém-se uma redução do consumo de até 41%. Observa-se que, de forma semelhante à análise de conforto térmico, concreto, alvenaria e madeira têm resultados melhores do que alumínio e PVC. Na análise do consumo global de toda a edificação, a madeira e a alvenaria se sobressaem; na análise do cenário crítico de calor, os melhores resultados são do concreto e da alvenaria.

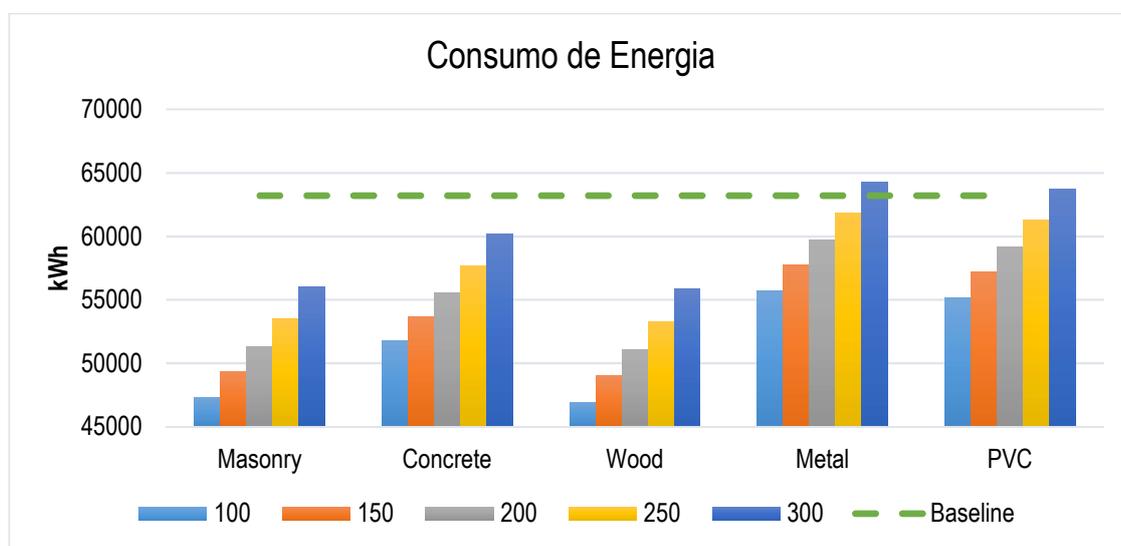


Gráfico 3 Gráfico de barras do consumo energia por cenário do material pela largura da cavidade para toda edificação

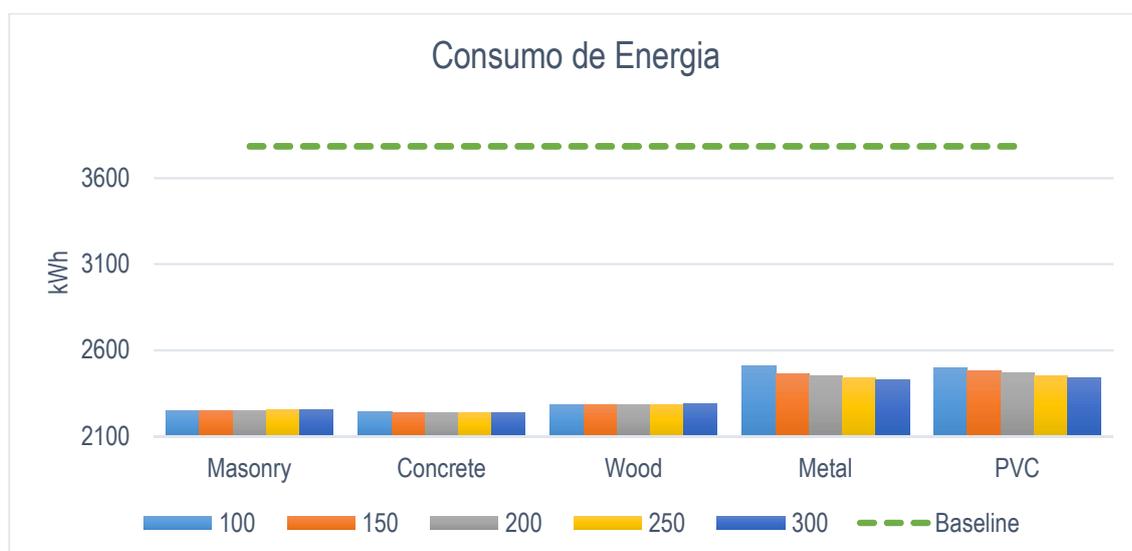


Gráfico 4 Gráfico de barras do consumo energia por cenário do material pela largura da cavidade para o cenário crítico

c. Conclusões e Recomendações

Dos resultados do estudo apresentado no congresso, é possível concluir, entre outros aspectos, que, nas condições do estudo, o emprego da fachada dupla possibilita melhorias marcantes de conforto térmico e desempenho termoenergético em comparação ao cenário sem fachada dupla. Além disso, percebe-se que, com o aumento da largura da cavidade da fachada dupla, há uma diminuição do consumo de energia de resfriamento, como uma melhoria da condição de conforto térmico ao cenário crítico, com pior condição de exposição — maior exposição solar. Entretanto, é a alteração dos materiais da pele externa que apresenta diferenças mais marcantes de resultados. Tanto o PVC quanto o alumínio, materiais com maior transmitância térmica, apresentam piores resultados, ao passo que a madeira, a alvenaria e o concreto possuem resultados próximos, com alternância do melhor entre a alvenaria e a madeira, a depender da análise e da largura da cavidade. Assim, supõe-se que há uma relação entre a transmitância térmica do material da pele externa da fachada dupla e o conforto térmico e desempenho termoenergético.

Esse exercício exploratório possibilitou compreender melhor o problema de pesquisa e as limitações e benefícios do método empregado. Percebeu-se que visualizações mais gráficas auxiliam melhor a compreensão dos resultados, inclusive com outros tipos de gráficos, como o gráfico de caixa. Contudo, essa forma de apresentação dos resultados não é capaz de avaliar o quanto as variações dos resultados são significativas, o que aponta a necessidade de análises estatísticas dos resultados.

Para demonstrar os benefícios das soluções híbridas de fachada dupla ao contexto climático de Brasília, percebeu-se a importância de compará-las com a solução tradicional, envidraçada. Observada a relevância da ventilação natural e do efeito chaminé na cavidade, também se notou a necessidade de avaliar a ventilação de forma mais precisa, diferentemente de taxas fixas como na norma de desempenho, como por exemplo por meio do modelo de rede de ventilação. Além disso, os resultados mostraram a necessidade de não se condicionar artificialmente a cavidade da fachada dupla para melhor avaliação dos resultados.

Ademais, junto com a banca de qualificação, definiu-se por não avaliar o conforto térmico e dar maior enfoque na análise termoenergética, assim como sugeriu-se explorar mais parâmetros de projeto de fachadas duplas com auxílio de simulações paramétricas.

3.1.2 Indicadores de Desempenho

Esta pesquisa busca avaliar a eficiência energética relativa ao desempenho termoenergético da edificação. Em vez de avaliar o consumo propriamente dito, influenciado por diversos sistemas mecânicos que fogem da alçada da arquitetura em si, opta-se — segundo sugestão de Augenbroe (2011) — pela análise de um aspecto que influencia diretamente o consumo, porém está

relacionado diretamente às decisões arquitetônicas, à carga térmica. A partir da definição dessa diretriz de desempenho, define-se o indicador de desempenho — a carga térmica de resfriamento — e a forma de medi-la — em kWh/ano.

Augenbroe (2011) coloca a importância de se definir e contextualiza o que exatamente se almeja avaliar no processo de análise de desempenho da edificação, independentemente de ser simulado ou não. Ele sugere um processo para auxiliar a tomada de decisão, que parte dos parâmetros de desempenho que se pretende avaliar para definir diretrizes e posteriormente os indicadores e, inclusive, a forma de medi-los — suas métricas. Esse processo também auxilia na definição de quais são as variáveis de projeto que influenciam esses indicadores. Augenbroe (2011) sugere esquematizar essas relações em um diagrama (Figura 21).

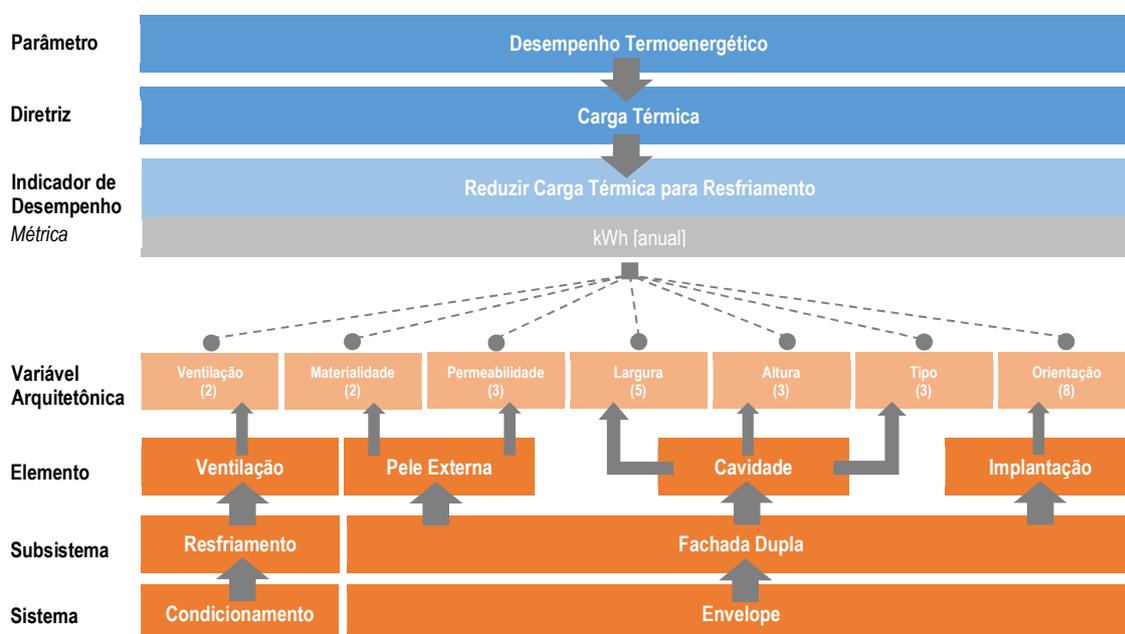


Figura 21 Diagrama entre os indicadores de desempenho e as variáveis arquitetônicas

Da mesma forma que existe uma escala hierárquica na organização dos parâmetros de desempenho, também há quanto aos aspectos de projeto que os influenciam. Na presente pesquisa, analisam-se dois sistemas distintos, que influenciam a carga térmica de resfriamento: o sistema de condicionamento e a envoltória.

O sistema de envoltória é subdividido em um subsistema — a fachada dupla — que, por sua vez, é decomposto em seus elementos — pele externa, cavidade e implantação. Por fim, estes são desmembrados nas variáveis de projeto:

- material da pele externa,

- taxa de permeabilidade da pele externa,¹¹
- largura da cavidade,
- tipo da cavidade,
- altura da cavidade,
- orientação da fachada;

Já o sistema de condicionamento é subdividido no subsistema de resfriamento, que, por sua vez, é desmembrado nos elementos desse sistema, no caso de haver ou não uso de ventilação. Assim, a variável está relacionada ao tipo de ventilação — ou ausência dele, para o condicionamento térmico do ambiente.

No diagrama da Figura 21, expõe-se a quantidade, entre parênteses, de variações possíveis a cada variável de projeto arquitetônico.

3.1.3 Métodos de Simulação

Por definição, modelos são formas de tentar representar e explicar a realidade por meio da descrição de um sistema (CLARKE, HENSEN, 2015). Dessa forma, são simplificações da realidade, uma aproximação desta. Sua utilização ainda pode ser muito útil para a compreensão da realidade, apesar de não a retratarem na sua totalidade. (BOX, DRAPER, 1987). A simulação por outro lado, é o procedimento que processa as funções do sistema que define o modelo para extrair dados que fundamentem a realidade em questão (CLARKE, HENSEN, 2015).

No campo do ambiente construído, as simulações são ferramentas úteis, capazes de analisar e verificar o desempenho de uma edificação, avaliar o impacto ambiental dela decorrente, e, assim, auxiliar na tomada de decisão (HENSEN, LAMBERTS, 2011). Contudo, ainda existem muitas limitações à plena aplicação, como dificuldade de operação da ferramenta pelo usuário, falta de calibragem entre ferramentas — o que gera resultados diferentes mesmo com usuários experientes — e impropriedade de procedimentos — como a falta de definição de incerteza e erro nas pesquisas (TUPPER *et al.* 2011, CLARKE, HENSEN, 2015). Mais do que prever com exatidão o funcionamento dos sistemas, as simulações ajudam no entendimento e compreensão dos fenômenos físicos que ocorrem no ambiente construído e servem como instrumento didático e investigativo a esse fim (CLARKE, HENSEN, 2015).

No caso específico das fachadas duplas, diversos fenômenos físicos complexos ocorrem nesse tipo de solução construtiva. Assim, a compreensão e entendimento do desempenho das

¹¹ A taxa de permeabilidade da pele externa da fachada dupla é referente a porcentagem entre as áreas abertas – que permite a passagem de ar; e áreas fechadas, somente relativas a pele externa da fachada dupla.

fachadas duplas não é um exercício trivial (HENSEN *et al.* 2002). É preciso endereçar os diferentes fenômenos físicos existentes na fachada dupla de forma mais específica. Nesse sentido, é consensual a necessidade de dividir a análise dos fenômenos a partir de suas naturezas. Assim, as simulações de fachadas duplas normalmente são divididas em três níveis básicos, relativos à análise do comportamento: ótico, dos fluidos e térmico (SAELENS, 2002, MANZ, FRANK, 2005).

Atualmente, considera-se o estado da arte da avaliação de desempenho de fachadas duplas por meio de um sistema de simulações entre ferramentas para análises de fluido dinâmica (CFD) com tradicionais ferramentas de análise energética global da edificação¹² (MANZ, FRANK, 2005). Hansen *et al.* (2002) entendem a primeira como uma abordagem microscópica, capaz de melhor detalhar um sistema, porém com um recorte de tempo mais restrito. Já a segunda é uma abordagem macroscópica, que apesar de não descrever os fenômenos físicos de maneira mais específica, é capaz de gerar dados a períodos mais amplos e responder perguntas mais amplas. Habitualmente, nos sistemas de simulação, utiliza-se o CFD à definição das taxas de ventilação que posteriormente servem de dado de entrada ao programa de análise energética (PAPPAS, ZHAI, 2008). Contudo, pode-se utilizar o programa de análise energética para gerar os dados de temperatura superficial que servem para definir as condicionantes de contorno do programa de CFD para estudar com mais profundidade os casos mais representativos (BARBOSA, 2012).

As ferramentas de análise energética, por serem instrumentos mais maduros, são capazes de retratar dados como consumo e conforto de forma mais abrangente, necessitam de menos tempo para seu processamento e podem realizar os diversos passos do processo de simulação de fachada dupla (HENSEN *et al.* 2002). Nesse caso, necessita-se realizar a modelagem do sistema de ventilação de forma específica, por meio de modelos de rede de ventilação¹³. Para isso, deve-se modelar a cavidade da fachada dupla em várias zonas térmicas (Figura 22) para melhor representar a diferença de gradiente de temperatura dentro da cavidade, como aponta Poirazis (2006) na sua revisão do estado da arte sobre ferramentas de simulação para fachadas duplas. Pomponi *et al.* (2016) apontam que os resultados de ventilação encontrados a partir da modelo análise energética com rede de ventilação seguem os mesmos padrões encontrados nos resultados de simulações de CFD. Contudo, os resultados são mais conservadores, o que é prudente. Além disso, apresenta tempo consideravelmente inferior à realização da simulação. Apesar das limitações dos programas de análise energética em simular concomitantemente transporte de massa e energia, esse procedimento de modelagem se mostra apto a simular o efeito convectivo a partir da adequação do coeficiente de descarga, como demonstram Pomponi *et al.* (2016).

¹²Em inglês, *whole building energy analysis*.

¹³Em inglês *Airflow Network*.

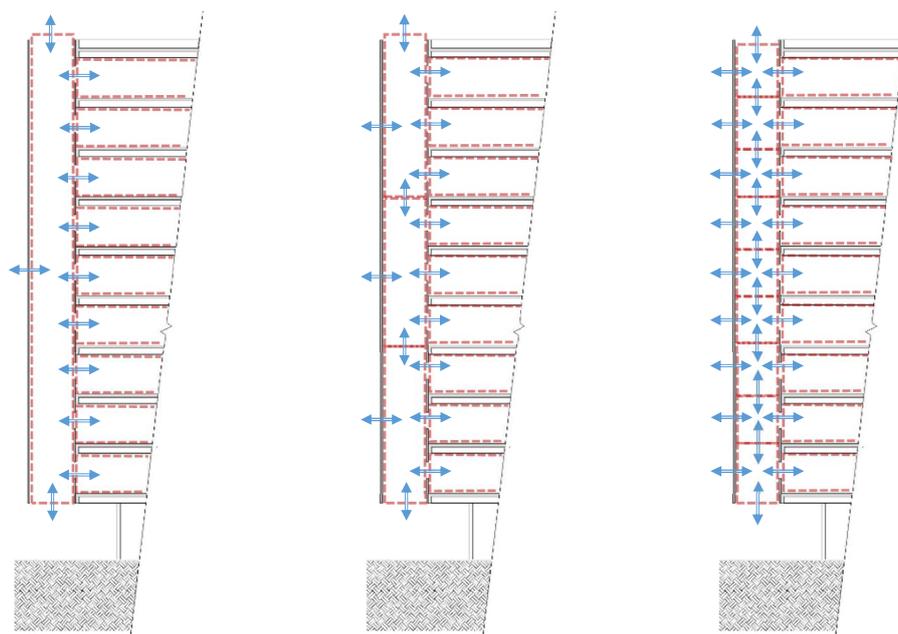


Figura 22 Diagrama das possibilidades de divisão de zonas na cavidade da fachada dupla no modelo de rede de ventilação.

3.2 MATERIAIS

Este item está relacionado aos recursos necessários à execução da pesquisa. Por se tratar de uma pesquisa experimental por meio de recursos de simulação computacional, seu principal recurso é o próprio programa responsável pela realização das simulações termoenergéticas, descrito a seguir.

3.2.1 Programa de Simulação Computacional

Na presente pesquisa, utiliza-se o programa *EnergyPlus* versão 8.5 por meio da interface gráfica *DesignBuilder* versão 5.4 para à realização das simulações de desempenho termoenergético. O *EnergyPlus* é um programa de análise energética *open-source* desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (CRAWLEY *et al.*, 2001). Com mais de 20 anos de existência, a sua criação parte da experiência acumulada pelo mesmo departamento no desenvolvimento de programas anteriores, *DOE* e *BLAST*. Vastamente utilizado, é um dos melhores representantes do estado da arte de programa de simulação de análise energética (WETTER *et al.*, 2015). Contudo, é um programa estritamente de simulação, com interação exclusivamente textual, o que torna sua manipulação mais complexa e de mais difícil visualização (CRAWLEY *et al.*, 2001). Assim, existem diversos programas de terceira parte que servem como meios para manipular o *EnergyPlus* indiretamente. O *DesignBuilder* é uma das mais utilizadas interfaces gráficas, especialmente pela sua facilidade de modelagem tridimensional e por sua

extensa biblioteca de materiais e configurações já predefinidas (WASILOWSKI, REINHART, 2009).

3.3 PROCEDIMENTOS

Os procedimentos explicam e caracterizam detalhadamente as ações tomadas à execução das atividades relativas ao objetivo central da pesquisa, ligadas à obtenção dos resultados. Assim, o presente item apresenta os passos metodológicos à realização das últimas etapas do método: coleta de dados, análises dos dados e discussão dos resultados. A Figura 23 apresenta o diagrama do fluxo de trabalho dessas etapas, como se organizam e se relacionam.

Antes de iniciar a coleta de dados propriamente dita, necessita-se definir e caracterizar os atributos gerais da tipologia, na qual testam-se os parâmetros de projeto de fachada dupla a serem avaliados. A esse fim, utilizam-se os trabalhos de Lima (2010), Costa *et al.* (2017) e Costa (2018) para definir tanto a geometria da tipologia como a caracterização dos sistemas construtivos empregados. Costa *et al.* (2017) também auxiliam na definição e caracterização das alternativas dos tipos de vidros testados na pele externa da fachada dupla no 1º ciclo de simulações. Para definir exatamente os dados de entrada no programa *DesignBuilder*, utiliza-se o relatório de Weber *et al.* (2017), que define camadas equivalentes de propriedades térmicas ao programa *EnergyPlus* à caracterização de diversos sistemas construtivos da NBR 15.220. Esses procedimentos são detalhados no subitem 3.3.1 Caracterização Geral do Modelo, na página 59.

A coleta de dados compõe-se de quatro ciclos de simulações, cada qual com objetivos específicos de análise. Em todos eles, testam-se diversas variáveis de algum(ns) parâmetro(s) por meio de simulação paramétrica no *DesignBuilder*, e extraem-se os resultados anuais de carga térmica de resfriamento para todo o edifício.

O primeiro ciclo, detalhado no subitem 3.3.2 1º Ciclo: Definição do Tipo de Vidro das Fachadas Duplas, na página 61, analisa diferentes alternativas de vidro para peles externas de fachadas duplas envidraçadas que são empregadas nos ciclos subsequentes. Nesse caso, opta-se por avaliar um modelo com somente um andar.

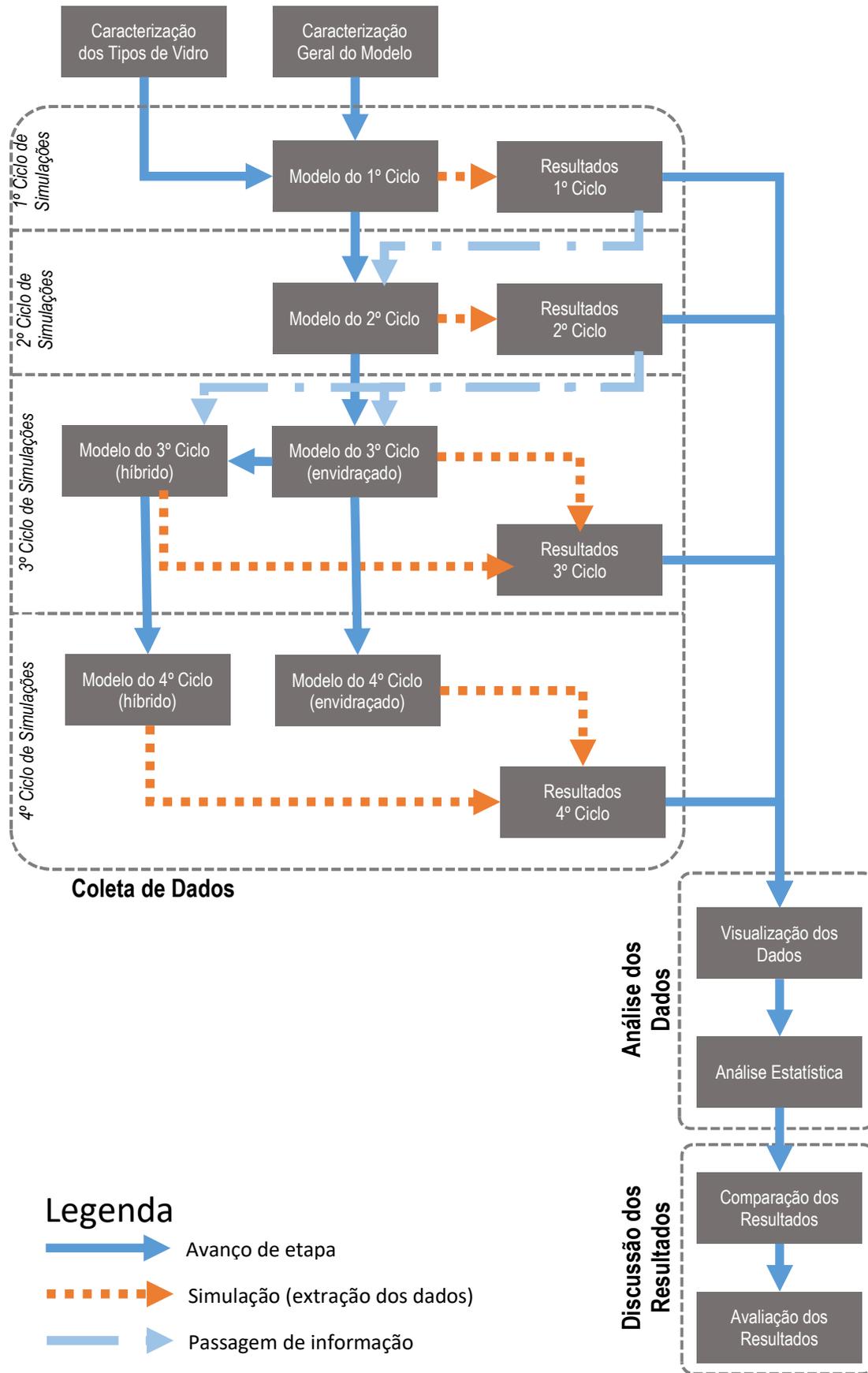


Figura 23 Diagrama das etapas do processo de coleta de dados, análise de dados e discussão dos resultados

Já o segundo ciclo de simulações, exposto no subitem 3.3.3 2º Ciclo: Avaliação das Fachadas Duplas Envidraçadas, na página 62, avalia diversos parâmetros de projeto de fachadas duplas envidraçadas: altura, largura e tipo de cavidade, assim como a orientação da fachada. Nesse caso, utiliza-se a tipologia com sua altura final, de 12 andares.

Dado que nos dois últimos ciclos de simulações almeja-se realizar comparações entre os cenários de diferentes ciclos e que em alguns cenários há o emprego com condicionamento híbrido, por meio de ventilação cruzada, há alterações significativas na caracterização da tipologia, especialmente quanto às adjacências da envoltória e à colocação de janelas. Detalha-se essa caracterização no subitem 3.3.4 Caracterização Geral do Modelo aos 3º e 4º, na página 66.

Expõe-se o terceiro ciclo de simulações no subitem 3.3.5 3º Ciclo: Fachadas Duplas Híbridas, na página 67. Nele, definem-se aspectos da caracterização dos modelos — como os elementos de sombreamento da pele externa das fachadas duplas híbridas —, assim como os parâmetros a serem analisados tanto nos cenários com fachada dupla híbrida como nas soluções envidraçadas. Às fachadas duplas híbridas, avaliam-se taxa de permeabilidade da pele externa e largura da cavidade, assim como a orientação da fachada, enquanto às soluções envidraçadas de fachada dupla avaliam-se somente largura da cavidade, assim como a orientação da fachada.

No quarto ciclo de simulações, realiza-se basicamente o mesmo procedimento do ciclo anterior, porém com o emprego do condicionamento híbrido para avaliar o impacto da ventilação natural no desempenho termoenergético. O subitem 3.3.6 4º Ciclo: Avaliação da Ventilação Cruzada, na página 71, detalha a caracterização da modelagem do condicionamento híbrido.

Em posse dos dados coletados, parte-se para a análise no intuito de extrair informação desses dados. A isso, para compilar e sintetizar os resultados, efetua-se a geração de visualizações gráficas para facilitar a comparação. Contudo, para obter maior compreensão, realiza-se o tratamento estatístico desses dados, para observar a significância da variação dos parâmetros. Utiliza-se o teste de relevância significativa de Tukey, procedimento explanado no subitem 3.3.7 Análise Estatística, na página 73.

Por fim, realiza-se a discussão dos resultados, que consiste na comparação e na análise destes. Além disso, busca-se encontrar elementos na literatura que demonstrem concordância ou não para apontar consistência e/ou relevância da pesquisa realizada na presente dissertação. Nesse sentido, procura-se obter uma maior compreensão sobre o desempenho termoenergético das soluções de fachada dupla no contexto climático de Brasília, que possa servir como orientação na realização de projetos.

3.3.1 Caracterização Geral do Modelo

O modelo elaborado para a realização da investigação desta dissertação segue, em linhas gerais, parâmetros levantados por Costa (2018) para edifícios comerciais na cidade de Brasília. Assim, definiu-se pela utilização de uma planta livre de 30 m x 30 m¹⁴ com o pé esquerdo de 3,50 m. A edificação possui térreo — modelado como *component block* — e 12 pavimentos tipo, entretanto no 1º ciclo opta-se por avaliar somente um pavimento tipo. Como somente os pavimentos tipos são analisados e o térreo não faz parte da avaliação, não se avaliam as trocas térmicas como o solo, por isso, os valores de temperatura do solo são desprezados. Contudo, diferentemente do que defende Costa (2018), modelam-se aberturas somente na fachada com fachada dupla, como também na fachada oposta a depender do ciclo de simulações¹⁵, além disso, opta-se por definir as paredes externas sem aberturas como adiabáticas. Tomam-se essas medidas para isolar o efeito da fachada dupla e assim avaliá-la de forma mais precisa. Contudo, por mais que torne mais evidente os efeitos relativos da fachada dupla, ao tornar as demais paredes adiabáticas isso afasta os cenários da realidade em que as trocas de calor ocorrem por todos os meios. Assim, ressalta-se que a escolha por paredes adiabáticas por mais que almeje analisar os efeitos do emprego da fachada dupla de forma mais específica, por outro lado é também uma limitação do trabalho por se distanciar das trocas térmicas que ocorrem naturalmente nos ambientes.

A caracterização dos sistemas de envoltória também está de acordo com o levantamento realizado por Costa (2018). A definição das propriedades térmicas dos sistemas utilizadas para realização das simulações segue as recomendações do Weber *et al.* (2017) partir do modelo equivalente de propriedades térmicas. A Tabela 4 apresenta a caracterização das propriedades térmicas dos sistemas construtivos empregados nos modelos.

Os pavimentos tipo possuem uma taxa de envidraçamento de 75%, com o emprego de vidros cinzas. Segundo levantamento de Costa *et al.* (2017), os vidros cinzas são apontados com os predominantes em edifícios comerciais em Brasília, com o emprego em mais de 30% dos edifícios em 2017.

Para o sistema de condicionamento de ar, empregam-se sistemas *splits* com CoP¹⁶ de 2,8 e com *setpoints* de 24 °C, o que segue o levantamento de Costa *et al.* (2017). A taxa de infiltração

¹⁴ Apesar de o levantamento de Costa (2018) apontar que o pavimento tipo de 30 m x 30 m é típico de edifícios de até 6 pavimentos e edifícios mais altos possuírem um pavimento tipo mais retangular, esses últimos representam predominantemente os edifícios dos ministérios, uma amostra muito restrita e homogênea. Visto que Costa (2018) avalia edifícios com pavimento tipo de 30 m x 30 m e esse intervalo também faz parte da análise do presente trabalho, opta-se por essa dimensão de pavimento tipo.

¹⁵ Há somente aberturas na fachada com fachada dupla nos 1º e 2º ciclos de simulação, enquanto nos dois seguintes também existem aberturas na fachada oposta.

