MATHEUS MENEZES OLIVEIRA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE CHAMINÉS SOLARES NO CONFORTO E NA RENOVAÇÃO DE AR DE AMBIENTES INTERNOS

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2017

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa

T
O48a
2017

Oliveira, Matheus Menezes, 1993-
Análise da influência de chaminés solares no conforto e na renovação de ar de ambientes internos / Matheus Menezes Oliveira. – Viçosa, MG, 2017.
xi, 133f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.
Orientador: Joyce Correna Carlo.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Ventilação. 2. Arquitetura e clima. 3. Conforto térmico. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo. II. Título.

CDD 22 ed. 697.72

MATHEUS MENEZES OLIVEIRA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE CHAMINÉS SOLARES NO CONFORTO E NA RENOVAÇÃO DE AR DE AMBIENTES INTERNOS

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 12 de dezembro de 2017.

Henor Artur de Souza

Túlio Márcio de Salles Tibúrcio

Joyce Correna Carlo
(Orientadora)

AGRADECIMENTOS

À professora Joyce Carlo, por todos os anos de orientação, disponibilidade e conhecimentos.

À Gabi pelo apoio, dedicação e paciência.

À minha família, meus pais, avós e irmãos pelo apoio.

À Sabrina pela generosidade em compartilhar seus conhecimentos e por toda ajuda na dissertação.

À Tatiane e Débora, pela amizade e troca valiosa de informações.

Aos colegas do Laboratório de Tecnologias em Conforto Ambiental e Eficiência Energética (LATECAE) pelos conhecimentos e dicas.

A todas as pessoas que contribuíram para a minha formação durante esse período em Viçosa.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Arquitetura e Urbanismo (DAU) e ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo (PPG.au) pelo apoio e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento das bolsas de estudo.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS vi
LISTA DE FIGURAS vii
LISTA DE TABELAS ix
RESUMO x
ABSTRACT xi
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO GERAL 1
1.1 Chaminé Solar 1
1.2 Conforto Térmico 4
1.2.1 Modelos de conforto térmico 4
1.2.2 Índices de conforto adaptativo 6
1.3 Objetivo 11
1.3.1 Objetivo Geral 11
1.3.2 Objetivos Específicos 11
1.4 Métodos 12
1.4.1 Resumo dos métodos adotados no Capítulo 2 12
1.4.2 Resumo dos métodos adotado no Capítulo 3 12
1.5 Estrutura da Dissertação 12
1.6 Referências Bibliográficas 14
CAPÍTULO 2: ANÁLISE DA QUALIDADE DA SIMULAÇÃO DO FLUXO DE AR DE CHAMINÉS SOLARES COM O *ENERGYPLUS* 17
Resumo 17
Abstract 18
2.1 Introdução 19
2.2 Fundamentação 20
2.2.1 Brise-Chaminé-Solar 20
2.2.2 Simulação termoenergética de chaminés solares no *EnergyPlus* 20
2.3 Métodos 22
2.3.1 Caracterização do Brise-Chaminé-Solar 22
2.3.2 Fluxos de ar referenciais 23
2.3.3 Simulação *EnergyPlus* 25
2.3.3.1 Caso Base 26

2.3.3.2 Brise-Chaminé-Solar modelado como chaminé térmica *(ThermalChimney)* 26
2.3.3.3 Brise-Chaminé-Solar modelado como zonas térmicas conectadas 28
2.3.3.4 Brise-Chaminé-Solar modelado como zonas combinadas *(HorizontalOpening)* 28
2.3.4 Indicadores estatísticos utilizados na análise dos resultados 29
2.4 Análise e discussão dos resultados 30
2.4.1 Caso base 30
2.4.2 Casos analisados 31
2.5 Conclusões 35
2.6 Referências Bibliográficas 36
CAPÍTULO 3: ANÁLISE DO DESEMPENHO DE AMBIENTES COM CHAMINÉS SOLARES 38
3.1 Introdução 40
3.1.1 Chaminés solares 41
3.1.2 Conforto Térmico 43
3.2 Método 45
3.2.1 Definição do ambiente de análise 45
3.2.2 Definição do modelo de chaminé solar 46
3.2.3 Definição das cidades analisadas 47
3.2.4 Simulação dos ambientes 48
3.2.4.1 Primeira etapa 51
3.2.4.2 Segunda etapa 52
3.3 Resultados 52
3.3.1 Primeira etapa de simulação: salas de aula 52
3.3.1.1 Percentual das horas em conforto 52
3.3.1.2 Renovação de ar 56
3.3.2 Primeira etapa de simulação: escritórios 59
3.3.2.1 Percentual das horas em conforto 59
3.3.2.2 Renovação de ar 64
3.3.3 Segunda etapa de simulação salas de aula e escritório 67
3.3.3.1 Percentual das horas em conforto 68
3.3.3.2 Renovação de ar 72

3.4 Conclusão 75
3.5 Referências Bibliográficas 76
CAPÍTULO 4: CONCLUSÃO GERAL 79
4.1 Contribuição da pesquisa 80
4.2 Limitações do trabalho 81
4.3 Sugestão para trabalhos futuros 81
Apêndice 83
Apêndice A: Análise das geometrias dos ambientes simulados 83
Salas de Aula 83
Escritórios 85
Apêndice B: Condições de conforto para as salas de aula e escritórios na primeira etapa 85
Salas de Aula 85
Escritórios 109
Apêndice C: Condições de conforto para as salas de aula e escritórios na segunda etapa 125
Salas de Aula 125
Escritórios 129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ALT1 – Altura do Brise-Chaminé-Solar equivalente a um pavimento

ALT2 – Altura do Brise-Chaminé-Solar equivalente a dois pavimentos

ALT3 – Altura do Brise-Chaminé-Solar equivalente a três pavimentos

ALT5 - Altura do Brise-Chaminé-Solar equivalente a cinco pavimentos

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

BCS – Brise-Chaminé-Solar

CB – Caso base

CFD - *Computational Fluid Dynamics*

EAM – Erro Absoluto Médio

ENCAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído

ENTAC - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

EQM – Erro Quadrático Médio

L – Leste

LATECAE – Laboratório de Tecnologias em Conforto Ambiental e Eficiência Energética

N – Norte

O – Oeste

RTQ-C - Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos

TRY - *Test Reference Year*

ZB – Zona Bioclimática

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Explicação dos princípios físicos de uma chaminé solar.....3

Figura 2 Variáveis e análise de modelo de conforto térmico.....9

Figura 3 Seção horizontal do Brise-Chaminé-Solar. Dimensões e inclinação com a parede.....23

Figura 4 Seção horizontal do Brise-Chaminé-Solar. Conexão entre o Brise-Chaminé-Solar e o ambiente interno.....23

Figura 5 Brise-Chaminé-Solar. Vista geral.....24

Figura 6 Brise-Chaminé-Solar. Superfície refletora.....24

Figura 7 Perspectiva isométrica do Brise-Chaminé-Solar. (a) Frente (b) Fundos.....24

Figura 8 Equações do fluxo de ar do Brise-Chaminé-Solar.....25

Figura 9 Modelo com entorno e orientação.....26

Figura 10 Geometria simulada no EnergyPlus.....26

Figura 11 Modelo em que foi simulado no EnergyPlus o Brise-Chaminé-Solar como *ThermalChimney*. (a) Edificação (b) Modelagem do Brise-Chaminé-Solar.....27

Figura 12 Modelo em que foi simulado no EnergyPlus o Brise-Chaminé-Solar como zonas térmicas conectadas. (a) Edificação (b) Modelagem do Brise-Chaminé-Solar.....28

Figura 13 Modelo em que foi simulado no EnergyPlus o Brise-Chaminé-Solar como *HorizontalOpening* (a) Edificação (b) Modelagem do Brise-Chaminé-Solar.....29

Figura 14 Fluxo de ar horário em um ano completo no Brise-Chaminé-Solar.....32

Figura 15 Fluxos de ar simulados comparados ao Caso Base, para ALT 1.....33

Figura 16 Fluxos de ar simulados comparados ao Caso Base, para ALT 2.....33

Figura 17 Seção horizontal do Brise-Chaminé-Solar. Dimensões e inclinação com a parede.....47

Figura 18 Perspectiva Isométrica do Brise-Chaminé-Solar.....47

Figura 19 Modelo ALT1 com 4BCS para sala de aula, com destaque para o ambiente analisado.....49

Figura 20 Modelo ALT1 com 8BCS para sala de aula, com destaque para o ambiente analisado 49

Figura 21 Modelo ALT2 com 4BCS para sala de aula, com destaque para o ambiente analisado 49

Figura 22 Modelo ALT2 com 8BCS para sala de aula, com destaque para o ambiente analisado 49

Figura 23 Modelo ALT3 com 4BCS para sala de aula e escritório, com destaque para o ambiente analisado 50

Figura 24 Modelo ALT3 com 8BCS para sala de aula e escritório, com destaque para o ambiente analisado 50

Figura 25 Modelo ALT5 com 4BCS para escritório, com destaque para o ambiente analisado 50

Figura 26 Modelo ALT5 com 8BCS para escritório, com destaque para o ambiente analisado 50

Figura 27 Distribuição mensal das horas em conforto na cidade de Campos do Jordão, com 8BCS instalados no ambiente, ALT3 e orientação norte 53

Figura 28 Distribuição mensal das horas em conforto na cidade de Belém, com 4BCS instalados no ambiente, ALT1 e orientação leste 54

Figura 29 Distribuição mensal das horas em conforto na cidade de Campos do Jordão, com 4BCS instalados no ambiente, ALT5 e orientação norte 60

Figura 30 Distribuição mensal das horas em conforto na cidade de Belém, com 4BCS instalados no ambiente, ALT3 e orientação leste 61

Figura 31 Condições de conforto para as salas de aula nas cidades analisadas na segunda etapa 69

Figura 32 Condições de conforto para os escritórios nas cidades analisadas na segunda etapa 70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Aumento nos limites aceitáveis de temperatura operativa na abordagem do conforto adaptativo resultante do aumento da velocidade do ar acima de 0,3m/s. 7

Tabela 2 Indicadores estatísticos aplicados aos casos estudados 32

Tabela 3 Cidades selecionadas para a simulação 48

Tabela 4 Parâmetros adotados na simulação 49

Tabela 5 Resumo da primeira etapa de simulação 51

Tabela 6 Comparação entre os melhores casos simulados e o caso base/Sala de Aula 53

Tabela 7 Condições de conforto em sala de aula 55

Tabela 8 Diferença percentual entre horas de conforto e desconforto proporcionado por 4BCS e 8BCS/Sala de Aula 56

Tabela 9 Renovação de ar (Trocas por hora) na ZB1/Sala de Aula.....57

Tabela 10 Renovação de ar (Trocas por hora) na ZB8/Sala de Aula.....58

Tabela 11 Comparação entre os melhores casos simulados e o caso base/Escritório 60

Tabela 12 Condições de conforto em escritório 62

Tabela 13 Diferença percentual entre horas de conforto e desconforto proporcionado por 4BCS e 8BCS/Escritório.....63

Tabela 14 Renovação de ar (Trocas por hora) na ZB1/Escritório 65

Tabela 15 Renovação de ar (Trocas por hora) na ZB8/Escritório 66

Tabela 16 Parâmetros adotados na segunda etapa de simulação.....68

Tabela 17 Condição de conforto na segunda etapa de simulação.....71

Tabela 18 Renovação de ar das salas de aula e escritório nas cidades analisadas na segunda etapa/ZB1, ZB2 e ZB3 73

Tabela 19 Renovação de ar das salas de aula e escritório nas cidades analisadas na segunda etapa/ZB3, ZB4 e ZB5 74

RESUMO

OLIVEIRA, Matheus Menezes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2017. **Análise da Influência de Chaminés Solares no Conforto e na Renovação de Ar de Ambientes Internos.** Orientadora: Joyce Correna Carlo.

Diante das crises energéticas mundiais e do aumento da consciência coletiva a respeito da sustentabilidade, percebe-se a necessidade de investigar estratégias passivas que proporcionem conforto térmico aos usuários e economia de energia às edificações. Nesse contexto, em climas quentes, como é grande parte do território brasileiro, o correto uso de estratégias relacionadas à ventilação natural se torna especialmente interessante. Dentre os dispositivos que proporcionam ventilação, estão as chaminés solares. As chaminés solares possuem grande potencial para o aumento das renovações de ar e do conforto térmico em edificações, não geram ruídos, possuem um baixo custo operacional e não necessitam de energia elétrica. Entretanto, para a correta aplicação desses dispositivos, são necessárias análises dos parâmetros construtivos e das variáveis ambientais. Diante disso, o objetivo principal deste trabalho foi investigar os parâmetros e o potencial de uma chaminé solar para proporcionar conforto térmico e renovação de ar em salas de aula e escritórios no clima brasileiro. Para esta investigação, adotou-se como método a simulação termoenergética com o *EnergyPlus*. Foram avaliados três métodos de simulação de chaminés solares no programa e identificados indicadores estatísticos e parâmetros referenciais para comparação entre fluxos de ar anuais. Após uma primeira análise, um modelo de chaminé solar, o Brise-Chaminé-Solar® foi avaliado em dois ambientes: sala de aula e escritórios, com variações de parâmetros construtivos, como a altura dos dispositivos, a quantidade destes e a orientação em que foram instalados. Ao serem comparados os casos simulados para cada clima, os resultados apresentaram diferenças de até 80% no número de horas em conforto. Esses valores reforçam a importância da análise do clima em que se pretende instalar uma chaminé solar. A partir dos resultados obtidos nas cidades analisadas, foi possível comprovar que o dispositivo aumentou o número de horas em conforto de 20 a 30%, e os melhores resultados foram obtidos nas cidades da ZB1 a ZB5, o que, a princípio, torna essas zonas bioclimáticas potencialmente favoráveis para a utilização do Brise-Chaminé-Solar.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Matheus Menezes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2017. **Analysis of the Influence of Solar Chimneys on Comfort and Air Renovation in Indoor Environments.** Advisor: Joyce Correna Carlo.

As a result of the global energy crises and the increasing in collective awareness of sustainability, it has become necessary to investigate passive strategies that provide thermal comfort to users and energy saving to buildings. In this context, in hot climates, as in most of the Brazilian territory, the correct use of strategies related to natural ventilation is very important. Solar chimneys are one of the devices that provide ventilation. They have great potential to increase air renovation and intensify thermal comfort in buildings, they do not create noise, have low-cost features and do not require electricity. However, for the correct application of these devices, it is necessary to analyze the construction parameters and the environmental variables. Therefore, the objective of this work is to investigate the parameters and potential of a solar chimney for thermal comfort and air renovation in classrooms and office spaces in the Brazilian climate. For this research, it was adopted as method an energy performance simulation in EnergyPlus. Three methods of simulating solar chimneys in the software were evaluated, then statistical indicators and benchmarks have been identified for comparison between annual air flows. After a first analysis, a solar chimney model, Brise-Chaminé-Solar®, was evaluated in two rooms: classrooms and offices, with variations of constructive parameters, as the height of the devices, the number of them and the orientation in which they were installed. When the simulated cases for each climate were compared, the results presented differences of up to 80% in the number of hours in thermal comfort. These values reinforce the importance of the analysis of the climate in where it is intended to install a solar chimney. From the results obtained in the analyzed cities, it was possible to prove that the device increased the number of hours in thermal comfort to between 20 and 30%, and the best results were obtained in ZB1 to ZB5 cities, it means, in principle, that these bioclimatic zones have favorable potential for a Brise-Chaminé-Solar® utilization.

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO GERAL

A busca por edificações mais sustentáveis e eficientes energeticamente tem crescido desde o final da década de 1970. Questões como conforto térmico dos usuários, uso dos recursos naturais e adaptabilidade ao clima são sempre estudadas, discutidas e revisadas por profissionais que buscam responder a esta crescente demanda exigida pelo mercado.

Nesse contexto, uma das principais estratégias para alcançar conforto e eficiência energética em climas quentes é o uso correto da ventilação natural. Esta, segundo Araújo e Cunha (2010), é recomendada para o resfriamento passivo dos edifícios, para a renovação do ar, dissipação de odores, fumaça, poluentes, vapores, gases e particulados. A norma NBR 15220 (ABNT, 2005) recomenda estratégias de ventilação natural no verão para as zonas bioclimáticas ZB2, ZB3 e ZB4, e para todo o ano na ZB5, ZB6, ZB7 e ZB8.

Para que a ventilação natural possa ocorrer, é fundamental que exista uma força motriz que induza o movimento do ar no interior dos ambientes. Esta força pode ser o resultado da pressão dos ventos sobre as fachadas da edificação ou do gradiente de temperatura que promove as correntes convectivas ascensionais (ARAÚJO; CUNHA, 2010). Uma das formas que pode promover a ascensão convectiva e, consequentemente, a ventilação natural no interior dos ambientes, é o uso de chaminés solares.

1.1 Chaminé Solar

As chaminés solares possuem grande potencial para o aumento das renovações de ar em edificações, não geram ruídos, possuem um baixo custo operacional e não necessitam de energia elétrica (ASADI et al., 2016). Por causa dessas características, esses dispositivos têm despertado interesse de projetistas devido a sua longa vida útil e economia para edificações (SHI et al., 2016). Zhai, Song e Wang (2011), Asadi et al. (2016) e Hosien e Selim (2017), as definem como um sistema de termossifão solar que melhora a qualidade interna e aumentam as taxas de renovação do ar por meio do efeito chaminé.

As chaminés solares são semelhantes às chaminés convencionais, exceto pelo princípio de captar a radiação solar para aumentar o efeito chaminé por meio de uma camada envidraçada voltada para a orientação que permita maior incidência de radiação. Essa radiação é transmitida pelo vidro, é absorvida pela superfície oposta e aquece o ar no interior da cavidade por radiação e convecção. As parcelas de absorção e reflexão variam de acordo com as propriedades do vidro utilizado.

Uma parcela da radiação solar transferida para a cavidade é absorvida pela placa absorvedora e reemitida por convecção ao ar no interior da cavidade em forma de ondas longas, contribuindo para o aumento da temperatura desse ar. O ar aquecido na cavidade se expande, se torna menos denso, e tende a ascender ao topo da chaminé, por meio do efeito chaminé (ASADI et al., 2016). O efeito chaminé que esses dispositivos proporcionam é especialmente interessante em áreas urbanas, em que existem grandes perdas da velocidade do vento devido aos obstáculos.

Conforme mostrado na Figura 1, a diminuição da pressão devido a diferença da altura entre a entrada e saída do ar (A) e o efeito chaminé proporcionado pela incidência de radiação solar (B) na superfície absorvedora cria uma diferença de pressão entre o interior da cavidade e o ar externo. Como consequência, o ar da cavidade se eleva ao topo da chaminé, é empurrado para o exterior, enquanto o ar do interior do ambiente é puxado pela base da chaminé solar (C) (NEVES; RORIZ, 2012). Em edifícios naturalmente ventilados, o deslocamento de ar da cavidade irá induzir a entrada de ar nos ambientes internos (D). Dessa forma, o ar fresco do exterior passa pelos ocupantes antes de descarregar na cavidade do dispositivo, gerando uma circulação do ar no edifício.

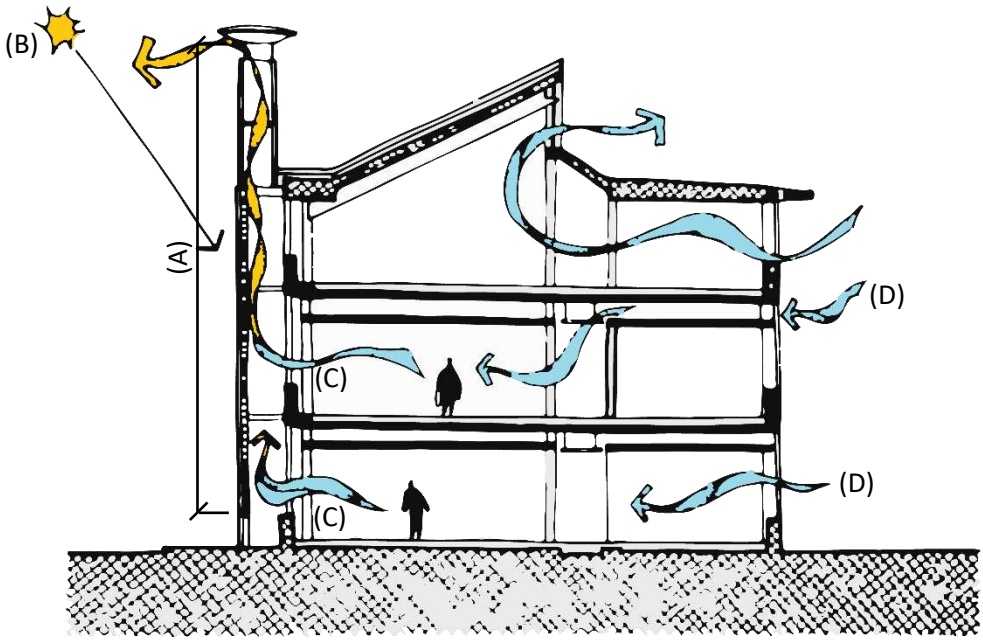

Figura 1 Explicação dos princípios físicos de uma chaminé solar

Fonte: Adaptado de BROWN; DEKAY, 2017

Embora a chaminé solar tenha sido apresentada como um dispositivo indutor da ventilação natural, Tan e Wong (2014) e Neves e Silva (2017) defendem que as trocas de ar por esquadrias mantidas abertas excedem os fluxos de uma chaminé solar. Portanto, esses dispositivos são justificáveis em edificações em que não é possível ou desejável a abertura de janelas, como em climas hostis, em centros urbanos com altos índices de poluição ou em locais sem vento. Nessas situações as chaminés solares podem fornecer as trocas de ar necessárias para garantir a salubridade do ambiente (MATHUR; MATHUR; ANUPMA, 2006; TAN; WONG, 2014).

Lee e Strand (2009), Neves e Silva (2017) e Hosien e Salim (2017) identificaram que o desempenho de uma chaminé solar está fortemente ligado às variáveis ambientais do local em que o dispositivo está instalado: diferença de temperatura entre o ambiente interno e externo, direção e intensidade do vento e radiação solar afetam diretamente a eficiência das chaminés solares. As variáveis climáticas podem justificar os resultados contraditórios levantados por Khanal e Lei (2011), que apontaram que não foi possível estabelecer uma concordância total entre os estudos que investigaram parâmetros construtivos que afetam a eficiência das chaminés solares. Os autores defendem que, para garantir a eficiência do dispositivo, deve ser realizada

uma avaliação para cada caso e os ajustes dos parâmetros devem ser realizados de acordo com as especificidades do ambiente e clima em que a chaminé será instalada.

1.2 Conforto Térmico

As condições térmicas dos ambientes internos afetam o conforto e também influenciam na termorregulação fisiológica e os processos psicológicos. Tais fatores podem interagir com outras condicionantes e influenciar a produtividade e o desempenho geral do usuário em determinadas tarefas (DE DEAR et al., 2013; DE DEAR et al., 2015). Logo, as condições de conforto nos ambientes podem melhorar de maneira significativa a eficiência energética dos edifícios e, em ambientes escolares e de escritórios, aumentar a produtividade dos usuários (STRAUB et al., 2017).