¹⁶ Coeficiente de performance.

é mantida a *default* do programa, de 0,7 renovações de ar por hora. Quanto à carga da iluminação artificial, utiliza-se a densidade de potência instalada (DPI) de 12 W/m², também levantado por Costa *et al.* (2017).

Definem-se as cargas e rotinas dos pavimentos tipos com o *template* de atividades *Generic Office Area*, enquanto as cavidades das fachadas duplas são caracterizadas como cavidades no *Zone Type*, o que define as atividades como *None*, sem qualquer tipo de ocupação ou sistemas mecânicos funcionando. As cavidades são ventiladas naturalmente, modeladas a partir de um sistema de rede de ventilação, sendo o coeficiente de descarga das aberturas dessas cavidades alterado para 0,62, como sugerido por Pomponi *et al.* (2016). O APÊNDICE B na página 131 traz maiores detalhes sobre os parâmetros de modelagem.

Tabela 4 Propriedades térmicas dos sistemas construtivos por meio do modelo de camadas equivalentes

Sistema	Camadas Equivalentes	e (cm)	λ (W/m°C)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kg.K)	Ut (W/m ² °C)
Parede de Alvenaria 6 furos 9x14x24 cm	Argamassa	2,50	1,15	2000	1,00	
	Cerâmica	1,34	0,900	1600	0,920	
	Camada de Ar	<i>Resistência térmica fixa em 0,18 m² °C/W</i>				2,363
	Cerâmica	1,34	0,900	1600	0,920	
	Argamassa	2,50	1,15	2000	1,00	
Laje Entre Pisos Piso cerâmico, laje maciça, forro de gesso	Piso Cerâmico	0,75	1,05	2000	0,920	
	Contrapiso	2,00	1,15	2000	1,00	
	Laje Maciça	9,85	1,75	2200	1,00	1,701
	Camada de Ar	<i>Resistência térmica fixa em 0,18 m² °C/W</i>				
	Placa de Gesso	2,00	0,35	900	0,87	
Laje de Cobertura Telha fibrocimento, laje maciça e forro de gesso	Telha Fibrocimento	0,80	0,95	1900	0,84	
	Camada de Ar	<i>Resistência térmica fixa em 0,18 m² °C/W</i>				
	Laje Maciça	9,85	1,75	2200	1,00	1,608
	Camada de Ar	<i>Resistência térmica fixa em 0,18 m² °C/W</i>				
	Placa de Gesso	2,00	0,35	900	0,87	

Legenda:

e: espessura

λ : calor específico

ρ : densidade

c: condutividade térmica
Ut: transmitância térmica

O arquivo climático utilizado é o SWERA para a cidade de Brasília, disponível na biblioteca do programa *DesignBuilder*.

Questões relativas a definições dos vidros da pele externa da fachada, orientação, tipo de *design* da fachada dupla, quantidade de pavimentos e materiais são discutidas e explicadas individualmente nos próximos itens. Isso ocorre porque esses elementos são as variáveis a serem investigadas ou pelas necessidades do ciclo de simulações.

3.3.2 1º Ciclo: Definição do Tipo de Vidro das Fachadas Duplas

Esse primeiro ciclo de simulações visa definir o tipo de vidro a ser empregado na pele externa da fachada dupla. Para esse fim, realiza-se uma análise paramétrica com a variação de diversos tipos de vidros da pele externa da fachada dupla para verificar a variação do desempenho da carga térmica de resfriamento em cada cenário.

O modelo desenvolvido para a avaliação nesse ciclo de simulações segue as mesmas características apresentadas no item 3.3.1 Caracterização Geral do Modelo. Contudo, visto que nesse primeiro momento almeja-se avaliar somente a relação da escolha do vidro da pele externa da fachada dupla com a carga térmica de resfriamento, optou-se pela modelagem e análise de somente um pavimento tipo e largura da cavidade de 0,50 m, como apresentado na Figura 24. Somente a fachada com o emprego da fachada dupla realiza trocas térmicas, enquanto as demais fachadas cobertura e piso são adiabáticas.

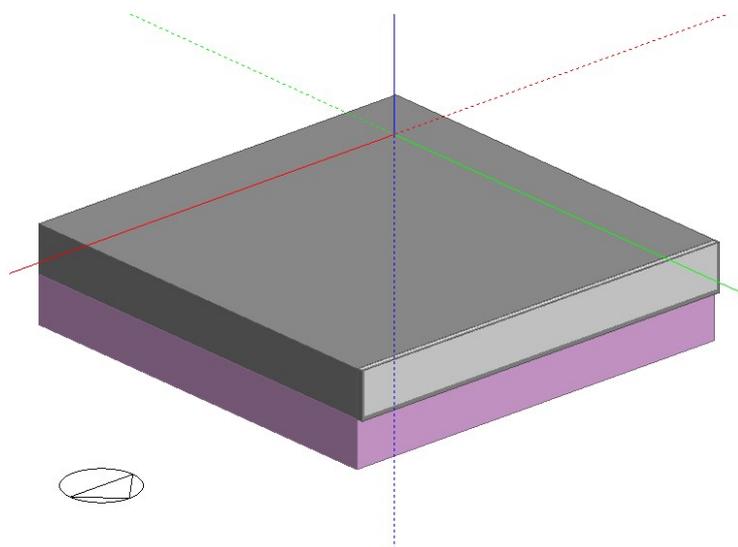


Figura 24 Modelo virtual com somente um pavimento tipo para avaliação do tipo de vidro da pele externa da fachada dupla

Na análise paramétrica, avaliam-se os tipos de vidros levantados por Costa *et al.* (2017) como os mais comuns para os edifícios comerciais na cidade de Brasília. A lista dos vidros, assim como as características das suas propriedades térmicas são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 Propriedades térmicas dos vidros

Tipos de Vidros	Fator Solar (SHGC %)	Transmissão Luminosa (%)	Transmitância Térmica (W/m ² .K)
Vidro Refletivo	29,5	20,1	5,379
Vidro Azul	60,2	57,0	6,144
Vidro Incolor	81,5	88,1	6,144
Vidro Bronze	60,2	53,4	6,144
Vidro Verde	60,6	74,9	6,144
Vidro Cinza	58,3	43,1	6,144

Fonte: Costa *et al.* (2017)

3.3.3 2º Ciclo: Avaliação das Fachadas Duplas Envidraçadas

Nesse ciclo busca-se avaliar o desempenho termoenergético de diversas soluções de fachada dupla envidraçada no clima de Brasília. Analisa-se esse parâmetro de desempenho da mesma forma que no ciclo anterior, a partir da medição da carga térmica de resfriamento (kWh.ano) para toda área condicionada — a área interna. Assim, não se considera o espaço intermediário da cavidade.

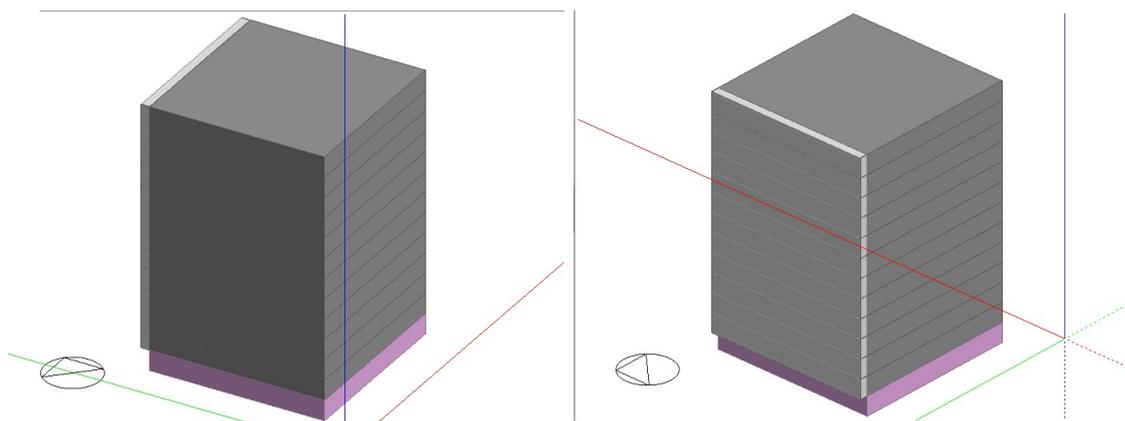


Figura 25 Tipologia de fachada dupla envidraçada do 2º ciclo de simulações

Os modelos desenvolvidos neste ciclo de simulações seguem, em linhas gerais, a mesma caracterização mencionada no item 3.3.1 Caracterização Geral do Modelo, na página 59, especificamente quanto a arquivo climático, rotinas, *setpoints*, sistemas construtivos e materiais. Os vidros da pele externa agora seguem o resultado do ciclo anterior e são definidos como vidros

cinzas – questão melhor explicada no item 4.1 AVALIAÇÃO DO VIDRO DA PELE EXTERNA DAS FACHADAS DUPLAS, na página 75. As dimensões em planta baixa também são as mesmas, porém ao invés de modelar somente um andar isoladamente, modelam-se todos os 12 andares propostos, conforme apresenta a Figura 25. Os modelos desenvolvidos neste ciclo diferenciam-se dos do ciclo anterior quanto aos parâmetros do *design* da cavidade. Assim, realiza-se um estudo paramétrico no *DesignBuilder*, em que se analisam três variáveis de projeto das fachadas duplas:

- i. Largura;
- ii. Altura;
- iii. Tipo de cavidade.

Além disso, analisa-se também um parâmetro de implantação da edificação, quanto a sua orientação. Avaliam-se 8 orientações, os pontos cardeais e colaterais, para todos os modelos desenvolvidos. Para isso também se utilizam os recursos de simulação paramétrica do programa *DesignBuilder* para explorar de forma mais prática e sistemática o universo de soluções.

Dessa forma, analisam-se cinco variações dimensionais da largura da cavidade, de 0,50 m a 2,50 m em intervalos de 0,50 m. Denominam-se pelo código L acrescido do numeral, como exposto na Tabela 6 abaixo:

Tabela 6 Codificação do parâmetro da largura da cavidade.

Código	Largura da Cavidade (m)
L1	0,50
L2	1,00
L3	1,50
L4	2,00
L5	2,50

Quanto à altura da cavidade, existem 3 variações, com altura equivalente a 3 andares, 6 andares e 12 andares, que em metros equivalem a: 10,50 m, 21,00 m e 31,50 m, respectivamente. Todos os modelos possuem o mesmo número de andares — 12 — para facilitar a comparação entre eles, porém há divisões horizontais da cavidade que definem diferentes alturas de cavidade, como se pode perceber na caracterização dos modelos dos tipo corredor e *shaft-box* na Figura 27. Optou-se por não haver uma opção de altura de 1 andar, visto que supostamente os maiores benefícios do emprego da fachada dupla estão ligados ao efeito chaminé, relacionados diretamente à altura da cavidade. O código desse parâmetro é H adicionado ao numeral. A Tabela 8 apresenta a relação da variação desse parâmetro.

Tabela 7 Codificação do parâmetro da altura da cavidade.

Código	Altura da Cavidade (em andares)	Altura da Cavidade (em m)
H1	3	10,50
H2	6	21,00
H3	12	31,50

Já em relação ao tipo de cavidade de fachada dupla, há três categorias: corredor, *shaft-box* e múltiplos andares, como apresentadas na revisão de literatura e expressas na Figura 26. Não se utiliza a categoria *box-window*, visto que não se utilizaram divisórias verticais e, se assim fosse, esse modelo assemelhar-se-ia ao do tipo corredor. Usa-se a letra T junto ao numeral para designar o código desse parâmetro, conforme mostra o Quadro 4.

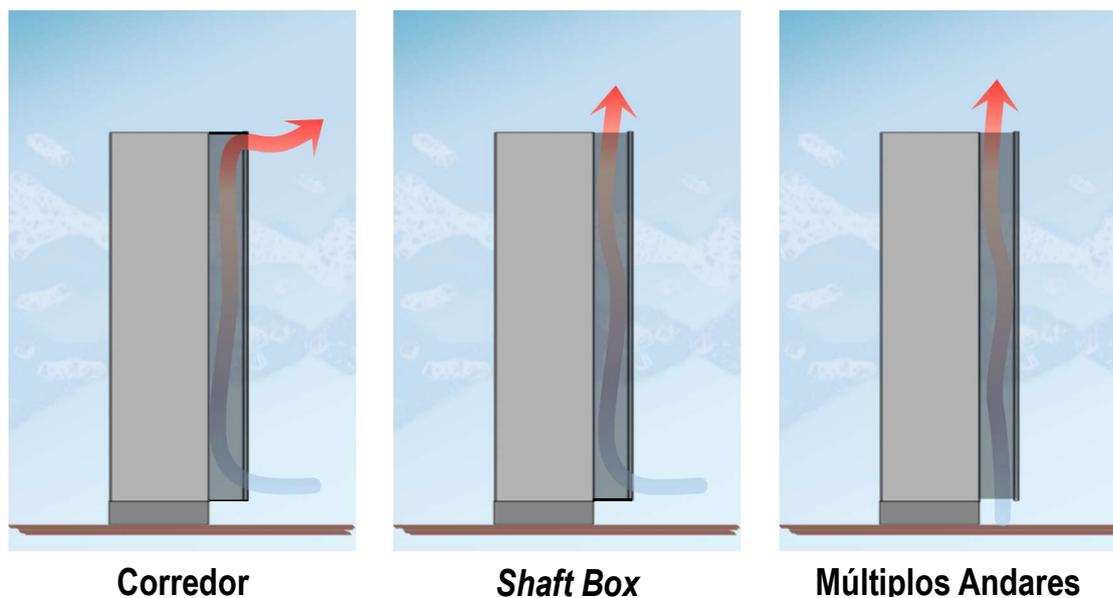


Figura 26 Corte esquemático dos tipos de cavidade de fachadas duplas analisadas

Quadro 4 Codificação do parâmetro do tipo da cavidade.

Código	Tipo de cavidade
T1	Corredor
T2	<i>Shaft-box</i>
T3	Múltiplos andares

Também é designado um código à combinação das variáveis tipo e altura: D no sentido de *design*. Nota-se que para T1 e T2 há combinações com todas as alturas, como mostra a Figura 27, contudo T3 só pode ser combinado com H3. Isso ocorre porque a fachada dupla de múltiplos

andares possui aberturas no topo e na base da cavidade, diferentemente dos demais casos, que as possuem apenas na pele externa. Assim, se fosse dividida em 6 ou 3 andares teria o topo de uma cavidade conectada diretamente à base de outra cavidade.

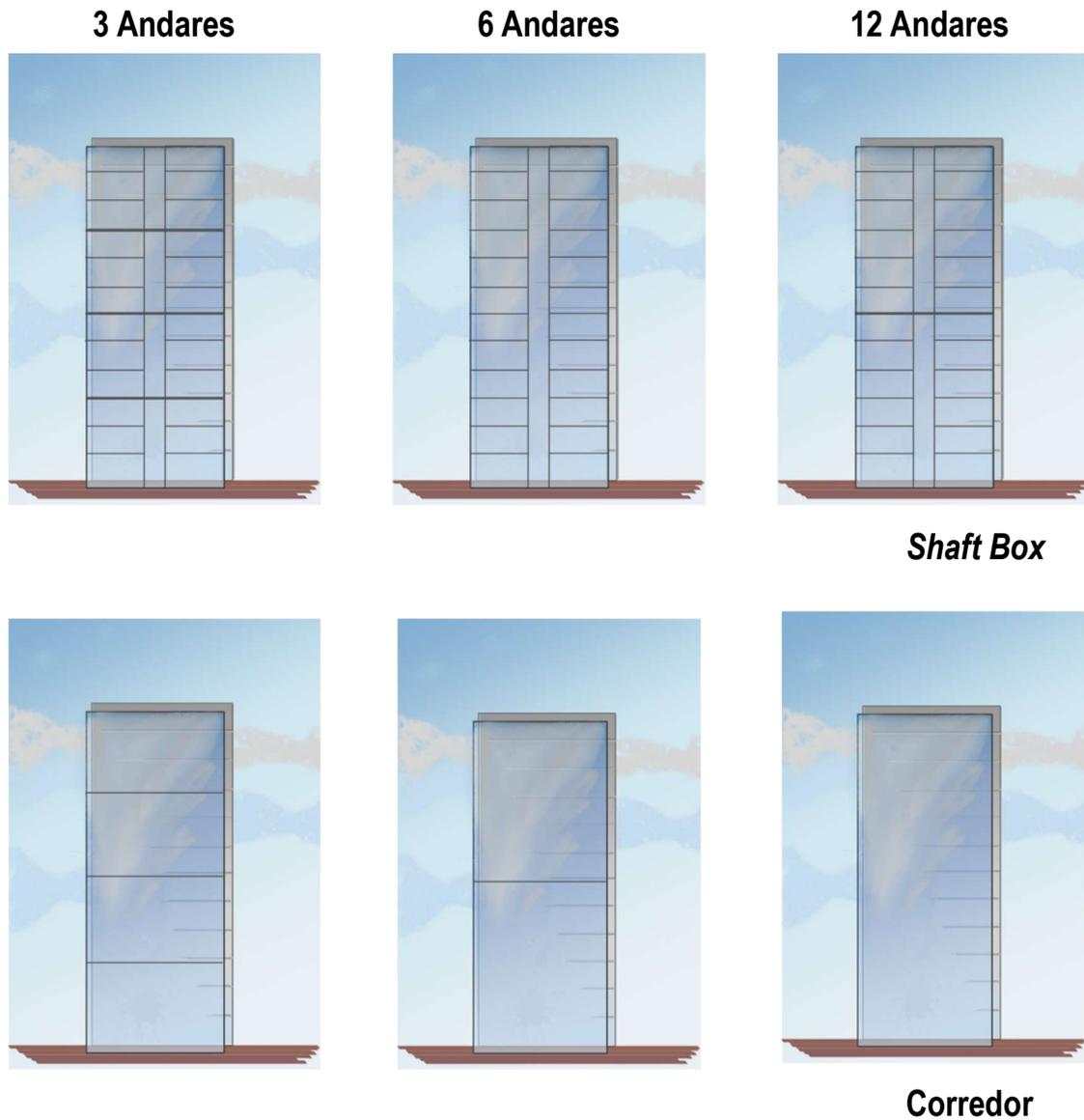


Figura 27 *Designs* resultantes da combinação dos tipos de cavidade corredor e *shaft-box* pelas alturas de cavidade

Quadro 5 Codificação do parâmetro de *designs* da cavidade.

Código	Tipo de cavidade	Altura da Cavidade
D1	T1	H1
D2	T1	H2
D3	T1	H3
D4	T2	H1
D5	T2	H2
D6	T2	H3
D7	T3	H3

No total, desenvolvem-se 35 cenários (modelos) referentes à combinação dos três parâmetros que são avaliados nas 8 orientações, o que totaliza 280 simulações. Além disso, modela-se um cenário de controle — denominado C0 — sem fachada dupla, que, além do fato de não possuir fachada dupla, é caracterizado identicamente aos demais cenários e simulado também nas 8 orientações.

3.3.4 Caracterização Geral do Modelo aos 3º e 4º Ciclos

O 3º e o 4º ciclos de simulação buscam compreender a influência de outros parâmetros de projeto de fachada dupla no desempenho termoenergético. Analisam-se questões além das intrínsecas às soluções envidraçadas de fachada dupla, investigadas nos dois ciclos anteriores. Especificamente, almeja-se compreender o impacto do emprego de peles externas opacas — sombreamento — no 3º ciclo e da ventilação natural no 4º ciclo, na carga térmica de resfriamento

No 2º ciclo de simulações buscou-se entender melhor o desempenho termoenergético das fachadas duplas envidraçadas. Dessa forma, empregaram-se janelas somente na parede com fachada dupla, enquanto as demais permaneceram opacas e adiabáticas. Esse intuito visa isolar o impacto dos efeitos do sistema — fachada dupla — na performance termoenergética. No entanto, essa tipologia não proporciona avaliar da melhor maneira os benefícios da ventilação natural, especialmente da ventilação cruzada.

Nesse sentido, com o intuito de também avaliar o efeito do emprego do condicionamento híbrido na carga térmica de resfriamento, faz-se necessário rever a tipologia até então empregada na presente pesquisa. Para possibilitar um melhor emprego do condicionamento híbrido, por meio do emprego da ventilação cruzada, é necessária a colocação de janelas na fachada oposta à fachada com fachada dupla. Dessa forma, os modelos desenvolvidos neste ciclo possuem a caracterização semelhante à mencionada no item 3.3.1 Caracterização Geral do Modelo, na página 59, quanto às rotinas e cargas, tais como: atividades, *setpoints* de HVAC¹⁷, taxa de infiltração, DPI, sistemas

¹⁷ Do inglês, *heating, ventilation and air conditioning*, que significa aquecimento ventilação e ar condicionado.

construtivos, arquivo climático, assim como a geometria do modelo. Contudo, há, além da colocação de janelas nas fachadas opostas à fachada dupla, a alteração da condição de adjacência, de adiabática para isotérmica¹⁸. Essas janelas possuem as mesmas características da pele interna da fachada dupla: vidro cinza e 75% de taxa de abertura da fachada. A Figura 28 mostra a perspectiva de uma tipologia com a fachada dupla e as aberturas na fachada oposta.

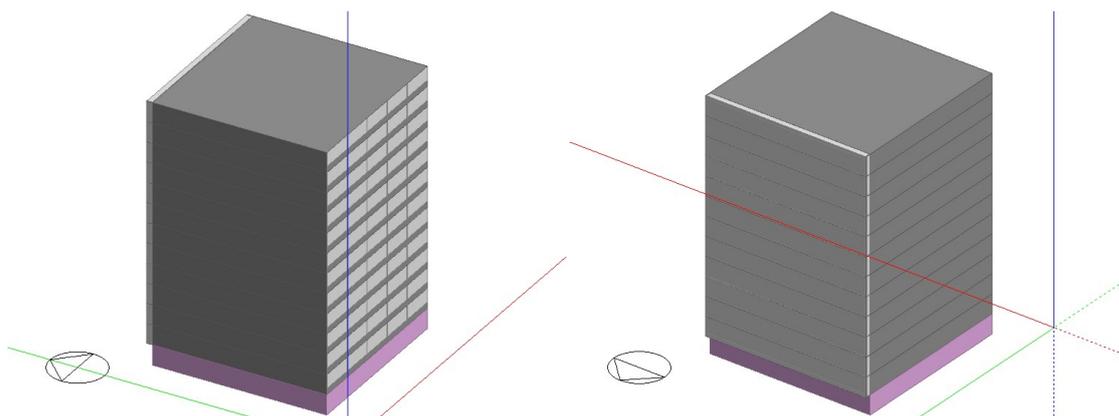


Figura 28 Tipologia do 3º e 4º ciclos aberturas na fachada oposta a fachada dupla

3.3.5 3º Ciclo: Fachadas Duplas Híbridas

Assim como nos ciclos de simulação anteriores, busca-se, neste ciclo, avaliar o impacto de parâmetros de projeto de fachadas duplas no desempenho termoenergético no contexto climático de Brasília. Analisa-se o desempenho da fachada dupla híbrida quanto aos seus parâmetros de projeto. Também se compara esse tipo de fachada com soluções envidraçadas e com um cenário de controle, o cenário de referência (C0_sVN) desenvolvido nesse ciclo de simulações.

Avalia-se o impacto da variação dos seguintes parâmetros de projeto de fachadas duplas híbridas: permeabilidade da pele externa e largura da cavidade. Como também se deseja compará-las com fachadas duplas envidraçadas, que também são modeladas e simuladas nesse ciclo. Opta-se por congelar alguns parâmetros já avaliados no 2º ciclo de simulações, especificamente altura e tipo de cavidade. Utilizam-se os parâmetros de melhor desempenho no 2º ciclo. Como a questão da permeabilidade da pele externa não se aplica a esse caso, há somente a variação de um parâmetro, a largura da cavidade. Assim, pode-se considerar que, no total, avaliam-se três parâmetros no 3º ciclo de simulações:

¹⁸ Isotérmico no sentido que há troca de calor pelo sistema. O programa *DesignBuilder* define automaticamente as adjacências. Assim, para retornar ao estado default de definição automática, altera-se a condição de adjacência para “automático”.

- i. materialidade da pele externa¹⁹;
- ii. permeabilidade da pele externa;
- iii. largura da cavidade.

Além disso, todos os cenários investigados — de fachada dupla envidraçada, híbrida e cenário de referência — também são simulados nas 8 orientações, cardiais e colaterais, de forma semelhante ao que foi feito no 2º ciclo de simulações.

A seguir, segue a caracterização dos modelos de fachadas duplas simuladas no 3º ciclo, tanto nas soluções envidraçadas quanto nas híbridas.

a. Modelo de Fachadas Duplas Envidraçadas

A partir dos resultados do 2º ciclo de simulações, define-se a solução de fachada dupla envidraçada mais adequada ao contexto climático de Brasília, que apresenta melhor desempenho termoenergético. A fachada dupla envidraçada do tipo corredor (T1) com altura equivalente a 12 andares (H3) — o *design*D3 — é a que apresenta menor carga térmica de resfriamento, tanto como conjunto (amostra), tanto como caso ótimo. Similar aos modelos desenvolvidos nos ciclos anteriores, a cavidade é composta por zonas térmicas configuradas com modelo de rede de ventilação.

A Tabela 8 apresenta a classificação e nomenclatura dos cenários de fachadas duplas envidraçadas analisadas nesse ciclo de simulações. O padrão de codificação dos cenários segue a mesma caracterização utilizada no ciclo de simulações anterior, com a variação da largura da cavidade representada pela letra L acrescida do numeral, porém, antes, adiciona-se a letra V para diferenciá-la dos casos do 2º ciclo e dos casos de fachada dupla híbrida do presente ciclo.

Tabela 8 Codificação do parâmetro de largura da cavidade de fachadas duplas envidraçadas

Código	Largura da Cavidade (m)
V_L1	0,50
V_L2	1,00
V_L3	1,50
V_L4	2,00
V_L5	2,50

Ao todo são modelados 5 cenários que são testados nas 8 orientações, o que totaliza 40 simulações.

¹⁹ Diferenciação entre envidraçada ou híbrida – com elemento opaco.

b. Modelo de Fachadas Duplas Híbridas

Quanto aos cenários de fachada dupla híbrida, com o emprego de elementos opacos, opta-se pelo emprego de elementos de sombreamento para cumprir a função de pele externa da fachada dupla. Assim, a cavidade não é mais modelada como zona térmica. Apesar de se ter utilizado essa alternativa em um primeiro momento, os resultados obtidos apresentaram um aumento da carga térmica de resfriamento em comparação com a fachada dupla envidraçada, mesmo com o aumento do sombreamento e ventilação. Dessa forma, a escolha por utilizar somente um elemento de sombreamento se justifica porque a fachada dupla híbrida possibilita maior troca de ar pela pele externa, devido a sua maior permeabilidade, o que minimiza o efeito chaminé, que é o objetivo da modelagem da cavidade como zona térmica com rede de ventilação utilizada nos cenários de fachada dupla envidraçada.

Avaliam-se os parâmetros de largura da cavidade, assim como a fachada dupla envidraçada, e a permeabilidade da pele externa. A Tabela 9 apresenta a classificação e nomenclatura quanto à largura da cavidade, e a Tabela 10, a classificação e nomenclatura quanto à permeabilidade da pele externa. Já a Tabela 11 sumariza todos os cenários estudados neste ciclo para a fachada dupla híbrida.

Tabela 9 Codificação do parâmetro de largura da cavidade de fachadas duplas híbridas

Código	Largura da Cavidade (m)
H_L1	0,50
H_L2	1,00
H_L3	1,50
H_L4	2,00
H_L5	2,50

Tabela 10 Codificação do parâmetro de permeabilidade da pele externa de fachadas duplas híbridas

Código	Permeabilidade da Pele Externa (%)
H_P1	66%
H_P2	50%
H_P3	33%

Tabela 11 Codificação geral dos cenários de fachadas duplas híbridas

Código	Permeabilidade da Pele Externa (%)	Largura da Cavidade (m)
H_P1_L1	66%	L1 0,50
H_P1_L2	66%	L2 1,00
H_P1_L3	P1 66%	L3 1,50
H_P1_L4	66%	L4 2,00
H_P1_L5	66%	L5 2,50
H_P2_L1	50%	L1 0,50
H_P2_L2	50%	L2 1,00
H_P2_L3	P2 50%	L3 1,50
H_P2_L4	50%	L4 2,00
H_P2_L5	50%	L5 2,50
H_P3_L1	33%	L1 0,50
H_P3_L2	33%	L2 1,00
H_P3_L3	P3 33%	L3 1,50
H_P3_L4	33%	L4 2,00
H_P3_L5	33%	L5 2,50

No total desenvolvem-se 15 modelos provenientes da combinação dos parâmetros da largura da cavidade e permeabilidade da pele externa, que são avaliados nas 8 orientações, o que totaliza 120 simulações.

À modelagem da pele externa das fachadas duplas híbridas, utiliza-se o recurso *local shading* do *DesignBuilder* para a criação do elemento de sombreamento. Como os elementos de sombreamento no *EnergyPlus* não conduzem calor e são responsáveis somente por sombrear e refletir, o impacto da alteração do material desse elemento não se mostra relevante. Assim, optou-se pelo emprego de madeira presente na biblioteca do programa *Woods - pine, pitch pine Dry* que segue a caracterização do CIBSE Guide A (2006). A Tabela 12 apresenta as propriedades físicas do material.

Tabela 12 Propriedades físicas do CIBSE Guide A (2006) à madeira empregada como elemento de sombreamento

Propriedade	Valor Unitário
Condutividade (W/m.K)	0,17
Calor Especifico (J/Kg.K)	2120,00
Densidade (Kg/m ³)	650,00
Absortância Térmica (W/W)	0,90
Absortância Solar (W/W)	0,60
Absortância Visível (W/W)	0,60
Espessura (mm)	20

A Figura 29 apresenta a caracterização geométrica do elemento de sombreamento que define a pele externa da fachada dupla híbrida. A quantidade de lâminas (*number of blades*) e o

espaçamento vertical (*vertical spacing*) não possuem valores na Figura 29 e são denominados por “a” e “b”, já que variam de acordo com cada uma das taxas de permeabilidade da pele externa da fachada dupla híbrida.

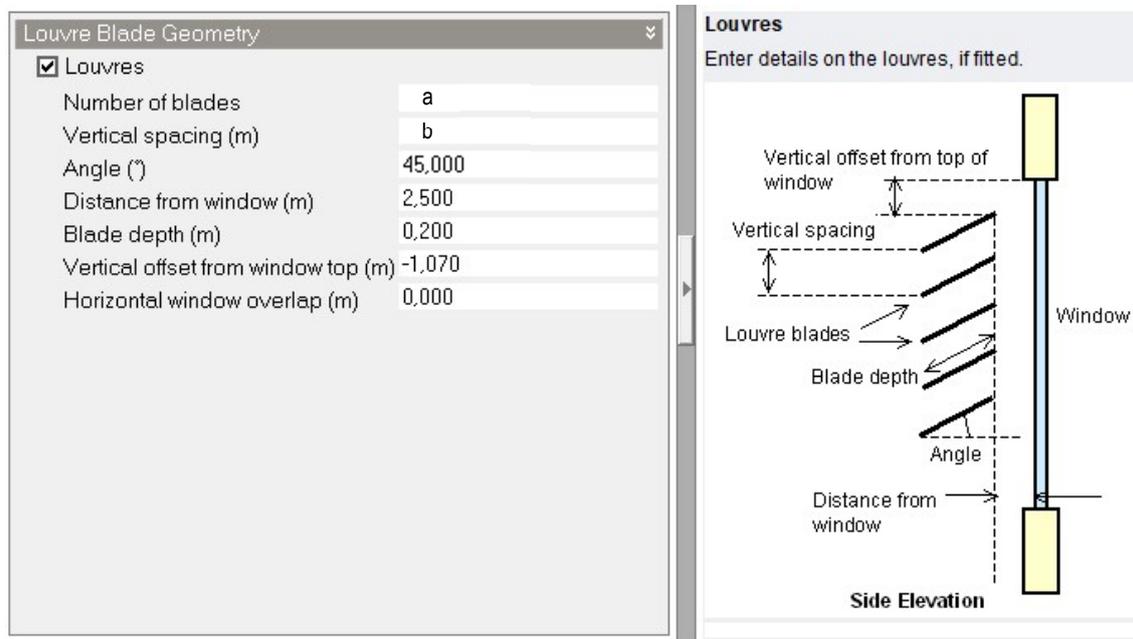


Figura 29 Caracterização da geometria da pele externa das fachadas duplas híbridas

3.3.6 4º Ciclo: Avaliação da Ventilação Cruzada

Edifícios com condicionamento híbrido, ou modo misto de ventilação possibilitam conforto ambiental interno ao usuário ao se beneficiar de diferentes aspectos da ventilação natural e de sistemas mecânicos em momentos ou espaços diferentes. Por usufruir de ambos modelos de condicionamento para proporcionar conforto é capaz de reduzir significativamente o consumo energético para condicionamento. Existem três formas básicas de condicionamento híbrido, que se distinguem pela espacialidade e temporalidade das formas de emprego de condicionamento natural e artificial: em ambientes distintos; concomitantemente em um mesmo ambiente; ou em um mesmo ambiente, mas em momentos distintos (BRAGER et al., 2000, HEISELBERG, 2002). Na presente pesquisa emprega-se a última alternativa, em um mesmo ambiente, mas em momentos distintos.

Para a caracterização dos modelos com condicionamento híbrido utilizam-se como base os modelos desenvolvidos no 3º ciclo, com a mesma caracterização de rotinas e cargas das atividades, DPI, sistemas construtivos, arquivo climático, assim como a geometria do modelo. Porém, necessita-se alterar o *setpoint* do HVAC e da ventilação natural, assim como suas rotinas

de operação; definir o modelo de rede de ventilação ao ambiente interno; e caracterizar a taxa de abertura das janelas e sua rotina de operação.

Para a modelagem do modo misto de ventilação (*mixed mode*), necessita-se ligar simultaneamente a ventilação natural e o sistema de HVAC. Contudo, para que as duas formas de condicionamento não funcionem concomitantemente, é necessário definir diferentes *setpoints* de funcionamento que não se sobreponham. Recomenda-se que haja uma diferença de 2 °C entre os *setpoints*, com menor valor à ventilação natural no caso de sistema de resfriamento (*DesignBuilder*, n.d.). Assim, emprega-se 24 °C como a temperatura máxima de funcionamento da ventilação natural e 26 °C como a temperatura mínima de funcionamento do sistema de resfriamento.

Sendo a ventilação natural modelada como uma rede de ventilação, necessita-se definir a taxa de abertura das janelas. Opta-se pelo modelo de maxim-ar, com abertura praticamente total da área de janela. Assim, a taxa de abertura é modelada em 100%. Sua rotina de operação fica vinculada ao *setpoint* de ventilação natural.

Similarmente ao 3º ciclo de simulações, desenvolve-se a mesma quantidade de modelos. Para fachadas duplas envidraçadas, varia-se a largura da cavidade à fachada dupla tipo corredor com altura equivalente de 12 andares, o que gera 5 modelos como mostra a Tabela 13. Como simulam-se às 8 orientações, realizam-se 40 simulações.

Tabela 13 Codificação do parâmetro de largura da cavidade de fachadas duplas envidraçadas com emprego de condicionamento híbrido

Código	Largura da Cavidade (m)
V_NV_L1	0,50
V_NV_L2	1,00
V_NV_L3	1,50
V_NV_L4	2,00
V_NV_L5	2,50

Já as fachadas duplas híbridas possuem dois parâmetros variáveis, como visto no 3º ciclo de simulações: largura da cavidade e taxa de permeabilidade da pele externa. A Tabela 14 apresenta as variáveis de largura da cavidade e a Tabela 15 mostra as variáveis de taxa de permeabilidade da pele externa. Por fim, a Tabela 16 sumariza todos os modelos de fachada dupla híbrida do 4º ciclo, a partir da combinação dos dois parâmetros de projeto de fachadas duplas – largura da cavidade e taxa de permeabilidade da pele externa. No total, desenvolvem-se 15 modelos, que são simulados às 8 orientações, o que totaliza 120 simulações.

Tabela 14 Codificação do parâmetro de largura da cavidade de fachadas duplas híbridas com emprego de condicionamento híbrido

Código	Largura da Cavidade (m)
H_NV_L1	0,50
H_NV_L2	1,00
H_NV_L3	1,50
H_NV_L4	2,00
H_NV_L5	2,50

Tabela 15 Codificação do parâmetro de permeabilidade da pele externa de fachadas duplas híbridas com emprego de condicionamento híbrido

Código	Permeabilidade da Pele Externa (%)
H_NV_P1	66%
H_NV_P2	50%
H_NV_P3	33%

Tabela 16 Codificação geral dos cenários de fachadas duplas híbridas com emprego de condicionamento híbrido

Código	Permeabilidade da Pele Externa (%)	Largura da Cavidade (m)
H_NV_P1_L1	66%	L1 0,50
H_NV_P1_L2	66%	L2 1,00
H_NV_P1_L3	P1 66%	L3 1,50
H_NV_P1_L4	66%	L4 2,00
H_NV_P1_L5	66%	L5 2,50
H_NV_P2_L1	50%	L1 0,50
H_NV_P2_L2	50%	L2 1,00
H_NV_P2_L3	P2 50%	L3 1,50
H_NV_P2_L4	50%	L4 2,00
H_NV_P2_L5	50%	L5 2,50
H_NV_P3_L1	33%	L1 0,50
H_NV_P3_L2	33%	L2 1,00
H_NV_P3_L3	P3 33%	L3 1,50
H_NV_P3_L4	33%	L4 2,00
H_NV_P3_L5	33%	L5 2,50

Além disso, realiza-se também um modelo de referência (C0_cVN) com o emprego do condicionamento híbrido, para servir como cenário de controle. Este também é simulado às 8 orientações. Dessa forma, no 4º ciclo de simulações realizam-se 168 simulações.

3.3.7 Análise Estatística

Com o intuito de compreender o quanto a variação de um parâmetro influencia no desempenho termoenergético, realiza-se a análise estatística dos dados coletados. Busca-se

perceber até que ponto é relevante variar o parâmetro. Com isso, pode-se concluir que valores específicos apresentam variações significativas, como também o contrário, quando a variação não apresenta impacto importante no resultado.

A esse fim, realizam-se análises de variância (ANOVA) acompanhadas do teste estatístico Tukey de diferença significativa. Tanto na ANOVA quanto no teste Tukey avalia-se o nível descritivo ou a probabilidade de significância, denominado valor p. Contudo, na ANOVA avalia-se o valor p global para toda a amostra de dados, ao passo que no teste Tukey realiza-se o pareamento de grupos de amostras que possibilita a comparação dessas diversas amostras simultaneamente em um único procedimento.

Utiliza-se o programa de distribuição gratuita para análises estatísticas PAST versão 3. Tradicionalmente, a análise do valor p entende que uma variação significativa corresponde a uma probabilidade significativa de diferença superior a 95%, o que corresponde a um valor p inferior a 0,05. Contudo, esse valor de 95% é uma referência. Dessa forma, é importante analisar os números mesmo quando o teste não aponte diferença significativa; quando há uma pequena margem a esse limite, pondera-se essa relevância e realiza-se uma ressalva na análise dos resultados.

Na presente pesquisa, emprega-se o teste Tukey na análise da variação de cada parâmetro de projeto de fachada dupla investigado, logo após a realização dos gráficos caixa desses mesmos parâmetros.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente capítulo apresenta todos os resultados e a discussão da pesquisa. Os resultados são apresentados a partir de todos os ciclos de simulação, assim como a sintetização desses dados para proporcionar um maior entendimento dos benefícios das fachadas duplas no contexto climático de Brasília. Alinhado a isso, os tópicos são acompanhados da discussão com os principais autores apresentados na revisão bibliográfica.

Divide-se o capítulo em quatro itens: os dois primeiros relativos, respectivamente, ao 1º e ao 2º ciclos de simulação; o terceiro referente ao 3º e ao 4º ciclos; e, por último, um item de considerações finais. Optou-se pela unificação dos dois últimos ciclos em razão da semelhança da tipologia empregada.

4.1 AVALIAÇÃO DO VIDRO DA PELE EXTERNA DAS FACHADAS DUPLAS

A alteração do tipo de vidro da pele externa da fachada dupla impacta nos valores anuais de carga térmica de resfriamento para a cidade de Brasília, como apresenta o Gráfico 5. O vidro refletivo apresenta os melhores resultados, representados pela barra azul, que sinaliza o valor de 210.630 kWh.ano, enquanto o vidro incolor apresenta os resultados mais altos, atingindo o valor de 223.699 kWh.ano — o pior resultado, destacado em laranja no Gráfico 5.

Apesar da diferença dos resultados, as variações não apresentam alterações significativas. A variação de resultados mais marcante existente é entre o vidro refletivo e os demais, com carga térmica aproximadamente 3,5% inferior. A variação entre os demais vidros não é superior a 2,5%, no entanto, excluindo-se o vidro incolor, a taxa de variação entre os demais quatro vidros passa a ser de aproximadamente 0,25%. Assim, pode-se dividir os 6 vidros em 3 grupos distintos: o vidro

refletivo, com resultado superior; o vidro incolor, com resultado inferior; e os demais vidros, com resultados intermediários entre esses dois grupos, como diferenciado por cores no Gráfico 5.

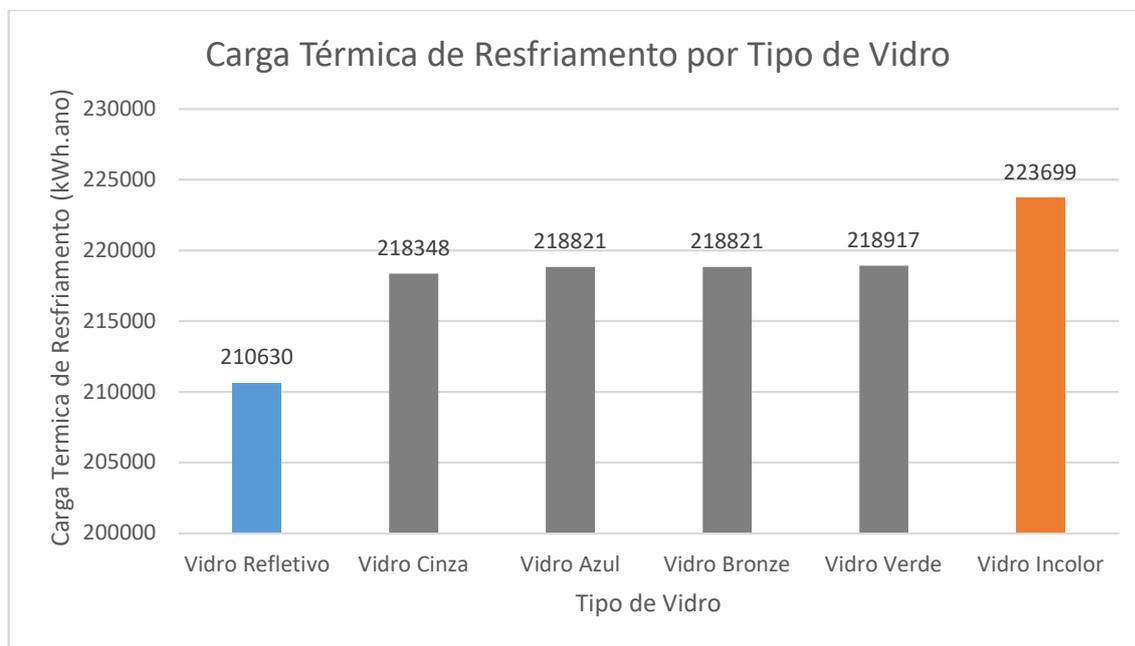


Gráfico 5 Gráfico de barras da carga térmica de resfriamento pelo tipo de vidro

Em parte, esses resultados podem ser atrelados à diferença de transmitância térmica do vidro refletivo em comparação aos demais, visto que essa diferença é de quase $0,80 \text{ W/m}^2\text{K}^{20}$. Essa tendência é apontada pela literatura (BOAKE *et al.*, 2003, BARBOSA, IP, 2014), que indica que os vidros com maior capacidade de isolamento são os que apresentam melhores resultados.

Acredita-se que essa tendência de diminuição da carga térmica com a melhoria das propriedades térmicas de isolamento dos vidros deve ser encontrada em outros vidros com qualidade superior. Contudo, entende-se que esses vidros representam uma categoria superior de vidros, que até pela sua qualidade diferenciada, possuem preços também diferenciados, o que de certa forma representa uma barreira ao seu emprego. De forma similar, pode-se argumentar que o vidro refletivo também se caracteriza como um vidro de uma categoria diferente da dos demais vidros da amostra da presente análise. Assim, apesar da superioridade do resultado do vidro refletivo, opta-se por empregar o vidro cinza — o tipo de vidro com o segundo melhor resultado quanto à carga térmica de resfriamento — na pele externa da fachada dupla nos ciclos de simulação subsequentes da pesquisa. Ainda, pode-se justificar essa decisão pelo fato de o vidro cinza ser o

²⁰ O vidro refletivo possui $5,379 \text{ W/m}^2\text{k}$ de transmitância térmica enquanto os demais vidros têm $6,144 \text{ W/m}^2\text{k}$.

mais empregado nas edificações comerciais de Brasília. Inclusive por isso, emprega-se esse tipo de vidro nas demais aberturas dos modelos simulados.

4.2 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DAS FACHADAS DUPLAS ENVIDRAÇADAS

Avaliam-se os 35 cenários diferentes de fachadas duplas envidraçadas provenientes da combinação dos parâmetros de altura, largura e tipo de cavidade da fachada dupla para oito orientações diferentes. Além disso, também se simula o cenário de referência (C0), sem o emprego de fachada dupla como grupo de controle para oito orientações diferentes.

Observa-se a existência de um padrão de carga térmica de resfriamento por orientação comum a todos os cenários analisados, inclusive ao C0, como pode-se reparar nos Gráfico 6 e Gráfico 7. As orientações do quadrante norte — orientações: norte, nordeste e noroeste — são as que recebem maior carga térmica e as fachadas voltadas ao nordeste são as que possuem maior ganho em todos os cenários estudados.

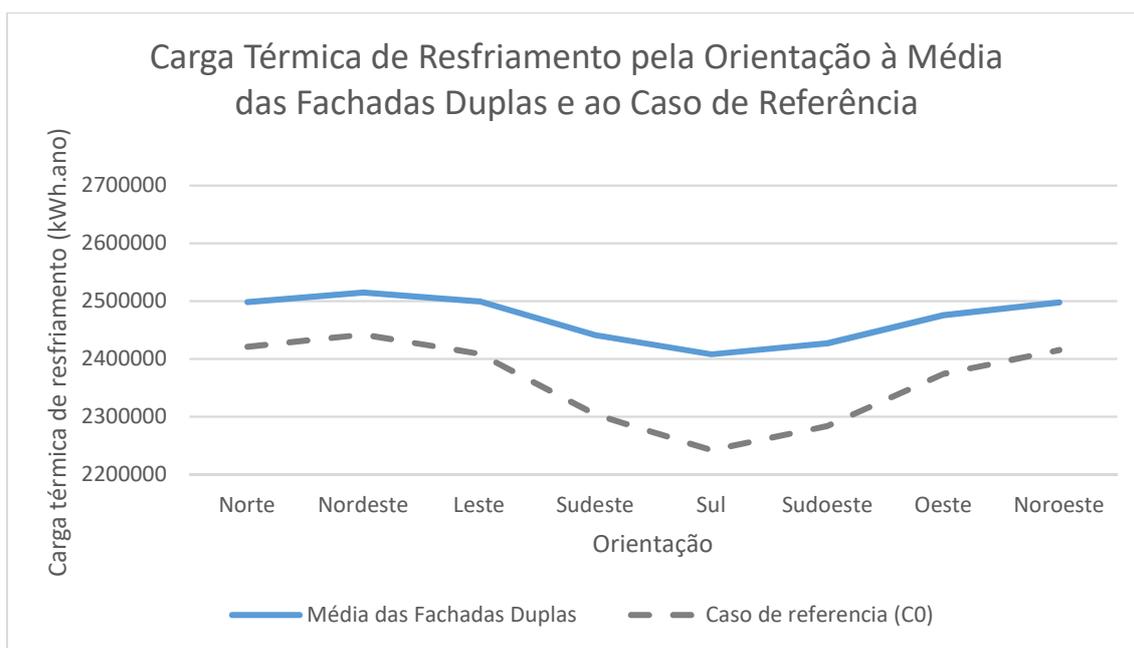


Gráfico 6 Gráfico de linhas da carga térmica de resfriamento pela orientação à média das fachadas duplas e ao caso de referência

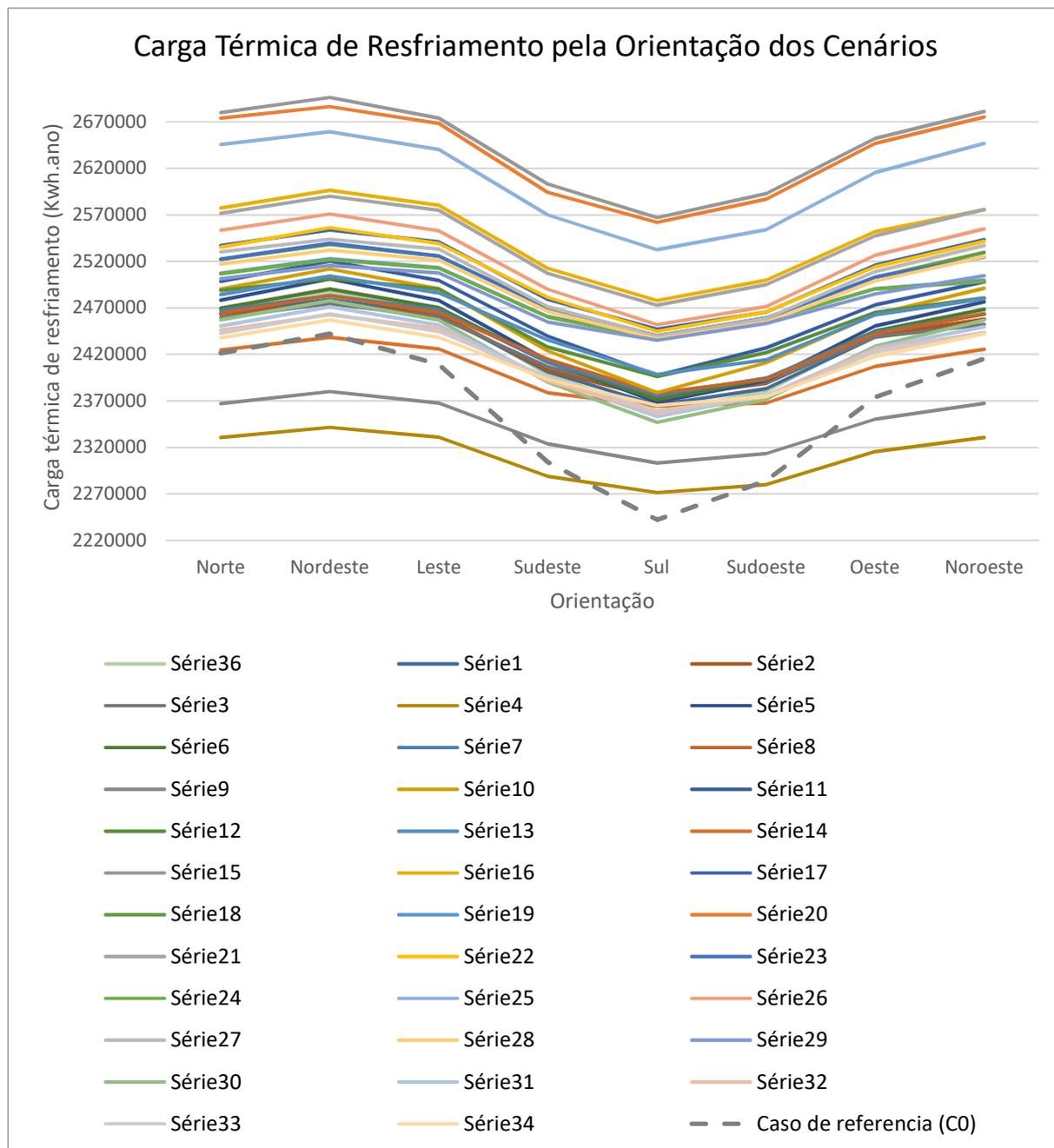


Gráfico 7 Gráfico de linhas da carga térmica de resfriamento pela orientação de todos os casos.

Nota-se, a partir da média dos 35 cenários com fachada dupla no Gráfico 6, que no geral, os cenários com fachada dupla possuem desempenho termoenergético inferior ao C0, com valores de carga térmica de resfriamento superiores. Da análise do Gráfico 7, observa-se que somente dois cenários obtiveram valores inferiores de carga térmica de resfriamento quando comparados com o C0. Além disso, nota-se que essa melhora não ocorre em todas as orientações. Esses dois cenários apresentam diminuição da carga térmica de resfriamento exatamente às orientações que representam maior ganho térmico, as do quadrante norte. Contudo, às orientações do quadrante sul, mesmo nesses dois cenários, o C0 possui um desempenho termoenergético superior. Isso pode

estar ligado ao maior isolamento térmico da fachada dupla, que ao mesmo tempo em que dificulta a entrada de calor por condução também inibe sua dispersão.

Esses resultados mostram que o emprego de fachadas duplas envidraçadas no contexto climático de Brasília não necessariamente significa melhora no desempenho termoenergético e a sua utilização deve ser avaliada de orientação a orientação. Em linhas gerais, deve-se evitá-las nas fachadas do quadrante sul, enquanto nas demais orientações deve-se avaliar a pertinência das soluções de fachadas duplas envidraçadas de acordo com seus parâmetros. Tendo a grande maioria dos cenários analisados — 33 dos 35 cenários — obtido performance termoenergética inferior ao C0, percebe-se a necessidade de se avaliar a escolha do *design* de fachada dupla envidraçada, adequando-se os parâmetros de projeto da fachada dupla para possibilitar uma redução da carga térmica.

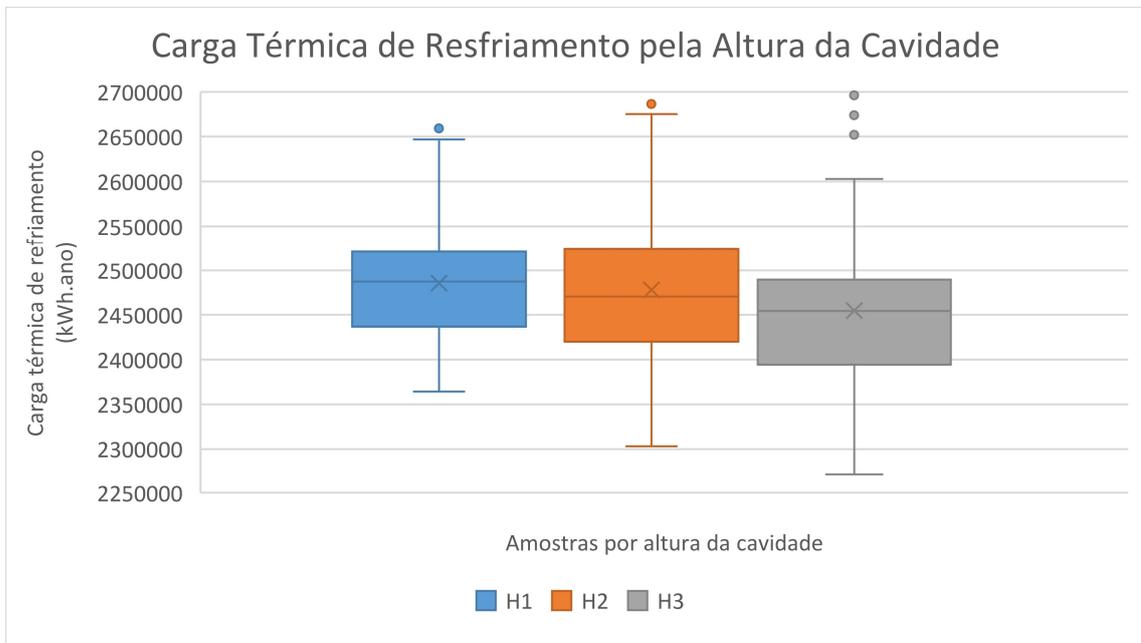


Gráfico 8 Gráfico de caixa da carga térmica de resfriamento pela altura da cavidade

Tabela 17 Teste Tukey às amostras de altura da cavidade

	H1	H2	H3
H1		0,8048	0,0173
H2	0,8883		0,09925
H3	3,892	2,919	

Quando se comparam os resultados das amostras agrupadas pelas diferentes alturas de cavidade estudadas, percebe-se que o aumento da altura representa uma melhora do desempenho termoenergético, como mostra o Gráfico 8. Esse padrão está de acordo com grande parte da

literatura e se comporta como esperado a partir dos princípios físicos que regem o efeito chaminé. Assim, a amostra H3 obteve na média valores inferiores de carga térmica de resfriamento. Nota-se que a amostra H2 possui média de carga térmica de resfriamento menor do que a média de H1, contudo, possui maior amplitude. A partir do teste estatístico Tukey às amostras das diferentes alturas de cavidade, apresentado na Tabela 17, observa-se que há diferença significativa somente entre H1 e H3, havendo entre H2 e H3 uma variação de mais de 90%. Assim, pode-se concluir que o aumento da altura da cavidade melhora o desempenho termoenergético, mas também que apenas a partir da altura equivalente a 12 andares que se obtêm melhoras significativas. Assim, sugere-se explorar ao máximo a altura da cavidade para obter melhor desempenho termoenergético.

Entre os tipos de cavidade também se notam diferenças quanto ao resultado de carga térmica de resfriamento. O Gráfico 9 apresenta os resultados agrupados pelos diferentes tipos de cavidade de fachadas duplas envidraçadas. Percebe-se que T2 — ou o tipo *Shaft-box* — possui um desempenho termoenergético inferior ao dos demais, que por sua vez possuem resultados semelhantes. Contudo, nota-se que T3 possui amplitude de resultados reduzida, o que provavelmente está relacionado à amostra menor desse grupo. O teste estatístico Tukey mostra que há diferença significativa somente entre T2 e os demais, como revela a Tabela 18. Isso mostra que a diferença dos resultados entre T1 e T3 probabilisticamente não está atrelada ao tipo de fachada dupla.

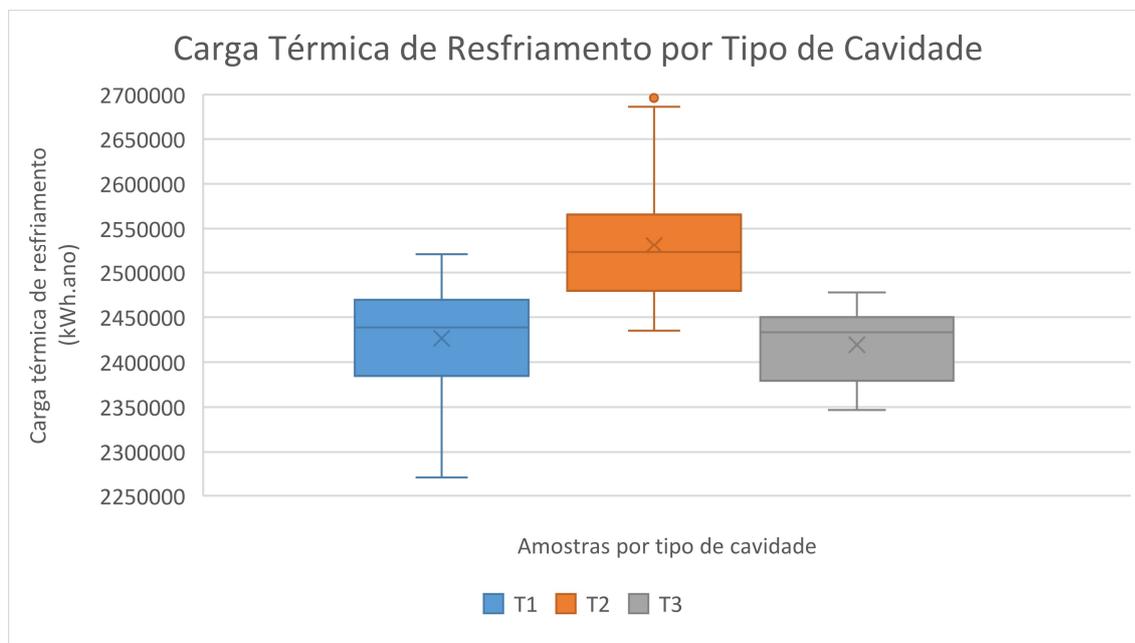


Gráfico 9 Gráfico de caixa da carga térmica de resfriamento pelo tipo de cavidade

Tabela 18 Teste Tukey às amostras de tipo da cavidade

	T1	T2	T3
T1		1,767E-13	0,7883
T2	19,66		2,026E-13
T3	0,9297	14,83	

Como já mencionado na revisão de literatura (POMPONI *et al.*, 2016, BARBOSA, IP, 2014), há uma predominância no emprego de fachada dupla de múltiplos andares (T3), o que se mostra justificável a partir dos resultados do presente estudo ao clima de Brasília. Provavelmente, isso ocorre pela menor obstrução da circulação de ar, e, conseqüentemente, da extração do ar quente. Contudo, a partir dos presentes resultados, percebe-se que há um potencial ao emprego de fachadas duplas corredor — ou mesmo ao tipo *box-window*²¹.

Supõe-se que esse desempenho inferior de T2 possa estar relacionado a maior divisão da cavidade e, conseqüentemente, maior percurso à saída do ar quente. Acredita-se que diferentes soluções de aberturas internas possam melhorar o fluxo de ar, e, portanto, seu desempenho termoenergético. Para tanto, seria necessária uma análise pormenorizada dos parâmetros específicos de projeto de fachadas duplas *shaft-box* para otimizar esse tipo de cavidade de fachada dupla.

²¹ Como já mencionado no método, o tipo *box-window* foi suprimido desse estudo em virtude de ser muito semelhante ao tipo corredor quando aplicado ao modelo desenvolvido na presente pesquisa.