As pesquisas relacionadas ao conforto térmico, embora não sejam recentes, têm tido forte destaque nos últimos anos, principalmente associadas à eficiência energética das edificações (STRAUB et al., 2017). O conforto térmico é definido pela norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013) como uma condição mental do ser humano que expressa a satisfação com as condições térmicas ambientais. A avaliação do nível de conforto é definida por uma combinação de variáveis, como o tipo da atividade que o usuário realiza, a temperatura ambiente e das superfícies circundantes e a velocidade e umidade relativa do ar (BARBOSA, 2016). Os dois modelos de avaliação de índices de conforto térmico mais utilizados são o Voto Médio Preditivo (*Predicted Mean Vote* - PMV) ou modelo de equilíbrio térmico, e o conforto adaptativo (EFOEMA; UDUKU, 2014).

1.2.1 Modelos de conforto térmico

Os primeiros estudos realizados sobre o impacto das condições térmicas na produtividade de trabalhadores foram desenvolvidos em 1916 pela Comissão Americana de Ventilação (STRAUB et al., 2017). Grande parte das questões de conforto térmico foram abordadas por meio de observações instrumentais ou simulações das condições climáticas em ambientes internos controlados (DE DEAR et al., 2013). Sob essa perspectiva, foram realizadas as primeiras pesquisas científicas que colaboraram para o estabelecimento dos princípios da avaliação da

sensação térmica dos usuários em relação a um ambiente. Além do estabelecimento de diretrizes, esses trabalhos também possibilitaram a elaboração das primeiras normas de conforto.

Nesse contexto, Fanger (1970) citado por De Dear et al. (2013) desenvolveu uma das principais pesquisas nessa área. No estudo, o autor estabeleceu como método o PMV, cujas equações de equilíbrio de calor em estado estacionário levavam em consideração as trocas entre o homem e o ambiente. Essas equações, em teoria, representam as respostas do indivíduo ao estado de conforto térmico e, de acordo com Fanger, poderiam ser utilizadas sem modificação em qualquer lugar do mundo (FANGER, 1970 *apud* DE DEAR et al., 2013).

As avaliações dos níveis de conforto pelo PMV levaram ao estabelecimento de padrões em ambiente interno que foram universalmente aplicados em vários tipos de edificações. Entretanto, essas avaliações não consideravam o contexto e as variáveis climáticas ao ar livre. Dentre as críticas ao PMV, Yau e Chew (2012) apontaram que o uso do método de Fanger torna-se questionável, especialmente quando aplicado em edifícios naturalmente ventilados, pois não considera o impacto psicológico e a adaptação humana às diferentes temperaturas durante as estações do ano na sensação de conforto térmico.

Estudos realizados por Frontczak e Wargocki (2011) concluíram que o tipo da construção, o clima e a estação do ano influenciam no conforto térmico. Os autores analisaram a relação entre a percepção de conforto e o tipo de condicionamento do edifício e concluíram que os usuários de edifícios condicionados artificialmente são mais exigentes quanto às variações térmicas, se comparados aos usuários de edifícios naturalmente ventilados. Além disso, o PMV não se mostrou capaz de estimar a real sensação de conforto de indivíduos aclimatados a climas tropicais (PEREIRA e ASSIS, 2010). A análise em casos reais possibilitou também uma compreensão mais clara de como as interações térmicas entre as pessoas e a edificação podem influenciar a satisfação geral dos usuários (DE DEAR et al., 2013).

Diante das limitações do modelo PMV, autores como Humphreys (1978), Auliciems (1981), Nicol e Humphreys (2002) de Dear e Brager (2002) começaram a realizar estudos de campo envolvendo grandes amostras de ocupantes e edificações reais

(PEREIRA; ASSIS, 2010; YAU; CHEW 2014). Dessas pesquisas nasceu a abordagem do conforto térmico adaptativo.

O conforto adaptativo adota padrões variáveis de temperatura interna e permite adaptações dos usuários no edifício às condições ambientais. Esta abordagem leva a algoritmos de controle ambiental mais responsivos, níveis mais aprimorados de conforto dos ocupantes, redução do consumo de energia e incentivo a projetos sustentáveis (DE DEAR; BRAGER; COOPER, 1997).

O conforto adaptativo considera o corpo humano como um agente ativo que interage com o meio ambiente em resposta a sua preferência e sensação térmica (BARBOSA, 2016). O conforto adaptativo é baseado em uma ampla amostragem de estudos de campo realizada em várias partes do mundo, cujos índices baseiam-se em resultados que medem as condições ambientais e a resposta simultânea à sensação térmica em indivíduos envolvidos em suas tarefas habituais. As pesquisas buscam reproduzir as condições reais, em que os usuários do edifício são agentes ativos nas condições térmicas do ambiente, além de que as populações de diferentes regiões climáticas, contextos socioculturais e socioeconômicos têm percepções diferentes do conforto (EFOEMA; UDUKU, 2014; PEREIRA; ASSIS, 2010).

A abordagem adaptativa, segundo Dear, Brager e Cooper (1997), é baseada em três variáveis distintas, porém, inter-relacionadas: variáveis comportamentais (utilização de janelas operáveis, ventiladores, portas, toldos, etc.); fisiológicas (aclimatização) e psicológicas (ajuste as expectativas de conforto em relação às condições climáticas internas e externas). De acordo com os autores, a adoção desta definição tripla contribui para conciliar as abordagens térmica, adaptativa e os padrões climáticos internos derivados delas.

1.2.2 Índices de conforto adaptativo

A norma ASHRAE 55, *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy* (Condições Ambientais Térmicas para Ocupação Humana) é uma norma que fornece requisitos térmicos mínimos para o estabelecimento do conforto em ambientes internos. O atual componente adaptativo foi baseado no banco de dados do projeto ASHRAE RP-884 (DE DEAR; BRAGER; COOPER, 1997), que foram obtidos a partir

de 21.000 medições em diversos edifícios e em zonas climáticas que cobrem quatro continentes (CANDIDO; DE DEAR; LAMBERTS, 2011; EFOEMA; UDUKU, 2014).

O componente adaptativo da norma é aplicável para a determinação dos índices de conforto em ambientes naturalmente ventilados em que a atividade física dos usuários é equivalente a atividades típicas de escritórios, entre 1,0 e 1,3 met. O método também especifica que os ocupantes podem adaptar livremente suas roupas às condições térmicas internas e/ou externas, dentro de uma faixa entre 0,5 a 1,0 clo, e que a temperatura média do ar esteja entre 10℃ e 33,5℃ (ASHRAE, 2013).

A norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013) determina que os limites de aceitação para aplicações em construção típicas, em que o intervalo de conforto térmico satisfaz 80% das pessoas, são descritos nas equações 1 e 2.

Limite de temperatura inferior (℃): 0,31* T.Externa (℃) + 14.3

(Eq. 1)

Limite de temperatura superior: (℃): 0,31* T.Externa (℃) + 21.3

(Eq. 2)

A norma permite que o limite de aceitabilidade da temperatura aumente quando a velocidade do ar ambiente é superior a 0,3m/s. Nesse caso, os limites de temperatura aceitáveis são calculados de acordo com a velocidade de ar correspondente (Tabela 1).

Tabela 1 Aumento nos limites aceitáveis de temperatura operativa na abordagem do conforto adaptativo resultante do aumento da velocidade do ar acima de 0,3m/s.

Velocidade do ar	0,6 m/s	0,9 m/s	1,2 m/s
Temperatura	1,2℃	1,8℃	2,2℃

Fonte: Adaptado da ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013)

A norma europeia EN15251 (CEN, 2007), publicada em 2007 pelo Comitê Europeu de Normatização (*Comité Européen de Normalisation - CEN*), foi resultado do projeto *Smart Controls and Thermal Comfort (SCATs)*. O projeto utilizou medições e questionários de um levantamento de 26 escritórios localizados na França, Grécia, Portugal, Suécia e Reino Unido. O foco exclusivo na Europa refletiu a intenção da *SCATs* de fornecer a base empírica de um padrão de conforto adaptativo exclusivamente europeu (NICOL; HUMPHREYS, 2010; DE DEAR et al., 2013).

A norma EN15251 (CEN, 2007) leva em consideração variáveis internas como a qualidade do ar, temperatura, iluminação e acústica para o projeto e avaliação do desempenho energético dos edifícios, projetos de aquecimento, resfriamento, ventilação e sistema de iluminação. É aplicável principalmente a edificações residenciais (unifamiliar e multifamiliar), institucionais, comerciais e de serviços.

A norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013) e a norma EN15251 (CEN, 2007) utilizam a abordagem do conforto adaptativo e possuem equações lineares para a avaliação dos índices de conforto semelhantes entre si, pois ambas relacionam as temperaturas internas em edifícios naturalmente ventilados com a temperatura externa (DE DEAR et al*.,* 2013). Entretanto, existem algumas diferenças entre elas, a ASHRAE 55 utiliza uma base de dados mais ampla, com resultados coletados em diversas regiões do planeta, enquanto a EN15251 utiliza dados estritamente europeus. Logo a ASHRAE 55, por ter uma abrangência maior, é aplicável a diversas partes do mundo, enquanto a EN15251 é mais aplicável à Europa (NICOL; HUMPHREYS, 2010).

O componente adaptativo da ASHRAE 55 é restrito a edifícios naturalmente ventilados, enquanto a EN15251 aplica-se a qualquer edifício que utiliza ventilação natural, mesmo que, em dias frios no inverno e quentes no verão seja utilizada condicionamento artificial. Alguns edifícios que são incluídos na base de dados da ASHRAE são excluídos nos dados EN15251, e vice-versa. Por exemplo, um edifício de escritórios com ventilação mecânica e janelas abertas, seria incluído nos dados da EN15251, mas seria excluído da ASHRAE. Um edifício aquecido artificialmente no inverno e refrigerado no verão, mas, em meados da temporada, operado com ventilação natural, seria incluído na EN15251, porém, excluído da ASHRAE 55 (NICOL; HUMPHREYS, 2010). Na Figura 2 apresenta-se um resumo comparativo entre os principais aspectos em comum da ASHRAE 55 e da EN15251 em contraste com o PMV.

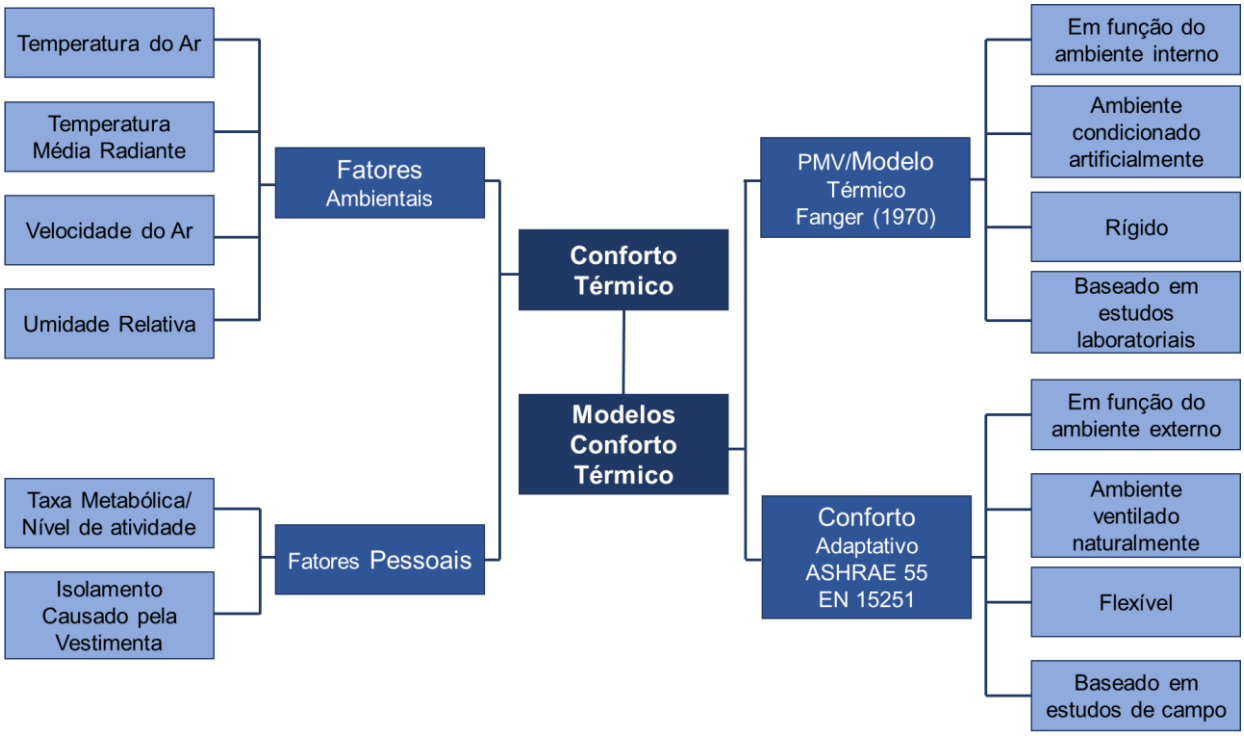

Figura 2 Variáveis e análise de modelos de conforto térmico
Fonte: Adaptado de EFEOMA; UDUKU, 2014

Por ser mais abrangente, o método adaptativo da norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013) é apropriado para aplicação em diferentes partes do mundo, inclusive no Brasil. Pereira e Assis (2010) desenvolveram um trabalho com o objetivo de identificar um índice de conforto adaptativo adequado às diferentes condições climáticas existentes no Brasil. As autoras compararam quatro índices de conforto adaptativo levantados na literatura internacional com índices nacionais e identificaram que os modelos de Auliciems (1981) e De Dear e Bragger (2002)[1] apresentaram as maiores semelhanças.

Entretanto, Cândido et al. (2010a), Cândido et al. (2010b) e Cândido, De Dear e Lamberts (2011) apontam que o método de conforto adaptativo da norma ASHRAE 55 especifica valores de fluxo de ar inferiores aos desejados pelos usuários em ambientes quentes. Os autores realizaram o estudo com o objetivo de identificar os níveis de aceitação da movimentação do ar dentro de edifícios naturalmente ventilados na cidade de Maceió-AL, Brasil. Foram realizadas simultaneamente,

[1] O modelo adaptativo de De Dear e Brager (2002) foi proposto como alternativa para o método da ASHRAE Standart 55 de 1998 e incorporado na versão de 2004 (PEREIRA; ASSIS, 2010).

medições microclimáticas e aplicações de questionários, durante o verão e o inverno. Os autores concluíram que os usuários preferem, em períodos quentes com temperatura acima de 29℃ e 30ºC, velocidades do ar próximas ao limite ado tado pela norma ASHRAE 55, de 0,8 m/s ou até mesmo superiores.

As limitações relacionadas à necessidade de ventilação natural acima do limite recomendado pela norma ASHRAE 55 para climas quentes não limita sua aplicação para ambientes com chaminés solares pois, esses dispositivos se destacam pela renovação de ar e possuem velocidades de movimentação de ar interna mínimas. Logo, os estudos supracitados qualificam a norma ASHRAE 55 para aplicação em ambientes com chaminés solares para climas quentes.

Outros trabalhos associaram o conforto térmico e temperatura de neutralidade a eficiência energética e melhores condições de trabalho e estudo. Batiz et al. (2009), realizaram uma pesquisa na cidade de Joinville SC, com objetivo verificar a relação entre conforto térmico, rendimento da atenção e da memória dos estudantes em salas de aulas universitárias. Os autores identificaram a existência de uma relação direta entre a atenção, memória e o conforto do usuário, pois, quando os valores de PMV se encontram próximos ao valor neutro (conforto), os testes apresentaram média de 70% de acerto.

Perez e Capeluto (2009) realizaram uma pesquisa com o objetivo de formular recomendações projetuais para escolas em Israel. Os autores identificaram que, para o clima quente e úmido, o projeto de uma escola focado em conforto e sustentabilidade pode reduzir o consumo anual de energia para aquecimento, resfriamento, ventilação e iluminação de 80 a 180kWh/m². Isso significa uma redução de mais de 50% do consumo de energia em comparação com uma edificação em que esses parâmetros não foram levados em consideração. Os autores concluíram que a implementação das recomendações projetuais levantadas na pesquisa em escolas não só resultou em redução significativa no consumo de energia, mas também apresentou potencial para melhorar o desempenho dos alunos em sala de aula.

Perez, Rodriguez e Lopez (2017) concluíram que, de maneira geral, as pessoas do território mexicano se sentem confortáveis à temperatura de 30° C ou mais. Isso contrasta com o fato de que, no tipo analisado de ambiente, o ponto de ajuste da temperatura do termostato do ar condicionado é de 19° C. Os autores recom endam

que, sempre que possível, sejam utilizados sistemas de resfriamento passivos e, quando for necessário a utilização de condicionamento artificial, a temperatura do termostato seja regulada próxima à temperatura de conforto. Tais recomendações impactam diretamente no consumo de energia e na produtividade dos usuários nos ambientes analisados.

A revisão de literatura apresentou o princípio físico e a importância das chaminés solares e como esses dispositivos podem impactar positivamente no desempenho de ambientes internos. Além disso, foi apresentada uma revisão sobre a evolução do conforto térmico para o desempenho dos usuários e eficiência energética. Entretanto, foram identificados poucos autores que pesquisaram a aplicação de chaminés solares para o clima brasileiro e não foram encontrados trabalhos que avaliaram simultaneamente a eficiência de uma chaminé solar para todo o ano aliado com o potencial em proporcionar conforto térmico e renovação de ar. A grande maioria das pesquisas avaliou o dispositivo de maneira isolada, com foco em resultados como a velocidade do fluxo e a renovação de ar. Além disso, a maior parte delas avaliou o dispositivo por um período curto do ano, geralmente associado à sua maior eficiência.

1.3 Objetivo

1.3.1 Objetivo Geral

Investigar parâmetros e o potencial de uma chaminé solar para proporcionar conforto térmico e renovação de ar em salas de aula e escritórios no clima brasileiro.

1.3.2 Objetivos Específicos

A) Avaliar os recursos do *EnergyPlus* para análise dos efeitos da ventilação em chaminés solares.
B) Avaliar os parâmetros e potencial das chaminés solares em proporcionar conforto térmico e renovação de ar em ambientes internos, com diferentes cargas térmicas internas, no clima brasileiro.

1.4 Métodos

1.4.1 Resumo dos métodos adotados no Capítulo 2

O método utilizado no Capítulo 2 está associado ao Objetivo Específico A. Nele foi realizada uma comparação entre diferentes modelos numéricos para a simulação de chaminés solares no *EnergyPlus*, os modelos foram comparados a um caso base específico: o dispositivo Brise-Chaminé-Solar (BCS) desenvolvido por Maciel (2016). Os fluxos de ar obtidos pelas simulações para o clima de Viçosa-MG, foram comparados por meio de indicadores estatísticos para validar as simulações apresentadas no Capítulo 3.

1.4.2 Resumo dos métodos adotado no Capítulo 3

Em seguida, o método do Capitulo 3, baseado em simulação termoenergética com o *EnergyPlus,* está associado ao Objetivo Específico B. Foram simulados dois ambientes, uma sala de aula e um escritório, ambos com o modelo de chaminé solar desenvolvido por Maciel (2016).

A simulação foi dividida em duas etapas, na primeira, os ambientes foram simulados para duas cidades da ZB1 e duas cidades da ZB8. Nessa etapa da simulação, foram realizadas variações de parâmetros como orientação solar da fachada, altura e número das chaminés solares instaladas no ambiente. Na segunda etapa, foram selecionados os melhores parâmetros identificados na primeira etapa, que levaram ao melhor desempenho e aplicados às demais cidades selecionadas nas zonas bioclimáticas ZB2, ZB3, ZB4, ZB5, ZB6 e ZB7.

Nas duas etapas da simulação, a avaliação da influência da chaminé foi feita com base nos índices de conforto adaptativo da norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013) e da taxa de renovação de ar.

1.5 Estrutura da Dissertação

A dissertação está dividida em quatro capítulos, sendo os capítulos dois e três desenvolvidos em formato de artigos.

No Capítulo 1 apresenta-se a introdução e justificativa da escolha do tema, em que foram expostos objetivos e resumo dos métodos adotados e a estrutura da dissertação.

No Capítulo 2, foi investigado o Objetivo Específico A. Este capítulo teve como foco a análise do desempenho do *EnergyPlus* para simular o fluxo de ar em chaminés solares.

No Capítulo 3, foi investigado o Objetivo Especifico B. Este capítulo está vinculado ao objetivo geral do trabalho, em que foi investigado o potencial do BCS em proporcionar conforto térmico e renovação de ar em ambientes internos.

No Capítulo 4, são apresentadas as conclusões dos capítulos 2 e 3, além de uma conclusão geral que integra os dois objetivos específicos. Neste capítulo, foram apresentadas as contribuições e limitações do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

1.6 Referências Bibliográficas

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 55**: Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, 2013.

ARAÚJO, C. V. A.; CUNHA, L. J. B. F. Proposta de método para potencializar o uso da ventilação natural. In: XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. **Anais...** Canela: ENTAC, 2010. p.1-10.

ASADI, S.; FAKHARI, M.; FAYAZ, R.; MAHDAVIPARSA, A. The effect of solar chimney layout on ventilation rate in buildings. **Energy and Buildings.** v.123, p.71-78, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS - ABNT. **NBR 15220-3. Desempenho térmico de edificações - parte 3: Zoneamento bioclimáticos brasileiros e diretrizes construtivas para habitação unifamiliar de interesse social.** Rio de Janeiro, 2005.

BARBOSA, S. **Thermal performance of naturally ventilated office buildings with double skin façade under Brazilian climate conditions**. Tese (Doutorado) - University of Brighton, Brighton Reino Unido, 2016.

BATIZ, E.; GOEDERT, J.; MORSCH, J.; JUNIOR, P.; VENSKE, R. Avaliação do conforto térmico no aprendizado: estudo de caso sobre influência na atenção e memória. **Produção.** v.19. p.477-488, 2009.

BROWN, G.; DEKAY, M. **The stack effect: hot air rises due to buoyancy, and its low pressure sucks in fresh air from outside**. Disponível em <https://sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/stack-ventilation-and-bernoullis-principle>. Acesso em 10 de novembro de 2017.

CÂNDIDO, C.; DE DEAR, R.; LAMBERTS, R. Combined thermal acceptability and air movement assessments in a hot humid climate zone. **Building and Environment**. v.46, p.379–385, 2011.

CÂNDIDO, C.; DE DEAR, R.; LAMBERTS, R.; BITTENCOURT, L. Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone. **Building and Environment**. v.45, p.222–229, 2010a.

CÂNDIDO, C.; LAMBERTS, R. BITTENCOURT, L.; DE DEAR, R. Aplicabilidade dos limites da velocidade do ar para efeito de conforto em climas quentes e úmidos. **Ambiente Construído**. v.10, p.59-68, 2010b.

CEN Standard. **EN 15251**. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings – addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. Bruxelas, 2007.

DE DEAR, R.; AKIMOTO, T.; ARENS, E. A.; BRAGER, G.; CÂNDIDO C.; CHEONG, K. W. D.; LI, B.; NISHIHARA, N.; SEKHAR, S. C.; TANABE, S.; TOFTUM, J.; ZHANG, H.; ZHU, Y. Progress in thermal comfort research over the last twenty years. **Indoor Air.** v.23, p.442-461, 2013.

DE DEAR, R.; BRAGER, G.; COOPER, D. **Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference: Final Report ASHRAE RP- 884**. 1997.

DE DEAR, R.; KIM, J.; CÂNDIDO, C.; DEUBLE, M. Adaptative thermal comfort in Australian school classrooms. **Building Research and Information**. v.43, p.383-398, 2015.

EFEOMA, M.; UDUKU, O. Assessing thermal comfort and energy efficiency in tropical African offices using the adaptive approach. **Structural Survey.** v.32, p.396-412, 2014.

FANGER, P. Thermal Comfort. Copenhagen, **Danish Technical Press.** 1970. *apud* DE DEAR, R.; AKIMOTO, T.; ARENS, E. A.; BRAGER, G.; CÂNDIDO C.; CHEONG, K. W. D.; LI, B.; NISHIHARA, N.; SEKHAR, S. C.; TANABE, S.; TOFTUM, J.; ZHANG, H.; ZHU, Y. Progress in thermal comfort research over the last twenty years. **Indoor Air.** v.23, p.442-461, 2013.

FRONTCZAK, M.; WARGOCKI, P. Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. **Building and Environment**. v.46, p.922-937, 2011.

HOSIEN, M.; SELIM, S. Effects of the geometrical and operational parameters and alternative outer cover materials on the performance of solar chimney used for natural ventilation. **Energy and Buildings**. v.138, p.355-367, 2017.

KHANAL, R.; LEI, C. Solar chimney - A passive strategy for natural ventilation. **Energy and Buildings**. v.43, p.1811-1819, 2011.

LEE, K.; STRAND, R. Enhancement of natural ventilation in buildings using a thermal chimney. **Energy and Buildings**. v.41, p.615-621, 2009.

MACIEL, L. F. **Desenvolvimento de dispositivo de proteção solar com ênfase na ventilação natural: Um método de avaliação baseado em CFD**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa-MG, 2016.

MATHUR, J.; MATHUR, S.; ANUPMA. Summer-performance of inclined roof solar chimney of natural ventilation. **Energy and Buildings.** v.38, p.1156-1163, 2006.

NEVES, L.; RORIZ, M. Procedimentos estimativos do potencial de uso de chaminés solares para promover a ventilação natural em edificações de baixa altura. **Ambiente Construído**. v.2, p.177-192, 2012.

NEVES, L.; SILVA, S. Análise paramétrica de chaminés solares visando à otimização de desempenho em climas típicos do território brasileiro. **Ambiente Construído**. v.17, p.163-182, 2017.

NICOL, F.; HUMPHREYS, M. Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251. **Building and Environment**. v.45, p.11–17, 2010.

PEREIRA, I.; ASSIS, E. Avaliação de modelos de índices adaptativos para uso no projeto arquitetônico bioclimático. **Ambiente Construído**. v.10, p.31-51, 2010.

PEREZ, I; RODRIGUEZ, A.; LOPEZ, C. Adaptive thermal comfort in the main Mexican climate conditions with and without passive cooling. **Energy and Buildings**. v.145, p.251–258, 2017.

PEREZ, Y.; CAPELUTO, I. Climatic considerations in school building design in the hot–humid climate for reducing energy consumption. **Applied Energy**. v.86, p.340–348, 2009.

SHI, L.; ZHANG, G.; CHENG, X.; GUO, Y.; WANG, J.; CHEW, M. Developing an empirical model for roof solar chimney based on experimental data from various test rigs. **Building and Environment**. v.110, p.115-128, 2016.

STRAUB, K.; LEÃO, E.; KUCHEN, E.; LEÃO, M. Determinação da temperatura de neutralidade em salas de aula do ensino superior para as zonas bioclimáticas do estado de Mato Grosso. **Ambiente Construído.** v.17, p.97-109, 2017.

TAN, A.; WONG, N. Influeces of ambient air speed and internal heat load on the performance of solar chimney in tropics. **Solar Energy.** v.102 p.116-125, 2014.

Yau, Y.; Chew, B. A review on predicted mean vote and adaptive thermal comfort models. **Building Services Engineering Research and Technology**. v.35, p.23-35, 2014.

ZHAI, X.; SONG, Z.; WANG, R. A review for the applications of solar chimneys in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v.15, p.3757-3667, 2011.

CAPÍTULO 2: ANÁLISE DA QUALIDADE DA SIMULAÇÃO DO FLUXO DE AR DE CHAMINÉS SOLARES COM O *ENERGYPLUS*

Resumo

A ventilação é uma das principais estratégias para alcançar conforto e eficiência energética em climas quentes e úmidos. Nesse contexto, as chaminés solares são dispositivos que promovem o aumento das trocas de ar no ambiente, com consequente renovação de ar e redução dos gastos energéticos de um edifício. Vários autores utilizaram simulações termoenergéticas em seus estudos sobre o tema, entretanto, não foram encontrados na literatura parâmetros referenciais para uma avaliação numérica anual dos fluxos de ar de uma chaminé solar. Logo, nesse artigo apresenta-se uma investigação sobre três métodos de simulação de chaminés solares no *EnergyPlus*: modelo *ThermalChimney*, *Airflow Network* e *HorizontalOpenings*. Os métodos foram discutidos em relação à modelagem e suas restrições, com identificação das vantagens e desvantagens de cada. Os resultados das simulações foram comparados àqueles de um modelo numérico desenvolvido por *CFD* em estudo anterior que, por sua vez, foi validado com uso de um protótipo construído. Para o tratamento dos fluxos de ar, foram utilizados três indicadores estatísticos, Erro Absoluto Médio, Erro Quadrático Médio e Diferenças Médias, em que o melhor resultado foi encontrado para o modelo *ThermalChimney*, cujo Erro Absoluto Médio foi entre 37 e 52% em comparação aos demais, que variaram de 65 a 229%. Estes resultados preenchem uma lacuna na literatura ao indicar algumas diretrizes para simulação e, em especial, ao discutir os resultados comparativamente para avaliação da qualidade das simulações termoenergéticas em chaminés solares com o *EnergyPlus*.

Palavras-chave: Chaminé Solar; Simulação Termoenergética; *EnergyPlus*.

Abstract

Natural ventilation is one of the most important strategies for achieving thermal comfort and energy efficiency in hot and humid climates. In this context, solar chimneys are devices that promote the increase of air exchanges in the internal room, with consequent renovation of air and reduction of energy consumption of buildings. Several authors have used energy performance simulation in EnergyPlus on their studies, however, reference parameters for an annual numerical evaluation of the airflows of a solar chimney were not found in the literature. Therefore, this paper presents an investigation of three methods of simulation of solar chimneys in EnergyPlus: model ThermalChimney, Airflow Network and HorizontalOpenings. The methods were discussed in relation to the modeling and its restrictions, with identification of the advantages and disadvantages of each one. The results of the simulations were compared to a numerical model developed by CFD in a previous study, validated with a constructed prototype. To identify airflows, three statistical indicators were used, Mean Absolute Error, Mean Square Error and Mean Differences. The best result was found for the ThermalChimney model, with Average Absolute Error between 37 and 52% in comparison to the others, that floated from 65 to 229%. These results fill a gap in the literature by indicating some guidelines for simulation, and in particular, by discussing the results comparatively to evaluate the quality of an energy performance simulations in solar chimneys with EnergyPlus.

Keywords:. Solar chimney; Thermoenergic Simulation; EnergyPlus

2.1 Introdução

Em climas quentes e úmidos, a ventilação é uma das principais estratégias para alcançar conforto e eficiência energética. O resfriamento passivo, segundo Imran, Jalil e Ahmed (2015), desempenha um papel importante para proporcionar um ambiente termicamente adequado para o conforto humano. A ventilação natural pode ocorrer a partir da ação direta dos ventos, do efeito chaminé ou da combinação de ambos. A mesma, segundo Schulze e Eicker (2013), deve atender a duas funções principais: proporcionar qualidade e trocas do ar interno, sem a necessidade do uso de eletricidade e aumentar o nível de conforto em dias quentes. Entretanto, de acordo com os autores, a falta de estudos e planejamento de aberturas para a ventilação natural, assim como a pouca disponibilidade de resultados de avaliações de edifícios naturalmente ventilados, prejudicam a aplicação desse tipo de estratégia de conforto.

Uma das maneiras de aumentar a movimentação de ar em um edifício em área urbana, em que existem grandes perdas da velocidade do vento devido aos obstáculos, é por meio da impulsão térmica. Esse efeito é incrementado pela radiação solar, em que o ar aquecido ascende devido à diferença de temperatura e pressão entre o meio interno e externo (NEVES; RORIZ, 2012).

Uma das formas de promover impulsão térmica em ambientes internos é por meio de chaminés solares, dispositivos que não dependem da ação direta dos ventos. As chaminés solares possuem grande potencial para o aumento das trocas de ar, além de redução dos gastos energéticos de um edifício. Mathur, Mathur e Anupma (2006), Cavalcanti (2010), Zhai, Song e Wang (2011), Asadi et al*.* (2016) Shi et al*,* (2016) definiram chaminés solares como dispositivos que utilizam a radiação solar para promover o efeito chaminé e melhorar a ventilação natural em edificações. Estes dispositivos possuem vantagens relacionadas ao baixo custo operacional, não utilização de energia elétrica e redução nas emissões de dióxido de carbono. Uma chaminé solar é composta por um duto, instalado na fachada da edificação, que absorve a energia solar, o que, por consequência, passa por um aumento de temperatura e uma diminuição da densidade do ar no seu interior. A queda da densidade faz com que o ar no interior da cavidade se eleve e seja expulso pela abertura superior da chaminé. Maciel (2016), Shi e Zhang (2016) e Neves e Silva (2017) apontam que a relação entre a quantidade de radiação solar direta incidente no dispositivo e o consequente aumento da temperatura superficial da placa

absorvedora são fatores essenciais para aumentar as renovações de ar no interior do ambiente e a eficiência do dispositivo.

Nesse contexto, este artigo tem por objetivo avaliar diferentes métodos de simulação de uma chaminé solar no *EnergyPlus* por meio de indicadores estatísticos para os fluxos de ar.

2.2 Fundamentação

2.2.1 Brise-Chaminé-Solar

Maciel (2016) propôs um dispositivo que mescla as características de uma proteção solar convencional (brise) e uma chaminé solar, que resultou no depósito de patente do produto denominado Brise-Chaminé-Solar® (BCS). O desempenho do BCS foi analisado por meio de simulação termo energética nos programas *Ansys CFD* e *EnergyPlus* e de medições em modelo construído em escala 1:1. Por este método, Maciel (2016) comprovou que o dispositivo apresenta potencial para a renovação de ar e redução do ofuscamento em ambientes internos. A autora destaca que, para maximizar a eficiência do dispositivo quanto à ventilação natural, o mesmo deve ser conectado a apenas um pavimento.

2.2.2 Simulação termoenergética de chaminés solares no *EnergyPlus*

Devido a sua importância e complexidade, vários métodos de análise foram desenvolvidos e testados para prever o comportamento e efeitos do vento em edificações. Esses métodos têm como objetivo, além de prever o desempenho da ventilação, fornecer informações relativas a variáveis do ar no interior de um ambiente ou de um edifício, antes mesmo da sua construção ou reforma (CHEN, 2009). Entre os métodos de análise de dispositivos proporcionadores de ventilação natural, destacam-se na literatura os modelos analíticos, modelos experimentais em escala, modelos em escala 1:1 e modelos multizonas (*EnergyPlus*) e modelos *CFD* (*Computational Fluid Dynamics*).

Lee e Strand, (2009), Koronaki, (2013), Neves e Roriz (2012), Asadi et al. (2016) e Neves e Silva (2017) realizaram seus estudos em simulações no *EnergyPlus* e alcançaram resultados satisfatórios na simulação de diferentes chaminés solares.

O *EnergyPlus* é um programa computacional criado a partir dos programas *BLAST* e *DOE-2* disponibilizado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos e desenvolvido para análise energética de edificações, para simulação de cargas térmicas, temperatura, ventilação, radiação entre outros (MELO; WESTPHAL; MATOS, 2009). O programa utiliza o método de cálculo do balanço térmico, validado pelo método *Bestest* da ASHRAE Standard 140 (ASHRAE, 2011) e suas simulações termoenergéticas utilizam o modelo de rede para o para cálculo do fluxo de ar, denominado *AirflowNetwork*. De acordo com Zhang, Lam e Yao (2013), no modelo de rede adotado pelo programa, cada zona é um nó do sistema, em que as aberturas são ligações entre esses nós. Neves e Roriz (2012) apontam que este modelo se baseia na hipótese de que as temperaturas superficiais e do ar são uniformemente distribuídas dentro de uma mesma zona térmica.

Lee e Strand (2009) e Asadi et al*.* (2016) utilizaram o *EnergyPlus* para simular uma chaminé solar. Os autores adotaram testes encontrados em outros estudos sobre chaminés solares para validação dos modelos. Porém, não foram apresentados os parâmetros de comparação utilizados para estabelecer a relação entre os fluxos obtidos por simulação e as referências para a validação dos modelos.

Neves e Roriz (2012), Asadi et al*.* (2016) e Neves e Silva (2017) avaliaram os fluxos de ar de uma chaminé solar por apenas um dia. Neves e Roriz (2012) e Neves e Silva (2017) apresentaram uma comparação entre a simulação no *EnergyPlus* com modelos matemáticos e testes em um protótipo construído, estabelecendo uma diferença entre as médias diárias de fluxo de ar de 7%. Koronaki (2013), também avaliou os fluxos de ar de uma chaminé solar por um dia. O autor apresentou uma comparação entre a simulação no *EnergyPlus* com medições realizadas em um protótipo construído. As diferenças entre os fluxos simulados e medidos foram de 10%.

Os modelos numéricos de transferência de massa do *EnergyPlus*, especialmente no sentido ascendente, podem ser mais investigados com o uso de resultados experimentais e teste de diferentes opções de modelagem e simulação no próprio programa. Essas diferentes opções necessitam de ser calibradas com outro tipo de análise complementar, e suas diferenças estabelecidas por indicadores estatísticos. E, embora tenham sidos citados diversos autores que utilizaram o *EnergyPlus* para a simulação do efeito chaminé, não foram encontrados na literatura parâmetros

referenciais para uma avaliação numérica anual dos fluxos de ar de uma chaminé solar, visto que somente com a simulação anual é possível produzir uma avaliação completa da aplicabilidade desses dispositivos (LEE; STRAND 2009). Nos estudos supracitados, o método de modelagem adotado no *EnergyPlus* para a simulação de chaminés solares é descrito de maneira simplificada, e não foram apresentadas as grandezas consideradas aceitáveis para a simulação do efeito chaminé em uma simulação anual.

2.3 Métodos

O método utilizado nesse artigo compara diferentes simulações termoenergéticas com o software *EnergyPlus*, tendo como referência o dispositivo Brise-Chaminé-Solar (BCS) desenvolvido por Maciel (2016). Os fluxos de ar obtidos pelas simulações são comparados por meio de indicadores estatísticos.

2.3.1 Caracterização do Brise-Chaminé-Solar

O BCS possui uma geometria retangular com dimensões internas de 0,90m por 0,20m, de acordo com a Figura 3 e 4. Segundo Maciel (2016) o dispositivo tem como características construtivas:

> (...) uma placa vertical composta de múltiplas camadas: uma superfície envidraçada, uma cavidade por onde o ar flui e uma placa absorvedora. A placa absorvedora é composta por uma chapa de aço na cor preta (alta absortância térmica), uma camada de ar para isolamento térmico e outra chapa de aço para fechamento. A face externa da chapa de fechamento, voltada para a abertura do ambiente interno, tem cor de baixa absortância solar e da luz visível e tem a função de refletir a radiação externa, bem como bloquear a radiação térmica emitida pela placa absorvedora. (MACIEL, 2016, p. 59)

O protótipo foi instalado no edifício anexo do Departamento de Arquitetura e Urbanismo (DAU), localizado na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais. A cidade está localizada na latitude 20,77° sul e longitude 42,87° o este e a 712,2 m acima do nível do mar.

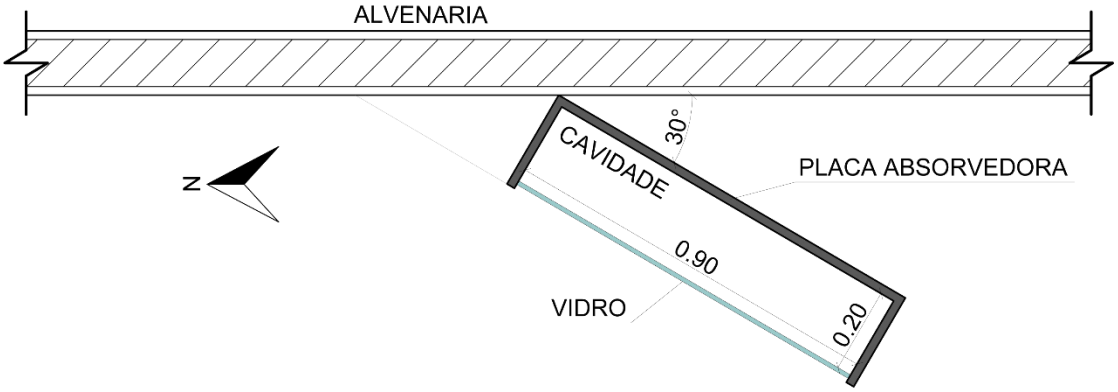

Figura 3 Seção horizontal do BCS. Dimensões e inclinação com a parede
Fonte: Adaptado de MACIEL, 2016

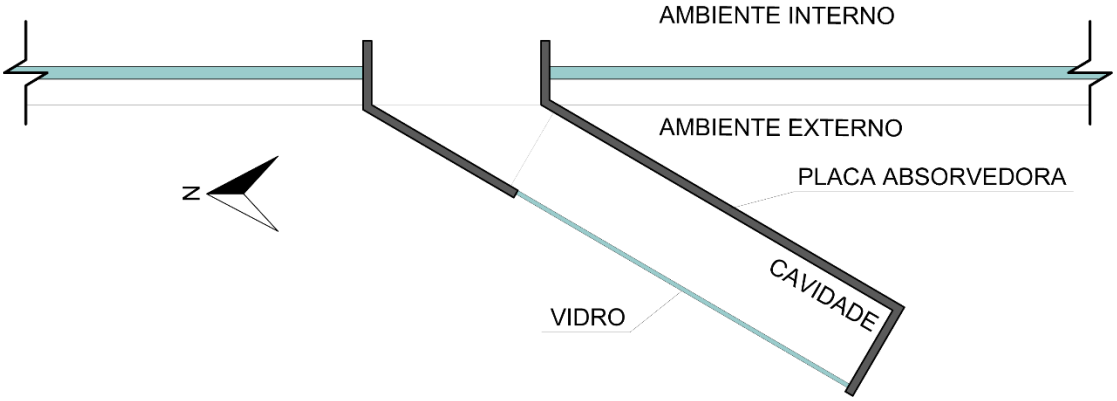

Figura 4 Seção horizontal do BCS. Conexão entre o BCS e o ambiente interno
Fonte: Adaptado de MACIEL, 2016

2.3.2 Fluxos de ar referenciais

As equações de Maciel (2016) para estimativa do fluxo de ar foram obtidas por simulação no *software Ansys CFD* e validadas com medições no protótipo mostrado. Para a simulação *CFD*, o dispositivo foi acoplado em dois laboratórios: o primeiro, um ambiente térreo, com área de 107,8m² e volume de 339,6 m³; o segundo, localizado no pavimento superior, com área de 91,3 m² e volume de 287,6m³. O BCS foi instalado na fachada oeste e encontra-se conectado aos dois ambientes simultaneamente, (Figuras 5, 6 e 7).

Figura 5 Brise-Chaminé-Solar. Vista geral

Fonte: Acervo LATECAE, 2016

Figura 6 Brise-Chaminé-Solar. Superfície refletora

Fonte: Acervo LATECAE, 2016

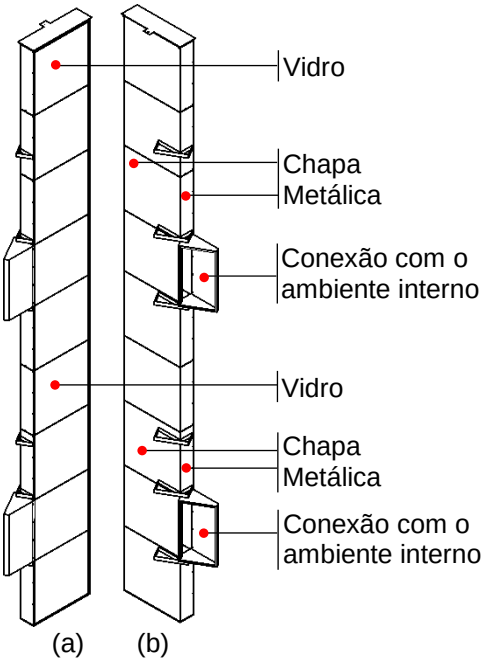

Figura 7 Perspectiva isométrica do Brise-Chaminé-Solar. (a) Frente (b) Fundos

Fonte: Adaptado de BRISE-CHAMINÉ-SOLAR®, 2016

Maciel (2016) desenvolveu três equações apresentadas na Figura 8. As equações foram obtidas por meio da simulação *CFD* para três alturas: 2,85m representando um pavimento (ALT1), 5,85m, dois pavimentos (ALT2) e 8,85m, três pavimentos (ALT3). Além disso, para cada altura, cinco condições de temperatura superficial da placa absorvedora foram consideradas (25℃, 45℃, 65℃, 85℃ e 105℃).