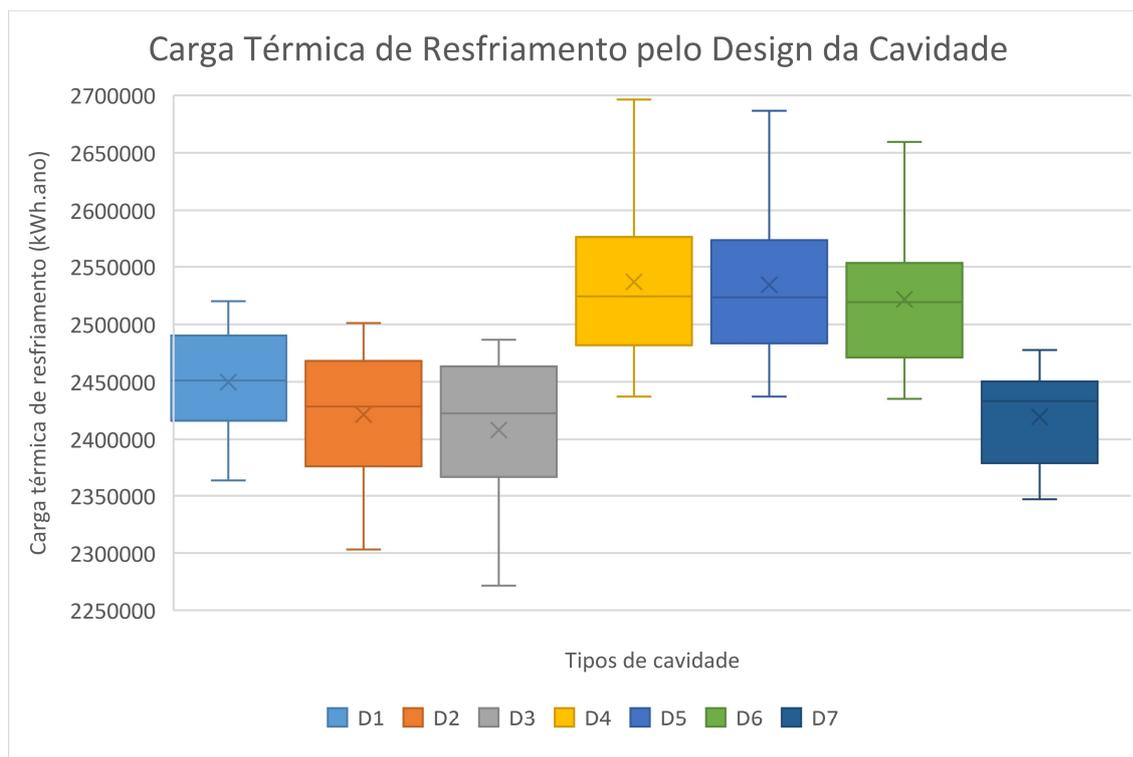


Gráfico 10 Gráfico de Caixa da carga térmica de resfriamento pela combinação entre tipo e altura da cavidade

Tabela 19 Teste Tukey às amostras de design da cavidade

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
D1		0,3068	0,02356	1,318E-09	4,267E-09	9,691E-07	0,225
D2	3,091		0,9443	1,162E-13	1,198E-13	2,724E-12	1
D3	4,562	1,471		1,165E-13	1,151E-13	1,16E-13	0,9757
D4	9,628	12,72	14,19		1	0,8992	1,149E-13
D5	9,345	12,44	13,91	0,2826		0,9568	1,152E-13
D6	7,951	11,04	12,51	1,677	1,394		1,018E-12
D7	3,321	0,2305	1,24	12,95	12,67	11,27	

A análise do *design* da cavidade — ou combinação da altura e tipo de cavidade —, exposta no Gráfico 10, corrobora com as tendências observadas nas análises anteriores: da melhora do desempenho com o aumento da altura da cavidade; e do desempenho termoenergético inferior das cavidades tipo *shaft-box*. Observa-se que os *designs* de D4 a D6 — os três do tipo *shaft-box* — possuem valores de carga térmica de resfriamento maiores que os demais. As fachadas duplas do tipo corredor e múltiplos andares com altura equivalente de 12 andares — D3 e D7 — possuem valores máximos e medianas semelhantes, contudo D3 possui amostra com maior amplitude e, assim, possui cenários com menor carga térmica de resfriamento, ou melhor desempenho. A amostra de fachadas duplas do tipo corredor com altura equivalente a 6 andares também possui resultados semelhantes a D3. Essas relações ficam claras a partir dos resultados do teste estatístico na Tabela 19, que praticamente só aponta as diferenças significativas entre as amostras D4, D5 e D6 — fachadas duplas do tipo *shaft-box* — e as demais amostras. Além disso, há uma grande

semelhança entre as amostras D2, D3 e D7, com resultados acima de 94%. Isso aponta como melhores soluções de fachada dupla envidraçadas dos tipos corredor e múltiplos andares quando possuem maiores alturas de cavidade.

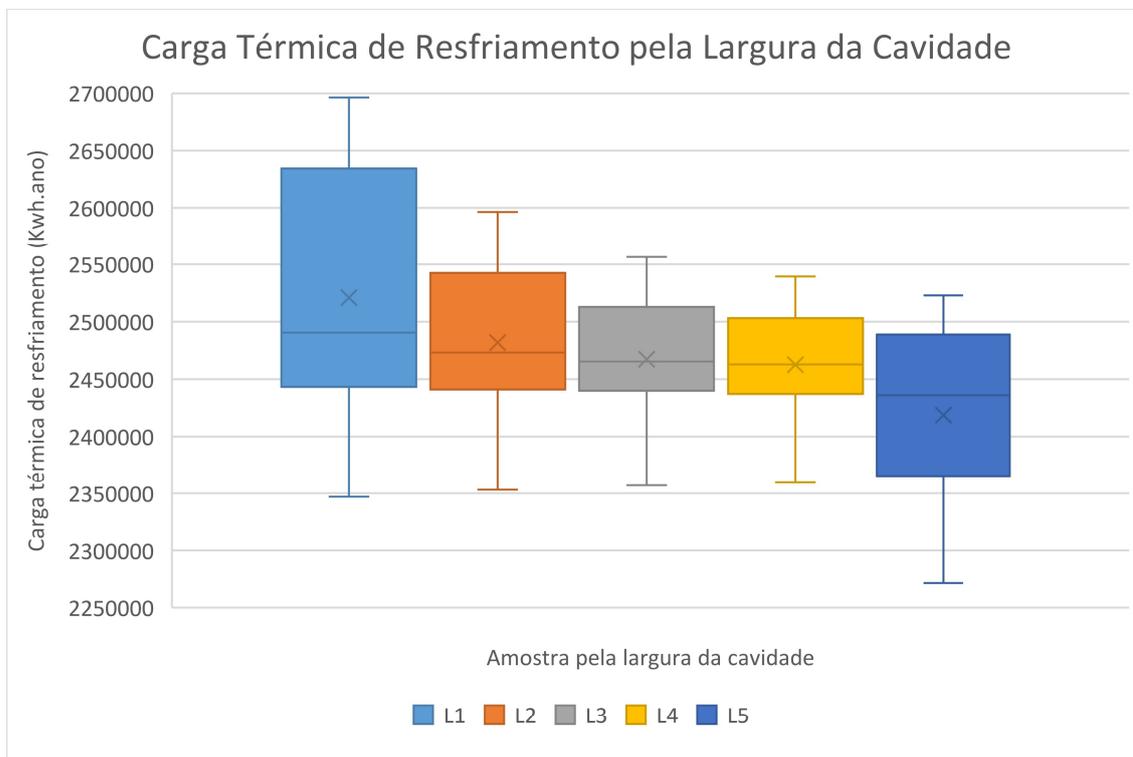


Gráfico 11 Gráfico de caixa da carga térmica de resfriamento pela largura da cavidade

Tabela 20 Teste Tukey às amostras de largura da cavidade

	L1	L2	L3	L4	L5
L1		0,03244	0,0009166	0,000207	6,364E-12
L2	4,104		0,8299	0,614	4,966E-05
L3	5,594	1,49		0,9961	0,003445
L4	6,115	2,011	0,5208		0,01196
L5	10,69	6,581	5,091	4,57	

A largura da cavidade da fachada dupla apresenta um padrão bem consistente na amostra estudada. Percebe-se que há uma tendência à melhoria do desempenho termoenergético conforme aumenta a largura da cavidade. Como se observa no Gráfico 11, há uma relação inversamente proporcional entre o aumento da largura da cavidade e a carga térmica de resfriamento. Em geral, essa tendência é mais sutil, com pequena alteração entre as amostras, porém sobressai-se a partir de L5 — largura máxima estudada, com 2,5 m — quando há uma diferença mais marcante dos valores da carga térmica de resfriamento. A partir do Gráfico 12, é possível observar que essa

variação em L5 está especificamente mais relacionada às fachadas duplas tipo corredor — de D1 a D3. Já em relação às fachadas duplas do tipo *shaft-box* — de D4 a D6 —, há uma redução da carga térmica mais brusca entre L1 e L2 e depois é mais gradual. Nas fachadas duplas de múltiplos andares, os valores são quase constantes, o que indica que a variação do parâmetro largura da cavidade é mais relevante nas fachadas duplas tipo *shaft-box* quando as larguras de cavidade são menores, ao passo que nas do tipo corredor isso ocorre com larguras maiores.

O teste estatístico para as amostras agrupadas pela largura da cavidade, exposto na Tabela 20, mostra que L1 e L5 são amostras que se diferenciam significativamente de todas as demais, porém, também são distintas entre si, dois extremos do espectro. Assim, caracteriza-se a existência de uma categoria de L2 a L4, outra somente à L1 e outra exclusiva à L5. Dessa forma, pode-se entender que, para alcançar melhor desempenho termoenergético, é importante que a largura da cavidade seja superior a 0,50 m (L1). Contudo, outra melhora significativa só volta a ocorrer a partir de largura de cavidade superior a 2,50 m (L5).

Dessa forma, em uma análise geral, há indícios de que existem benefícios quanto ao desempenho termoenergético com o aumento da largura da cavidade das fachadas duplas aqui analisadas, em uma relação inversamente proporcional entre carga térmica de resfriamento e largura da cavidade. No geral, cavidades com dimensões a partir de 1,00 m apresentam resultados significativamente superior aos de cavidades com dimensões menores, especialmente se forem do tipo *shaft-box*, como mostra o Gráfico 12. Entretanto, melhoras significativas no desempenho termoenergético só voltam a acontecer após 2,50 m, especialmente as do tipo corredor. Assim, pode-se cogitar que a largura de 1,0 m seja uma dimensão adequada, especialmente sob a ótica do empreendedor que deseja minimizar o consumo de área com um espaço normalmente não ocupável. Essa dimensão está de acordo com a literatura (POMPONI *et al.*, 2016, BARBOSA, IP, 2014). Caso essa questão não seja um empecilho, larguras maiores, superiores a 2,5 m, podem ser mais recomendadas.

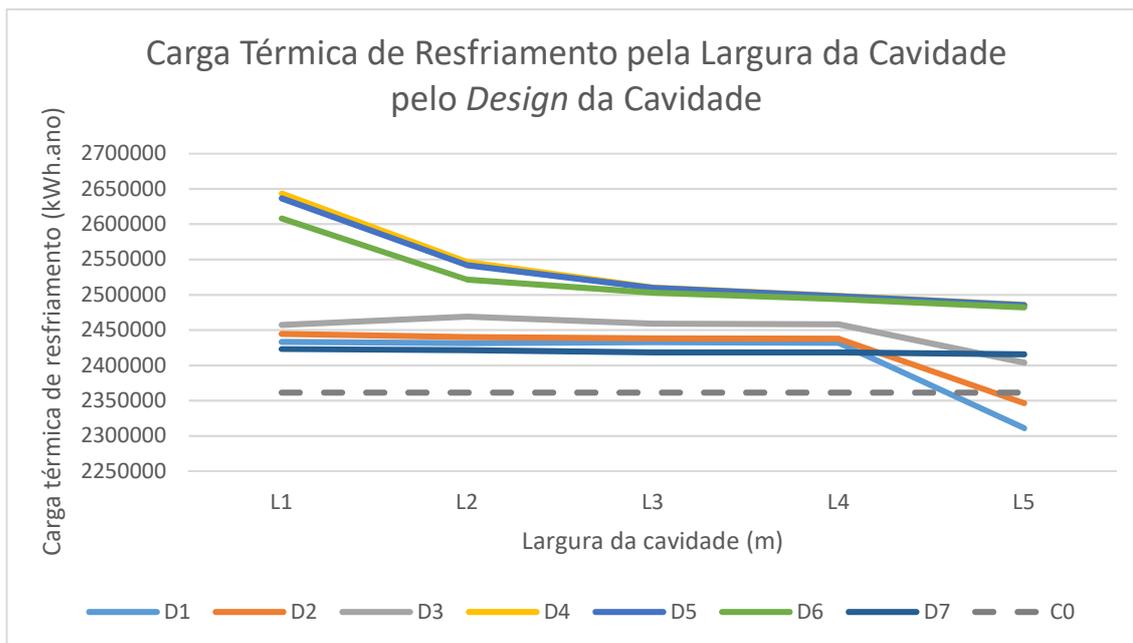


Gráfico 12 Carga térmica de resfriamento pela largura da cavidade pelo *design* da cavidade

4.3 AVALIAÇÃO DAS FACHADAS DUPLAS

Neste item, apresentam-se os resultados do 3º e do 4º ciclos de simulações, devido especialmente à tipologia com aberturas em fachadas opostas, que ocorre em ambos os ciclos, mas que difere do ciclo anterior. Divide-se o item em três subitens: um para cada um dos ciclos — um sem e outro com condicionamento híbrido — e um último subitem que compara os dois ciclos e sintetiza os resultados gerais dessa etapa. Por sua vez, os dois primeiros subitens, relativos aos ciclos, são subdivididos em três partes: uma para fachadas duplas envidraçadas, outra para fachadas duplas híbridas e uma última para comparação entre elas.

4.3.1 Avaliação das Fachadas Duplas Envidraçadas e Híbridas

Divide-se a apresentação dos resultados do 3º ciclo, presentes neste subitem, em três etapas: primeiro, sobre as fachadas duplas envidraçadas com o emprego da tipologia com melhor desempenho termoenergético obtido no ciclo anterior — do tipo corredor e com 12 andares de altura — além do cenário de controle. Em seguida, sobre os resultados das fachadas duplas híbridas; e, posteriormente, comparam-se os resultados das fachadas duplas envidraçadas, híbridas e o cenário de controle.

a. Fachadas Duplas Envidraçadas

A fachada dupla envidraçada mostra-se mais eficaz quando empregada na fachada norte, como se pode perceber no Gráfico 13, sendo essa a mesma condição que se apresenta no 2º ciclo,

o que se mostra coerente com a literatura (POMPONI *et al.*, 2016, BARBOSA, IP, 2014), que normalmente indica o emprego de sistemas de fachada dupla na orientação equatorial, no hemisfério meridional, a norte.

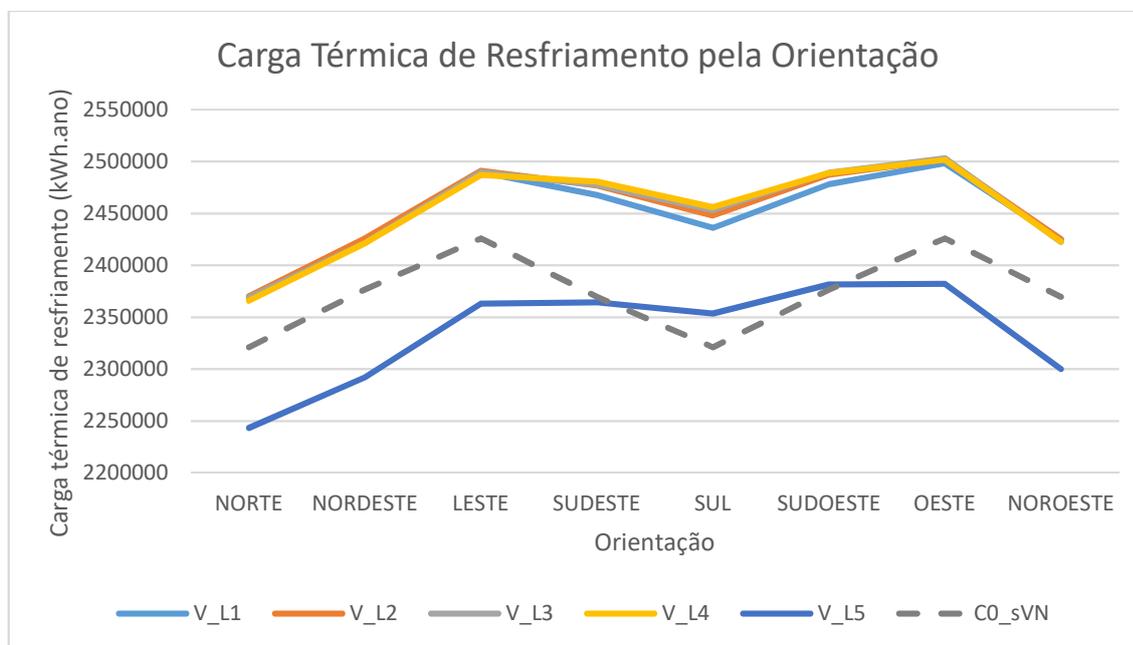


Gráfico 13 Gráfico de linhas da carga térmica de resfriamento pela orientação

Contudo, o caso de controle — ou referência — (C0_sVN) obteve resultado superior a praticamente todos os cenários, com exceção de algumas orientações do cenário com largura da cavidade de 2,50 m (V_L5). Nota-se que o caso de referência (C0_sVN) possui envidraçamento em fachadas opostas, sem o emprego de fachada dupla em nenhuma delas; por isso, os resultados de orientações opostas são idênticos. Observa-se que, da mesma forma que nas análises do 2º ciclo, nas análises do 3º ciclo, verificou-se que o emprego da fachada dupla em fachadas com orientações do quadrante sul obteve desempenho inferior ao caso de referência. Dessa forma, reforça-se a ideia de que o emprego de fachadas duplas envidraçadas deve ser evitado nessas orientações. Como já mencionado anteriormente, acredita-se que isso decorra do maior isolamento que o sistema de fachada dupla envidraçada proporciona, impedindo-se, assim, a dissipação do calor de dentro da edificação. Inclusive, observa-se que a menor largura de cavidade (V_L1) obtém desempenho levemente superior a V_L2 a V_L4 na orientação sul, o que corrobora com a tese da influência do isolamento. Nas condições da presente pesquisa, o emprego de fachadas duplas só é capaz de proporcionar melhoria no desempenho termoenergético, em comparação ao caso de referência (C0_sVN), com a largura de cavidade de 2,50 m (V_L5) e em determinadas orientações.

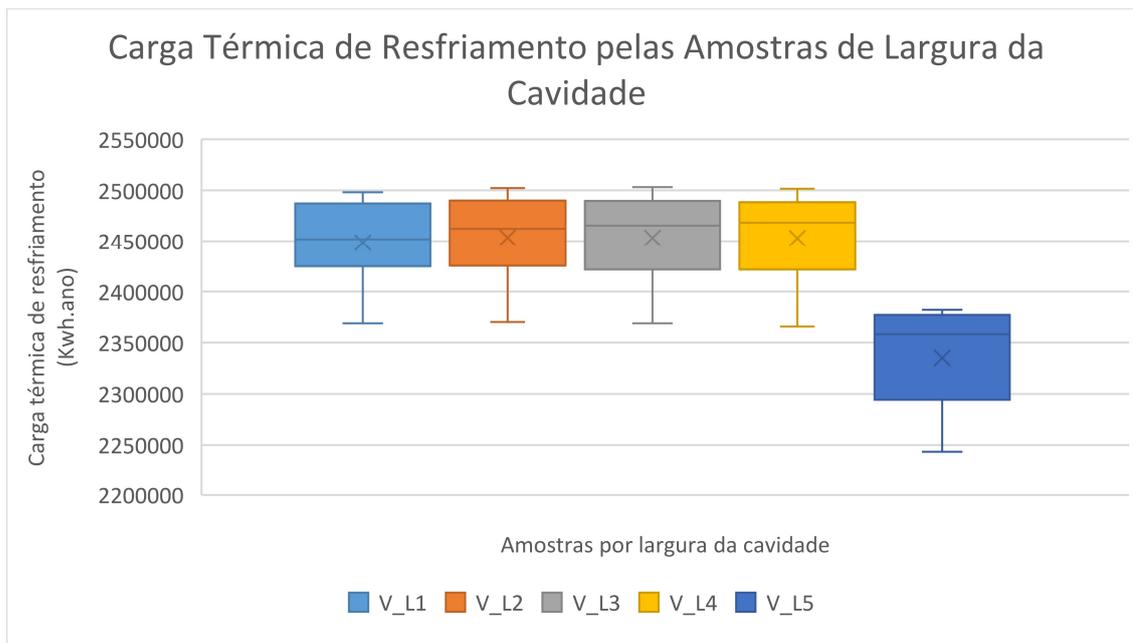


Gráfico 14 Gráfico de caixa da carga térmica de resfriamento por amostra de largura da cavidade

Tabela 21 Teste Tukey da carga térmica de resfriamento pela largura da cavidade

	V_L1	V_L2	V_L3	V_L4	V_L5
V_L1		0,9996	0,9996	0,9997	0,0001888
V_L2	0,2899		1	1	0,0001025
V_L3	0,2807	0,009262		1	0,0001045
V_L4	0,2678	0,0221	0,01284		0,0001074
V_L5	6,957	7,247	7,238	7,225	

A partir do Gráfico 13 e do Gráfico 14, nota-se que a fachada dupla com maior largura de cavidade (V_L5) possui um desempenho visivelmente superior. O teste estatístico na Tabela 21 confirma que realmente há somente uma distinção significativa entre as amostras de largura da cavidade de fachadas duplas envidraçadas, entre V_L5 e as demais amostras. Contudo, apesar de a variação entre as primeiras quatro amostras de largura da cavidade — de V_L1 a V_L4 — não ser significativa, percebe-se que não há uma tendência de melhora do desempenho termoenergético com o aumento da cavidade, como se observa nos resultados do 2º ciclo. Inclusive, nota-se, no Gráfico 14, que V_L1 possui desempenho termoenergético melhor do que as demais quatro primeiras amostras, o que configura uma relação diretamente proporcional entre carga térmica de resfriamento e largura da cavidade neste intervalo de amostras. Isso pode estar relacionado ao tipo e à altura da cavidade, porém é uma tendência oposta ao encontrado no ciclo anterior. Entretanto, a variância entre as quatro amostras é muito baixa e tem uma semelhança na casa de 90% — com exceção de V_L2, que apresenta variância maior com V_L1 e V_L4, entre 60% e 70% —, o que

mostra que a variação da largura nesse intervalo não influencia a carga térmica de resfriamento de maneira representativa.

Assim, somente cavidades de larguras maiores representam redução significativa da carga térmica de resfriamento, enquanto a variação no intervalo entre 0,50 m e 2,00 m não tem impacto relevante nos resultados. Contudo, nas condições do presente estudo, as fachadas duplas envidraçadas com cavidades mais estreitas apresentam desempenho termoenergético inferior ao cenário de referência (C0_sVN) — sem fachada dupla. Somente a partir de 2,50 m (V_L5) que o aumento da largura da cavidade proporciona melhoria significativa do desempenho termoenergético, quando comparado com as demais amostras de largura da cavidade, e obtêm-se resultados superiores ao caso de referência (C0_sVN) na maioria das orientações.

b. Fachadas Duplas Híbridas

Assim como a fachada dupla envidraçada, a fachada dupla híbrida apresenta melhor desempenho termoenergético quando empregada no quadrante norte, o que se observa no Gráfico 15. Porém, diferentemente das fachadas envidraçadas, todos os cenários de fachada dupla híbrida analisados possuem desempenho termoenergético superior ao cenário de referência (C0_sVN), até mesmo no que diz respeito às orientações do quadrante sul, em que todos os cenários de fachada dupla envidraçada analisados têm desempenho inferiores ao cenário de referência (C0_sVN).

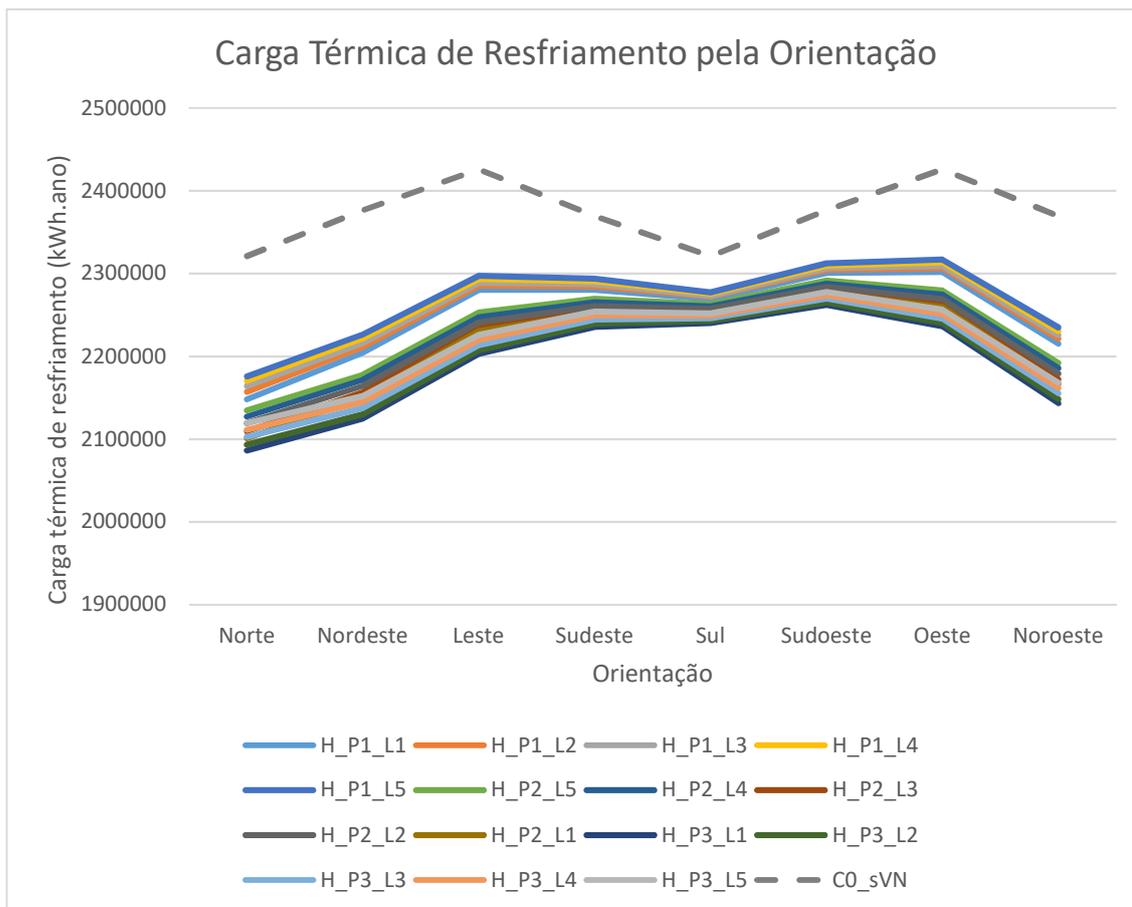


Gráfico 15 Gráfico de linhas da carga térmica de resfriamento pela orientação

A diferença na taxa de permeabilidade da pele externa da fachada dupla apresenta uma relação diretamente proporcional com a carga térmica de resfriamento. À medida que a taxa de permeabilidade diminui, a carga térmica de resfriamento também diminui, ou o desempenho termoenergético melhora. O Gráfico 16 possibilita constatar essa relação. A Tabela 22 apresenta os resultados do teste estatístico, que apontam diferença significativa entre H_P1 e as demais amostras, enquanto entre estas a variação não é considerada relevante. Assim, pode-se entender que existem dois grupos, um somente com H_P1, com desempenho inferior e outro com as demais taxas de permeabilidade com desempenho superior. Dessa forma, sugere-se o emprego de taxas de permeabilidade da pele externa de fachadas duplas híbridas iguais ou superiores a 50%.

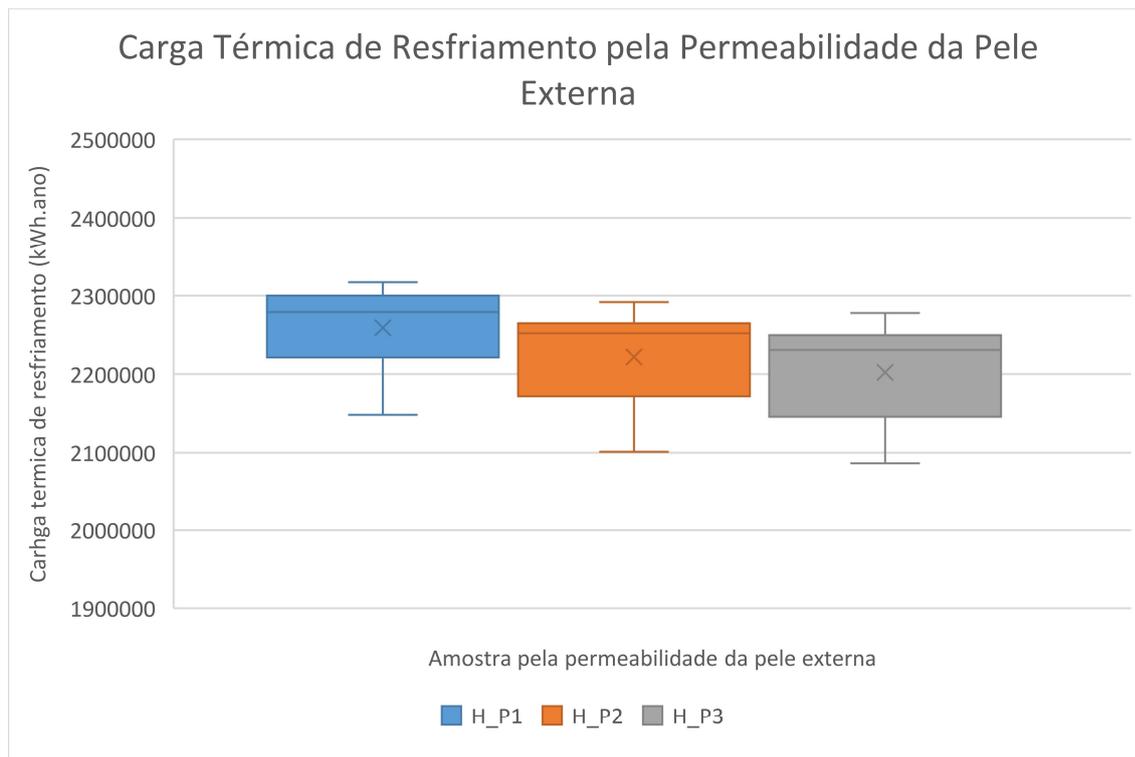


Gráfico 16 Gráfico de caixa da carga térmica de resfriamento pela permeabilidade da pele externa

Tabela 22 Teste Tukey da carga térmica de resfriamento pela permeabilidade da pele externa

	P1	P2	P3
P1		0,009556	3,464E-05
P2	4,224		0,2526
P3	6,477	2,253	

Quanto ao parâmetro da largura da cavidade, ao se analisar toda a amostra, nas fachadas duplas híbridas não se nota um padrão marcante definido, diferentemente do padrão das fachadas duplas envidraçadas, que possuem uma relação inversamente proporcional entre a largura da cavidade e a carga térmica de resfriamento. Observa-se no Gráfico 17 que os valores de média, medianas, primeiro e terceiro quartis são muitos próximos. Nota-se uma leve redução de H_L1 a H_L3 e depois um leve aumento até H_L5, porém muito sutil.