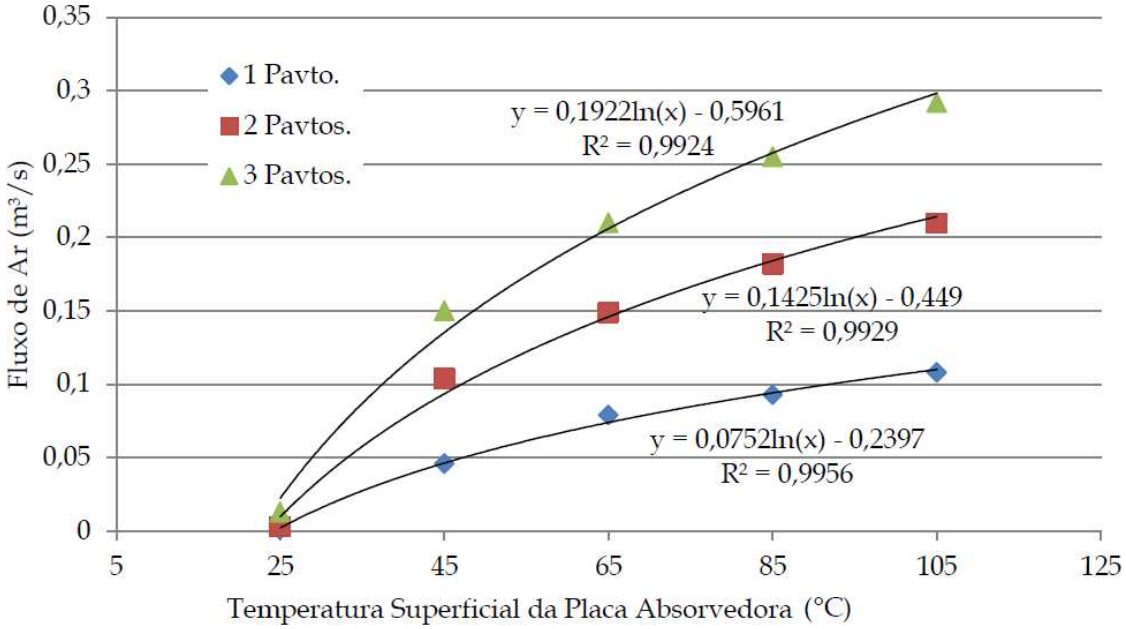

Figura 8 Equações do fluxo de ar do Brise-Chaminé-Solar
Fonte: MACIEL, 2016

2.3.3 Simulação *EnergyPlus*

O BCS foi simulado no *EnergyPlus*, versão 8.4. A simulação foi feita para a cidade de Viçosa-MG, zona bioclimática 3 (ZB3) (ABNT, 2005), com o arquivo climático TMY desenvolvido por Guimarães e Carlo (2011). A simulação levou em consideração todas as horas do ano e desconsiderou cargas internas de pessoas, iluminação, equipamentos e condicionamento artificial, conforme condições de contorno estabelecidas por Maciel (2016) para simulações em *CFD*.

O dispositivo foi modelado de três formas distintas: (1) utilizando o modelo cálculo de chaminé térmica do *EnergyPlus, ThermalChimney*; (2) utilizando zonas térmicas independentes por pavimento para compor o BCS, conectadas entre si; (3) utilizando o método de zonas térmicas combinadas, ou *HorizontalOpening*. Nos três métodos de modelagem, o BCS foi modelado para duas alturas, ALT1 e ALT2. A opção equivalente a ALT3 não foi simulada, pois o protótipo de Maciel (2016) possui altura de um e dois pavimentos, logo a equação para ALT3 não foi validada com medições. As propriedades dos materiais dos ambientes em que o dispositivo está acoplado, assim como as obstruções do entorno, orientação solar e materiais do BCS são idênticos aos especificados por Maciel (2016) (Figuras 9 e 10).

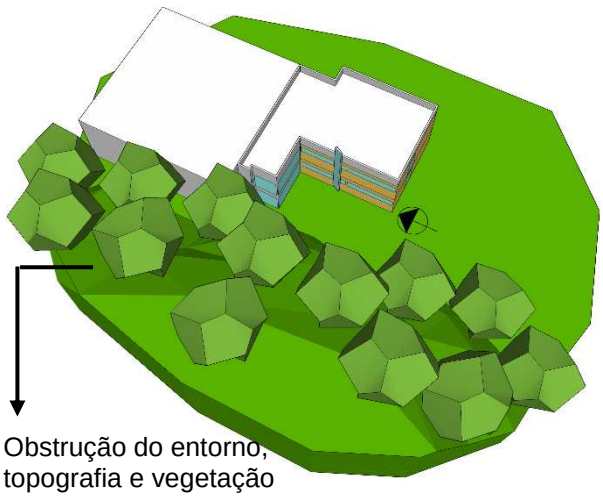

Figura 9 Modelo com entorno e orientação

Fonte: Elaborado pelo autor

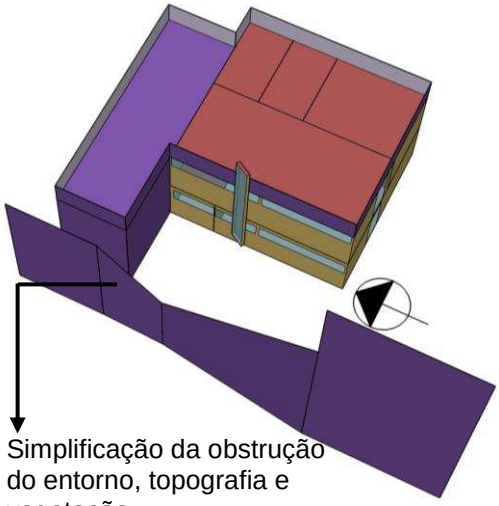

Figura 10 Geometria simulada no *EnergyPlus*

Fonte: Adaptado de MACIEL, 2016

2.3.3.1 Caso Base

Foi denominado Caso Base (CB) o fluxo de ar resultante da aplicação das equações de Maciel (2016) para ALT1 e ALT2 a partir da temperatura horária da placa absorvedora, esta última determinada por simulação no *EnergyPlus* para o ano completo.

2.3.3.2 Brise-Chaminé-Solar modelado como chaminé térmica *(ThermalChimney)*

O BCS foi modelado como uma chaminé térmica utilizando o modelo de cálculo *ThermalChimney* (Figura 11). O parâmetro de saída desse modelo no *EnergyPlus* (2015) é baseado no aumento da taxa de ventilação natural causada pela presença de uma chaminé térmica, conforme mostra a Equação 3. Para determinar o aumento da ventilação, a temperatura de descarga do ar no interior da chaminé é calculada com base nas informações sobre a temperatura da placa absorvedora, temperatura da cobertura de vidro e distribuição vertical da temperatura do ar no interior da chaminé. O algoritmo utilizado pelo programa para o balanço energético através da temperatura da placa absorvedora e cobertura de vidro são semelhantes aos utilizados para o cálculo da parede *Trombe*. Porém, a distribuição vertical da temperatura do ar e a temperatura de descarga são calculadas usando o algoritmo de chaminé térmica.

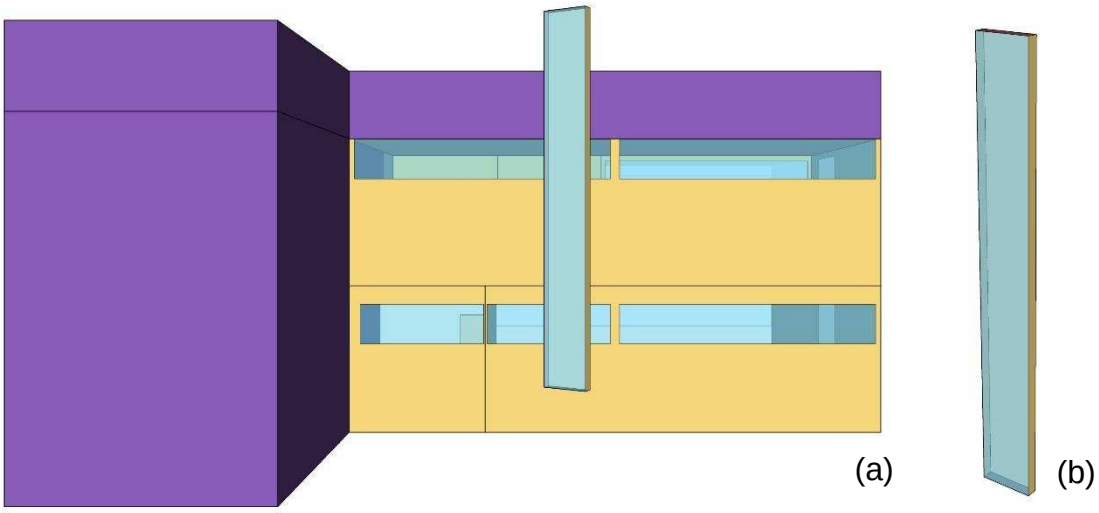

Figura 11 Modelo em que foi simulado no *EnergyPlus* o BCS como *ThermalChimney*. (a) Edificação (b) Modelagem do BSC
Fonte: Elaborado pelo autor

$$Q = C_d A_o \sqrt{\frac{2\left(\frac{T_{fo} - T_r}{T_r}\right) gL}{(1 + A_r)^2}}$$

$$A_r = A_o / A_i$$

(Eq. 3)

Onde: Q – Vazão volumétrica de ar causado pelo efeito chaminé [m³/s]; Ai - Área da seção transversal da entrada do canal de ar [m²]; Ao - Área da seção transversal da saída do canal de ar [m²]; Cd – Coeficiente de descarga; g – Aceleração da gravidade [9.8 m/s²]; L – Altura total da chaminé Solar [m]; Tfo – Temperatura do ar na saída da chaminé solar [K]; Tr – Temperatura do ambiente [K]

Devido ao fato do modelo de chaminé térmica não se integrar com o modelo de rede de ventilação natural, foi realizada uma simulação prévia com as aberturas fechadas, com o modelo de rede ativado e sem a chaminé térmica. A partir dessa simulação, obteve-se a infiltração horária, que foi inserida em uma nova simulação com modelo de rede desativado e a chaminé térmica ativada.

2.3.3.3 Brise-Chaminé-Solar modelado como zonas térmicas conectadas

O BCS foi modelado como zonas térmicas independentes conforme o pavimento e conectadas entre si por meio de esquadrias constantemente abertas (Figura 12). Esse modelo de simulação não considera o cálculo do efeito chaminé, mas a diferença de pressão, logo, é esperado que seus resultados se distanciassem do CB. Para esse modelo foram desenvolvidas duas alternativas adicionais: (1) com as janelas 100% do tempo abertas e (2) com as janelas 100% do tempo fechadas.

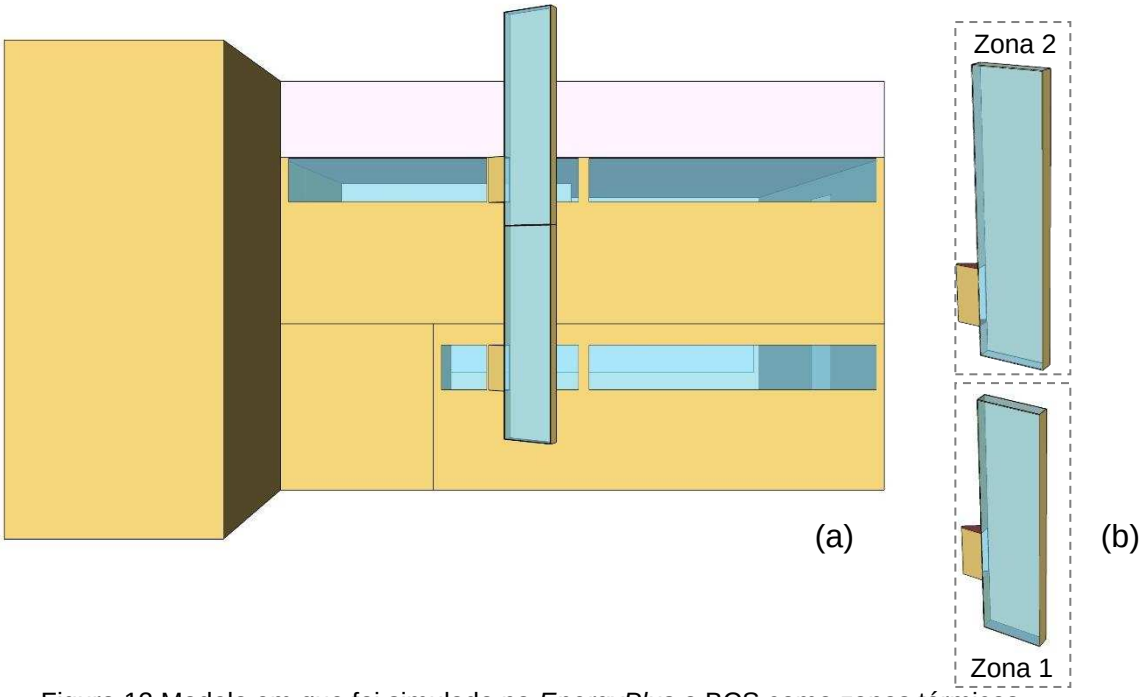

Figura 12 Modelo em que foi simulado no *EnergyPlus* o BCS como zonas térmicas conectadas. (a) Edificação (b) Modelagem do BCS
Fonte: Elaborado pelo autor

2.3.3.4 Brise-Chaminé-Solar modelado como zonas combinadas *(HorizontalOpening)*

O modelo de zonas térmicas combinadas é utilizado para simular fluxos de ar em grandes aberturas verticais. O componente de abertura assume que a diferença de pressão através da abertura é função da altura, e esta, é resultado da diferença entre a abertura mais baixa e a mais alta. Logo, o componente de abertura horizontal é indicado para simular fluxos de ar em grandes aberturas horizontais com a possibilidade de fluxo bidirecional, combinando fluxos de ar forçados e de flutuação em conjunto. Para utilização desse modelo de simulação para aberturas horizontais, a diferença de pressão em toda a abertura, assim como a densidade do ar, permanece constantes, de modo que é possível apenas calcular o fluxo unidirecional (ENERGYPLUS, 2015).

A modelagem consiste, basicamente, em duas zonas em que o teto da Zona 1 está acima da Zona 2, o ar flui do interior do ambiente para a Zona 1, da Zona 1 para a Zona 2, por meio de uma abertura que as conecta, e da Zona 2 para o exterior (Figura 13).

Este modelo é válido somente com duas zonas sobrepostas verticalmente, logo não foi possível simular o fluxo de ar do BCS para ALT1.

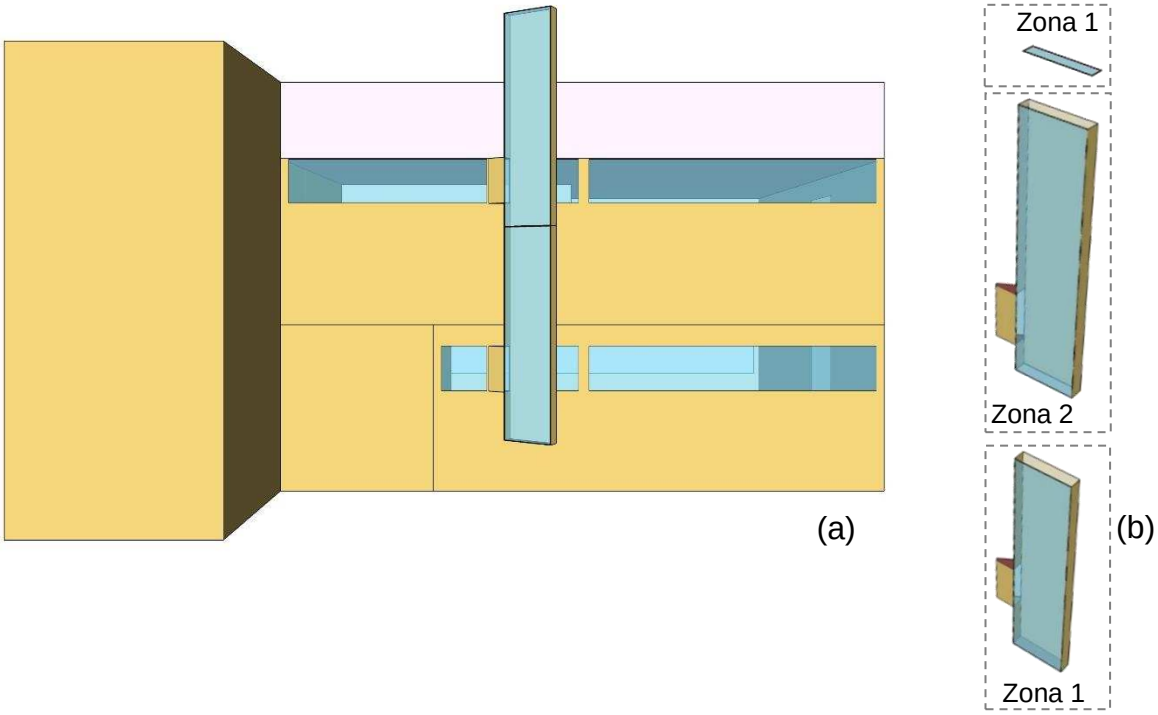

Figura 13 Modelo em que foi simulado no *EnergyPlus* o BCS como *HorizontalOpening* (a) Edificação (b) Modelagem do BCS
Fonte: Elaborado pelo autor

2.3.4 Indicadores estatísticos utilizados na análise dos resultados

A vazão de ar simulada com o *EnergyPlus* para o BCS nos três métodos apresentados foi comparada com o resultado do fluxo de ar obtido no CB. Para determinar a relação entre fluxos de ar obtidos nas simulações e o CB, foi utilizado o Erro Absoluto Médio (Equação 4) e o Erro Quadrático Médio (Equação 5) e a Diferença Horária Média (Equação 6).

$$\mathrm{EAM} = \sqrt{\frac{\sum_{\mathrm{I}}^{\mathrm{N}} \left(\frac{\mathrm{y_i} - \mathrm{x_i}}{\mathrm{x_i}}\right)^2}{\mathrm{N}}}\,100$$

(Eq. 4)

Onde: EAM: Erro Absoluto Médio; yi= Dados obtidos por simulação; xi= Dados obtidos a partir do caso base; N= número de valores analisados, horas do ano.

$$EQM\ (\theta') = (\theta' - \theta)^2 / N$$

(Eq. 5)

Onde: EQM: Erro Quadrático Médio; θ'= Valor do estimador (Caso Base); θ = Valor do parâmetro escalar (Simulações); N = Número de Casos;

$$D(\%) = \frac{\sum_i^N \frac{F_{cb} - F_{ca}}{F_{cb}}}{N}$$

(Eq. 6)

Onde: D: Média das Diferenças horárias (%); Fca= Fluxo do caso analisado (m³/s); Fcb= Fluxo do caso base (m³/s); N = número de valores analisados, horas do ano, excluindo fluxos negativos.

A análise dos indicadores foi complementada com informações gráficas para visualização dos resultados, gráfico *BoxPlot* e de dispersão, o que inclui a obtenção do coeficiente de determinação para verificar a correlação entre dados referenciais.

Em todos os métodos de análise, apenas os fluxos de ar positivos (fluxos ascendentes) foram selecionados, pois as equações de Maciel (2016) iniciavam com a temperatura de 25° C na placa absorvedora, com a obtenção restrita de valores positivos de fluxo. Logo, temperaturas superficiais inferiores a 25ºC foram descartadas para evitar fluxos de ar negativos (fluxos descendentes).

2.4 Análise e discussão dos resultados

2.4.1 Caso base

A partir da simulação, observou-se que a temperatura da placa absorvedora variou de 5,4ºC a 78,3ºC. Os fluxos resultantes da aplicação da equação de Maciel (2016) sobre esses valores apresentaram alta variação. Foram observados resultados para ALT1 mínimo de -0,11 m³/s e máximo de 0,09 m³/s, e para ALT2 mínimo de -0,21 m³/s e máximo de 0,17 m³/s. Porém, como mencionado, os valores de fluxo negativo foram descartados na análise dos resultados.

2.4.2 Casos analisados

Como resultado da simulação do Brise-Chaminé-Solar (BCS) modelado como chaminé térmica, pôde ser observado que houve aumento do fluxo com o aumento da altura da chaminé. Entretanto, não houve fluxos negativos, o que indica que o programa não simulou fluxos descendentes, do meio externo para o interior da chaminé (Tabela 2). Esse resultado pode ser explicado, pois o conceito fundamental de uma chaminé solar é utilizar a radiação solar para proporcionar fluxo de ar ascendente. Portanto, se a temperatura do ar de descarga na saída chaminé for menor que a temperatura do ar ambiente, o *EnergyPlus* automaticamente desliga a chaminé solar, uma vez que a temperatura da saída deve ser maior do que a temperatura ambiente para causar fluxo de ar ascendente (LEE; STRAND, 2009). O menor Erro Absoluto Médio (EAM) e Erro Quadrático Médio (EQM) foram obtidos para ALT1 desse modelo, 37,35% e 0,0004 respectivamente.

Embora o destaque seja para o modelo de chaminé térmica, os fluxos obtidos como zonas combinadas apresentou valores na mesma grandeza aos fluxos do modelo de chaminé térmica (Tabela 2), o que indica uma boa coerência entre as simulações. Entretanto, a grande limitação desse método é o fato do número de zonas ser restrito a duas, o que impossibilitou sua aplicação para a simulação da ALT1.

Os demais modelos apresentaram EAMs consideravelmente elevados, o que é coerente, visto que o dispositivo modelado como zonas térmicas não descreve o efeito chaminé, apenas a diferença de pressão entre as zonas. Os valores de EQM apresentaram pequenas diferenças entre todos os casos analisados. Entretanto, foi possível notar valores maiores para os dispositivos modelados como zona térmica, o que mostra coerência entre os métodos de análise e simulação.

O valor positivo ou negativo da diferença horária média representa que o *EnergyPlus* subestimou o fluxo de ar em relação ao CB quando positivo e superestimou quando negativo. Quando consideradas ALT1 e ALT2, a menor diferença horária ocorreu entre o dispositivo modelado como chaminé térmica e o CB. Entretanto, a diferença horária média entre o “BCS Modelado como Zonas, janelas fechadas” foi menor que do modelo “BCS Modelado como Chaminé Térmica ALT1”. Logo, embora apresentado resultados parciais coerentes, ocorreram limitações na comparação entre fluxos de ar de maneira isolada, restringindo a utilização desse indicador à identificação de que o

programa subestima ou superestima os fluxos de ar do CB comparado ao modelo testado.

Tabela 2 Indicadores estatísticos aplicados aos casos estudados

	BCS Modelado como Chaminé Térmica		BCS Modelado como Zonas Térmicas				BCS Modelado como Zonas Combinadas	
			Janelas Fechadas		Janelas Abertas			
	ALT1	**ALT2**	**ALT1**	**ALT2**	**ALT1**	**ALT2**	**ALT1**	**ALT2**
EAM (%)	37,35	51,80	174,25	229,05	194,25	139,15	-	65,10
EQM	0,0004	0,0014	0,0017	0,0049	0,0020	0,0019	-	0,0017
Diferença (%)	164,9	-72,5	87,5	-352,7	- 756,0	-352,7	-	-102,8
Fluxo Máximo (m^3/s)	0,048	0,082	0,003	0,019	0,153	0,172	-	0,079
Fluxo Mínimo (m^3/s)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-	0,000

Fonte: Elaborado pelo autor

A análise do gráfico *BoxPlot* (Figura 14), mostrou maior semelhança entre os fluxos de ar do CB e do dispositivo modelado como zonas térmicas com as janelas abertas. Entretanto, sabe-se que ela não é correta, já que esse método apresentou resultados mais divergentes de EAM e das diferenças horárias médias (Tabela 2). Logo, uma análise comparativa restrita a gráficos *BoxPlot* pode mascarar os resultados de fluxo de ar, e eventualmente, levar a conclusões equivocadas.

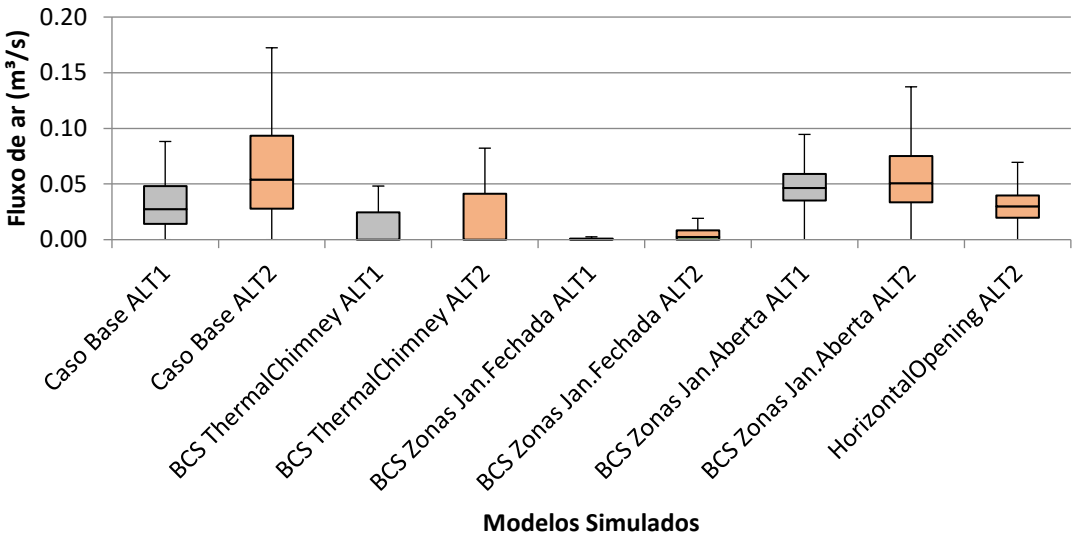

Figura 14 Fluxo de ar horário em um ano completo no Brise-Chaminé-Solar
Fonte: Elaborado pelo autor

Nas Figuras 15 e 16 mostram-se as melhores correlações dos fluxos para o modelo de chaminé térmica, identificado em vermelho, cujo coeficiente de determinação para uma equação linear é 0,792 e 0,791, respectivamente. Pôde ser observado que este é o único modelo que apresenta alguma correlação com o caso base.

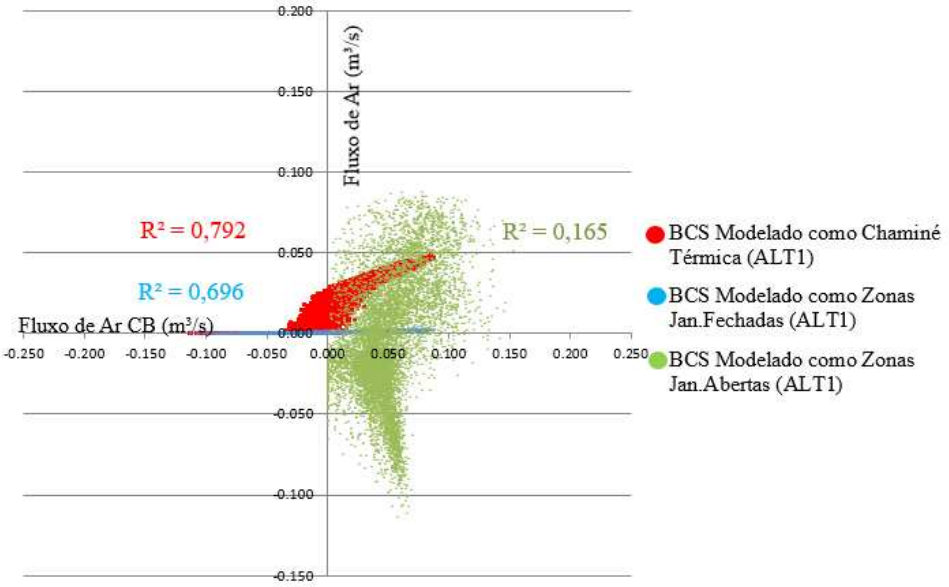

Figura 15 Fluxos de ar simulados comparados ao Caso Base, para ALT 1
Fonte: Elaborado pelo autor

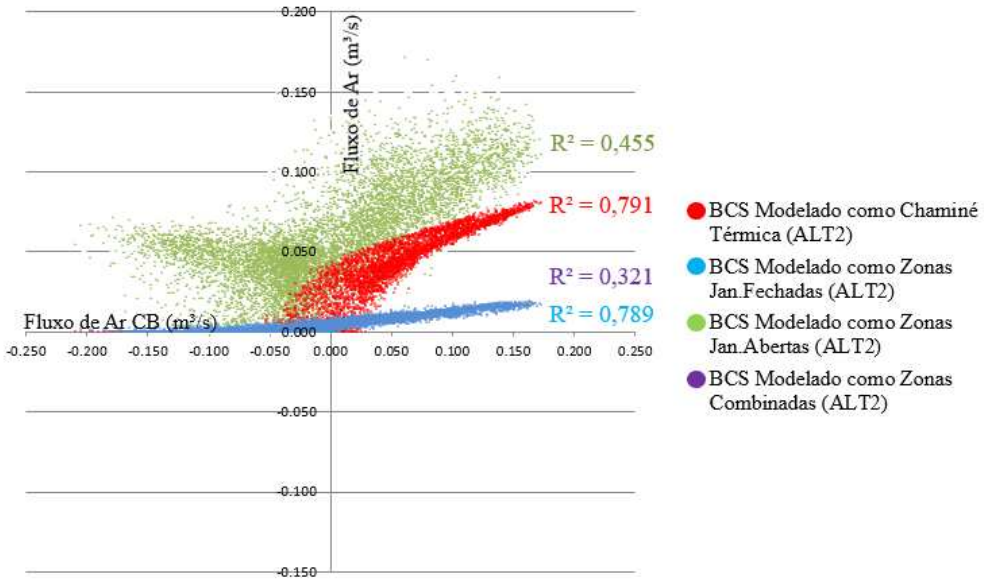

Figura 16 Fluxos de ar simulados comparados ao Caso Base, para ALT 2
Fonte: Elaborado pelo autor

O modelo de janelas fechadas, identificado em azul, apresentou coeficiente de determinação de 0,696 e 0,789. A explicação para os elevados coeficientes de

determinação é pelo fato dos fluxos de ar se aproximarem de zero. O modelo de janelas abertas, identificada em verde e o modelo zonas térmicas combinadas, identificado em roxo, não apresentaram coerência entre os dados, com dispersão elevada e coeficientes de determinação de 0,165 (ALT1) e 0,455 (ALT2) e 0,321 (ALT2).

A análise dos gráficos de dispersão contribuiu para o entendimento qualitativo do tratamento dos dados, tanto pela análise visual quanto pelo coeficiente de determinação, embora este último não indique semelhanças entre os dados, mas o ajuste entre os modelos. Em contraste, a análise com *BoxPlot* foi insuficiente para descrever o resultado encontrado, o que poderia induzir a uma interpretação equivocada.

Apesar dos fluxos simulados mais próximos ao caso base apresentarem diferenças entre 37 e 52%, valores relativamente elevados se comparados aos encontrados na literatura, deve-se destacar algumas limitações das simulações. Na simulação foram utilizados materiais idênticos aos do protótipo construído, entretanto, suas propriedades foram baseadas na literatura. O coeficiente de descarga também foi baseado na literatura. Além disso, variáveis como a radiação solar, intensidade e direção dos ventos não foram ajustadas de acordo com as condições de medição e simulação em *CFD* de Maciel (2016), uma vez que a simulação foi realizada para todas as horas do ano com um arquivo climático representativo do local. Lee e Strand (2009), ao comparar a eficiência da mesma chaminé solar em duas simulações distintas, um dia e um ano, identificaram redução da eficiência do dispositivo de até 49% na simulação anual se comparada a de um único dia, justamente pela maior variabilidade meteorológica da primeira condição. Diante das limitações de calibração das variáveis ambientais em uma simulação anual, é recomendado que, sempre que possível, sejam realizadas o maior número de ajustes de variáveis ambientais e parâmetros construtivos para a obtenção de diferenças entre medição e simulação mais baixos, como apresentados por Neves e Roriz (2012).

Portanto, dentre os modelos disponíveis investigados no *EnergyPlus*, o modelo de chaminé térmica é o mais indicado para a simulação do BCS. Além disso, a comparação com os resultados de Maciel (2016) o validou para outros tipos de simulações, por exemplo, com variações de parâmetros construtivos.

2.5 Conclusões

O presente artigo teve como objetivo comparar diferentes métodos de simulação de chaminés solares no *EnergyPlus* e investigar indicadores estatísticos para a comparação de fluxos de ar anuais resultantes desses dispositivos. Os resultados obtidos a partir da simulação com o *EnergyPlus* comprovaram que o modelo de cálculo *ThermalChimney* é válido para simular os efeitos da ventilação natural em chaminés solares.

O tratamento estatístico com o Erro Absoluto Médio (EAM) e Erro Quadrático Médio (EQM) apresentaram resultados coerentes entre o CB e os demais modelos analisados. Considerou-se EAMs entre 37 e 52% e EQMs entre 0,0005 e 0,0015 como máximos aceitáveis para determinar a semelhança entre fluxos de ar em simulações anuais. Porém, mais estudos são necessários para confirmar estes limites, o que inclui outros métodos ou modelos numéricos de simulação.

Portanto, para simulação termoenergética de uma chaminé solar no *EnergyPlus* recomenda-se a utilização do modelo de cálculo de chaminé térmica (*ThermalChimney*) e para a análise estatística relacionada a fluxos de ar, recomenda-se a utilização do EAM, EQM e análise da dispersão dos dados. Destaca-se a combinação entre as análises citadas para o melhor entendimento dos fenômenos ligados ao fluxo de ar em chaminés solares, visto que a análise baseada em mais de um indicador contribuiu para aumentar a confiabilidade do tratamento dos dados.

2.6 Referências Bibliográficas

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 140**. Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs. Atlanta, 2011.

ASADI, S.; FAKHARI, M.; FAYAZ, R.; MAHDAVIPARSA, A. The effect of solar chimney layout on ventilation rate in buildings. **Energy and Buildings**. v.123, p.71-78, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS - ABNT**. NBR 15220-3. Desempenho térmico de edificações - parte 3: Zoneamento bioclimáticos brasileiros e diretrizes construtivas para habitação unifamiliar de interesse social.** Rio de Janeiro, 2005.

CAVALCANTI, F. **Chaminé solar como alternativa para incrementar a ventilação natural em espaços internos.** Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

CHEN, Q. Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent application. **Building and Environment**. v.44, p.848–858, 2009.

ENERGYPLUS**. EnergyPlus documentation Engineering Reference:** the reference to EnergyPlus calculation**.** US Department of Energy, 2015.

GUIMARAES, I.; CARLO, J. Caracterização bioclimática da cidade de Viçosa-MG. In: XI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...** Armação de Búzios: ENCAC, 2011.

IMRAN, A. A.; JALIL J. M.; AHMED S. T. Induced flow for ventilation and cooling by a solar chimney. **Renewable Energy**. v.78, p.236-244, 2015.

KORONAKI, P. The impact of configuration and orientation of solar thermosyphon systems on night ventilation and fan energy savings. **Energy and Buildings**. v.57, p.119-131, 2013.

LEE, K.; STRAND, R. Enhancement of natural ventilation in buildings using a thermal chimney. **Energy and Buildings**. v.41, p.615-621, 2009.

MACIEL, L. **Desenvolvimento de dispositivo de proteção solar com ênfase na ventilação natural: Um método de avaliação baseado em CFD.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

MATHUR, J.; MATHUR, S.; ANUPMA. Summer-performance of inclined roof solar chimney of natural ventilation**. Energy and Buildings.** v.38, p.1156-1163, 2006.

MELO, A. P.; WESTPHAL, F.S.; MATOS, M. **Apostila do Curso Básico do Programa Energyplus**. Laboratório de Eficiência energética em Edificações - Labeee. Florianópolis, 2009.

NEVES, L.; RORIZ, M. Procedimentos estimativos do potencial de uso de chaminés solares para promover a ventilação natural em edificações de baixa altura. **Ambiente Construído**. v.2, p.177-192, 2012.

NEVES, L.; SILVA, S. Análise paramétrica de chaminés solares visando à otimização de desempenho em climas típicos do território brasileiro. **Ambiente Construído**. v.17, p.163-182, 2017.

SCHULZE, T; EICKER, U. Controlled natural ventilation for energy efficient buildings. **Energy and Buildings**. v.56, p.221-232, 2013.

SHI, L.; ZHANG, G. An empirical model to predict the performance of typical solar chimneys considering both room and cavity configurations. **Building and Environment**. v.103, p.250-261, 2016.

SHI, L.; ZHANG, G.; CHENG, X.; GUO, Y.; WANG, J.; CHEW, M. Developing an empirical model for roof solar chimney based on experimental data from various test rigs. **Building and Environment**. v.110, p.115-128, 2016.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA e FUNDAÇÃO DE AMPARO A PESQUISA DE MINAS GERAIS. Maciel, L.; Villar, R.; Carlo, J.; Tibiriçá, A. C. G.; Tibiriçá, A. M. B. **Brise-Chaminé-Solar**. BR1020160032237. 2016, Brasil.

ZHAI, X.; SONG, Z.; WANG, R. A review for the applications of solar chimneys in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v.15, p.3757-3667, 2011.

ZHANG, R.; LAM, K.; YAO, S. Coupled EnergyPlus and computational fluid dynamics simulation for natural ventilation. **Building and Environment**. v.68, p.100-113, 2013.

CAPÍTULO 3: ANÁLISE DO DESEMPENHO DE AMBIENTES COM CHAMINÉS SOLARES

Resumo

As condições climáticas dos ambientes internos afetam o conforto térmico e os processos psicológicos, e podem influenciar a produtividade e o desempenho do usuário. Em climas quentes, como é o caso de grande parte do território brasileiro, o correto uso de estratégias relacionadas à ventilação natural se torna especialmente necessário. Nesse contexto, os dispositivos que proporcionam melhorias na ventilação natural, como é o caso das chaminés solares, possuem benefícios relacionados ao potencial de aumentar as renovações de ar e o conforto térmico em edificações. Apesar das vantagens citadas, foram encontrados poucos estudos com utilização de chaminés solares no clima brasileiro e, portanto, este artigo tem como objetivo investigar o potencial de um modelo especifico de chaminé solar, o Brise-Chaminé-Solar® (BCS), em proporcionar conforto térmico e renovação de ar em salas de aula e escritórios. Para a avaliação, foi utilizada simulação termoenergética no *EnergyPlus* e, em uma primeira etapa, foram realizadas variações de parâmetros como altura e número de dispositivos instalados por ambiente, além da orientação da fachada. A seleção dos melhores parâmetros se mostrou importante fator de decisão sobre a aplicação de chaminés solares, pois apresentou variação de até 80% nas horas em conforto para os casos analisados. A partir da seleção dos melhores parâmetros, o dispositivo foi simulado para cidades nas oito zonas bioclimáticas brasileiras e apresentou aumento médio do número de horas em conforto em 28% nas salas de aula e 21% nos escritórios. Além desse resultado, o dispositivo proporcionou taxas de renovação de ar mensal médias entre 2,4 e 13,5 trocas por hora. A maior quantidade de horas em conforto foi obtida nas cidades da ZB1, ZB2, ZB3, ZB4 e ZB5 o que torna essas zonas bioclimáticas potencialmente favoráveis para a utilização do BCS.

Palavras Chave: Chaminé solar; EnergyPlus; Conforto; Renovação de ar

Abstract

Indoor climate conditions affect thermal comfort and psychological processes and can influence user's productivity and performance. In hot and humid climates, as it is in most of the Brazilian territory, the correct use of strategies related to natural ventilation becomes mostly necessary. Devices that provide improvements in natural ventilation, such as solar chimneys, provide benefits related to the increase of air renovation and of thermal comfort in buildings. Despite the mentioned advantages, few studies about the use of solar chimneys in Brazilian climates have been found. Therefore, this article aims to investigate the potential of a specific model of solar chimney, the Brise-Chaminé-Solar®, in providing thermal comfort and air renovation in classrooms and office spaces. For the evaluation, an energy performance simulation in EnergyPlus was used. In a first step, variations of parameters such as height and number of installed devices per room, besides the orientation of the façade, were simulated. The selection of the most suitable parameters proved to be an important decision factor for using of solar chimneys, since it presented a variation of up to 80% in comfort hours for the analyzed cases. Based on the selection of the most suitable parameters, the device was simulated for cities located into one of the eight existing Brazilian Bioclimatic Zones and presented an average increase of the number of hours in comfort of 28% in classrooms and 21% in offices. In addition, the device provided average monthly air changes rates between 2,4 and 13,5 changes per hour. The highest number of hours in thermal comfort was obtained in the cities of ZB1, ZB2, ZB3, ZB4 e ZB5, which means that the mentioned bioclimatic zones are potentially favorable for the use of BCS.

Keywords: Solar chimney; EnergyPlus; Comfort; Air renewal

3.1 Introdução

A busca por edificações mais sustentáveis e eficientes energeticamente tem crescido desde as primeiras crises do petróleo, na década de 1970. A partir desse período, questões como o conforto térmico dos usuários, uso dos recursos naturais e adaptabilidade ao clima começaram a ser mais estudadas, discutidas e revisadas por profissionais em busca de satisfazer a essa crescente demanda de mercado.

O crescente consumo de energia, tanto no setor residencial quanto no setor comercial, tem despertado grande preocupação, principalmente em países tropicais, em que as temperaturas elevadas e a alta taxa de umidade induzem ao uso de ventilação mecânica e de condicionamento artificial (AFLAKI et al., 2015). Segundo Jonsson e Roos (2010), os edifícios são responsáveis pelo dispêndio de 30% a 40% de toda a energia primária consumida no mundo. No Brasil, 51% da energia gerada é consumida pelos setores residencial, comercial e público (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2017).

As pesquisas relacionadas à eficiência energética têm sido crescentemente associadas ao conforto térmico (STRAUB et al., 2017). O conforto térmico é definido pela ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013) como um estado mental do ser humano que expressa a satisfação com as condições térmicas ambientais. A avaliação do nível de conforto é determinada por uma combinação de variáveis, como o tipo de atividade que o usuário realiza, a temperatura do ar ambiente e das superfícies circundantes, além da velocidade e da umidade relativa do ar (DE DEAR et al., 2013).

Nesse contexto, as estratégias passivas são soluções arquitetônicas que possibilitam o aquecimento e/ou o resfriamento de ambientes sem o consumo de energia elétrica e, por consequência, apresentam potencial para a redução do consumo energético em edificações e o aumento das horas em conforto térmico. Como exemplos de estratégias passivas, podem ser citados o aproveitamento da ventilação e iluminação natural, aquecimento solar passivo, sombreamento e inércia térmica (MICHAILIDIS et al., 2015) entre outras.

Em climas quentes, como é grande parte do território brasileiro, o correto uso de estratégias relacionadas à ventilação natural se torna especialmente interessante. As chaminés solares são dispositivos que aumentam a ventilação natural e tem

despertado interesse de projetistas devido a sua longa vida útil e economia para edificações (SHI et al*.,* 2016).

3.1.1 Chaminés solares

Zhai, Song e Wang (2011), Asadi et al*.* (2016) e Hosien e Selim (2017), definem as chaminés solares como um sistema de termossifão solar que melhora a qualidade interna do ar aumentando as taxas de ventilação natural de ambientes por meio do efeito chaminé. As chaminés solares são semelhantes às chaminés convencionais, exceto pelo princípio de captar a radiação solar para aumentar o efeito chaminé por meio de uma camada envidraçada voltada para a orientação que permita maior incidência de radiação. Essa radiação é transmitida pelo vidro, é absorvida pela superfície oposta e aquece o ar no interior da cavidade. O ar aquecido se expande, diminui de densidade e devido ao efeito chaminé ascende ao topo da chaminé. Esse movimento substitui o ar no interior do ambiente em que o dispositivo está instalado, aumentando o efeito da ventilação natural (ASADI et al*.*, 2016). Por aumentar as renovações de ar, esses dispositivos são especialmente interessantes para os climas tropicais, quentes, úmidos e sem vento, (MATHUR et al., 2006; TAN; WONG, 2014).

Embora a chaminé solar tenha sido apresentada como um dispositivo indutor da ventilação natural, Tan e Wong (2014) e Neves e Silva (2017) defendem que, as trocas de ar por esquadrias mantidas abertas excedem os fluxos de uma chaminé solar. Portanto, esses dispositivos são justificáveis em edificações em que não é possível ou desejável a abertura de janelas, como em climas hostis e centros urbanos com altos índices de poluição. Nessas situações as chaminés solares podem fornecer as trocas de ar necessárias para garantir a salubridade do ambiente mesmo em locais sem vento. Além disso, esses dispositivos não geram ruídos, possuem um baixo custo operacional e não necessitarem de energia elétrica (ASADI et al*.*, 2016).

Diversos estudos sobre chaminés solares investigaram sua eficiência e aplicabilidade. Lee e Strand (2009) realizaram um estudo utilizando *EnergyPlus* para quantificar o desempenho de uma chaminé solar ao comparar a eficiência da mesma chaminé solar em duas simulações distintas, pelo período de um dia e um ano. Os autores identificaram uma redução da eficiência do dispositivo em até 49% na simulação anual

se comparada a de um único dia, logo a importância desse tipo de simulação para o entendimento real da aplicabilidade das chaminés solares.

Zhai, Song e Wang (2011) apresentaram uma visão geral das pesquisas com chaminés solares nas décadas 1990 a 2010 abordando os principais métodos de avaliação, com foco em modelos teóricos, matemáticos e simulação de configurações de chaminés solares, como chaminés inclinadas, verticais e parede *Trombe*, além de sistemas de pré-resfriamento, como dutos enterrados e sistemas de resfriamento evaporativo com aspersores. Também foram identificados estudos com a associação de chaminés solares com sistemas fotovoltaicos e exaustores de ar. Os autores concluíram que a chaminé solar é um excelente sistema de ventilação passiva, principalmente em regiões com altas taxas de radiação solar e pouca disponibilidade de vento.

Khanal e Lei (2011) realizaram uma pesquisa de revisão de literatura sobre o desempenho de chaminés solares com o objetivo de investigar os efeitos da geometria e ângulo de inclinação. Os autores apresentaram estudos que evidenciaram que as chaminés solares são uma excelente estratégia de ventilação passiva, e que esses dispositivos podem ser utilizados para melhorar a ventilação natural e proporcionar conforto térmico. Embora as variáveis ambientais e parâmetros construtivos que aumentam a eficiência das chaminés solares, como ângulo de inclinação, intensidade da radiação solar, e tamanho das aberturas da chaminé, os autores identificaram uma grande variedade de resultados contraditórias relatados na literatura, o que indica que a chaminé solar como uma estratégia de ventilação não está totalmente compreendida.

Asadi et al. (2016) estudaram o impacto da eficiência e velocidade do fluxo de ar em diferentes layouts orientações de uma chaminé solar em um edifício de escritórios com o *EnergyPlus*, para o clima do Irã. Os resultados mostraram que todas as configurações de chaminés solar apresentaram fluxos de ar considerados aceitáveis para os ambientes em que estavam conectadas.