De fato, o teste estatístico mostra baixa variância entre as amostras de largura da cavidade, inferior a 1% de diferença, como mostra a Tabela 23. Isso aponta o baixo impacto da variação da dimensão do parâmetro de largura em fachadas duplas híbridas na carga térmica de resfriamento, diferentemente do que ocorre em fachadas duplas envidraçadas, nas quais, a partir de 2,50 m, há uma sensível alteração dos resultados, o que sugere maior importância do parâmetro largura da cavidade às soluções envidraçadas.

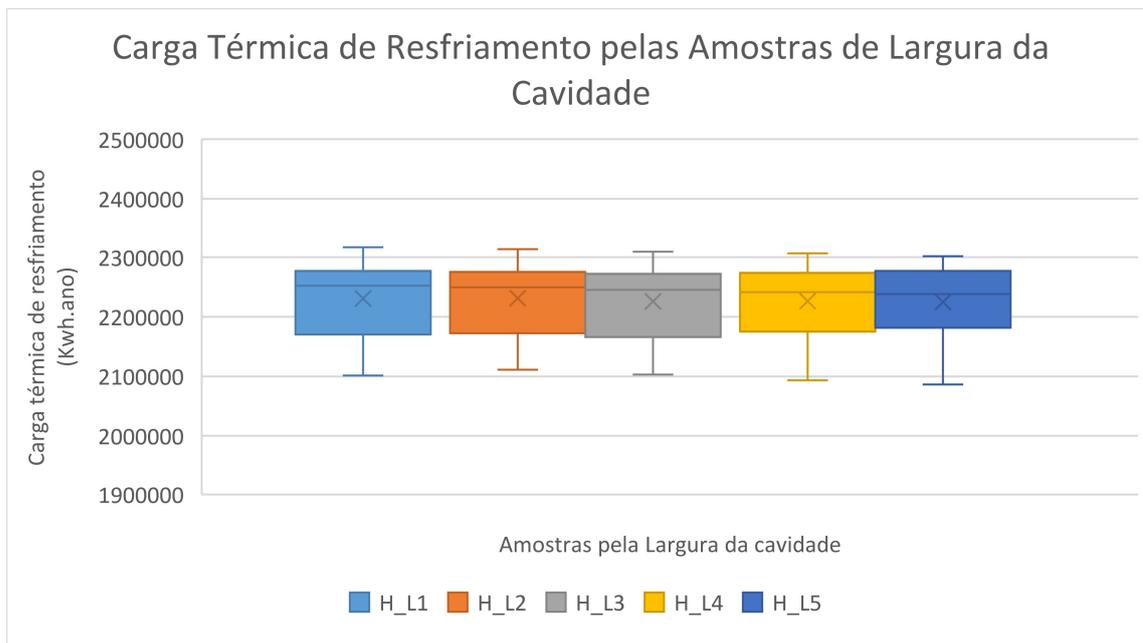


Gráfico 17-Gráfico de caixa da carga térmica de resfriamento pela largura da cavidade

Tabela 23 Teste Tukey da carga térmica de resfriamento pela largura da cavidade

	H_L1	H_L2	H_L3	H_L4	H_L5
H_L1		1	0,9987	0,9993	0,9977
H_L2	0,04593		0,998	0,9988	0,9966
H_L3	0,3927	0,4386		1	1
H_L4	0,3359	0,3818	0,05677		1
H_L5	0,4536	0,4995	0,0609	0,1177	

Entretanto, nota-se um padrão mais uniforme ao se analisar a relação entre a largura da cavidade e a carga térmica de resfriamento em fachadas duplas híbridas, quando se dividem as amostras pela taxa de permeabilidade da pele externa, conforme exposto no Gráfico 18. Observa-se que há uma leve tendência ao aumento da carga térmica com o aumento da largura da cavidade para cada uma das taxas de permeabilidade, uma relação diretamente proporcional. Porém é um crescimento sutil, que, de acordo com a baixa variação entre as amostras expostas no teste estatístico, pode ser entendido como algo constante. Isso sugere que variação da largura da cavidade em fachadas duplas híbridas não possui impacto significativo no desempenho termoenergético.

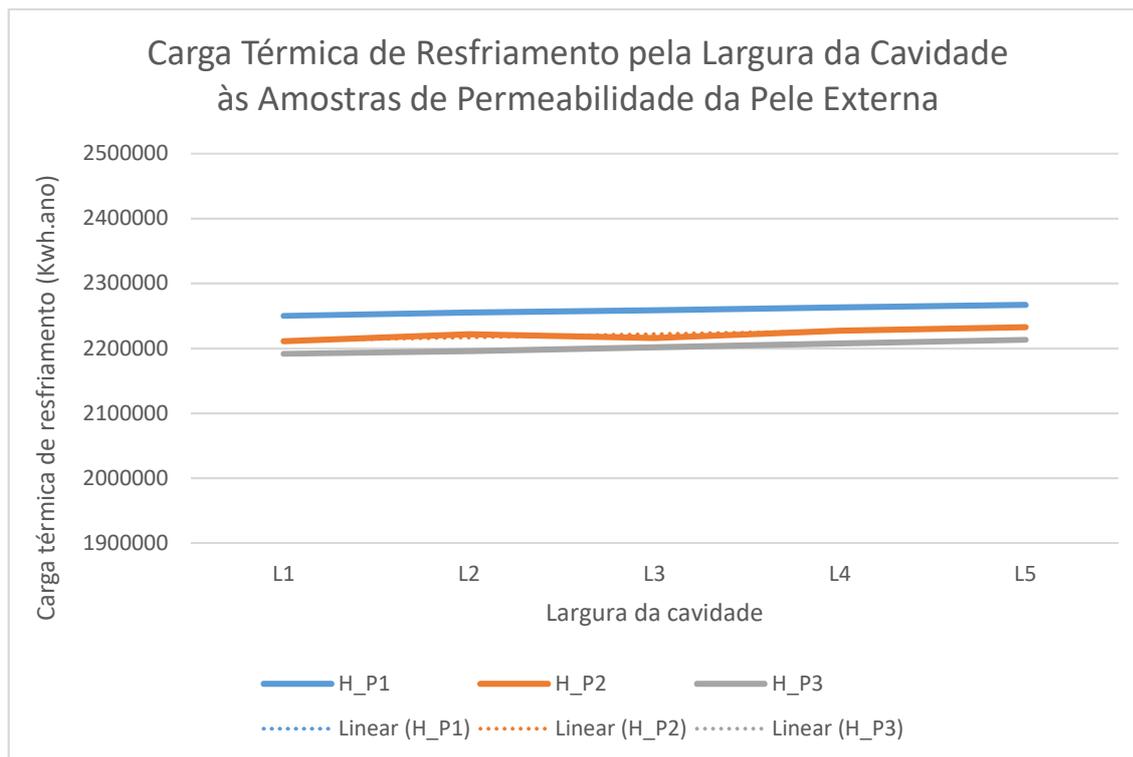


Gráfico 18 Gráfico de linhas da carga térmica de resfriamento pela largura da cavidade às amostras de permeabilidade da pele externa

c. Comparação entre Fachadas Duplas Envidraçadas e Híbridas

Tanto as fachadas duplas híbridas quanto as envidraçadas apresentam o mesmo padrão de carga térmica de resfriamento por orientação, com menores valores para a orientação do quadrante norte. Entretanto, percebe-se que as soluções híbridas possuem desempenho significativamente superior, como se pode observar no Gráfico 19. Enquanto todas as alternativas analisadas de fachadas duplas híbridas apresentam cargas térmicas de resfriamento inferiores à amostra de controle (C0_sVN) — as soluções envidraçadas —, somente a com cavidade de 2,50 m de largura (V_L5) obtém desempenho superior à C0_sVN na maioria das orientações. Dessa forma, pode-se concluir que os maiores benefícios do emprego da fachada dupla ocorrem quando esta é empregada no quadrante norte. Por outro lado, observa-se que o emprego da fachada dupla no quadrante sul tem efeito reduzido. Além disso, todos os cenários de soluções envidraçadas analisadas neste quadrante apresentam desempenho inferior à C0_sVN, devendo-se, dessa forma, evitar o emprego de fachadas duplas envidraçadas neste quadrante.

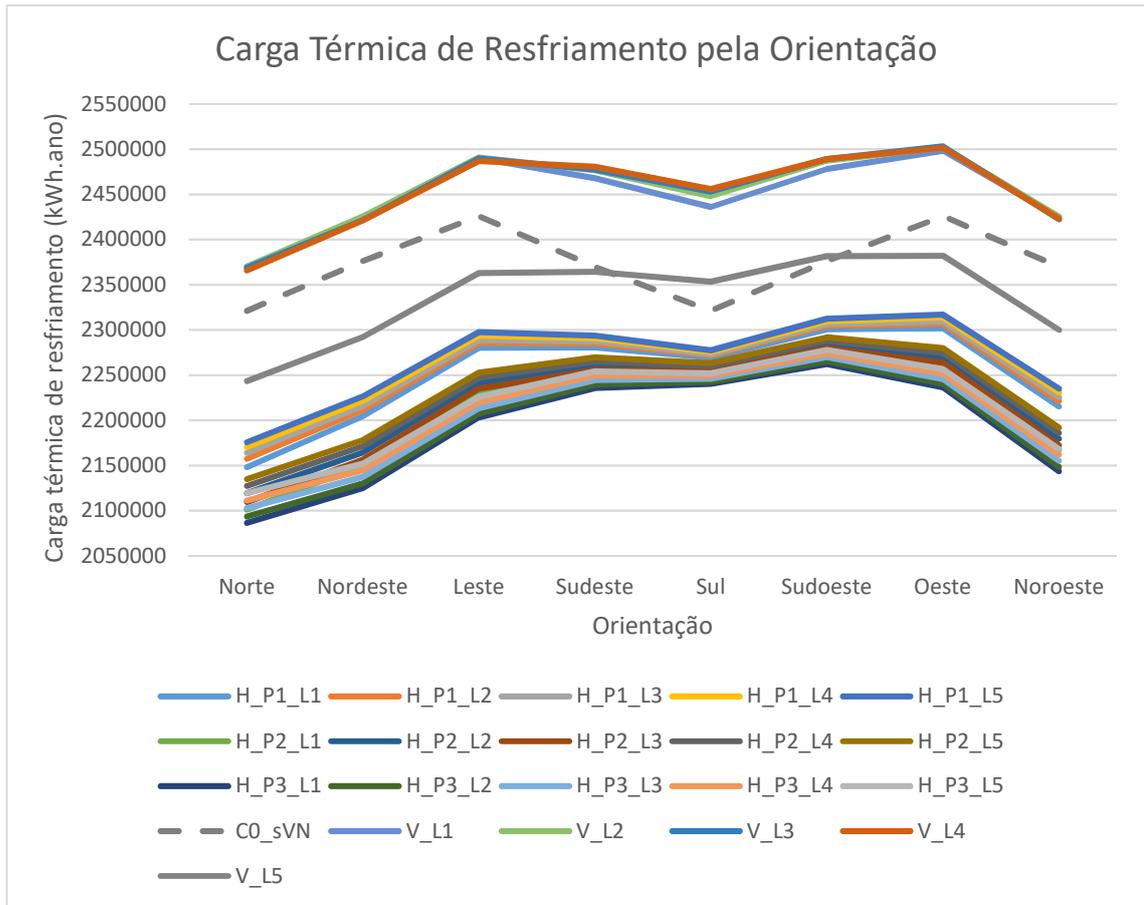


Gráfico 19 Gráfico de linhas da carga térmica de resfriamento pela orientação

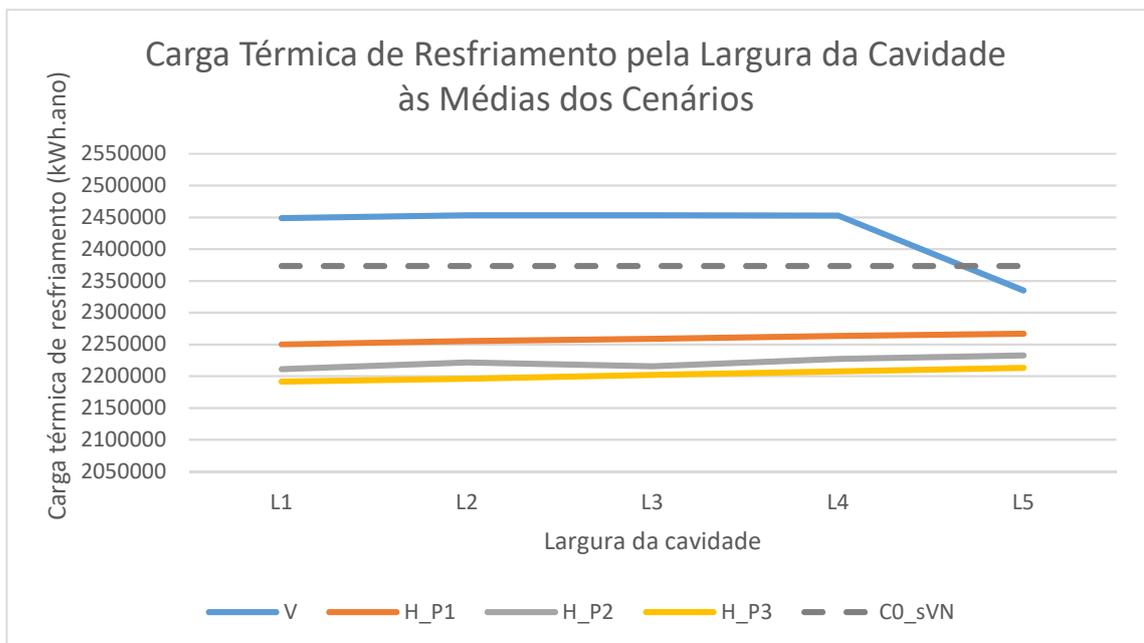


Gráfico 20 Gráfico de linhas da carga térmica de resfriamento pela largura da cavidade às médias dos cenários

O sombreamento propiciado pela solução híbrida de fachada dupla é o que aparentemente ocasiona maior melhoria dos resultados, mais do que as especificidades de largura da cavidade e que a taxa de permeabilidade da pele externa. A partir do Gráfico 20, nota-se a diferença marcante entre os resultados das soluções envidraçadas e híbridas, conforme os quais todas as soluções híbridas possuem desempenho superior ao caso de referência (C0_sVN), ao passo que praticamente todas soluções envidraçadas têm desempenho inferior. Por outro lado, percebe-se que nas fachadas duplas híbridas, tanto a largura da cavidade, quanto a permeabilidade da pele externa não possibilitam grandes alterações dos resultados. Isso corrobora com as diretrizes da norma brasileira de Desempenho Térmico das Edificações (NBR 15.220) (ABNT, 2003), que indica a estratégia de sombreamento como uma das principais alternativas bioclimáticas ao contexto climático de Brasília.

Na média, as soluções híbridas (H) analisadas proporcionam uma melhoria de 6,1% em comparação com a amostra média do C0_sVN, enquanto as fachadas duplas envidraçadas (V), em geral, apresentam desempenho inferior à média de C0_sVN em 2,3%, como se observa no Gráfico 21. Isso mostra, como citado anteriormente, a relevância de sombreamento das aberturas no contexto climático de Brasília, algo que a solução envidraçada não proporciona. Contudo, esses valores médios são afetados por diversos aspectos, inclusive pela orientação sul, que se mostra pouco favorável às fachadas duplas, assim como por larguras de cavidades com desempenho inferior.

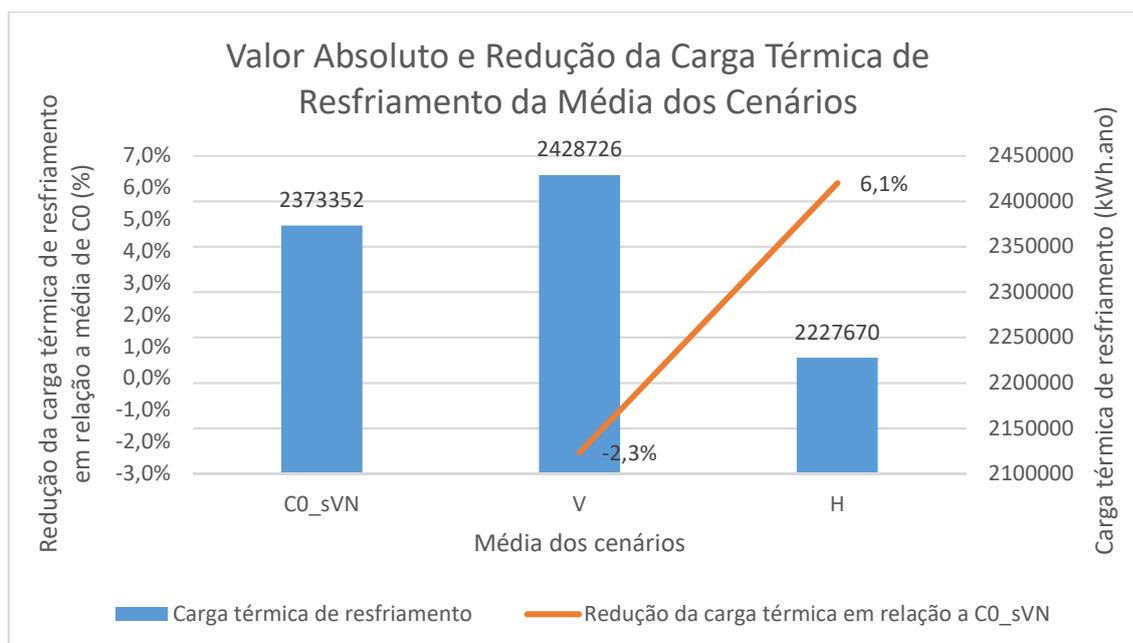


Gráfico 21 Gráfico de barras e linhas do valor absoluto e redução da carga térmica de resfriamento da média dos cenários

Os parâmetros de projeto da fachada dupla envidraçada, como tipo, largura e altura da cavidade e orientação da fachada dupla possuem grande impacto no desempenho termoenergético. Considerando-se que a maioria dos cenários analisados apresentam desempenho inferior ao cenário de referência (C0_sVN), torna-se necessário um estudo para se desenvolver um *design* apropriado ao clima, que melhore o desempenho, e não que o piore. Assim, é importante analisar especificamente as situações mais vantajosas do emprego de fachadas duplas.

O Gráfico 22 apresenta os cenários com melhores desempenhos das fachadas duplas envidraçadas e híbridas em comparação com o cenário C0_sVN para a orientação norte, no qual as fachadas duplas possuem melhores resultados. Essa análise apresenta uma melhoria do desempenho termoenergético da solução envidraçada em relação ao C0_sVN, com um incremento de 5,5%. Entretanto as soluções híbridas apresentam desempenho ainda melhor, de 9,5%, 11,5% e 12,1% para H_P1_L1, H_P2_L1 e H_P3_L1, respectivamente. O que mais uma vez mostra os maiores benefícios que as soluções híbridas possibilitam ao clima de Brasília, o que reforça o impacto positivo do emprego do sombreamento.

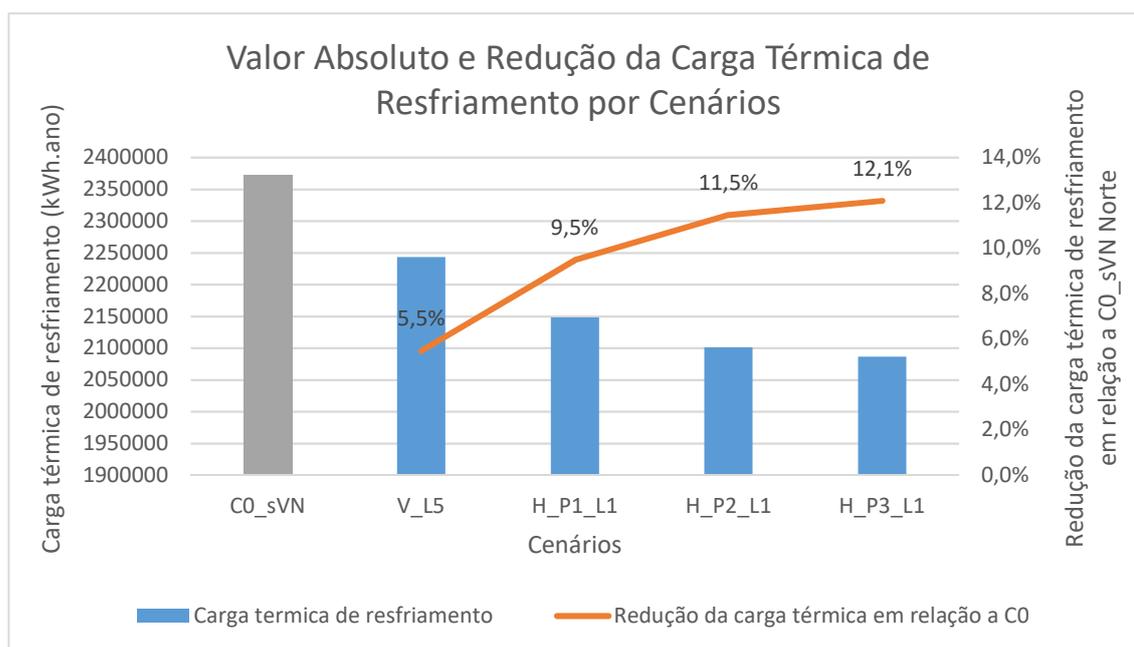


Gráfico 22 Gráfico de barras e linhas do valor absoluto e redução da carga térmica de resfriamento por cenários

O Quadro 6 a seguir apresenta um resumo da comparação das principais diferenças entre as fachadas duplas híbridas e envidraçadas observadas nesse ciclo de simulações.

Quadro 6 Comparação entre fachadas duplas híbridas e envidraçadas sem condicionamento híbrido.

Fachada Dupla Híbrida	Fachada Dupla Envidraçada
Todos são superiores ao controle	Somente maior largura (L5) é superior ao controle (mas só em determinadas orientações)
	Quadrante norte melhor, sul pior
Orientação	
	Somente maior largura (L5) é significativa superior
Largura da Cavidade	
Não há variação significativa	
	-
Permeabilidade da Pele Externa	

4.3.2 Avaliação do Emprego do Condicionamento Híbrido

Neste subitem, busca-se analisar o quanto o emprego da ventilação natural pode impactar na redução da carga térmica de resfriamento. Para tanto, divide-se o subitem em três partes: na primeira, avalia-se a influência do condicionamento híbrido somente nas fachadas duplas envidraçadas; em seguida, exclusivamente nas fachadas duplas híbridas; e, por último, faz-se uma avaliação conjunta, que engloba as fachadas duplas de distintas materialidades.

a. Fachadas Duplas Envidraçadas

Assim como os outros cenários de fachadas duplas envidraçadas analisados nos demais ciclos, os casos com o emprego de condicionamento híbrido demonstram ser mais adequados às fachadas do quadrante norte, como se nota no Gráfico 23. O cenário de referência (C0_cVN) sem fachada dupla possui melhor desempenho em comparação a todos os casos para o quadrante sul. Contudo, o desempenho termoenergético das fachadas duplas envidraçadas é superior somente para V_VN_L4 e V_VN_L5 nas orientações mais favoráveis — no quadrante norte. As demais larguras de cavidade não possibilitam redução da carga térmica de resfriamento em comparação com o modelo de referência (C0_cVN).

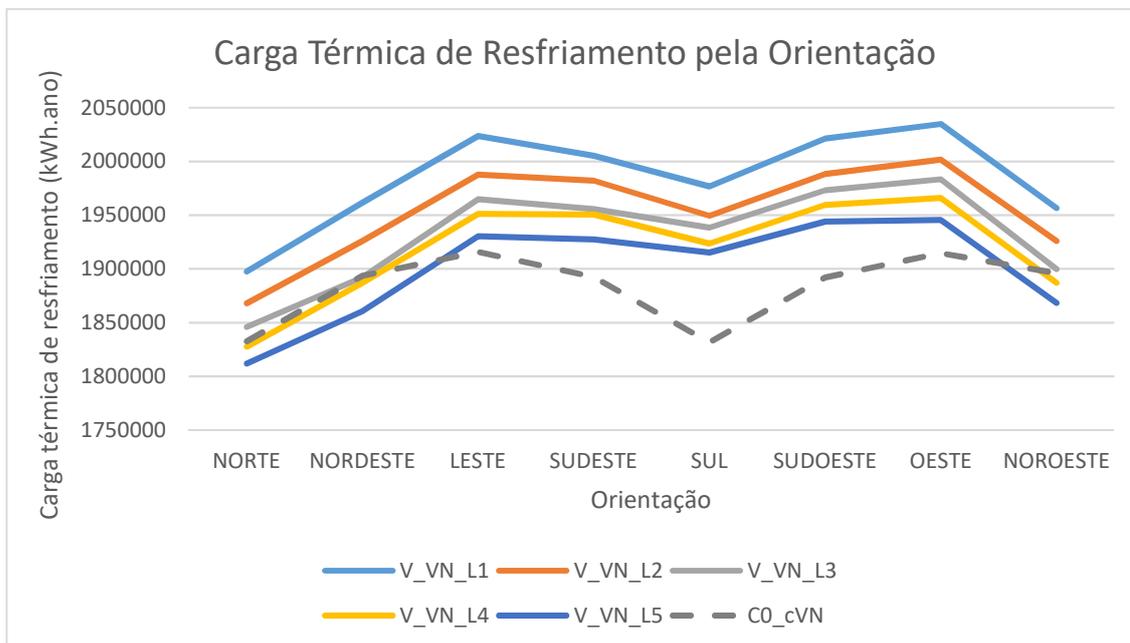


Gráfico 23 Gráfico de linhas carga térmica de resfriamento pela orientação

O efeito da largura da cavidade também é semelhante aos casos em que não há o emprego da ventilação ao condicionamento interno. Percebe-se uma melhora do desempenho termoenergético com o aumento da largura da cavidade, porém, isso é mais marcante quando há o emprego do condicionamento híbrido, analisado no presente subitem. Nos casos sem o emprego de condicionamento híbrido, uma melhora marcante só ocorre a partir de cavidades com 2,50 m de largura (L5). Até essa marca, a diferença entre os resultados é mínima, havendo um leve aumento da carga térmica de resfriamento conforme o aumento da largura da cavidade. Contudo, quando há o emprego do condicionamento híbrido, percebe-se uma melhora constante, gradativa; um comportamento é mais homogêneo, com um padrão mais constante de diminuição da carga térmica de resfriamento com o aumento da cavidade, como se observa no Gráfico 24.

Por meio do teste estatístico, exposto na Tabela 24, nota-se que há variação significativa somente entre V_VN_L5 e V_VN_L1. Contudo, V_VN_L4 tem uma variação de mais de 93% em relação a V_VN_L1, próximo do limite de 95% e, dessa forma, também se pode considerá-lo distinto de V_VN_L1. Apesar de a análise de variação entre as amostras ser superior a 95% em um parâmetro, percebe-se uma variação gradual da carga térmica de resfriamento, como observado no Gráfico 24. Assim, embora a análise estatística aponte para baixa variação dos resultados entre as amostras, entende-se que a variação do parâmetro de largura da cavidade em fachadas duplas envidraçadas com o emprego de condicionamento híbrido possui impacto importante no desempenho termoenergético, especialmente porque só assim é possível obter um desempenho termoenergético superior ao caso de referência (C0_cVN).

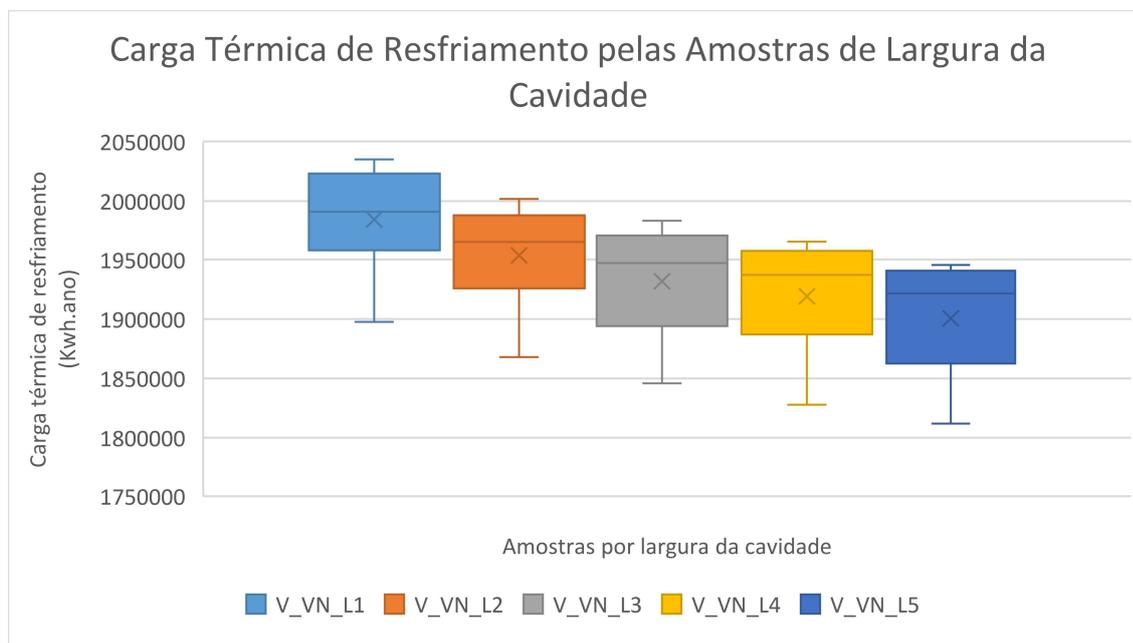


Gráfico 24 Gráfico de caixas de carga térmica de resfriamento pelas amostras de largura da cavidade

Tabela 24 Teste Tukey da carga térmica de resfriamento pela largura da cavidade para fachadas duplas envidraçadas com condicionamento híbrido

	V_VN_L1	V_VN_L2	V_VN_L3	V_VN_L4	V_VN_L5
V_VN_L1		0,6815	0,1853	0,06164	0,008674
V_VN_L2	1,865		0,8824	0,5915	0,1835
V_VN_L3	3,184	1,318		0,9834	0,6784
V_VN_L4	3,936	2,071	0,7528		0,9313
V_VN_L5	5,056	3,191	1,873	1,12	

Ao se compararem os cenários de fachada dupla envidraçada com e sem o emprego do condicionamento híbrido, no Gráfico 25, tornam-se perceptíveis os benefícios da ventilação no desempenho termoenergético. Enquanto casos sem condicionamento híbrido possuem resultados na casa dos 2.400.000 kWh.ano, os casos com condicionamento híbrido têm carga térmica em torno de 2.000.000 kWh.ano. Isso representa uma diminuição média aproximada de 20%, entre 18,6% e 21,8%, nas amostras analisadas. Dessa forma, evidencia-se a grande influência da ventilação na melhoria do desempenho termoenergético, o que está de acordo com as diretrizes de projeto bioclimático para Brasília, segundo a NBR 15.220, que sugere o uso de ventilação natural.