Maciel (2016) propôs e investigou um dispositivo que mescla as características de uma proteção solar convencional (brise) e uma chaminé solar. O produto foi denominado Brise-Chaminé-Solar® e seu desempenho para a renovação de ar e redução do ofuscamento em ambientes internos foi comprovado a partir de simulação

termo energética nos programas *Ansys CFD* e *EnergyPlus* e de medições em modelo construído em escala 1:1.

Neves e Silva (2017) investigaram o potencial de chaminés solares por meio de uma análise paramétrica para maximizar o seu desempenho em climas típicos do território brasileiro. Os autores avaliaram variações na espessura da cavidade, comprimento da chaminé, inclinação e tipo de vidro utilizado no coletor solar e compararam chaminés com e sem coletor solar. Os resultados obtidos indicaram a aplicabilidade da chaminé solar para promover a ventilação natural em todas as cidades analisadas, entretanto é necessário ajustar os parâmetros citados de forma a otimizar o desempenho da chaminé solar para cada clima.

Os estudos apresentados identificaram que o desempenho de uma chaminé solar está fortemente ligado às variáveis ambientais do local em que o dispositivo está instalado. Fatores como diferença de temperatura entre o ambiente interno e externo, direção e intensidade do vento e radiação solar afetam diretamente a eficiência das chaminés solares. As variáveis climáticas podem justificar os resultados contraditórios levantados por Khanal e Lei (2011), cuja revisão de literatura não conseguiu estabelecer uma concordância total entre parâmetros construtivos que afetam a eficiência das chaminés solares. Os autores defendem que, para garantir a eficiência do dispositivo, devem ser realizados estudos para cada caso, e os ajustes dos parâmetros devem ser realizados de acordo com as variáveis do ambiente e clima em que a chaminé será instalada.

3.1.2 Conforto Térmico

A avaliação do nível de conforto é definida por uma combinação de variáveis, como o tipo da atividade que o usuário realiza, a temperatura do ambiente e das superfícies circundantes, velocidade e umidade relativa do ar (BARBOSA, 2016). Os dois modelos de avaliação de índices de conforto térmico mais populares são o Voto Médio Preditivo (PMV) ou modelo de equilíbrio térmico, e o conforto adaptativo (EFOEMA; UDUKU, 2014).

O conforto adaptativo defende padrões variáveis de temperatura interna e permite adaptações dos usuários no edifício às condições ambientais. Esta abordagem leva a algoritmos de controle ambiental mais responsivos, níveis mais aprimorados de

conforto dos ocupantes, redução do consumo de energia e incentivo a projetos sustentáveis (DE DEAR; BRAGER; COOPER, 1997).

A norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013), *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy* (Condições Ambientais Térmicas para Ocupação Humana) é uma norma que fornece requisitos térmicos mínimos para o estabelecimento do conforto térmico em ambientes internos. O atual componente adaptativo da norma foi baseado no banco de dados do projeto ASHRAE RP-884 (DE DEAR; BRAGER; COOPER, 1997), que foram obtidos a partir de 21.000 medições em diversos edifícios e em zonas climáticas que cobrem quatro continentes (CANDIDO; DE DEAR; LAMBERTS, 2011; EFOEMA; UDUKU, 2014).

Por ser mais abrangente, o componente adaptativo da ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013) é apropriado para aplicação em diferentes partes do mundo, inclusive no Brasil. Pereira e Assis (2010) desenvolveram um trabalho com o objetivo de identificar um índice de conforto adaptativo adequado às diferentes condições climáticas existentes no Brasil. As autoras compararam quatro índices de conforto adaptativo levantados na literatura internacional com índices nacionais, e identificaram que os modelos de Auliciems (1981) e De Dear e Bragger (2002) apresentaram as maiores semelhanças. Entretanto Cândido et al. (2010a), Cândido et al. (2010b) e Cândido, De Dear e Lamberts (2011) apontam que o método de conforto adaptativo da ASHRAE 55 especifica valores de fluxo de ar inferiores aos desejados pelos usuários em ambientes quentes e úmidos. Os autores concluíram que os usuários preferem, em períodos quentes com temperatura acima de 29℃ e 30ºC, velocidades do ar próximas ao limite adotado pela norma ASHRAE 55, de 0,8 m/s ou até mesmo superiores.

As limitações relacionadas à necessidade de ventilação natural acima do limite recomendado pela norma ASHRAE 55 para climas quentes não limita sua aplicação para ambientes com chaminés solares pois, esses dispositivos se destacam pela renovação de ar e possuem velocidades de movimentação de ar interna mínimas. Logo, os estudos supracitados qualificam a norma ASHRAE 55 para aplicação em ambientes com chaminés solares para climas quentes.

A partir da revisão de literatura, não foram encontrados trabalhos que avaliaram simultaneamente a eficiência de uma chaminé solar para todo o ano aliado com o potencial em proporcionar conforto térmico desses dispositivos no Brasil. Além disso,

a maior parte dos estudos sobre chaminés solares avaliaram o dispositivo de maneira isolada, focado principalmente em resultados como velocidade do fluxo de ar e trocas por hora, ignorando a influência desses dispositivos nas horas em conforto. Outra limitação encontrada foi que a grande maioria das pesquisas avaliaram as chaminés em um período curto do ano, geralmente associado à maior eficiência do dispositivo. Portanto, o objetivo desse artigo é avaliar os parâmetros e potencial das chaminés solares em proporcionar conforto térmico e renovação de ar em ambientes internos, com diferentes densidades de cargas térmicas internas, no clima brasileiro.

3.2 Método

O método adotado nesse trabalho foi baseado em simulação termoenergética com o *EnergyPlus* 8.4. Foram simulados dois tipos de ambientes, uma sala de aula e um escritório, ambos com o modelo de chaminé solar desenvolvido por Maciel (2016). A simulação foi dividida em duas etapas, na primeira, os ambientes foram simulados para duas cidades da ZB1 e duas cidades da ZB8. Nessa etapa da simulação, foram realizadas variações na orientação solar da fachada, altura e número das chaminés solares. Na segunda etapa, foram selecionados os parâmetros mais adequados identificados na primeira etapa, que levaram ao melhor desempenho e aplicados às demais cidades selecionadas nas zonas bioclimáticas ZB2, ZB3, ZB4, ZB5, ZB6 e ZB7. Nas duas etapas da simulação, a avaliação da influência da chaminé foi feita com base nos índices de conforto adaptativo da norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013) e da taxa de renovação de ar.

3.2.1 Definição do ambiente de análise

Foi realizado um levantamento dos artigos dos ENCACs e ENTACs do período 2007-2017 para definir a geometria dos ambientes simulados. Foram avaliadas a geometria dos ambientes e coletados parâmetros como dimensões (comprimento e largura), área total, área das aberturas, unidade da federação em que se localizava, e no caso das salas de aula, nível de ensino da escola agrupadas em duas categorias, Fundamental/Médio e Superior.

Foram selecionadas 102 salas de aula, em 36 artigos, em 14 unidades da federação. A seleção final da geometria foi definida pela maior frequência de ocorrência e cada

parâmetro foi avaliado separadamente (Apêndice A). Após o levantamento, ficou estabelecido que a sala de aula a ser simulada deve possuir entre 45-50m², geometria quadrada com relação entre comprimento e largura iguais, pé direito entre 2,8-3,0m e proporção de janela em relação ao piso entre 20 e 30%.

Para o escritório foram selecionados 23 artigos e levantados 46 ambientes, a maior frequência de ocorrência de área foi entre 20-40m² (Apêndice A). Entretanto, o levantamento apresentou uma grande variação de área, de 9 a 5000m², devido à existência de pavimentos com planta livre. Na seleção dos artigos destacam-se dois trabalhos pela abrangência da amostra, o trabalho de Coelho e Ghisi (2007), para a cidade de Florianópolis-SC, cuja maior frequência de ocorrência de área de piso de escritórios foi entre 12,2 e 59,9m² e o trabalho de Nascimento e Barbosa (2009) que identificaram que 70% dos escritórios de Londrina-PR possuem até 50m².

Foi possível observar que não existe uma grande variação entre as áreas representativas de escritórios e sala de aula. Os ambientes se diferenciaram essencialmente pela densidade de carga térmica interna mais alta nas salas de aula devido ao número de ocupantes, embora a carga interna de equipamentos do escritório seja maior.

3.2.2 Definição do modelo de chaminé solar

O modelo de chaminé solar utilizado foi o Brise-Chaminé-Solar® (BCS), que mescla as características de uma proteção solar (brise) e de uma chaminé solar. O dispositivo foi resultado da dissertação de Maciel (2016), que comprovou seu potencial para renovação de ar e redução do ofuscamento por meio de simulação termoenergética nos programas *ANSYS CFX* e *EnergyPlus* e de medições em modelo construído em escala 1:1.

Segundo Maciel (2016) o dispositivo tem como características construtivas:

> (...) uma placa vertical composta de múltiplas camadas: uma superfície envidraçada, uma cavidade por onde o ar flui e uma placa absorvedora. A placa absorvedora é composta por uma chapa de aço na cor preta (alta absortância térmica), uma camada de ar para isolamento térmico e outra chapa de aço para fechamento. A face externa da chapa de fechamento, voltada para a abertura do ambiente interno, tem cor de baixa absortância solar e da luz visível e tem a função de refletir a radiação externa, bem como bloquear a radiação térmica emitida pela placa absorvedora. (MACIEL, 2016, p.59)

O BCS possui uma geometria retangular com dimensões internas de 0,90m por 0,20m, conforme mostrado nas Figuras 17 e 18.

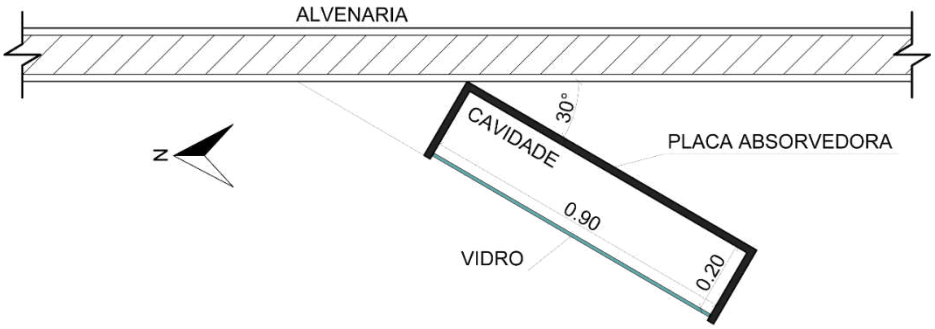

Figura 17 Seção horizontal do Brise-Chaminé-Solar. Dimensões e inclinação com a parede

Fonte: Adaptado de MACIEL, 2016

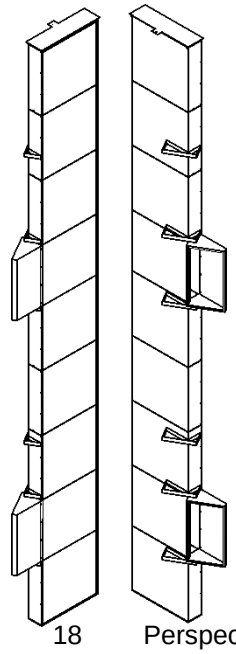

Figura 18 Perspectiva Isométrica do Brise-Chaminé-Solar

Fonte: BRISE-CHAMINÉ-SOLAR®, 2016

3.2.3 Definição das cidades analisadas

Foram selecionadas cidades nas oito zonas bioclimáticas definidas pela NBR 15220 (ABNT, 2005) de acordo com a disponibilidade dos arquivos climáticos, abrangência territorial e características do clima.

A partir da revisão de literatura foi identificado que em climas frios existe um maior potencial em proporcionar conforto com a utilização de chaminés solares, logo, para avaliar melhor esses climas, foram escolhidas duas cidades na ZB1, ZB2 e ZB3. Na ZB4 a ZB7 foi selecionada uma cidade e, pelo fato da ZB8 ocupar 57,8% do território e abranger uma grande amplitude de latitudes, foram selecionadas duas cidades nessa zona.

Nas zonas em que foram avaliadas duas cidades, estas foram selecionadas pelas suas diferenças de latitude, uma vez que um dos fatores que aumenta a eficiência de

uma chaminé solar é a quantidade de radiação incidente na superfície absorvedora. As cidades selecionadas estão dispostas na Tabela 3.

Tabela 3 Cidades selecionadas para a simulação

Zona Bioclimática	Cidade	Unidade da Federação	Latitude
ZB1	Bento Gonçalves	RS	29,17 S
	Campos do Jordão	SP	22,74 S
ZB2	Santa Maria	RS	29,68 S
	São João del Rei	MG	21,13 S
ZB3	Porto Alegre	RS	30,03 S
	Belo Horizonte	MG	19,82 S
ZB4	Brasília	DF	15,77 S
ZB5	Niterói	RJ	22,88 S
ZB6	Campo Grande	MS	20,44 S
ZB7	Cuiabá	MT	15,59 S
ZB8	Rio de Janeiro	RJ	22,90 S
	Belém	PA	01,45 S

Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.4 Simulação dos ambientes

A simulação dos ambientes representativos com o BCS foi realizada com o *EnergyPlus* 8.4. O ambiente padrão possui geometria de 7,05x7,05m, 49,7m² de área de piso, pé direito de 2,90m e janelas com área de 10,3m² sem contato com o solo ou com a cobertura com zonas adjacentes de mesmas dimensões (Figuras 19 a 26). As propriedades construtivas dos materiais utilizados no ambiente seguiram o padrão construtivo brasileiro dentre os da norma NBR 15220 (ABNT, 2005) (Tabela 4).

Na simulação da sala de aula, baseado no layout, foram inseridas 41 pessoas (40 alunos e um professor) com metabolismo equivalente a uma pessoa sentada, definido pela tabela 5.2.1.2 da norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013), um computador e um projetor. Para escritórios foram inseridas, baseado no layout, 6 pessoas em atividade leve de escritório, tabela 5.2.1.2 da norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013) e 6 computadores. Nos dois ambientes simulados, a iluminação e a potência dos equipamentos seguiu a recomendação do manual do RTQ-C (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2010), para Escola/Universidade e Escritórios com nível de eficiência A (Tabela 4).

Tabela 4 Parâmetros adotados na simulação

Parâmetros da simulação	Sala de Aula	Escritório
Horas Ocupadas (h)	8-18h	8-18h
Densidade de Carga Interna (W/m²)	103	59,6
Transmitância Térmica das Paredes (W/m²K)	2,5	2,5
Capacidade Térmica das Paredes (kJ/m²K)	150	150
Percentual de abertura da região envidraçada em relação à fachada (%)	50,3	50,3
Fator Solar do Vidro	0,8	0,8

Fonte: Elaborado pelo autor

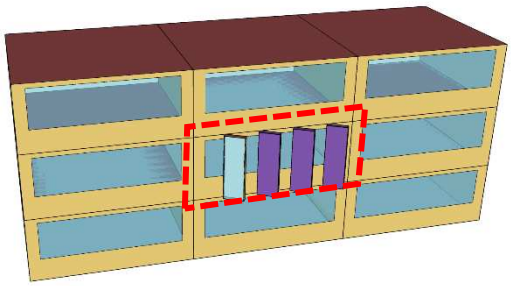

Figura 19 Modelo ALT1 com 4BCS para sala de aula, com destaque para o ambiente analisado
Fonte: Elaborado pelo autor

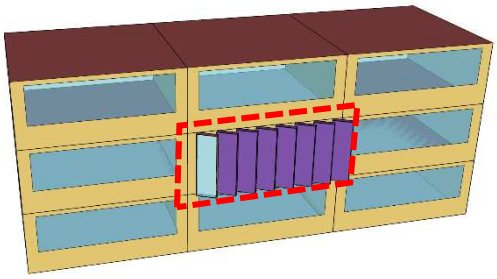

Figura 20 Modelo ALT1 com 8BCS para sala de aula, com destaque para o ambiente analisado
Fonte: Elaborado pelo autor

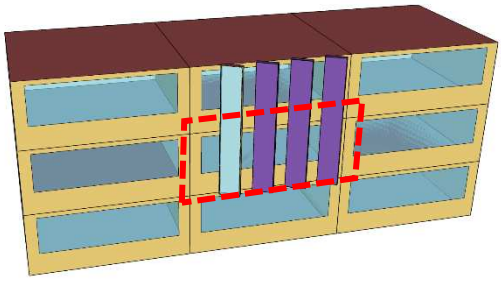

Figura 21 Modelo ALT2 com 4BCS para sala de aula, com destaque para o ambiente analisado
Fonte: Elaborado pelo autor

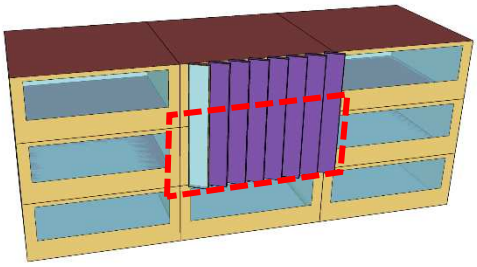

Figura 22 Modelo ALT2 com 8BCS para sala de aula, com destaque para o ambiente analisado
Fonte: Elaborado pelo autor

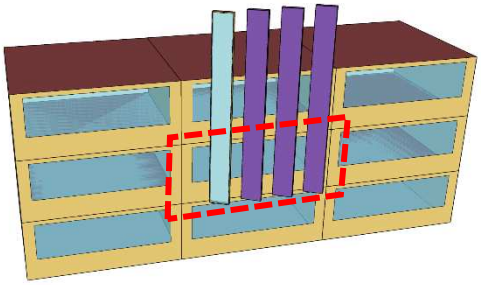

Figura 23 Modelo ALT3 com 4BCS para sala de aula e escritório, com destaque para o ambiente analisado
Fonte: Elaborado pelo autor

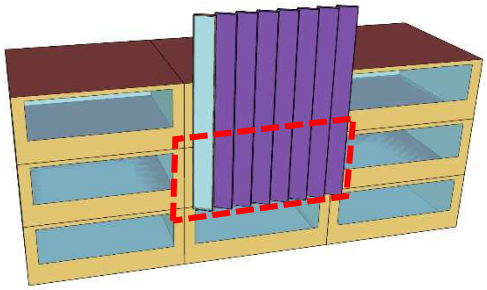

Figura 24 Modelo ALT3 com 8BCS para sala de aula e escritório, com destaque para o ambiente analisado
Fonte: Elaborado pelo autor

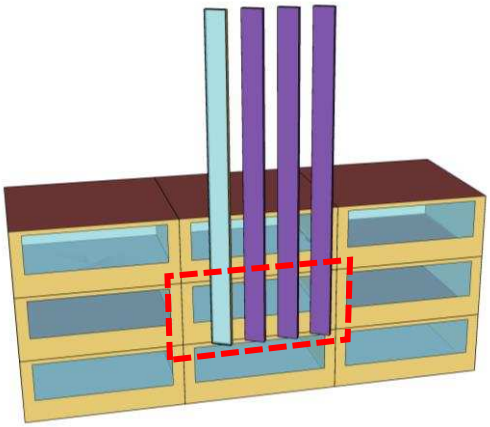

Figura 25 Modelo ALT5 com 4BCS para escritório, com destaque para o ambiente analisado
Fonte: Elaborado pelo autor

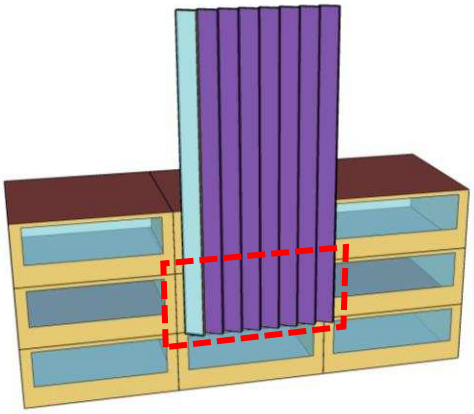

Figura 26 Modelo ALT5 com 8BCS para escritório, com destaque para o ambiente analisado
Fonte: Elaborado pelo autor

Devido à limitação do programa que só simula uma chaminé solar por ambiente, o fluxo de uma chaminé simulada (em ciano nas Figuras 19 a 26) foi multiplicado por quatro, ou por oito, conforme cada caso. Para simular o efeito do sombreamento do dispositivo, as chaminés foram substituídas por proteções solares (em roxo nas Figuras 19 a 26). Para avaliar o efeito dessa simplificação na temperatura operativa, foi realizada uma simulação teste, em que o fluxo de um BCS foi multiplicado por oito e inserido como um exaustor integrado ao modelo de ventilação natural em rede do programa. As diferenças de temperatura operativa horária foram, em 99,73% das horas do ano, menores que 0,5℃, e em apenas 0,26% das horas no ano apresentaram diferença entre 0,5 e 1℃, validando a simplificação adotada.

Para avaliar a renovação de ar exclusivamente dos BCS o ambiente foi simulado com a janela fechada. Como o *EnergyPlus* não permite integrar uma chaminé térmica ao modelo de rede de ventilação, foi realizada uma simulação prévia com as aberturas

fechadas, com o modelo de rede ativado e sem a chaminé solar. A partir dessa simulação, obteve-se a infiltração horária, que foi inserida em uma nova simulação com modelo de rede desativado e a chaminé térmica ativada. A infiltração inserida foi resultado da média das infiltrações das três orientações avaliadas, norte, leste e oeste, para cada cidade analisada.

3.2.4.1 Primeira etapa

As simulações foram divididas em duas etapas, na primeira foram simulados os ambientes de sala de aula e de escritório apenas para as cidades da ZB1 e ZB8. Essa avaliação teve como objetivo analisar o desempenho do conjunto ambiente/BCS, em climas predominantemente frios ou quentes, e selecionar os melhores casos para serem replicados na segunda etapa das simulações.

Maciel (2016) destacou que, para maximizar a eficiência do dispositivo quanto à ventilação natural, este deve ser conectado, sempre que possível, a apenas um pavimento. A autora também recomenda a instalação de mais de um dispositivo por ambiente para aumentar a ventilação natural e a renovação do ar. Ambas recomendações foram acatadas na simulação. Na primeira etapa, foram avaliados os seguintes parâmetros: orientação solar, fachada norte (N), leste (L) e oeste (O); altura do BCS, para sala de aula ALT1 - 2,90m, ALT2 - 5,80m e ALT3 - 8,70m e para escritório ALT3 - 8,70m e ALT5 - 14,5m; e número de dispositivos instalados por ambiente quatro (4BCS) e oito (8BCS) (Tabela 5).