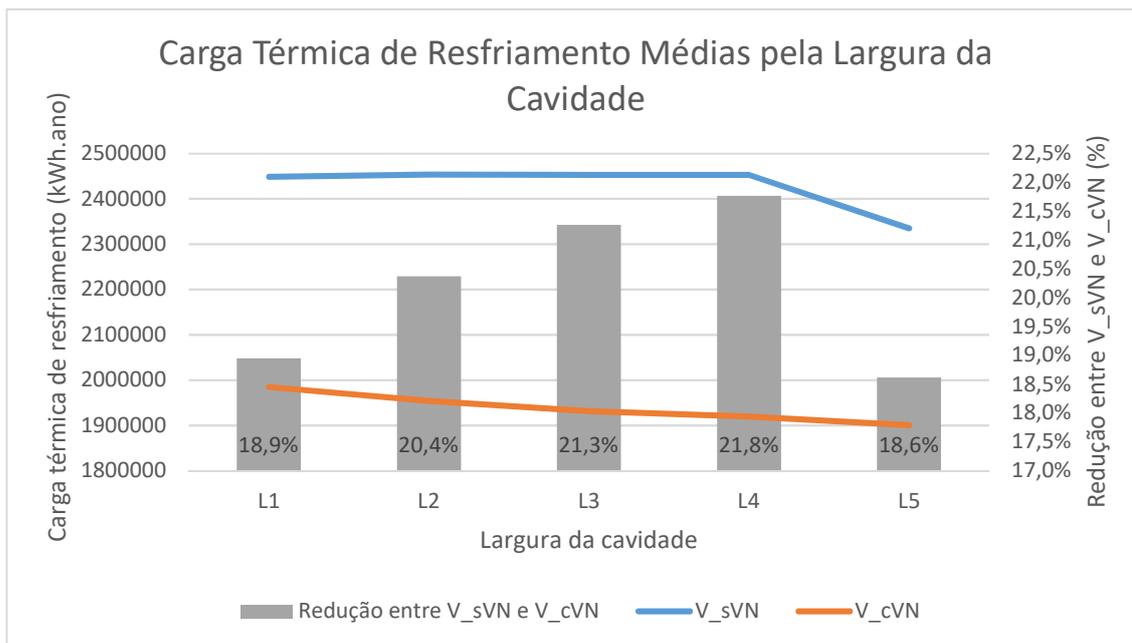


Gráfico 25 Gráfico de barras e de linhas da carga térmica de resfriamento médias pela largura da cavidade

b. Fachadas Duplas Híbridas

Da mesma forma que nos casos sem o emprego de ventilação para auxiliar o condicionamento, as fachadas duplas híbridas apresentam desempenho termoenergético superior ao cenário de referência (C0_{cVN}), como se observa no Gráfico 26. O perfil do desempenho por orientação segue a mesma tendência observada nos cenários de fachadas duplas híbridas dos demais ciclos. Fachadas voltadas ao quadrante norte possuem menor carga térmica de resfriamento, enquanto as fachadas voltadas ao quadrante sul possuem maior carga térmica de resfriamento.

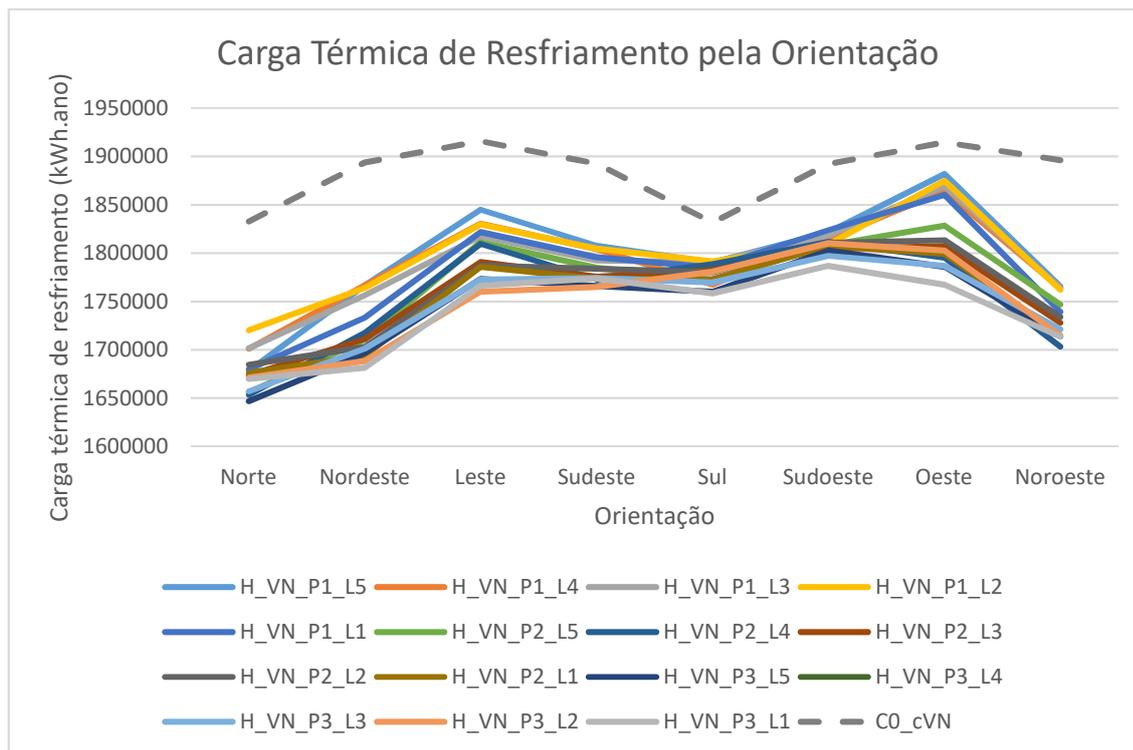


Gráfico 26 Gráfico de linhas da carga térmica de resfriamento pela orientação

O parâmetro da permeabilidade da pele externa da fachada dupla híbrida com emprego de condicionamento híbrido possui uma relação diretamente proporcional com a carga térmica de resfriamento, conforme mostra o Gráfico 27. Assim, as fachadas duplas com peles com menor taxa de permeabilidade possuem, em geral, menor carga térmica de resfriamento, ou melhor desempenho termoenergético. Segundo o resultado do teste estatístico, na Tabela 25, há uma diferença significativa entre a amostra mais permeável (H_VN_P1) e as demais, relação semelhante aos cenários de fachada dupla híbrida sem o emprego de ventilação. Dessa forma, sugere-se o emprego de taxas de permeabilidade da pele externa de fachadas duplas híbridas iguais ou superiores a 50%.

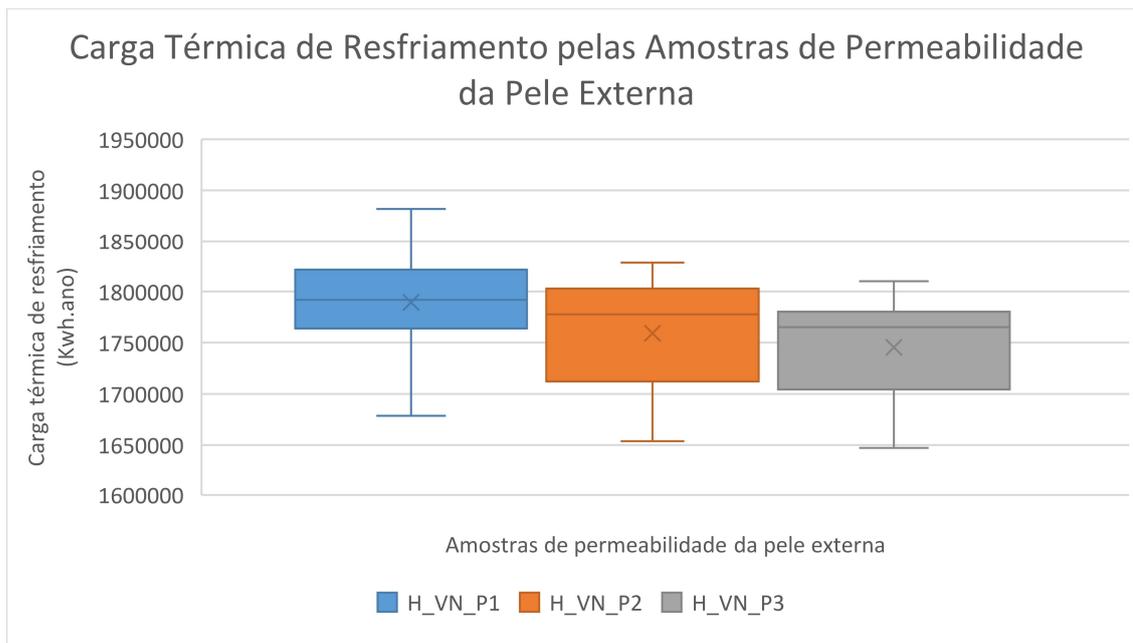


Gráfico 27 Gráfico de caixa da carga térmica de resfriamento pelas amostras de permeabilidade da pele externa

Tabela 25 Teste Tukey da carga térmica de resfriamento pela permeabilidade da pele externa para fachadas duplas híbridas com condicionamento híbrido

	H_VN_P1	H_VN_P2	H_VN_P3
H_VN_P1		0,01906	0,0003242
H_VN_P2	3,882		0,4227
H_VN_P3	5,659	1,777	

Quanto à relação entre a largura da cavidade e a carga térmica de resfriamento, em geral, percebe-se uma relação diretamente proporcional, observada pelo padrão do Gráfico 28. Contudo, nota-se que a diferença entre as distintas amostras de largura da cavidade é sutil; inclusive, a amostra H_NV_L2 destoa levemente desse padrão. O teste estatístico aponta que não há diferença significativa entre as amostras, o que sugere que a variação da largura da cavidade em fachadas duplas híbridas com o emprego de condicionamento híbrido no contexto climático de Brasília não é algo significativo. Entre uma largura de 0,50 m (H_NV_L1) e 2,50 m (H_NV_L5), a diferença de carga térmica de resfriamento é pouca e, assim, pode-se definir a que mais for conveniente ao projeto, o que, muitas vezes devido a questões comerciais, tende a maximizar área útil, e consequentemente reduzir a largura da cavidade da fachada dupla.

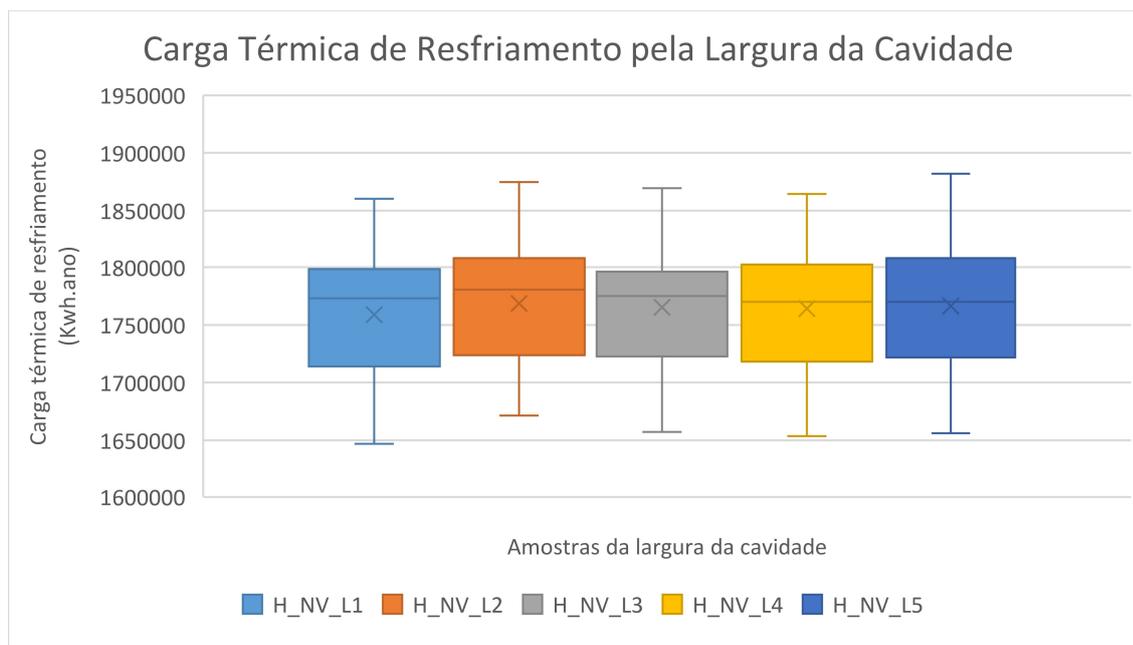


Gráfico 28 Gráfico de caixa da carga térmica de resfriamento pelas amostras de largura da cavidade

Tabela 26 Teste Tukey da carga térmica de resfriamento pela largura da cavidade para fachadas duplas híbridas com condicionamento híbrido

	H_NV_L1	H_NV_L2	H_NV_L3	H_NV_L4	H_NV_L5
H_NV_L1		0,9669	0,9934	0,9966	0,9871
H_NV_L2	0,9148		0,9994	0,9984	0,9999
H_NV_L3	0,5936	0,3211		1	1
H_NV_L4	0,4993	0,4154	0,09432		0,9999
H_NV_L5	0,7085	0,2063	0,1148	0,2091	

Também se percebe a relação diretamente proporcional entre carga térmica de resfriamento e largura da cavidade quando se analisam amostras agrupadas pela permeabilidade da pele externa, de acordo com as linhas de tendência do Gráfico 29. Há uma variação desse padrão entre as diferentes taxas de permeabilidade da pele externa da fachada dupla, notadamente em H_NV_P3, como uma redução da carga térmica de resfriamento em L5. Contudo, o padrão geral é de uma relação diretamente proporcional entre largura e carga térmica de resfriamento, como se observa nas linhas de tendência do Gráfico 29. Porém, como mostram os resultados da estatística, na Tabela 26, não se observa variação significativa. Assim, conclui-se que a variação da largura da cavidade não tem influência significativa na carga térmica de resfriamento. Situação similar aos casos de fachada dupla híbrida sem o emprego de condicionamento híbrido.

Contudo, diferentemente do que se observa com as fachadas duplas híbridas sem o emprego de condicionamento híbrido, essa relação entre carga térmica de resfriamento e largura da cavidade não é constante para todas as orientações. O Gráfico 30 apresenta os valores de carga

térmica de resfriamento pela largura da cavidade para cada taxa de permeabilidade da pele externa da fachada dupla somente à orientação norte. Nessa orientação, predomina uma relação diretamente proporcional entre carga térmica de resfriamento e largura da cavidade, como se observa a partir das linhas de tendência. Nota-se, portanto, que o melhor desempenho termoenergético das fachadas duplas híbridas com o emprego de condicionamento híbrido ocorre com maiores larguras de cavidade. A largura máxima estudada (L5) apresenta melhores resultados a H_VN_P1 e H_VN_P3, enquanto H_VN_P2 obtém melhor desempenho em L4.

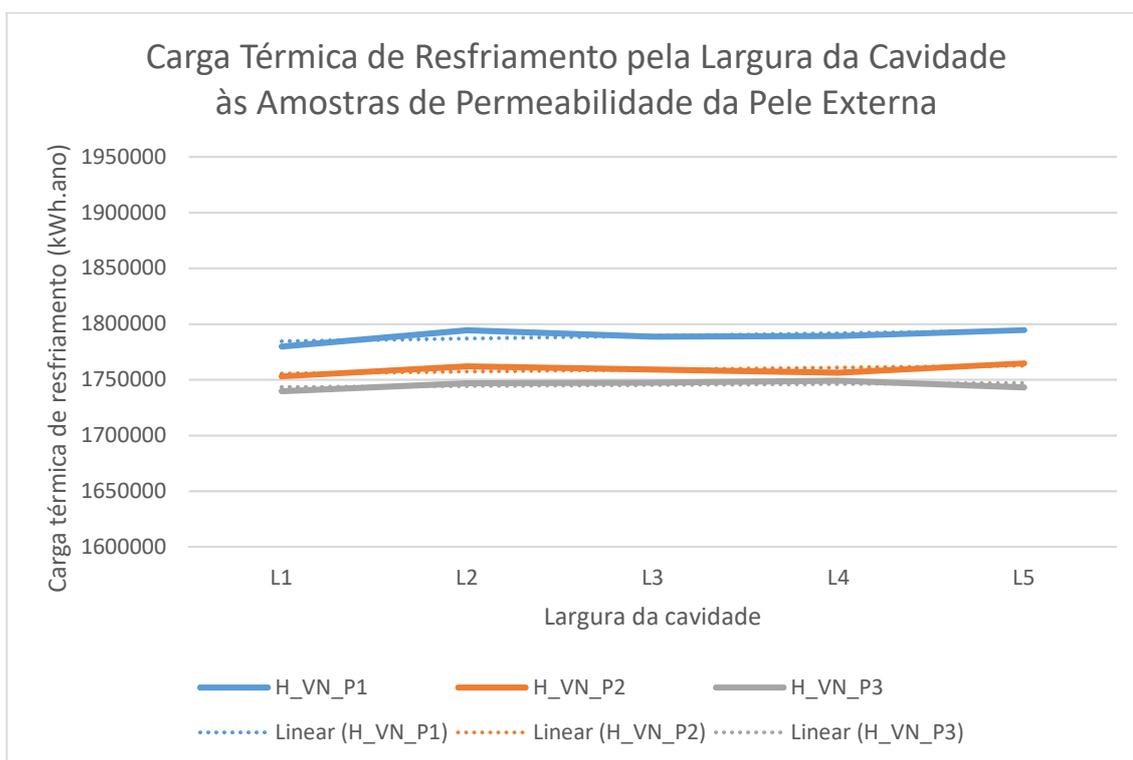


Gráfico 29 Gráfico de linhas da carga térmica de resfriamento pela largura da cavidade às amostras de permeabilidade da pele externa

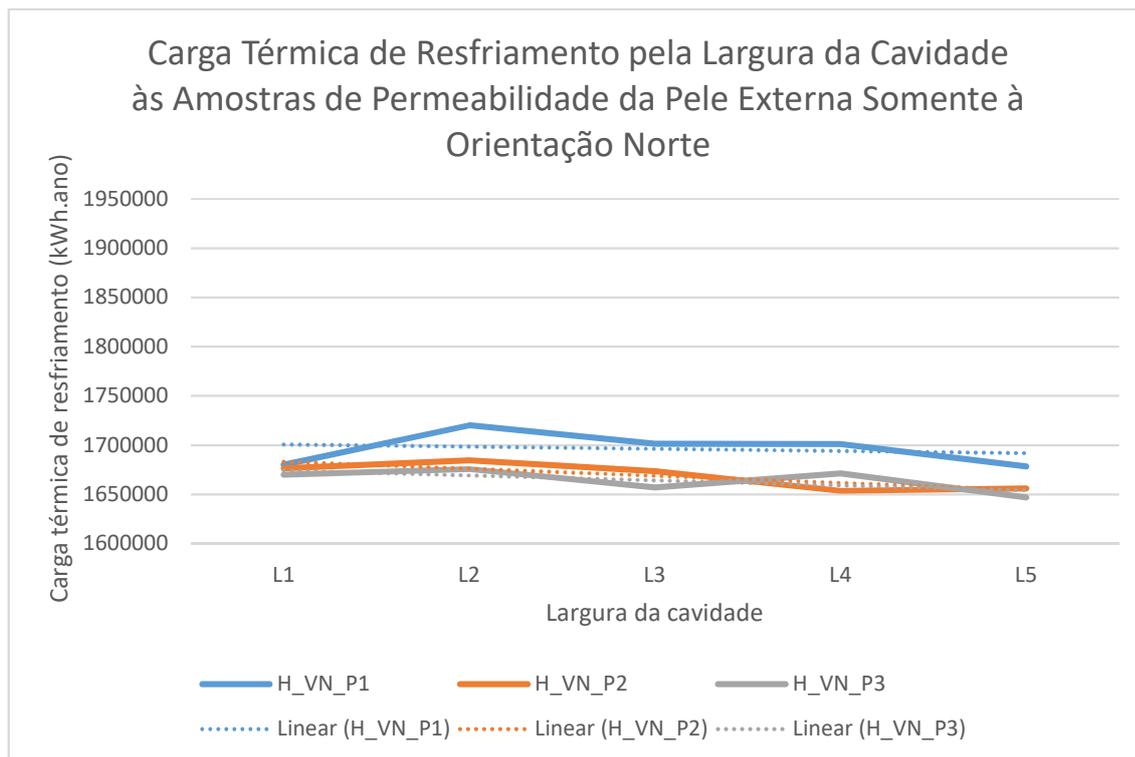


Gráfico 30 Gráfico de linhas da carga térmica de resfriamento pela largura da cavidade às amostras de permeabilidade da pele externa somente à orientação norte

c. Comparação entre Fachadas Duplas Envidraçadas e Híbridas

Em uma análise geral de todas as amostras de fachadas duplas com emprego de condicionamento híbrido, observa-se que as fachadas duplas envidraçadas possuem um desempenho inferior ao do cenário de controle, quando este também emprega ventilação como estratégia auxiliar de condicionamento (C0_cVN). O Gráfico 31 mostra que a média dos casos de fachada dupla envidraçada é 2,9% inferior à média dos casos sem fachada dupla. Por outro lado, o emprego de fachadas duplas híbridas apresenta, em comparação como o cenário de referência (C0_cVN), uma melhora do desempenho termoenergético de 6,3%. Isso evidencia o impacto da questão do sombreamento das aberturas ao melhor desempenho térmico das edificações no contexto climático de Brasília, como sugere a NBR 15.220.

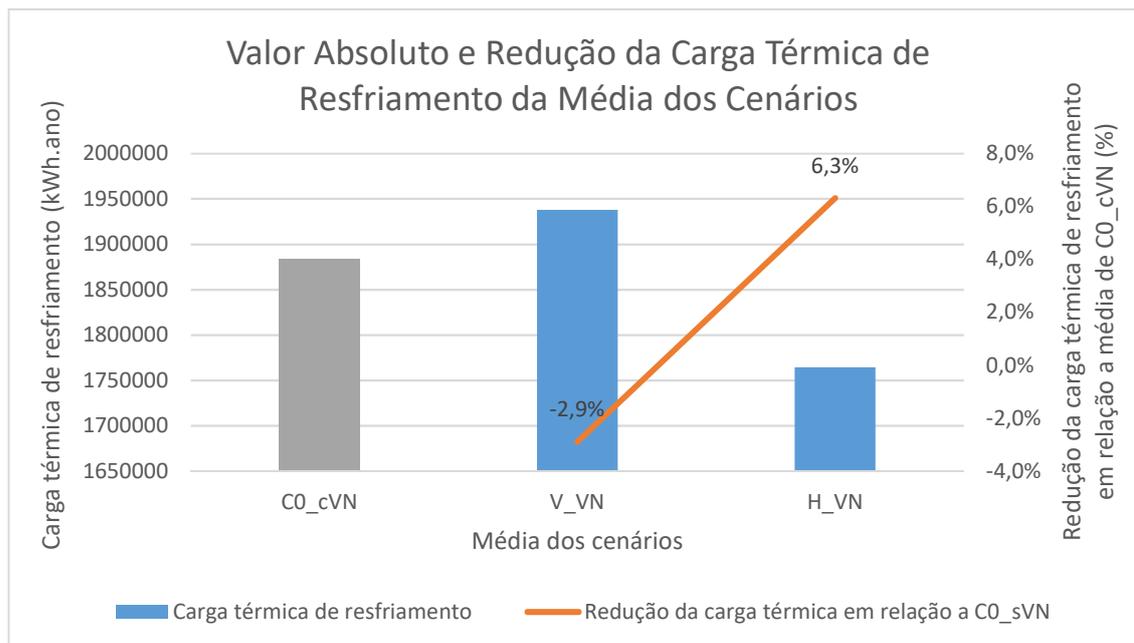


Gráfico 31 Gráfico de barras e linhas do valor absoluto e redução da carga térmica de resfriamento da média dos cenários com emprego de condicionamento híbrido

As fachadas duplas envidraçadas não apresentam redução da carga térmica de resfriamento em qualquer circunstância. Como apresentaram os dados anteriormente, fachadas duplas envidraçadas obtêm desempenho termoenergético inferior ao cenário de referência no quadrante sul. Apesar de não apresentarem resultados inferiores ao cenário de referência, as fachadas duplas híbridas apresentam seus piores resultados neste quadrante. Por outro lado, têm melhores resultados no quadrante norte. Assim, para entender a possível contribuição das fachadas duplas, é relevante avaliá-las em sua melhor condição.

Dessa forma, compara-se o desempenho termoenergético das soluções de fachada dupla ao o cenário de referência com emprego de condicionamento híbrido (CO_cVN) à orientação norte, exposta no Gráfico 32. Analisam-se os cenários com melhores resultados de desempenho termoenergético, predominantemente com as maiores larguras de cavidade (L5), com exceção de H_VN_P2, que obtém melhor desempenho com L4.

Nessas condições, percebe-se que todas as fachadas duplas possuem desempenho termoenergético superior ao cenário de controle (CO_cVN). Mesmo assim, há uma perceptível superioridade do desempenho termoenergético das fachadas duplas híbridas. Enquanto a solução envidraçada tem uma diminuição de carga térmica de resfriamento de 1,1%, as soluções híbridas têm reduções entre 8,4% e 10,1%. A melhora no desempenho termoenergético das fachadas duplas híbridas acompanha a diminuição da permeabilidade da pele externa. Isso só volta a reforçar o impacto do sombreamento no desempenho térmico das edificações no contexto climático de Brasília. Nota-se que a diminuição da permeabilidade da pele externa das fachadas duplas híbridas

proporciona melhoria, contudo observa-se que a redução mais significativa está relacionada ao fato do emprego do sombreamento em si. Enquanto a variação da permeabilidade da pele externa obtém uma variação da redução da carga térmica de resfriamento inferior a 2%, o emprego do sombreamento reduz mais de 7% em comparação com o cenário de fachada dupla envidraçada (V_VN_L5).

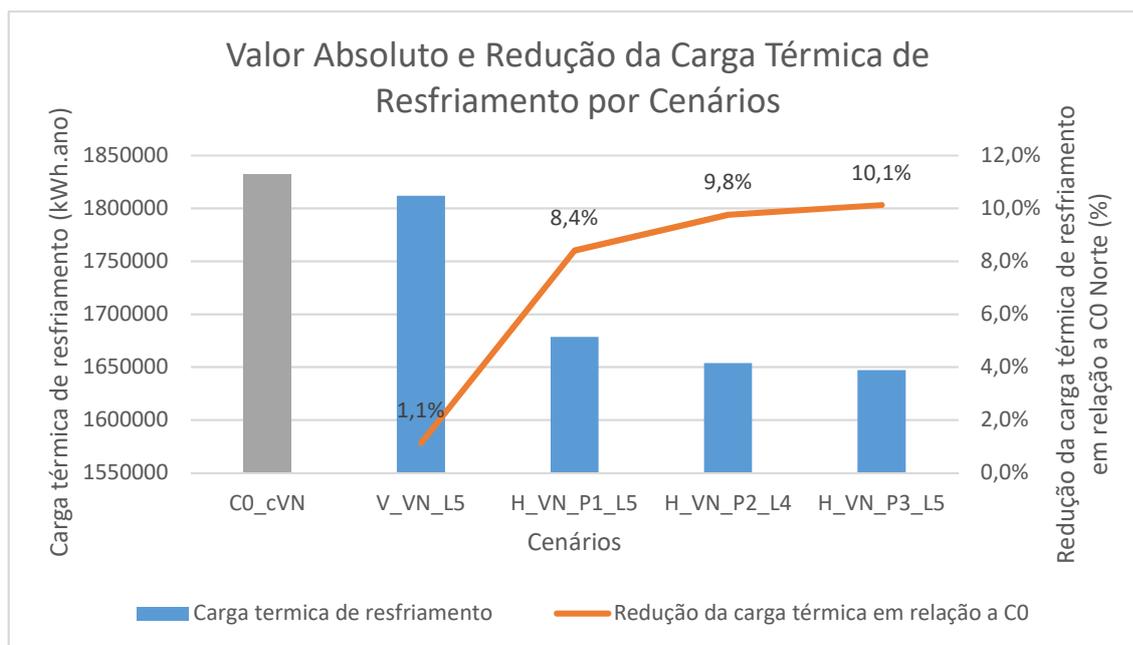
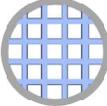


Gráfico 32 Gráfico de barras e linhas do valor absoluto e redução da carga térmica de resfriamento por cenários com emprego de condicionamento híbrido

O Quadro 7 a seguir apresenta um resumo da comparação das principais diferenças entre as fachadas duplas híbridas e envidraçadas observadas nesse ciclo de simulações.

Quadro 7 Comparação entre fachadas duplas híbridas e envidraçadas com condicionamento híbrido.

	
Fachada Dupla Híbrida	Fachada Dupla Envidraçada
Todos são superiores ao controle	
	Maiores larguras (L4 e L5) são superiores ao controle (mas só em determinadas orientações)
Orientação	Quadrante norte melhor, sul pior Só o norte consegue superar o controle
	Maior largura (L5) é significativa superior a menor largura (L1), porém com variação mais uniforme
Largura da Cavidade	-
	
Permeabilidade da Pele Externa	
Menor permeabilidade (P1) é significativa inferior	

4.3.3 Resultados Gerais

Ao analisar todos os resultados dos 3º e 4º ciclos, para avaliar o desempenho termoenergético das fachadas duplas envidraçadas e híbridas, tanto com quanto sem o emprego de condicionamento híbrido, nota-se que as soluções com elementos opacos na pele externa possuem desempenho consideravelmente superior em relação ao das soluções envidraçadas, que, inclusive, em determinados casos, têm desempenho inferior aos casos de controle (C0's). Também é possível perceber a grande influência que o emprego do condicionamento híbrido ocasiona no desempenho termoenergético dos cenários estudados, em que é o parâmetro que proporciona consideráveis diminuições da carga térmica de resfriamento.

O Gráfico 33 apresenta o resultado das médias das cargas térmicas de resfriamento às fachadas duplas envidraçadas e híbridas, além do cenário de controle, tanto com o emprego do condicionamento híbrido como sem. Ademais, o gráfico também apresenta a redução da carga térmica de resfriamento das médias das amostras em relação à média do caso de referência sem o emprego de condicionamento híbrido (C0_sVN). Nota-se que as soluções envidraçadas sem o benefício da ventilação (V), na média, possuem desempenho inferior ao C0_sVN, um aumento da

carga térmica de 2,3%. Enquanto isso, a média das soluções híbridas sem ventilação (H) reduziu 6,1% em relação ao C0_sVN. O que representa uma diferença de 8,4% em relação às soluções envidraçadas.