Tabela 5 Resumo da primeira etapa de simulação

	ZB	**Cidade**	**Altura do Dispositivo**			**Orientação**			**Nº de Chaminés**	
Sala de Aula	ZB1	Bento Gonçalves	ALT1	ALT2	ALT3	N	L	O	4BCS	8BCS
		Campos do Jordão	ALT1	ALT2	ALT3	N	L	O	4BCS	8BCS
	ZB8	Rio de Janeiro	ALT1	ALT2	ALT3	N	L	O	4BCS	8BCS
		Belém	ALT1	ALT2	ALT3	N	L	O	4BCS	8BCS
Escritório	ZB1	Bento Gonçalves	ALT3		ALT5	N	L	O	4BCS	8BCS
		Campos do Jordão	ALT3		ALT5	N	L	O	4BCS	8BCS
	ZB8	Rio de Janeiro	ALT3		ALT5	N	L	O	4BCS	8BCS
		Belém	ALT3		ALT5	N	L	O	4BCS	8BCS

Fonte: Elaborado pelo autor

Após as simulações iniciais, foram selecionados os melhores casos: com maior porcentagem de horas ocupadas em conforto, definido pela ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013) e maior renovação de ar horária, para as quatro cidades analisadas. Para o entendimento da contribuição do BCS no conforto ou desconforto do ambiente, os melhores casos foram comparados a um caso base (CB) composto pelo ambiente sem o BCS e com infiltração idêntica.

3.2.4.2 Segunda etapa

A segunda etapa consiste na simulação dos dois ambientes, sala de aula e escritório, seguindo os parâmetros que proporcionaram melhor relação entre conforto e renovação de ar da primeira etapa, para as demais cidades apresentadas na Tabela 3.

3.3 Resultados

3.3.1 Primeira etapa de simulação: salas de aula

3.3.1.1 Percentual das horas em conforto

Os ambientes que apresentaram o maior percentual de horas em conforto (POC) ocupadas foram, na cidade de Bento Gonçalves, Campos do Jordão e Belém, os casos com 8BCS com ALT3 instalados por ambiente e orientados a norte, com POC 88%, 97% e 41% respectivamente; na cidade do Rio de Janeiro ocorreram as mesmas características, porém na orientação oeste, POC de 68% (Tabela 6).

A comparação entre esses ambientes e seus respectivos casos base apresentou um aumento médio de 24% das horas do ano em conforto (Tabela 6). A partir da comparação foi possível afirmar que o Brise-Chaminé-Solar (BCS) apresentou potencial para proporcionar aumento das horas em conforto e redução das horas em desconforto por calor, nas cidades analisadas.

Tabela 6 Comparação entre os melhores casos simulados e o caso base/Sala de Aula

Cidade	Conforto	8BCS	CB	8BCS-CB
Bento Gonçalves	**Frio**	2%	0%	1%
	Conforto	88%	63%	24%
	Calor	10%	36%	-26%
Campos do Jordão	**Frio**	0%	0%	0%
	Conforto	97%	67%	30%
	Calor	3%	33%	-30%
Rio de Janeiro	**Frio**	0%	0%	0%
	Conforto	68%	49%	19%
	Calor	32%	51%	-19%
Belém	**Frio**	0%	0%	0%
	Conforto	41%	17%	23%
	Calor	59%	83%	-23%

Fonte: Elaborado pelo autor

O caso que apresentou o maior POC nas horas ocupadas foi a cidade de Campos do Jordão-SP, 96,6%, com 8BCS com ALT3 instalados, para a orientação norte (Tabela 7 e Figura 27). O pior caso ocorreu em Belém-PA, com 4BCS com ALT1, instalados para a orientação leste, com 16,1% das horas do ano em conforto (Tabela 6 e Figura 28). As demais cidades estão contidas no Apêndice B. Percebe-se uma tendência à sazonalidade na distribuição das horas de conforto ao longo do ano, como pode ser identificada na Figura 27.

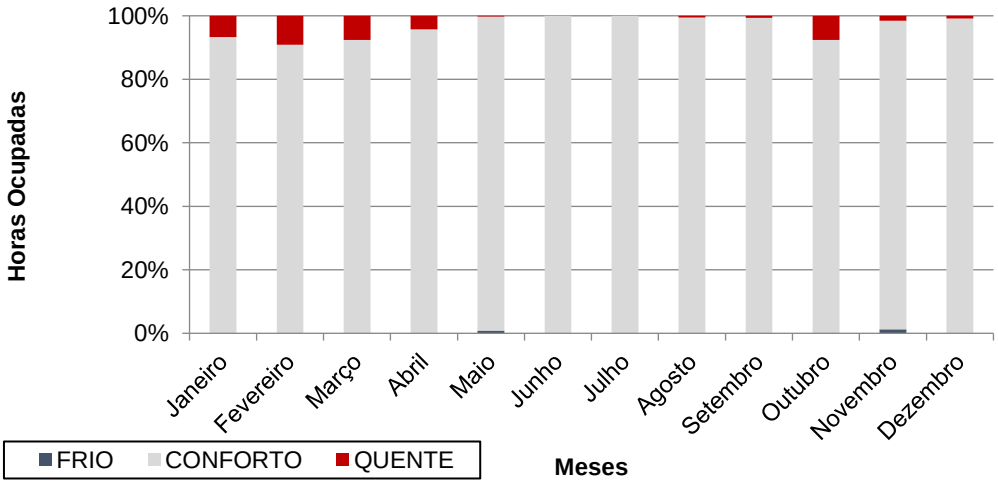

Figura 27 Distribuição mensal das horas em conforto na cidade de Campos do Jordão, com 8BCS instalados no ambiente, ALT3 e orientação norte

Fonte: Elaborado pelo autor

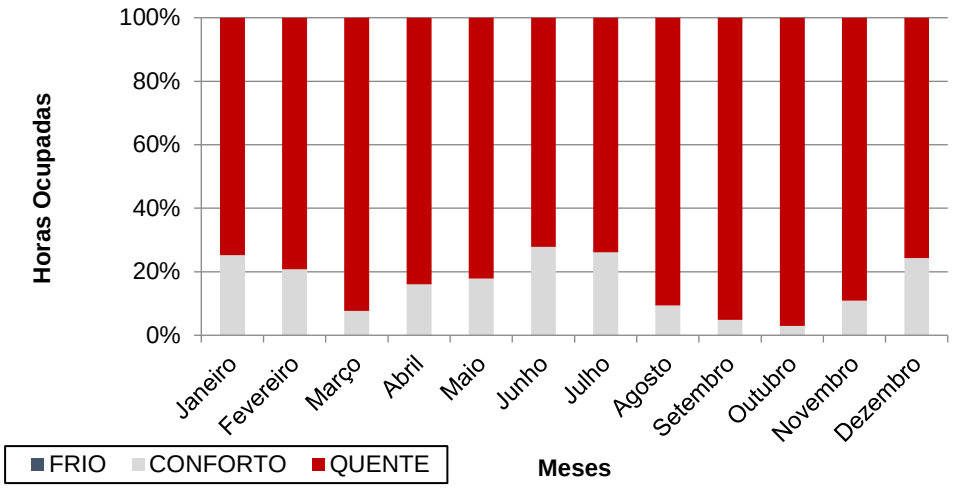

Figura 28 Distribuição mensal das horas em conforto na cidade de Belém, com 4BCS instalados no ambiente, ALT1 e orientação leste
Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 7 Condições de conforto em sala de aula

	ZB	Cidade	Condição de conforto	Altura do Brise Chaminé Solar								
				Alt1	Alt2	Alt3	Alt1	Alt2	Alt3	Alt1	Alt2	Alt3
				Orientação solar da Fachada								
				L	L	L	N	N	N	O	O	O
4 BCS/Ambiente	ZB1	Bento Gonçalves	Frio	0,9%	1,1%	1,1%	0,6%	0,9%	1,0%	1,1%	1,4%	1,4%
			Conforto	69,1%	75,0%	76,3%	73,9%	80,5%	81,9%	75,2%	80,1%	81,2%
			Calor	30,0%	24,0%	22,6%	25,5%	18,7%	17,1%	23,7%	18,5%	17,3%
		Campos do Jordão	Frio	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,2%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
			Conforto	77,0%	84,3%	85,9%	81,3%	96,0%	90,9%	85,2%	90,1%	91,3%
			Calor	23,0%	15,6%	14,0%	18,7%	3,8%	9,1%	14,8%	9,9%	8,6%
	ZB8	Rio de Janeiro	Frio	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
			Conforto	49,5%	55,2%	56,7%	48,3%	56,4%	57,9%	55,5%	61,2%	62,5%
			Calor	50,5%	44,8%	43,3%	51,7%	43,6%	42,1%	44,5%	38,8%	37,5%
		Belém	Frio	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
			Conforto	16,1%	21,7%	22,9%	24,0%	30,4%	31,5%	21,0%	26,3%	27,3%
			Calor	83,9%	78,3%	77,1%	76,0%	69,6%	68,5%	79,0%	73,8%	72,7%
8 BCS/Ambiente	ZB1	Bento Gonçalves	Frio	1,0%	1,3%	1,4%	0,8%	1,5%	1,8%	1,2%	1,5%	1,7%
			Conforto	73,5%	82,5%	83,6%	78,3%	86,8%	87,7%	78,9%	84,7%	85,9%
			Calor	25,5%	16,2%	14,9%	21,0%	11,8%	10,5%	20,0%	13,7%	12,4%
		Campos do Jordão	Frio	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,2%	0,2%	0,1%	0,1%	0,1%
			Conforto	82,8%	91,8%	93,5%	87,0%	96,0%	96,6%	88,8%	94,5%	95,5%
			Calor	17,1%	8,1%	6,4%	13,0%	3,8%	3,2%	11,1%	5,5%	4,4%
	ZB8	Rio de Janeiro	Frio	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
			Conforto	54,2%	64,3%	65,4%	54,3%	66,9%	68,0%	59,3%	67,2%	68,2%
			Calor	45,9%	35,7%	34,6%	45,7%	33,1%	32,1%	40,7%	32,9%	31,8%
		Belém	Frio	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
			Conforto	20,7%	32,8%	34,1%	28,5%	39,3%	40,7%	24,6%	35,5%	36,8%
			Calor	79,3%	67,2%	65,9%	71,5%	60,7%	59,4%	75,4%	64,5%	63,2%

Legenda		
Frio	Conforto	Calor

Fonte: Elaborado pelo autor

Como esperado, nas cidades mais frias (ZB1), o POC foi em média 40% maior que nas cidades quentes da ZB8 (Tabela 7) e os ambientes voltados a norte e oeste apresentaram os maiores POCs.

A variação na altura do BCS impactou diretamente no conforto. Em média, para ALT1 59% das horas foram de conforto, para ALT2 66%, e para ALT3 68%. Percebe-se que

o maior ganho de conforto foi entre a ALT1 e ALT2 (7%), após essa altura, a tendência do dispositivo em influenciar o conforto se reduz (Tabela 7).

O número de BCS instalados no ambiente também impactou no POC. Houve um aumento médio de 15% nos ambientes que possuíam 8BCS instalados (Tabela 8). Esse aumento é mais sensível nas cidades da ZB8, em média, 23% maior.

Tabela 8 Diferença percentual entre horas de conforto e desconforto proporcionado por 4BCS e 8BCS/Sala de Aula

ZB	Cidade	Conforto	Altura do Brise Chaminé Solar								
			Alt1	Alt2	Alt3	Alt1	Alt2	Alt3	Alt1	Alt2	Alt3
			Orientação solar da Fachada								
			L	L	L	N	N	N	O	O	O
ZB1	Bento Gonçalves	Frio	17%	21%	33%	24%	69%	80%	3%	8%	16%
		Conforto	6%	10%	10%	6%	8%	7%	5%	6%	6%
		Calor	-15%	-32%	-34%	-18%	-37%	-39%	-16%	-26%	-28%
	Campos do Jordão	Frio	40%	0%	43%	0%	114%	143%	0%	43%	20%
		Conforto	8%	9%	9%	7%	8%	6%	4%	5%	5%
		Calor	-26%	-48%	-54%	-31%	-64%	-64%	-25%	-45%	-49%
ZB8	Rio de Janeiro	Frio	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		Conforto	9%	16%	15%	12%	18%	17%	7%	10%	9%
		Calor	-9%	-20%	-20%	-12%	-24%	-24%	-8%	-15%	-15%
	Belém	Frio	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		Conforto	28%	51%	49%	19%	29%	29%	17%	35%	35%
		Calor	-5%	-14%	-15%	-6%	-13%	-13%	-5%	-13%	-13%

Legenda					
	Aumento		Manteve		Redução

Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.1.2 Renovação de ar

De maneira geral, as maiores renovações ocorreram na fachada oeste, pela combinação da incidência de radiação nos horários de maiores temperaturas externas. Nas cidades da ZB1, as maiores renovações ocorreram nos meses do verão, com 8BCS e ALT3 instalados por ambiente. Nas cidades da ZB8 as maiores renovações também foram com 8BCS com ALT3 instalados por ambiente, porém sua distribuição ao longo do ano foi mais uniforme, principalmente da cidade de Belém-PA (Tabelas 9 e 10).

Tabela 9 Renovação de ar (Trocas por hora) na ZB1/Sala de Aula

Cidade	Mês	4BCS									8BCS								
		Altura do Brise Chaminé Solar									Altura do Brise Chaminé Solar								
		Alt1	Alt2	Alt3	Alt1	Alt2	Alt3	Alt1	Alt2	Alt3	Alt1	Alt2	Alt3	Alt1	Alt2	Alt3	Alt1	Alt2	Alt3
		Orientação solar da Fachada									Orientação solar da Fachada								
		L	L	L	N	N	N	O	O	O	L	L	L	N	N	N	O	O	O
Bento Gonçalves	JAN	1,8	3,5	5,1	1,7	3,3	4,8	1,6	3,1	4,6	4,1	8,1	11,8	3,9	8,1	9,5	3,6	7,2	11,0
	FEV	1,8	3,4	5,0	2,0	3,7	5,2	1,8	3,4	4,9	4,0	7,9	11,6	4,4	8,5	10,5	3,9	7,6	11,4
	MAR	1,3	2,6	3,8	1,8	3,5	4,9	1,5	3,0	4,3	3,0	6,2	9,2	4,0	7,9	9,8	3,4	6,7	10,0
	ABR	0,7	1,4	2,1	1,4	2,6	3,7	1,1	2,1	3,0	1,7	3,4	5,3	3,0	5,9	7,4	2,4	4,7	7,0
	MAI	0,3	0,6	0,9	1,0	2,0	2,8	0,7	1,4	2,1	0,8	1,7	2,9	2,2	4,6	5,7	1,6	3,3	4,8
	JUN	0,0	0,1	0,2	0,5	1,1	1,5	0,3	0,6	1,0	0,2	0,4	0,9	1,2	2,5	3,1	0,7	1,5	2,3
	JUL	0,1	0,3	0,5	0,8	1,7	2,3	0,6	1,1	1,6	0,4	1,1	1,9	1,9	3,8	4,7	1,2	2,5	3,7
	AGO	0,4	0,9	1,4	1,1	2,1	3,0	0,8	1,7	2,4	1,1	2,4	3,8	2,5	4,9	6,1	1,9	3,8	5,6
	SET	0,7	1,4	2,1	1,2	2,4	3,4	1,0	1,9	2,8	1,7	3,6	5,5	2,9	5,8	6,8	2,2	4,5	6,7
	OUT	0,8	1,7	2,6	1,1	2,2	3,1	1,0	2,0	2,9	2,0	4,2	6,4	2,7	5,4	6,2	2,3	4,6	7,0
	NOV	1,7	3,3	4,8	1,7	3,2	4,6	1,6	3,1	4,6	3,8	7,6	11,2	3,9	7,9	9,2	3,6	7,3	11,0
	DEZ	1,9	3,6	5,3	1,7	3,3	4,8	1,7	3,3	4,8	4,2	8,4	**12,2**	4,0	8,4	9,5	3,8	7,6	11,5
Campos do Jordão	JAN	1,6	3,1	4,5	1,4	2,8	4,0	1,4	2,8	4,2	3,5	6,4	10,4	2,9	7,2	10,1	3,2	6,4	9,8
	FEV	1,7	3,3	4,7	1,6	3,2	4,6	1,4	2,8	4,2	3,7	6,8	10,8	3,3	7,6	10,6	3,2	6,5	9,9
	MAR	1,3	2,5	3,8	1,6	3,2	4,5	1,5	2,8	4,2	2,9	5,3	9,0	3,4	7,4	10,3	3,2	6,4	9,7
	ABR	1,1	2,2	3,3	1,8	3,5	4,9	1,4	2,7	4,0	2,5	4,5	8,0	3,7	8,1	11,3	3,1	6,2	9,4
	MAI	0,4	0,9	1,5	1,2	2,4	3,4	0,9	1,8	2,7	1,1	1,9	4,1	2,6	5,8	8,1	2,1	4,2	6,4
	JUN	0,3	0,7	1,2	1,4	2,7	3,9	1,0	2,0	2,8	0,9	1,5	3,8	2,9	6,2	8,7	2,2	4,4	6,5
	JUL	0,3	0,7	1,1	1,4	2,7	3,8	0,9	1,8	2,6	0,9	1,5	3,7	2,9	6,3	8,8	2,0	4,1	6,1
	AGO	0,8	1,6	2,5	1,6	3,1	4,3	1,1	2,2	3,2	1,9	3,4	6,3	3,3	7,1	9,9	2,5	5,0	7,6
	SET	0,8	1,6	2,5	1,3	2,4	3,4	1,1	2,1	3,1	1,9	3,4	6,3	2,6	6,0	8,5	2,5	4,9	7,4
	OUT	1,6	3,1	4,5	1,8	3,5	5,0	1,6	3,1	4,5	3,6	6,5	10,8	3,7	8,3	11,6	3,5	7,0	10,7
	NOV	1,1	2,2	3,2	1,0	2,0	3,0	1,1	2,1	3,1	2,5	4,6	8,0	2,1	5,8	8,1	2,4	5,1	7,9
	DEZ	1,5	3,0	4,4	1,2	2,4	3,6	1,3	2,5	3,8	3,5	6,3	10,4	2,4	7,0	9,9	2,9	6,1	9,5

Legenda
Fluxo de ar (Trocas/hora)
0 — 19

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 10 Renovação de ar (Trocas por hora) na ZB8/Sala de Aula

Cidade	Meses	4BCS									8BCS								
		Altura do Brise Chaminé Solar									Altura do Brise Chaminé Solar								
		Alt1	Alt2	Alt3	Alt1	Alt2	Alt3	Alt1	Alt2	Alt3	Alt1	Alt2	Alt3	Alt1	Alt2	Alt3	Alt1	Alt2	Alt3
		Orientação solar da Fachada									Orientação solar da Fachada								
		L	L	L	N	N	N	O	O	O	L	L	L	N	N	N	O	O	O
Rio de Janeiro	JAN	2,0	3,8	5,4	1,8	3,5	5,0	1,8	3,5	5,1	4,2	8,3	**12,0**	3,6	8,2	11,4	3,7	7,9	11,6
	FEV	2,0	3,9	5,5	2,1	3,9	5,5	2,0	3,8	5,4	4,4	8,4	**12,2**	4,2	8,6	12,0	4,0	8,3	**12,1**
	MAR	1,8	3,5	5,0	2,1	4,0	5,6	2,0	3,7	5,3	3,9	7,6	11,1	4,3	8,8	**12,2**	4,0	8,1	11,8
	ABR	1,3	2,6	3,7	1,7	3,3	4,6	1,5	2,9	4,2	2,9	5,7	8,3	3,5	7,3	10,1	3,1	6,4	9,3
	MAI	1,0	2,0	3,0	1,7	3,2	4,5	1,4	2,6	3,8	2,3	4,6	6,9	3,4	7,0	9,7	2,7	5,7	8,4
	JUN	0,8	1,6	2,4	1,4	2,7	3,8	1,1	2,2	3,1	1,9	3,7	5,6	3,0	5,9	8,2	2,3	4,8	7,0
	JUL	1,1	2,1	3,1	1,8	3,5	4,9	1,4	2,7	3,9	2,4	4,8	7,1	3,8	7,5	10,5	2,9	5,9	8,6
	AGO	1,2	2,3	3,3	1,7	3,3	4,5	1,4	2,7	3,9	2,6	5,1	7,5	3,5	7,3	10,1	2,9	5,9	8,6
	SET	1,2	2,3	3,3	1,5	2,8	3,9	1,3	2,4	3,5	2,6	5,2	7,6	3,0	6,5	9,1	2,6	5,4	8,1
	OUT	1,6	3,0	4,3	1,8	3,3	4,6	1,6	3,0	4,3	3,4	6,7	9,7	3,6	7,3	10,2	3,2	6,7	9,8
	NOV	1,7	3,4	4,8	1,7	3,3	4,6	1,7	3,3	4,8	3,8	7,4	10,9	3,4	7,6	10,6	3,5	7,3	10,8
	DEZ	1,8	3,4	4,8	1,6	3,1	4,3	1,6	3,1	4,5	3,8	7,4	10,7	3,2	7,2	9,9	3,3	7,0	10,2
Belém	JAN	2,1	4,0	5,7	1,7	3,3	4,7	1,8	3,4	4,8	4,3	8,7	11,6	3,4	6,6	10,6	3,8	7,4	10,7
	FEV	2,1	4,0	5,6	1,7	3,3	4,7	1,8	3,4	4,9	4,2	8,6	11,4	3,4	6,6	10,6	3,9	7,4	10,8
	MAR	2,1	3,9	5,5	2,0	3,7	5,2	1,9	3,5	5,0	4,2	8,5	11,3	4,1	7,5	11,4	4,0	7,7	11,2
	ABR	1,8	3,4	4,8	1,9	3,6	5,0	1,7	3,3	4,7	3,6	7,3	9,7	3,9	7,3	10,6	3,7	7,1	10,2
	MAI	1,7	3,3	4,6	2,0	3,7	5,2	1,9	3,5	4,9	3,5	7,0	9,3	4,0	7,5	10,7	3,9	7,5	10,6
	JUN	1,7	3,2	4,5	2,0	3,8	5,3	2,0	3,7	5,2	3,4	6,9	9,1	4,1	7,7	10,9	4,2	7,9	11,2
	JUL	1,8	3,3	4,7	2,0	3,8	5,3	2,0	3,8	5,3	3,6	7,1	9,4	4,2	7,9	11,0	4,3	8,1	11,4
	AGO	1,9	3,7	5,2	2,2	4,1	5,7	2,1	4,0	5,6	4,0	7,9	10,5	4,6	8,4	**12,0**	4,5	8,5	**12,1**
	SET	2,1	4,0	5,7	2,2	4,1	5,7	2,1	4,0	5,6	4,3	8,7	11,6	4,7	8,3	**12,2**	4,5	8,6	**12,4**
	OUT	2,3	4,3	6,0	2,0	3,8	5,4	2,0	3,8	5,4	4,6	9,3	**12,4**	3,9	7,6	11,8	4,3	8,2	12,0
	NOV	2,3	4,3	6,1	1,9	3,6	5,2	2,0	3,8	5,4	4,6	9,3	**12,4**	3,8	7,3	11,5	4,3	8,3	11,9
	DEZ	2,1	3,9	5,5	1,7	3,2	4,6	1,8	3,4	4,8	4,2	8,5	11,2	3,4	6,5	10,4	3,8	7,3	10,6

Legenda	
Fluxo de ar (Trocas/hora)	
0	**19**

Fonte: Elaborado pelo autor

Foi possível observar que, nas cidades da ZB1, o número de BCS instalados por ambiente impactou de forma mais significativa a taxa de renovação de ar. Para duas vezes mais dispositivos instalados, a média das renovações para a ZB1 foi de 2,3 trocas/hora, com máximo de 5,3 (4BCS) e 12,2 (8BCS) contra 2,1 nas cidades da ZB8, com máximo de 6,1 (4BCS) e 12,4 (8BCS). A diferença de fluxo resultante da variação

do número de BCS instalados (4BCS para 8BCS) nas cidades da ZB1, foi maior no inverno, chegando a 4,9 trocas em julho, na cidade de Bento Gonçalves, para o dispositivo com ALT3, instalado na fachada norte. Nas cidades da ZB8 essa diferença não acedeu 2,3 trocas. Além disso, não foi possível identificar uma tendência dos meses em que a renovação foi maior, principalmente na cidade de Belém-PA, devido a sua condição de calor permanente e baixa variação da radiação solar ao longo do ano, que contrasta com a cidade de Bento Gonçalves.