Nota-se, assim, que o impacto mais relevante está relacionado ao emprego do condicionamento híbrido. O emprego da ventilação no caso de referência (C0_cVN), por si só, propicia uma melhoria de 20,6% em relação a ele próprio, sem o emprego da ventilação (C0_sVN). Os melhores resultados são das pelas duplas híbridas (H_VN), que, em média, possibilitam uma redução de 25,6% da carga térmica de resfriamento em relação ao C0_sVN. Sua melhora em relação ao C0_cVN é de 6,0%, próxima à encontrada entre os casos sem condicionamento híbrido ao C0_sVN, de 6,1%. Já as fachadas duplas envidraçadas com o emprego do condicionamento híbrido (V_VN) possuem uma redução da carga térmica de resfriamento de 18,3% em relação ao C0_sVN. Contudo, quando comparada ao o caso de referência com o emprego de ventilação, há um aumento da carga térmica de resfriamento em 2,3%. Mesmo valor encontrado entre as fachadas duplas envidraçadas sem o emprego da ventilação (V) e C0_sVN.

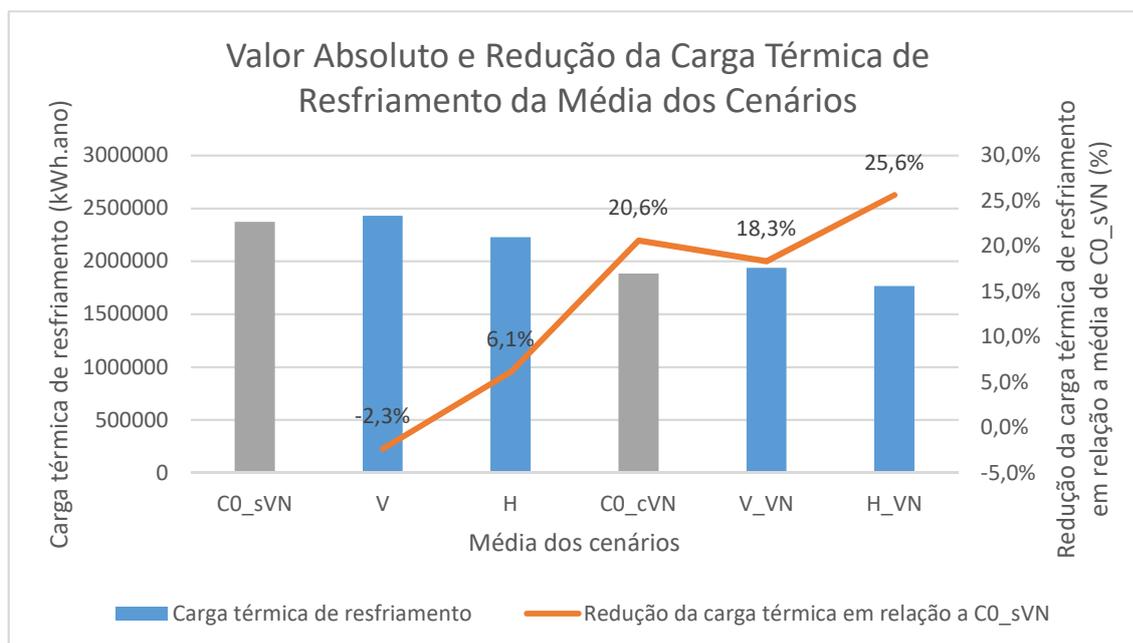


Gráfico 33 Gráfico de barras e linhas do valor absoluto e redução da carga térmica de resfriamento da média dos cenários com e sem o emprego de condicionamento híbrido

Porém, esses resultados se baseiam em médias de todas as amostras e, como já observado nos dados anteriormente apresentados, não é em todas as circunstâncias que o emprego da fachada dupla apresenta melhoria de desempenho termoenergético. Assim, como realizado no subitem anterior, é importante analisá-las onde são mais adequadas, à orientação norte e a menor largura da cavidade (L1) aos casos de fachada dupla híbrida sem condicionamento híbrido e maior largura

da cavidade (L5) aos demais casos de fachada dupla. O Gráfico 34 apresenta os valores de carga térmica de resfriamento assim como a redução em relação ao caso de referência sem condicionamento híbrido (C0_sVN). Todos os casos são voltados ao norte.

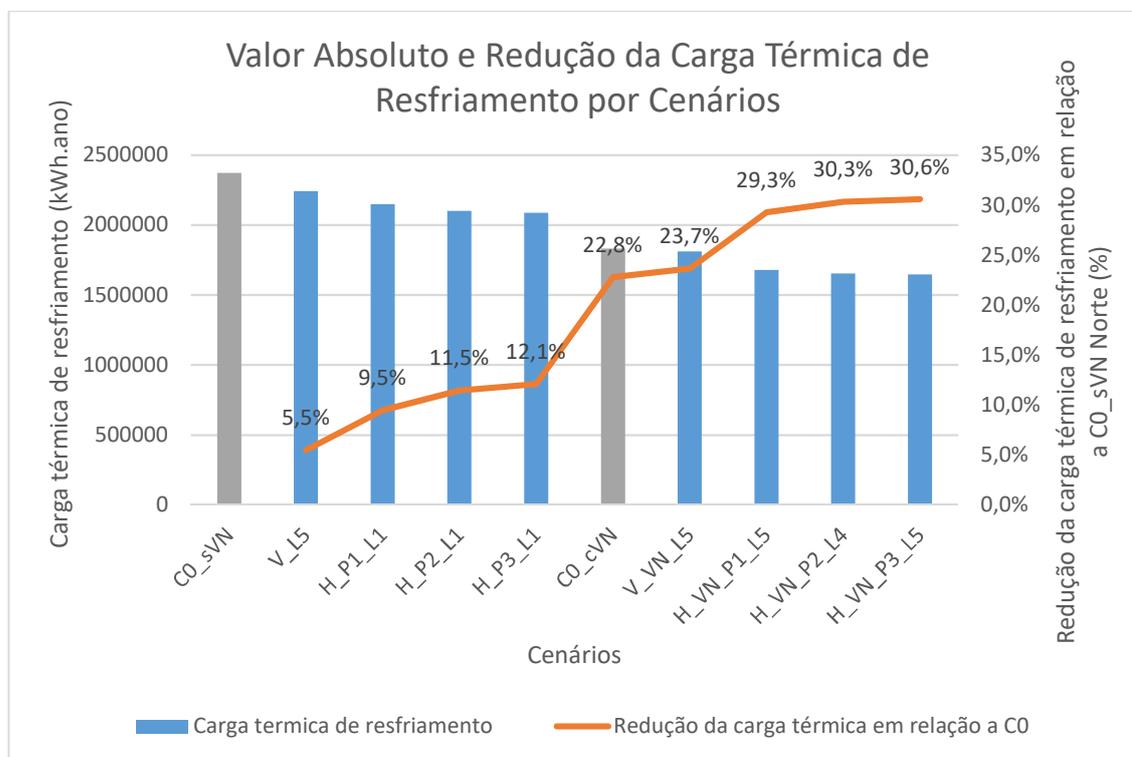


Gráfico 34 Gráfico de barras e linhas do valor absoluto e redução da carga térmica de resfriamento por cenários com e sem o emprego de condicionamento híbrido

A constatação mais marcante é o impacto do condicionamento híbrido nos resultados de carga térmica de resfriamento. Enquanto os casos sem o emprego de condicionamento híbrido obtêm uma melhora do desempenho entre 5,5% e 12,1%, os casos com os benefícios da ventilação melhoram entre 23,7% e 30,6%. Percebe-se uma melhoria média de 18,5% entre os casos com e sem condicionamento híbrido. Ao comparar os casos sem fachada dupla, observa-se uma redução da carga térmica de resfriamento de 22,8% com o emprego do condicionamento híbrido.

Observa-se também um padrão de redução dos resultados de carga térmica de resfriamento entre as fachadas duplas híbridas e as envidraçadas. Nas análises dos casos com e sem o emprego de condicionamento híbrido, há uma notável distinção entre o caso envidraçado e os casos com elementos opacos na pele externa. Há uma variação de pelo menos 4,0% e 5,6% na comparação dos casos sem e com condicionamento híbrido, respectivamente. Entretanto, a variação entre as taxas de permeabilidade é menos marcante, de 2,6% e 1,3% na comparação dos casos sem e com condicionamento híbrido, respectivamente.

Em primeiro lugar, é importante registrar que os resultados reforçam as recomendações projetuais que já constam na NBR 15.220 ao contexto climático de Brasília para melhoria do desempenho térmico de edificações residências: emprego de sombreamento e ventilação natural. Em segundo lugar, percebe-se principalmente o impacto do emprego do condicionamento híbrido nos casos estudados, sendo o parâmetro mais significativo na redução da carga térmica de resfriamento. Inclusive, o emprego do condicionamento híbrido no modelo sem fachada dupla — no caso de referência (C0_sVN) — proporciona significativa melhora, superior a todos os casos de fachada dupla sem os benefícios da ventilação no condicionamento. Em menor grau, nota-se também a relevância do emprego do sombreamento na redução da carga térmica de resfriamento. Observa-se que seu emprego propicia melhora significativa, porém a variação da taxa de permeabilidade da pele externa representa variações mais sutis. Isso sugere uma maior importância do emprego do sombreamento em si do que da variação da taxa de permeabilidade.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Os resultados obtidos mostram que o emprego de fachadas duplas pode ser extremamente benéfico no desempenho termoenergético no contexto climático de Brasília, com até 30,6% de redução da carga térmica de resfriamento. Contudo, é necessário discernimento para empregar soluções de fachada dupla, visto que nem sempre elas são benéficas. Fachadas duplas envidraçadas, em média, apresentam desempenho termoenergético relativo a carga térmica de resfriamento inferior ao caso de referência sem o emprego de fachada dupla, de -2,3%. Somente sob as melhores condições – orientação norte, maior largura e altura da cavidade e tipo corredor – é que as soluções envidraçadas possuem desempenho termoenergético superior, de 5,5%, em comparação ao caso de referência.

Primeiramente, deve-se observar que a diferença de materialidade entre as soluções híbridas e envidraçadas é marcante. Observa-se que as fachadas duplas híbridas possuem desempenho consideravelmente superior às fachadas duplas envidraçadas. Quando comparada com o caso de referência, a carga térmica de resfriamento das soluções híbridas é em torno de 7 pontos percentuais inferior aos valores obtidos pelas soluções envidraçadas, tanto aos cenários médios como sob as melhores condições.

Percebe-se que tanto a orientação da fachada como a largura da cavidade são parâmetros fundamentais para maximizar o desempenho das soluções de fachada dupla em ambas as materialidades.

A partir dos resultados, percebe-se que o emprego das fachadas duplas tem maior potencial no quadrante norte, enquanto seu desempenho piora no quadrante sul. Inclusive, todas as fachadas duplas envidraçadas analisadas nessas orientações apresentam resultados inferiores ao caso de

referência — sem o emprego de fachada dupla. Isso mostra a inadequação das fachadas duplas envidraçadas no quadrante, devendo, portanto, ser evitadas nessas condições.

Quanto à largura da cavidade, percebe-se que há um padrão inversamente proporcional em relação à carga térmica de resfriamento em praticamente todas as amostras. Somente na amostra geral das fachadas duplas híbridas nota-se uma tendência oposta, porém muito sutil, praticamente constante. Contudo, no quadrante norte, as fachadas duplas híbridas apresentam o mesmo padrão inversamente proporcional em relação à carga térmica de resfriamento. É importante salientar que a variação da largura da cavidade mostra-se realmente impactante no desempenho térmico a partir de larguras maiores nas soluções envidraçadas. Nos cenários sem o emprego de condicionamento híbrido, observa-se um salto na redução da carga térmica de resfriamento, normalmente a partir de 2,50 m. Quando há o emprego do condicionamento híbrido, a variação é mais constante e não se nota esse salto.

Em relação às fachadas duplas envidraçadas, além dos parâmetros de orientação da fachada e largura da cavidade, a altura e tipo da cavidade também são essenciais à maximização do desempenho. No presente estudo, o tipo de fachada dupla *shaft-box* apresenta desempenho significativamente inferior aos demais tipos. Estes são maximizados com o aumento da altura da cavidade. Em ambos os parâmetros, suspeita-se que esses resultados estejam relacionados ao maior desimpedimento da circulação de ar. Dessa forma, aponta-se ao máximo aproveitamento da altura à maximização do desempenho das fachadas duplas envidraçadas.

Quanto às fachadas duplas híbridas, a variação da taxa de permeabilidade da pele externa mostra que permeabilidades iguais ou superiores a 50% apresentam desempenho termoenergético significativamente superior à taxa de permeabilidade menor. Contudo, os resultados gerais mostram que a variação entre as diferentes amostras de permeabilidade da pele externa não resulta em diminuição da carga térmica de resfriamento superior a 2%.

Mais do que o impacto da variação dos parâmetros de projeto de fachada dupla, o emprego do sombreamento — proporcionado pelas fachadas duplas híbridas — e o emprego do condicionamento híbrido dos espaços internos da edificação são os elementos que mais influenciam o desempenho termoenergético. O sombreamento proporcionado pelas fachadas duplas híbridas possibilita uma redução da carga térmica média, em comparação ao caso de referência, superior a 6% na média e de 10% nas melhores condições. Já o emprego da ventilação no auxílio ao condicionamento interno possibilita uma melhora de desempenho de aproximadamente 20% de caso a caso. Esses resultados enfatizam que as estratégias bioclimáticas adequadas ao clima de Brasília, normalmente associadas a edificações de uso residencial, também são relevantes a outras tipologias, como comerciais e verticalizadas, e não devem ser ignoradas.

5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa teve o objetivo de analisar o desempenho termoenergético do emprego de fachadas duplas em edifícios condicionados no contexto climático de Brasília. Apesar da opção pelo uso de paredes adiabáticas, em parte, se distanciar da complexa realidade de trocas térmicas, os resultados da pesquisa mostram que as fachadas duplas são capazes de melhorar o desempenho termoenergético por meio da redução da carga térmica de resfriamento de edificações comerciais verticais no contexto climático de Brasília em até 30% em comparação ao cenário de referência — sem fachada dupla.

Concluiu-se também que as fachadas duplas híbridas possuem desempenho termoenergético significativamente superior ao das alternativas envidraçadas, superior a 8% na média de todos os cenários de 6,6% e 9,0%, nas condições ótimas sem e com o emprego do condicionamento híbrido, respectivamente. A melhora possível pelo emprego de fachadas duplas envidraçadas é de no máximo 5,5% em relação ao caso de referência com caracterização similar. Dessa forma, por apresentarem limitado benefício no contexto climático de Brasília, as soluções envidraçadas não são recomendadas nestas circunstâncias.

Destaca-se que os parâmetros de projeto de fachadas duplas influenciam diretamente o desempenho termoenergético dos edifícios. Inclusive, somente em condições específicas as fachadas duplas envidraçadas obtiveram desempenho termoenergético superior ao cenário de referência. Isso ocorre devido ao estudo paramétrico, que possibilita encontrar cenário ótimo de altura, largura e tipo de cavidade, assim como relativo a orientação da fachada.

Alguns tipos de tipo de fachada dupla envidraçada podem contribuir de forma mais significativa no desempenho termoenergético do edifício. As Fachadas duplas do tipo corredor e

múltiplos andares apresentaram desempenho termoenergético significativamente semelhante e possibilitaram melhor desempenho termoenergético. Já as fachadas duplas envidraçadas do tipo *shaft-box* apresentaram desempenho termoenergético inferior, o que está relacionado a sua maior compartimentação, que dificulta a passagem de ar.

A altura da cavidade de fachadas duplas envidraçadas também é parâmetro relevante. O aumento da altura da cavidade melhora o desempenho termoenergético das edificações com fachada dupla. Porém, esse aumento só gerou melhorias significativas a partir do modelo de maior altura, equivalente a um edifício de 12 andares neste trabalho. Dessa forma, recomenda-se explorar ao máximo a altura da cavidade da fachada dupla como estratégia potencializadora do desempenho termoenergético da fachada dupla.

De forma similar, o aumento da largura da cavidade também proporciona melhoria do desempenho termoenergético em fachadas duplas envidraçadas sem o emprego de condicionamento híbrido. Entretanto, isso só ocorreu a partir da largura máxima estudada, de 2,50 m. Antes disso a variação manteve-se praticamente constante. Assim, com o objetivo de maximizar o desempenho termoenergético da fachada dupla envidraçada, recomenda-se largura igual ou superior a 2,50 m.

A variação entre os diversos tipos de vidro da pele externa da fachada dupla envidraçada exerce baixo impacto no desempenho termoenergético. Dentre os vidros analisados, o vidro refletivo apresentou uma variação marcante com relação ao vidro incolor simples. Enquanto o primeiro apresentou desempenho superior, o segundo, por outro lado, obteve desempenho significativamente inferior.

Quanto às fachadas duplas híbridas, o aumento da largura da cavidade leva ao aumento da carga térmica de resfriamento, fenômeno oposto ao observado nas fachadas duplas envidraçadas. Porém, isso não foi observado em todas as circunstâncias. Na orientação norte, em que as fachadas duplas obtêm maior efeito, a tendência é predominantemente oposta. Em todos os casos, a variação do desempenho termoenergético é bem discreta, podendo, assim, ser compreendida como constante, o que mostra a pouca relevância da variação do parâmetro.

A variação entre as diferentes amostras de permeabilidade da pele externa de fachadas duplas híbridas não resulta em diminuição da carga térmica de resfriamento superior a 2%. O que também aponta ao baixo impacto da variação da taxa de permeabilidade no desempenho termoenergético.

Apesar de a variação de diversos parâmetros de projeto em muitos casos não ter resultado em redução significativa de carga térmica de resfriamento entre os cenários, notou-se que a adoção dos parâmetros em si teve grande influência no desempenho termoenergético, especialmente do sombreamento e do condicionamento híbrido. Conclui-se, assim, que mais do que o ajuste fino da

variação do parâmetro, a adoção de parâmetros como sombreamento — por meio da fachada dupla híbrida — e condicionamento híbrido foi o que realmente gerou impacto significativo no desempenho termoenergético.

A utilização do sombreamento obtido por meio do emprego da fachada dupla híbrida possibilitou, isoladamente, uma melhoria média do desempenho termoenergético superior a 6% em comparação com o caso de referência — sem sombreamento. Nas situações mais favoráveis, na fachada norte, obteve-se 10% de melhoria. O emprego do condicionamento híbrido gerou resultados ainda mais marcantes. Em média, houve uma melhoria do desempenho termoenergético de 20% em comparação com os mesmos cenários sem o emprego do condicionamento híbrido.

Dessa forma, vê-se que as estratégias passivas são as que melhor proporcionam melhoria no desempenho termoenergético e devem orientar o desenvolvimento de projeto. Isso demonstra a coerência da NBR 15.220, que aponta sombreamento e ventilação natural controlada como diretrizes de projeto ao contexto climático de Brasília a edificações residenciais. Mais que isso, a pesquisa demonstra a adequação dessas estratégias a edifícios comerciais verticais no mesmo clima.

Isso evidencia a necessidade da adequação da arquitetura ao clima local como premissa fundamental ao desempenho termoenergético. A coerência entre os resultados da pesquisa e a norma demonstra que o resgate ao respeito das condições climáticas locais impacta de maneira adequada no aumento do desempenho termoenergético do edifício.

O emprego de altas taxas de envidraçamento nas fachadas é extremamente prejudicial ao desempenho termoenergético e à eficiência energética em climas quentes como o de Brasília. A importação desse tipo de solução exógena impacta negativamente o desempenho termoenergético das edificações neste clima, o que gera edifícios totalmente dependentes de condicionamento energético.

Por mais que se tenha almejado otimizar o desempenho termoenergético em soluções envidraçadas — como as fachadas duplas envidraçadas — em climas quentes como o de Brasília, não se pode ignorar as estratégias passivas de condicionamento.

Fachadas duplas envidraçadas podem possibilitar melhoria no desempenho termoenergético em climas temperados, comuns nos países centrais do hemisfério norte, conforme já apresentado na literatura. Contudo, o emprego de grandes peles envidraçadas prejudica a melhoria do desempenho termoenergético em contextos climáticos como o de Brasília. Nesses climas, soluções como o uso de fachadas duplas devem orientar-se por diretrizes adequadas ao clima local e buscar soluções que avaliem adequadamente o emprego do vidro e contemplem a utilização de elementos opacos na pele externa, como as fachadas duplas híbridas.

No contexto Brasileiro, em que a preocupação com a eficiência energética é recente, ainda é restrito o número de grupos que realmente colaboram com o desenvolvimento de normas e regulamentações como as NBRs 15.220 e 15.575 e os RTQ-C e RTQ-R. Apesar dos avanços proporcionados por tais recursos, a discussão quanto ao emprego de estratégias passivas ainda é limitada. Contudo, a presente pesquisa demonstra a importância de se incorporar estratégias passivas às normas e regulamentações no sentido de equacionar o projeto e a eficiência energética.

Destaca-se que as normas e afins têm pouca influência nos hábitos de operação da edificação ou mesmo no uso dos edifícios pelos seus usuários. Contudo, como mostrou o impacto do condicionamento híbrido nos resultados, esses aspectos possuem grande impacto no desempenho termoenergético.

Conclui-se, também, que há potencial do emprego de fachadas duplas como estratégia de *retrofit* do parque construído existente, visto que grande parte dele é altamente envidraçado e que a adequada incorporação de uma nova pele – em vez de intervenções estruturais que envolvam alterações de envoltória – pode se mostrar viável e eficaz.

Destaca-se que o uso de ferramenta de simulação computacional foi fundamental na avaliação do desempenho termoenergético das fachadas duplas e de seus parâmetros de projeto. A utilização do recurso de parametrização permitiu a avaliação ampla dos parâmetros de projeto de forma rápida e eficiente, o que possibilitou a investigação de um universo de soluções mais amplo.

A utilização de um modelo genérico hipotético e a estratégia dos ciclos de simulações possibilitaram a avaliação de forma pormenorizada e isolada da influência da variação de cada parâmetro, o que colaborou no desenvolvimento de importantes subsídios para direcionar o desenvolvimento de projetos com melhor desempenho termoenergético.

5.1 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

A partir das lacunas averiguadas durante o desenvolvimento desta pesquisa, sugere-se a seguir uma série de aspectos que podem ser aprofundados sobre o assunto em futuros estudos:

- analisar mais zonas bioclimáticas do território nacional e, assim, indicar estratégias a nível nacional;
- analisar mais parâmetros intrínsecos aos tipos das fachadas duplas envidraçadas, como a variação das aberturas das cavidades. Possivelmente, algo relacionado ao fluxo de ar, que possa ser auxiliado por estudos de CFD;
- utilizar simulações CFD e aprendizagem de máquina para fornecer dados de entrada da vazão e temperatura do ar da cavidade a modelos de análise energética;

- realizar investigação empírica, com dados de levantamento *in loco* sobre o desempenho termoenergético de fachadas duplas que possam auxiliar na calibragem de modelos, inclusive com a utilização de modelos de aprendizagem de máquina para gerar dados anuais;
- estudar de forma pormenorizada o efeito chaminé em fachadas duplas híbridas, tanto por meio de simulação como por levantamento *in loco*;
- realizar estudo de otimização holística do desempenho lumínico e térmico em soluções de fachada dupla híbrida;
- investigar o impacto da ventilação noturna da massa térmica e/ou do resfriamento geotérmico no desempenho termoenergético;
- realizar estudo de otimização das áreas de aberturas para melhorar o condicionamento híbrido;
- usar o modelo de conforto adaptativo da ASHRAE-55 como parâmetro de funcionamento do condicionamento híbrido;
- avaliar mais ângulos e taxas de permeabilidade da pele externa para que se possa obter sombreamentos mais adequados as orientações;
- investigar mais larguras de cavidade para analisar se o padrão inversamente proporcional entre largura da cavidade e carga térmica de resfriamento se mantém;
- avaliar mais tipos de vidros em ambas as peles da fachada dupla e realizar essa análise em conjunto com a variação de outros parâmetros para ver se há relação;
- avaliar indicadores de desempenho diferentes da carga térmica de resfriamento;
- realizar análise estatística que meça o impacto de cada parâmetro, como correlação entre parâmetros análise de variância, entre diversos parâmetros;
- avaliar o desempenho de outras formas de classificação de fachada dupla, como pela forma de ventilação da cavidade.
- Analisar a viabilidade econômica das soluções de fachadas duplas envidraçadas e híbridas em diferentes contextos climáticos, por meio de análise de ciclo de vida.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALIBABA, H. Z., OZDENIZ, M. B. **Thermal comfort of multiple-skin facades in warm climate offices.** Scientific Research and Essays Vol. 6(19), pp. 4065-4078, 8 September, 2011.

ALUICIEMS, A. **Psycho-Physiological criteria for global thermal zones of building design.** International Journal of Biometeorology: 69-86. 1981.

ARONS, D. M. M. **Properties and Applications of Double-Skin Building Facades.** Dissertação de Mestrado no programa de Building Technology no Massachusetts Institute of Technology (MIT), EUA, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15.575: Edificações Habitacionais - Desempenho.** Rio de Janeiro, 2013.

_____ **NBR 15.220: Desempenho Térmico de Edificações.** Rio de Janeiro, 2003.

ATHIENITIS, A.; O'BRIEN, W. **Modeling, Design and Optimization of Net-Zero Energy Buildings.** Ernst & Sohn GmbH & Co. ISBN 978-3-433-03083-7. 2015.

AUGENBROE, G. The role of simulation in performance based buildings. In: HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R (Orgs.). **Building performance simulation for design and operation.** New York: Spon Press, cap.2, p. 15-36. 2011.

BARBOSA, S. **Fachadas duplas em clima tropical de altitude: análise do potencial de ventilação para ambientes por meio de simulação computacional.** Dissertação de Mestrado no programa de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Viçosa, 2012.

BARBOSA, S., IP, K., SOUTHALL, R. **Thermal comfort in naturally ventilated buildings with double skin facade under tropical climate conditions: the influence of key design parameters.** Energy and Buildings. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.10.029>.

BARBOSA, S; IP, K. **Double skin façade for naturally ventilated office buildings in Brazil.** World SB14. Barcelona, October 28-30, 2014.

BELGIAN BUILDING RESEARCH INSTITUTE (BBRI). **Source book for a better understanding of conceptual and operational aspects of active facades.** Department of Building Physics, Indoor Climate and Building Services, Belgian Building Research Institute. Version no 1. 2002.

BOAKE, T. M., HARRISON, K., COLLINS, D., CHATHAM, A., LEE, R. **Understanding the general principles of the double skin façade system.** National Building Envelope Council Conference, Vancouver, Canadá, 2003.

BOAKE, T., M. **Hot climate double facade: avoiding solar gain.** Façade Tectonics Journal, Volume 14, pp. 68-73, 2014.

BOX, G. E. P., DRAPER, N. R. **Empirical model-building and response surfaces.** Wiley. ISBN 0471810339. 1987.

BRAGER, G. S, RING, E., POWELL, K. **Mixed-mode ventilation: Hvac meets Mother Nature.** UC Berkeley: Center for the Built Environment. 2000.

BRYANT R. **Foto de Edifício Lloyd's.** N.d. Disponível em <https://www.dezeen.com/2013/08/04/movie-richard-rogers-lloyds-building-high-tech-architecture/> - visitado em 19 de dezembro de 2018.

CATALINA, T., VIRGONE J., IORDACHE, V. **Study on the impact of the building form on the energy consumption.** Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 14-16 November.

CHAN, A. L. S., CHOW, T. T., FONG, K. F., & LIN, Z. **Investigation on energy performance of double skin façade in hong kong.** Energy & Buildings, 41(11), 1135-1142. 2009.

CLARKE, J.A., HENSEN, J.L.M. **Integrated building performance simulation: Progress, prospects and requirements.** Building and Environment. 2015. Disponível no sítio eletrônico <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.002>. Acessado em 28 de setembro de 2017.

COCH, H. **La utilitat dels espais inútils – una aportación a l'avaluació del confort ambiental a l'arquitectura dels espais intermedis.** Tese de Doutorado – Ámbitos de Investigación em la Energía y el Medio Ambiente em la Arquitectura – Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Espanha, 2003.

COSTA, J. **Edifícios de balanço energético nulo – um estudo para escritórios em Brasília.** 2018. Dissertação Mestrado em Arquitetura e Urbanismo. Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

COSTA, J.; POLITANO, N.; AMORIM, C. N. D. **Morphological characteristics and energy consumption of office buildings in the central area of Brasilia.** In: Passive and Low Energy Architecture, 2017, Edinburgh. PLEA 2017 Edinburgh - Design to Thrive. Edinburgh: NCEUB, 2017. v. II. p. 2507-2514.

CRAWLEY, D. B., LAWRIE, L. K., WINKELMANN, F. C., BUHL, W. F., HUANG, J. Y., PEDERSEN, C. O., STRAND, R. K., LIESEN, R. J., FISHER, D. E., WITTE, M. J., GLAZER, J. **EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program**. Energy and Buildings, Oxford, v. 33, p. 319-331, 2001.

CRESPO, A. M. L. **History of the double skin façade**. 1999. Disponível no sítio eletrônico <http://envelopes.cdi.harvard.edu/envelopes/content/resources/PDF/doubleskins.pdf>. Acessado em 11 de janeiro de 2017.

DESIGNBUILDER. **Mixed Mode Cooling**. Sítio da internet. N.d. Disponível em https://www.designbuilder.com/helpv2/Content/Mixed_mode.htm. Acessado em 24 de novembro de 2018.

FALLAHI, ALI, HAGHIGHAT, FARIBORZ, & ELSADI, HAFIA. **Energy performance assessment of double-skin façade with thermal mass**. Energy & Buildings, 42(9), 1499-1509. 2010.

FERREIRA, C. P. **Alguns dados sobre o clima para a edificação em Brasília**. Dissertação de Mestrado. no programa de pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo na Universidade de Brasília. Brasil, 1965.

GERTIS, K. **Sind neuere fassadenentwickelungen bauphysikalisch sinnvoll?** Teil 2: Glas-Doppelfassaden (GDF), Bauphysik 21 pag. 54–66. 1999.

GHAFFARIANHOSEINI, A., GHAFFARIANHOSEINI, A., BERARDI, U., TOOKEY, J., LI, D. H. W., KARIMINIA S. **Exploring the advantages and challenges of double-skin façades (DSFs)**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. Disponível no sítio eletrônico <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.130i>. Acessado em 07 de dezembro de 2017.

GOES, T.M., SILVA, C.F. **Hybrid Double-Skin Façade: Thermal and Energy Performance in Brasília, Brazil**. Sustainability Laboratory 2017 Conference, em Porto, Portugal. 2017

GOETHE INSTITUTE. **Steiff factory building in giengen: glass-icon of modernism**. Página de internet. Disponível em: <https://www.goethe.de/en/kul/arc/20430390.html>. Acessado em 12 de dezembro de 2017.

GOVERNO DO DISTRITO FEDERAL (GDF). **Portal do governo do distrito federal: Geografia**. Disponível no sítio eletrônico <http://www.df.gov.br/333/>. Acessado em 09 de dezembro de 2017

GRAEFF, E.B. **Edifício**. Cadernos Brasileiros de Arquitetura – Editora Projeto, 7º Volume, 3ª edição, São Paulo, Brasil, 1979.

GRATIA, E., DE HERDE, A. **Are energy consumptions decreased with the addition of a double-skin?** Energy and Buildings 39. Pag. 605–619. 2007.

HABERL J. *et al.* **ASHRAE’s proposed guideline 14p for measurement of energy and demand savings: how to determine what was really saved by the retrofit**. Proceedings of the First International Conference for Enhanced Building Operations, Austin, Texas, July 16-19, 2001.

HALAWA, E., GHAFARIANHOSEINI, A., GHAFARIANHOSEINI, A., TROMBLEY, J., HASSAN, N., BAIG, M., YUSOFF, S. Y., ISMAIL, M. A. **A review on energy conscious designs of building façades in hot and humid climates: Lessons for (and from) Kuala Lumpur and Darwin.** Renewable and Sustainable Energy Reviews (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.061>.

HAMZA, N. **Double versus single skin facade in hot arid areas.** Energy and Buildings 40 (3) pag. 240–248. 2008.

HARTWEG, L. **Zero energy design – abundant energy in harmony with nature.** Zero Energy Design, EUA, 1979-2011.

HEISELBERG, P. (ed.). **Principles Hybrid Ventilation.** IEA Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme Annex 35: Hybrid Ventilation in New and Retrofitted Office Buildings. Printed in Aalborg, Denmark by KOMMUNIK Grafiske Løsninger A/S. First Published August 2002. ISSN 1395-7953 R0207.

HENSEN, J. L. M. LAMBERTS, R. Introduction to Building Performance Simulation. In: HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R (Orgs.). **Building performance simulation for design and operation.** New York: Spon Press, cap.1, p. 1-14. 2011.

HENSEN, J. L. M., BARTAK, M., DRKAL, F. **Modeling and simulation of a double-skin façade system.** ASHRAE Transactions, Vol 108, Part 2. 2002.

HOOKER OFFICE. 2018. Disponível em <http://www.niagarafallsreporter.com/Stories/2013/Feb12/SBAOffice.html> - visitado em 09 de janeiro de 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa de clima do Brasil.** Rio de Janeiro: IBGE, 2002.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Atlas das normais climatológicas.** Brasil, 2009.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). **Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos.** Anexo da Portaria INMETRO nº 163/2009. 2009.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Mitigation of Climate Change.** Bangkok, 2007.

JIRU, T.E., HAGHIGHAT, F. **Modeling ventilated double skin façade —A zonal approach.** Energy and Buildings 40 pag. 1567–1576. 2008.

KEELER, M.; BURKE, B. **Fundamentos de projeto de edificações sustentáveis.** Porto Alegre: Bookman, 2010.

KHOSHBAKHT, M., GOU, Z., DUPRE, K., ALTAN H. **Thermal environments of an office building with double skin façade.** Journal of Green Building, Volume 12, Number 3. 2017.

KIM, D., PARK, C. **Difficulties and limitations in performance simulation of a double skin façade with energyplus.** Energy & Buildings, 43(12), 3635-3645. 2011.

LANG, W., HERZOG, T. **Using multiple glass skins to clad buildings.** Architectural Record (7) (188): 171. 2000.

LIMA, T. B. S. **Qualidade ambiental e arquitetônica em edifícios de escritórios: diretrizes para projetos em Brasília.** 2010. 253 f. Tese Doutorado em Arquitetura e Urbanismo. Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

LOU, W., HUANG, M., ZHANG, M., LIN, N. **Experimental and zonal modeling for wind pressures on double-skin facades of a tall building.** Energy Buildings (54): 179–191. 2012.

MACIEL, A. A. **Projeto bioclimático em Brasília: Estudo de caso em edifício de escritórios.** 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de pós graduação em engenharia civil, Universidade de Santa Catarina, Florianópolis. 2002

MANZ, H.; FRANK, Th. **Thermal simulation of buildings with double-skin façades.** Energy and Buildings, Oxford, v. 37, p. 1114-1121, 2005.

NABONI, E., MALCANGI, A., ZHANG, Y., BARZON F. **Defining the energy saving potential of architectural design.** Energy Procedia 83. 2015. 140 – 146.

OESTERLE, W., LIEB, E., LUTZ, R-D., HEUSLER, M. **Double skin facades: Integrated planning.** Munich, Germany: Prestel Verlag. 2001.

OLGYAY V, OLGAYAY A. **Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism.** 1st Edition. Princeton University Press Princeton Estados Unidos; 1963.

PANAGIOTIS, K. **2×F(acade) – properties and design guidelines for double-skin facades in sweden – literature review + energy efficiency + cost + life cycle assessment.** Dissertação de Mestrado em Design for Sustainable Development – Departamento de Arquitetura – Chalmers University of Technology, Suécia, 2014.

PAPPAS, A., ZHAI, Z. **Numerical investigation on thermal performance and correlations of double skin façade with buoyancy-driven airflow.** Energy and Buildings, Oxford, v. 40, p. 466-475, 2008.

PEREIRA, E.B, MARTINS, F.R., ABREU, S.L., e RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** São José dos Campos: INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2006.

PESSOA, J. L. N., GHISI, E., LAMBERTS, R. **Estado da arte em eficiência energética: iluminação e envoltória.** CB3e - Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações. UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina Dep. de Engenharia Civil. Florianópolis, 2013.

POIRAZIS, H. **Double Skin Façade – A Literature Review**. Report EBD-R-04/3, Division of Energy and Building Design, Lund University, 2006.

POLLARD, B., BEATTY, M. **Double skin façades - more is less?** ISES-AP - 3rd International Solar Energy Society Conference - Asia Pacific Region (ISES-AP-08) Incorporating the 46th ANZSES Conference, Sydney, Australia, 2008.

POMPONI, F., BARBOSA, S., PIROOZ FAR, P. A. E. **On the intrinsic flexibility of the double skin façade: a comparative thermal comfort investigation in tropical and temperate climates**. Energy Procedia 00 (2016) 000–000

QUESADA, G., ROUSSE, D., DUTIL, Y., BADACHE, M., HALLE, S. **A comprehensive review of solar facades. Transparent and translucent solar facades**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16(5). June 2012.

RORIZ, M. **Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros**. Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Carlos – SP, 2012. Disponível em: http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/arquivos_climaticos/sobre_epw.pdf. Acessado em 09 de dezembro de 2017

RUIZ, G. R., BANDERA, C. F. **Validation of Calibrated Energy Models: Common Errors**. Energies 2017, 10, 1587; doi:10.3390/en10101587

RUUSKA, A., HÄKKINEN, T. **Material efficiency of building construction**. Buildings 2014, 4, 266-294; doi:10.3390/buildings4030266.

SAELENS, D. **Energy performance assessments of single storey multiple-skin facades**. PhD thesis, Laboratory for Building Physics, Department of Civil Engineering, Catholic University of Leuven, Belgium. 2002.

SCALCO, V. A., PEREIRA, F. O. R., RIGATTI, D. **Impacto de novas edificações na vizinhança: proposta de método para a análise das condições de iluminação natural e de insolação**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 10, n. 2, p. 171-187, abr./jun. 2010.

SCIGLIANO, S. HOLLO, V. **Índice de ventilação natural**. São Paulo, PINI, 2001.

SEMPER, G. **Os quatro elementos da arquitetura – e outros escritos**. Cambridge Press, Cambridge, Inglaterra, 1851.

SILVA, C., F. **O conforto térmico de cavidades urbanas: contexto climático do distrito federal**. Tese de Doutorado no programa de pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo na Universidade de Brasília. Brasil, 2013.

STIGGE, B., ADIBI, C. **A critical review of energy savings and cost payback for double facades**. From the Proceedings of the World Conference SB08. 2008.

THE CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERS (CIBSE). **Environmental design CIBSE Guide A**. 7th edition. Printed in Great Britain by Page Bros. (Norwich) Ltd., Norwich, Norfolk NR6 6SA. January 2006. ISBN-10: 1-903287-66-9

TRUBIANO, F. **Performance based envelopes: a theory of spatialized skins and the emergence of the integrated design professional**. ed. 3, pag. 689-712, Buildings Journal, 2013.

TUPPER, K., FRANCONI, E., CHAN, C., HODGIN, S., BUYS, A., JENKINS, M. **Building energy modeling: industry-wide issues and potential solutions**. Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 14-16 November.

UUTTU, S. **Study of Current Structures in Double-Skin Facades**. Dissertação de Mestrado no programa de Structural Engineering and Building Physics no Departamento de Civil and Environmental Engineering em Helsinki University of Technology (HUT), Finlândia, 2001.

WALTI, R. **Foto de Edifício SUVA**. N.d. Disponível em <https://www.herzogdemeuron.com/index/projects/complete-works/026-050/050-suva-house-apartment-and-office-building/image.html> - visitado em 19 de dezembro de 2018.

WASILOWSKI H. A., REINHART C. F. **Modelling an existing building in designbuilder/energyplus: custom versus default inputs**. 11th Conference of International Building Desempenho Simulation Association, Glasgow, Escócia, July 27-30, 2009.

WEBER, F. S., MELO, A. P., MARINOSKI, D. L., GUTHS, S., LAMBERTS, R. **Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus**. Relatório técnico do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE). Universidade Federal de Santa Catarina. Agosto, 2017.

WETTER, M., NOUIDUI, T. S., LORENZETTI, D., LEE, E. A., ROTH, A. **Prototyping the next generation energyplus simulation engine**. 14th Conference of International Building Performance Simulation Association, Hyderabad, Índia, Dec. 7-9, 2015.

WONG, P. C., PRASAD, D., BEHNIA, M. **A new type of double-skin façade configuration for the hot and humid climate**. Energy and Buildings, 40(10), 1941-1945. 2008.

WORLD COMISSION ON ENVIROMENTAL AND DEVELOPMENT (WCED). **Our common future**. Oxford: Oxford University Press, 1987.

YELLAMRAJU, V. **Evaluation & design of double skin facades for office buildings in hot climates**. Dissertação de Mestrado (Msc) em Arquitetura na Texas A&M University. Estados Unidos, 2004.

ZANONI, V.A.G. **Influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higrotérmico de fachadas em Brasília**. Tese de Doutorado em Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, Brasília, DF, 293 p. 2015.

ZEVI, B. **Saber ver a arquitetura**. Editora Martins Fontes, 5ª edição, São Paulo, Brasil. 1948.

ZOMORODIAN, Z. S., TAHSILDOOST, M. **Energy and carbon analysis of double skin façades in the hot and dry climate.** Journal of Cleaner Production 197 (2018) 85e96.

APÊNDICE A

Caracterização do Modelo do Estudo Exploratório

Os valores de densidades, cargas e rotinas relativas a ocupação, equipamentos e *setpoints* do sistema de HVAC do modelo do estudo exploratório estão descritos nas figuras abaixo. As Figura 30 e Figura 31 apresentam os dados do *template Domestic Lounge*, enquanto que as Figura 32 e Figura 33 são relativas ao *template Domestic Circulation*.

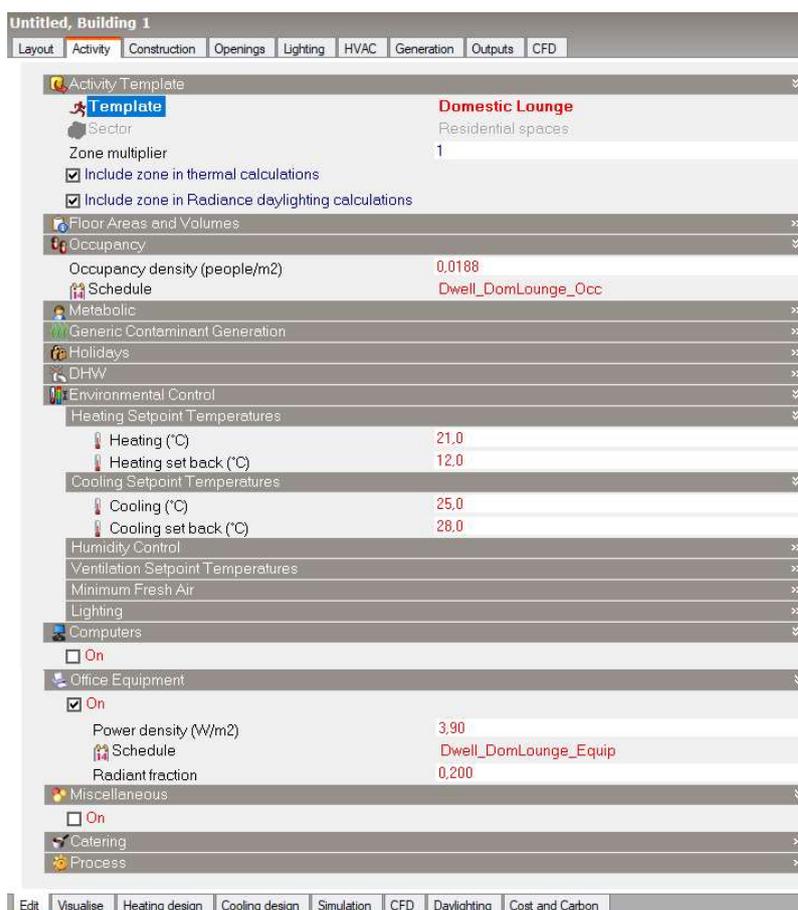


Figura 30 Densidade de ocupação e outras cargas do *template Domestic Lounge*

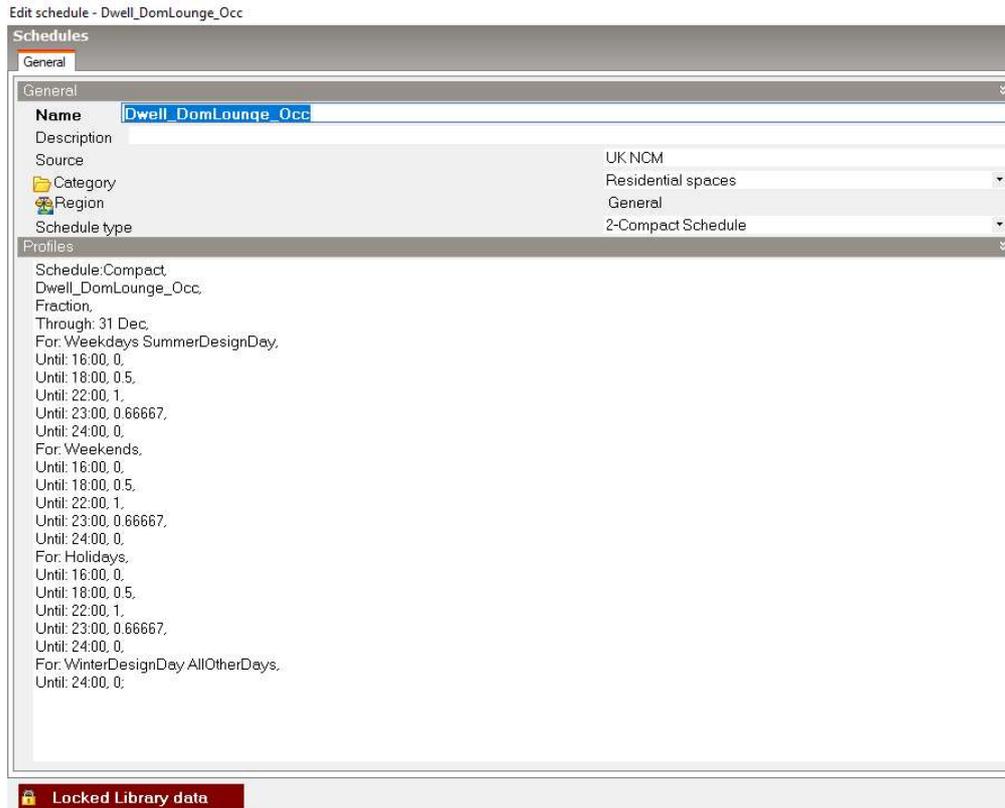


Figura 31 Rotina de ocupação do *template Domestic Lounge*

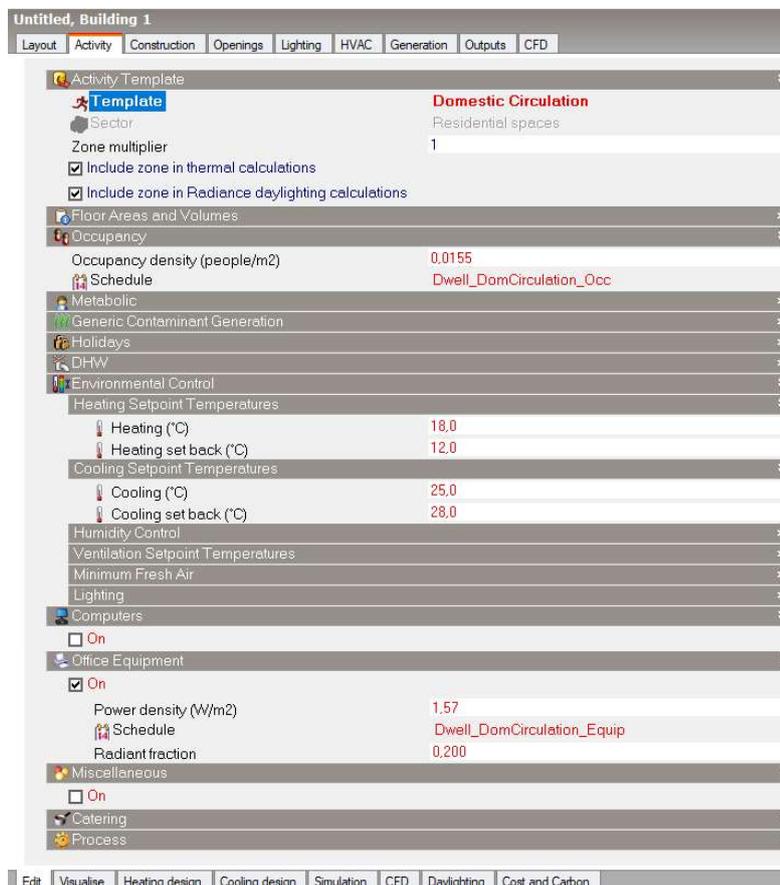


Figura 32 Densidade de ocupação e outras cargas do *template Domestic Circulation*

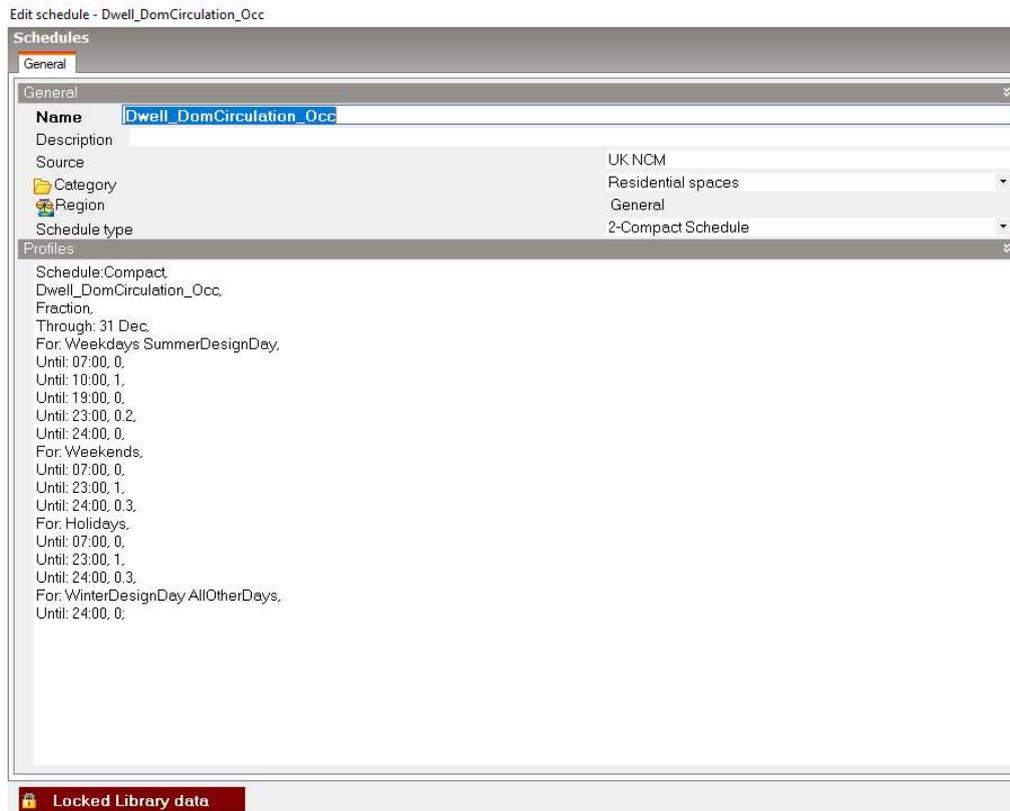


Figura 33 Rotina de ocupação do *template Domestic Circulation*

APÊNDICE B

Caracterização do Modelo do Investigado na Pesquisa

Os valores de densidades, cargas e rotinas relativas a ocupação, equipamentos e *setpoints* do sistema de HVAC dos modelos investigados na presente pesquisa estão descritos nas figuras abaixo. As Figura 34 e Figura 35 apresentam os dados do *template None* e *Zone type Cavity*, enquanto que as Figura 36 e Figura 37 são relativas ao *template Generic Office Area*.

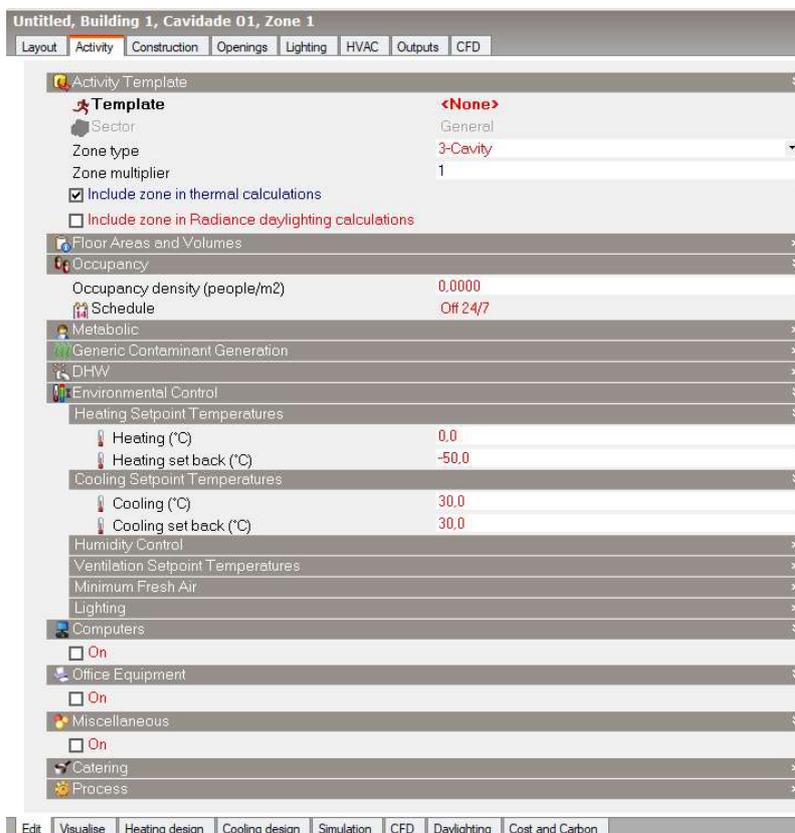


Figura 34 Densidade de ocupação e outras cargas do *template None* e *Zone type Cavity*

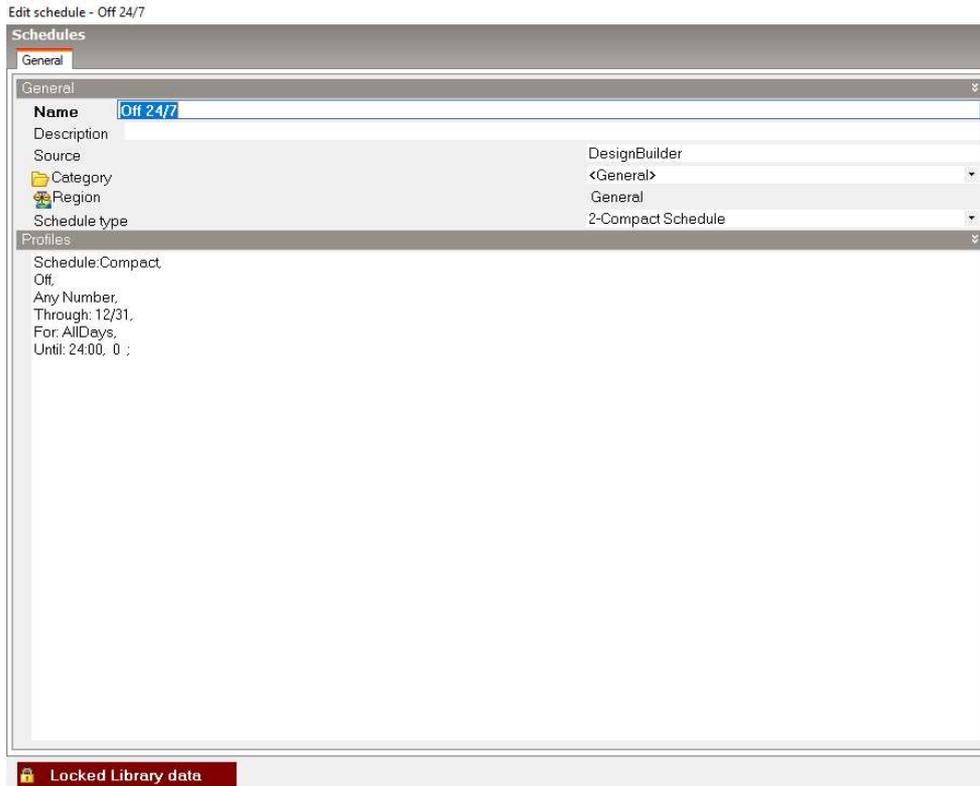


Figura 35 Rotina de ocupação do *template None* e *Zone type Cavity*

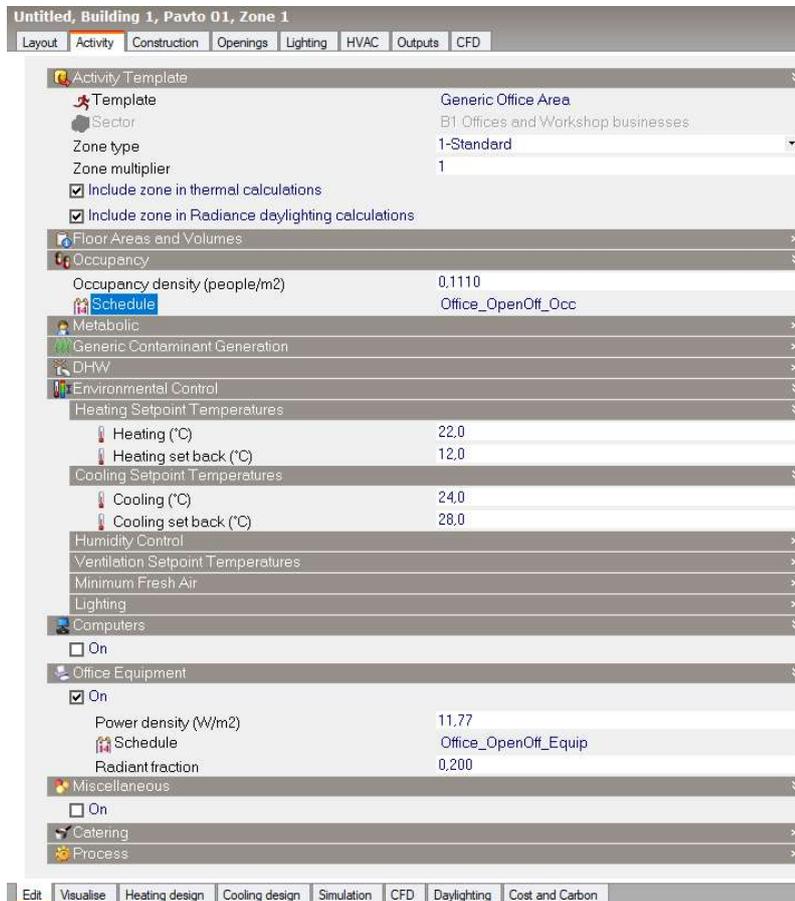


Figura 36 Densidade de ocupação e outras cargas do *template Generic Office Area*

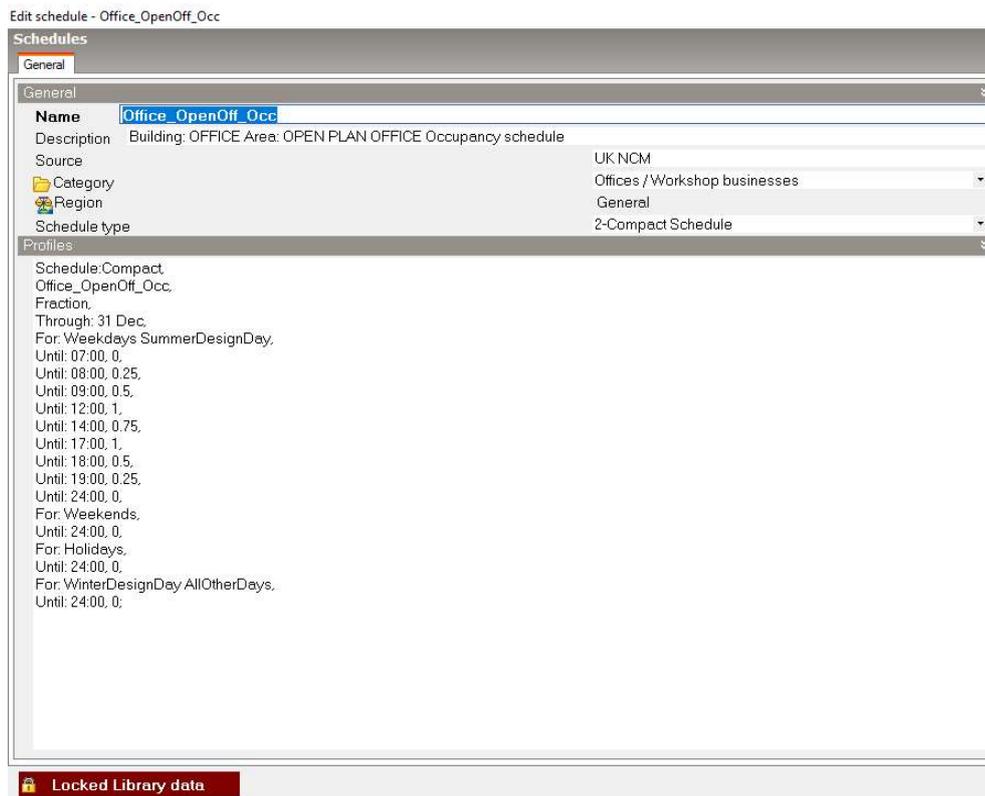


Figura 37 Rotina de ocupação do *template Generic Office Area*