3.3.2 Primeira etapa de simulação: escritórios

3.3.2.1 Percentual das horas em conforto

Os ambientes que apresentaram o maior POC foram, na cidade de Bento Gonçalves, Rio de Janeiro e Belém, os casos com 8BCS com ALT5 instalados por ambiente e orientados a norte, com POC 79%, 72% e 46% respectivamente; na cidade de Campos do Jordão, as mesmas características, porém para 4BCS instalados no ambiente, POC de 90% (Tabela 11).

A comparação entre esses ambientes e seus respectivos casos base apresentou um aumento médio de 16% das horas do ano em conforto (Tabela 11). A partir da comparação foi possível afirmar que o BCS apresentou potencial para proporcionar aumento das horas em conforto e redução das horas em desconforto por calor nas cidades analisadas.

Tabela 11 Comparação entre os melhores casos simulados e o caso base/Escritório

Cidade	Conforto	BCS	CB	BCS-CB
Bento Gonçalves	**Frio**	15%	6%	8%
	Conforto	79%	67%	11%
	Calor	6%	26%	-20%
Campos do Jordão	**Frio**	7%	2%	5%
	Conforto	90%	77%	13%
	Calor	3%	21%	-18%
Rio de Janeiro	**Frio**	1%	0%	0%
	Conforto	72%	46%	25%
	Calor	28%	53%	-26%
Belém	**Frio**	0%	0%	0%
	Conforto	46%	32%	14%
	Calor	54%	68%	-14%

Fonte: Elaborado pelo autor

O caso que apresentou o maior POC foi na cidade de Campos do Jordão-SP, 90,2% com 4BCS com ALT5 instalados, para a orientação norte (Tabela 12 e Figura 29). O pior caso ocorreu em Belém-PA, com 4BCS com ALT3, instalados para a orientação leste. Com 33,5% das horas do ano em conforto, (Tabela 12 e Figura 30). As demais cidades estão contidas no Apêndice B.

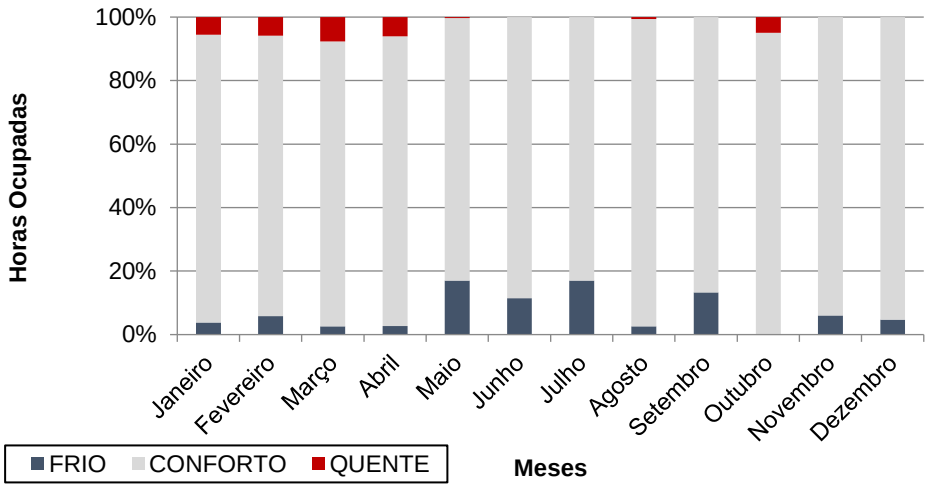

Figura 29 Distribuição mensal das horas em conforto na cidade de Campos do Jordão, com 4BCS instalados no ambiente, ALT5 e orientação norte

Fonte: Elaborado pelo autor

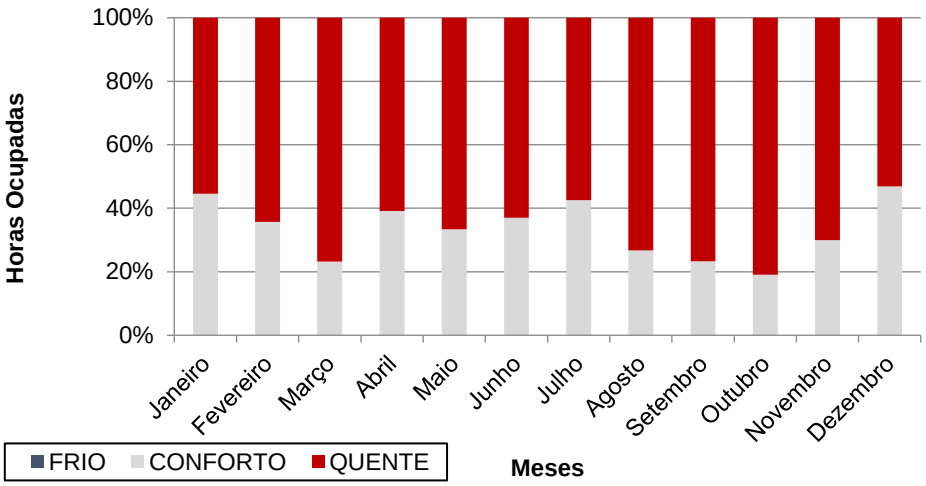

Figura 30 Distribuição mensal das horas em conforto na cidade de Belém, com 4BCS instalados no ambiente, ALT3 e orientação leste

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 12 Condições de conforto em escritório

	ZB	Cidade	Condição de conforto	Altura do Brise Chaminé Solar					
				Alt3	Alt5	Alt3	Alt5	Alt3	Alt5
				Orientação solar da Fachada					
				L	L	N	N	O	O
4 BCS/Ambiente	ZB1	Bento Gonçalves	Frio	12,0%	12,3%	10,8%	11,7%	13,7%	14,2%
			Conforto	71,4%	72,5%	77,9%	78,2%	73,3%	74,0%
			Calor	16,6%	15,2%	11,3%	10,1%	13,0%	11,9%
		Campos do Jordão	Frio	7,2%	7,9%	6,63%	7,3%	10,2%	11,0%
			Conforto	84,0%	85,1%	90,0%	90,2%	84,9%	85,1%
			Calor	8,8%	7,1%	3,39%	2,6%	5,0%	3,9%
	ZB8	Rio de Janeiro	Frio	0,8%	0,8%	0,6%	0,7%	0,9%	0,9%
			Conforto	60,1%	61,4%	63,0%	64,4%	65,1%	66,2%
			Calor	39,1%	37,7%	36,3%	35,0%	34,0%	32,9%
		Belém	Frio	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
			Conforto	33,5%	33,6%	39,8%	40,6%	36,2%	36,5%
			Calor	66,6%	66,4%	60,2%	59,4%	63,8%	63,5%
8 BCS/Ambiente	ZB1	Bento Gonçalves	Frio	14,0%	14,7%	14,1%	14,7%	14,9%	15,7%
			Conforto	75,3%	75,8%	78,3%	78,8%	75,9%	76,2%
			Calor	10,8%	9,5%	7,6%	6,5%	9,1%	8,1%
		Campos do Jordão	Frio	10,5%	11,3%	10,3%	11,5%	12,8%	13,3%
			Conforto	86,3%	86,2%	88,6%	87,9%	85,2%	85,1%
			Calor	3,2%	2,4%	1,10%	0,7%	2,0%	1,6%
	ZB8	Rio de Janeiro	Frio	1,0%	1,0%	0,7%	0,9%	1,0%	1,0%
			Conforto	67,2%	68,2%	70,6%	71,6%	69,9%	70,9%
			Calor	31,9%	30,8%	28,7%	27,5%	29,1%	28,1%
		Belém	Frio	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
			Conforto	41,4%	42,6%	44,3%	45,7%	41,9%	43,3%
			Calor	58,6%	57,4%	55,7%	54,3%	58,1%	56,7%

Legenda		
Frio	Conforto	Calor

Fonte: Elaborado pelo autor

De forma semelhante aos resultados da simulação das salas de aula, nas cidades mais frias (ZB1) o POC foi em média 28% maior que nas cidades mais quentes da ZB8, e os ambientes voltados a norte apresentaram os maiores POCs (Tabela 12).

A variação na altura do BCS nos escritórios impactou menos as horas em conforto, se comparada às salas de aula. Em média, para ALT3 66,8%, das horas foram de conforto e para ALT5 67,5% (Tabela 12). Na cidade de Campos do Jordão, para 8BCS

instalados, a ALT3 apresentou maior POC que ALT5. A redução das horas em desconforto por frio, desconforto esse devido à baixa temperatura externa e à baixa densidade de carga térmica interna, foi causada pelo aumento da incidência de radiação solar no ambiente, pois ALT3 obstrui menos a esquadria do que ALT5.

O número de BCS instalados no ambiente também impactou menos as horas de conforto, se comparada às salas de aula. Houve um aumento médio de 4% dessas horas nos ambientes que possuíam 8BCS instalados (Tabela 13).

Por outro lado, as horas em desconforto por frio foram consideravelmente maiores nos escritórios, em média 5,8% se comparado às salas de aula, devido a menor densidade de carga térmica interna. A maior quantidade de horas em desconforto por frio foi nas cidades da ZB1, em média 13% para 8BCS instalados por ambiente (Tabela 13).

Tabela 13 Diferença percentual entre horas de conforto e desconforto proporcionado por 4BCS e 8BCS/Escritório

ZB	Cidade	Conforto	Altura do Brise Chaminé Solar					
			Alt3	Alt5	Alt3	Alt5	Alt3	Alt5
			Orientação solar da Fachada					
			L	L	N	N	O	O
ZB1	Bento Gonçalves	Frio	16%	19%	30%	26%	9%	11%
		Conforto	6%	5%	1%	1%	4%	3%
		Calor	-35%	-37%	-33%	-36%	-30%	-32%
	Campos do Jordão	Frio	46%	44%	56%	58%	25%	21%
		Conforto	3%	1%	-2%	-3%	0%	0%
		Calor	-64%	-65%	-68%	-75%	-59%	-59%
ZB8	Rio de Janeiro	Frio	19%	18%	8%	34%	9%	9%
		Conforto	12%	11%	12%	11%	7%	7%
		Calor	-18%	-18%	-21%	-21%	-14%	-15%
	Belém	Frio	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		Conforto	24%	27%	11%	13%	16%	19%
		Calor	-12%	-14%	-7%	-9%	-9%	-11%

Legenda					
	Aumento		Manteve		Redução

Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.2.2 Renovação de ar

Assim como às salas de aula, as maiores renovações ocorreram na fachada oeste, pela combinação da incidência de radiação nos horários de maiores temperaturas externas. Nas cidades da ZB1 as maiores renovações de ar ocorreram nos meses do verão, com 8BCS com ALT5 instalados por ambiente. Nas cidades da ZB8 as maiores trocas foram com 8BCS e ALT5 instalados por ambiente, e a distribuição das trocas ao longo do ano foi mais uniforme devido a maior uniformidade do clima nessas zonas, principalmente na cidade de Belém-PA (Tabelas 14 e 15). Se comparada aos demais casos, a renovação de ar obtida para ALT5 foi consideravelmente maior, o que demonstra, para os casos simulados, que quanto maior a altura da chaminé solar, maiores serão as taxas de renovação de ar.

Tabela 14 Renovação de ar (Trocas por hora) na ZB1/Escritório

Cidade	Meses	4BCS						8BCS					
		Altura do Brise Chaminé Solar						Altura do Brise Chaminé Solar					
		Alt3	Alt5	Alt3	Alt5	Alt3	Alt5	Alt3	Alt5	Alt3	Alt5	Alt3	Alt5
		Orientação solar da Fachada						Orientação solar da Fachada					
		L	L	N	N	O	O	L	L	N	N	O	O
Bento Gonçalves	JAN	5,2	7,8	5,0	7,5	4,8	7,3	**12,2**	**18,4**	11,3	**17,0**	11,5	**17,6**
	FEV	5,1	7,7	5,5	8,1	5,1	7,7	**12,0**	**18,2**	**12,2**	**18,2**	11,9	**18,2**
	MAR	4,0	6,0	5,1	7,5	4,4	6,7	9,6	**14,8**	11,5	**17,2**	10,4	**16,0**
	ABR	2,6	4,0	4,0	6,0	3,4	5,2	6,4	9,8	9,2	**13,6**	7,9	11,9
	MAI	1,6	2,4	3,3	4,9	2,6	4,0	4,4	6,7	7,8	11,5	6,0	9,1
	JUN	0,8	1,2	2,1	3,1	1,5	2,3	2,2	3,5	4,9	7,3	3,5	5,4
	JUL	1,3	1,9	2,9	4,3	2,2	3,3	3,5	5,3	6,8	10,1	5,1	7,7
	AGO	1,9	2,9	3,5	5,1	2,9	4,3	5,0	7,6	7,9	11,7	6,6	10,0
	SET	2,8	4,2	4,0	5,8	3,4	5,1	6,9	10,6	9,0	**13,4**	8,0	**12,2**
	OUT	3,1	4,7	3,6	5,3	3,4	5,1	7,5	11,6	8,2	**12,3**	8,1	**12,5**
	NOV	5,0	7,6	5,0	7,5	4,9	7,5	11,8	**17,9**	11,3	**16,8**	11,9	**18,1**
	DEZ	5,6	8,4	5,2	7,8	5,2	7,9	**12,9**	**19,6**	11,8	**17,7**	**12,4**	**19,0**
Campos do Jordão	JAN	5,0	7,6	4,7	7,1	4,7	7,2	11,6	**17,7**	10,6	**16,2**	11,0	**17,0**
	FEV	5,1	7,7	5,1	7,6	4,7	7,2	11,7	**17,8**	11,2	**17,0**	11,1	**17,2**
	MAR	4,1	6,3	4,9	7,3	4,6	6,9	9,8	**15,1**	11,0	**16,5**	10,5	**16,2**
	ABR	3,8	5,8	5,3	7,9	4,6	6,9	9,1	**14,1**	**12,1**	**17,9**	10,5	**16,0**
	MAI	2,3	3,5	4,0	5,9	3,3	5,0	5,7	9,0	9,3	**13,9**	7,7	11,8
	JUN	2,1	3,1	4,4	6,5	3,5	5,3	5,7	8,9	10,1	**15,0**	8,0	**12,1**
	JUL	2,2	3,2	4,5	6,6	3,4	5,1	5,9	9,1	10,3	**15,3**	7,9	12,0
	AGO	3,1	4,8	4,8	7,1	3,8	5,8	7,7	11,8	10,9	**16,2**	8,8	**13,5**
	SET	3,1	4,7	4,0	5,9	3,8	5,7	7,8	**12,0**	9,4	**14,0**	8,9	**13,5**
	OUT	5,0	7,6	5,5	8,1	5,1	7,6	11,9	**18,1**	**12,2**	**18,2**	11,7	**18,0**
	NOV	3,8	5,8	3,6	5,5	3,7	5,6	9,3	**14,3**	8,6	**13,1**	9,2	**14,3**
	DEZ	5,0	7,5	4,4	6,7	4,5	6,9	11,6	**17,7**	10,1	**15,5**	10,9	**16,8**

Legenda	
Fluxo de ar (Trocas/hora)	
0	**19**

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 15 Renovação de ar (Trocas por hora) na ZB8/Escritório

Cidade	Meses	4BCS						8BCS					
		Altura do Brise Chaminé Solar						Altura do Brise Chaminé Solar					
		Alt3	Alt5	Alt3	Alt5	Alt3	Alt5	Alt3	Alt5	Alt3	Alt5	Alt3	Alt5
		Orientação solar da Fachada						Orientação solar da Fachada					
		L	L	N	N	O	O	L	L	N	N	O	O
Rio de Janeiro	JAN	5,3	8,0	5,0	7,5	5,1	7,7	**12,1**	**18,2**	11,0	**16,6**	11,7	**17,7**
	FEV	5,5	8,2	5,6	8,2	5,5	8,2	**12,2**	**18,4**	**12,0**	**17,9**	**12,2**	**18,5**
	MAR	4,8	7,1	5,5	8,1	5,2	7,8	10,8	**16,3**	**12,1**	**17,8**	11,7	**17,7**
	ABR	3,8	5,6	4,7	6,9	4,3	6,4	8,6	**13,0**	10,5	**15,5**	9,6	**14,5**
	MAI	3,2	4,8	4,6	6,8	4,0	6,0	7,4	11,3	10,4	**15,3**	8,9	**13,5**
	JUN	2,8	4,2	4,2	6,1	3,5	5,3	6,4	9,7	9,2	**13,5**	7,8	11,6
	JUL	3,6	5,3	5,2	7,7	4,3	6,5	8,1	**12,1**	11,6	**17,0**	9,6	**14,3**
	AGO	3,4	5,1	4,6	6,8	4,1	6,0	7,9	12,0	10,4	**15,3**	9,0	**13,6**
	SET	3,6	5,4	4,3	6,3	3,8	5,8	8,3	**12,6**	9,5	**14,1**	8,8	**13,4**
	OUT	4,4	6,6	4,8	7,0	4,5	6,7	10,0	**14,9**	10,4	**15,4**	10,2	**15,4**
	NOV	4,9	7,3	4,8	7,1	4,9	7,3	11,1	**16,8**	10,6	**15,9**	11,1	**16,8**
	DEZ	4,9	7,3	4,5	6,7	4,7	7,0	10,9	**16,4**	9,8	**14,7**	10,5	**15,9**
Belém	JAN	5,7	8,5	4,7	7,1	4,8	7,3	**12,5**	**18,2**	10,5	**15,9**	10,9	**16,5**
	FEV	5,5	8,2	4,7	7,1	4,8	7,3	**12,2**	**18,4**	10,4	**15,8**	10,8	**16,5**
	MAR	5,3	7,9	5,1	7,5	4,8	7,3	11,8	**16,3**	10,9	**16,3**	10,9	**16,6**
	ABR	4,7	7,0	5,0	7,4	4,6	6,9	10,3	**13,0**	10,8	**16,0**	10,1	**15,3**
	MAI	4,5	6,7	5,0	7,5	4,8	7,2	9,8	11,3	11,0	**16,3**	10,5	**15,8**
	JUN	4,4	6,6	5,1	7,5	5,1	7,6	9,7	9,7	11,2	**16,5**	11,2	**16,6**
	JUL	4,6	6,8	5,2	7,7	5,3	7,8	10,1	**12,1**	11,4	**16,8**	11,4	**16,9**
	AGO	4,9	7,4	5,5	8,1	5,4	8,0	11,0	12,0	12,0	**17,7**	11,8	**17,7**
	SET	5,4	8,1	5,6	8,2	5,5	8,2	**12,1**	**12,6**	11,9	**17,6**	**12,1**	**18,2**
	OUT	5,9	8,7	5,2	7,9	5,3	7,9	**13,0**	**14,9**	11,4	**17,1**	11,7	**17,8**
	NOV	5,9	8,8	5,0	7,6	5,3	7,9	**13,0**	**16,8**	11,1	**16,9**	11,8	**17,8**
	DEZ	5,6	8,3	4,7	7,0	4,8	7,3	**12,3**	**16,4**	10,4	**15,8**	10,8	**16,4**

Legenda
Fluxo de ar (Trocas/hora)
0 **19**

Fonte: Elaborado pelo autor

Nas cidades da ZB1 o número de BCS instalados por ambiente impactou de forma mais significativa a taxa de renovação de ar. Para duas vezes mais dispositivos instalados, a média das renovações para a ZB1 foi de 2,4 trocas/hora, com máximo de 8,4 (4BCS) e 19,6 (8BCS), contra 2,2 nas cidades da ZB8 com máximo de 8,8 (4BCS) e 18,5 (8BCS). Na comparação entre a diferença de fluxo resultante da

variação do número de BCS instalados (4BCS para 8BCS) nas cidades da ZB1, o maior efeito ocorreu no inverno, chegando a 2,9 trocas em julho, nas cidades de Bento Gonçalves e Campos do Jordão, para o dispositivo com ALT5, instalado na fachada norte. Nas cidades da ZB8 essa diferença não acedeu 2,3 trocas.

A partir do cruzamento das informações obtidas na primeira etapa da simulação, os parâmetros mais adequados para proporcionar conforto e renovação de ar foram, em salas de aula: 8BCS instalados por ambiente, cada dispositivo com ALT3 e orientados para norte; e em escritórios 8BCS instalados por ambiente, cada dispositivo com ALT5 e orientados também para norte.

Na análise dos diferentes parâmetros e variáveis climáticas da simulação dos ambientes com o BCS, foram obtidas diferenças de mais de 80% no POC entre os diferentes casos, além de uma grande variação de taxas de renovação de ar. Esses resultados reforçam as conclusões de Lee e Strand (2009), Neves e Silva (2017) e Hosien e Salim (2017) ao destacar a importância da seleção dos parâmetros mais adequados e da avaliação das variáveis ambientais para a utilização de chaminés solares.

3.3.3 Segunda etapa de simulação salas de aula e escritório

Embora na simulação das salas de aula na primeira etapa o maior número de horas em conforto tenha sido alcançado com ALT3, para a segunda etapa da simulação, foram utilizados os BCS com ALT2. A escolha pela ALT2 se justifica devido a diferença entre as horas em conforto (ALT3-ALT2) ser pequena e a ALT2 apresentar a melhor relação entre conforto, renovação de ar e impacto na fachada da edificação. Da mesma forma, e com a mesma justificativa, embora na simulação dos escritórios o maior número de horas em conforto tenha sido alcançado com ALT5, para a segunda etapa da simulação, foram utilizados os BCS com ALT3.

Portanto, na segunda etapa da simulação para salas de aula, os parâmetros adotados foram 8BCS instalados por ambiente, cada dispositivo com ALT2, orientados para norte, e para escritórios, 8BCS instalados por ambiente, cada dispositivo com ALT3, orientados para norte (Tabela 16).

Tabela 16 Parâmetros adotados na segunda etapa de simulação

	Parâmetros Analisados				
	ZB	**Cidade**	**Altura do Dispositivo**	**Orientação**	**Nº de Chaminés**
Sala de Aula	ZB1	Bento Gonçalves Campos do Jordão	ALT2	N	8BCS
	ZB2	Santa Maria São João del Rei			
	ZB3	Porto Alegre Belo Horizonte			
	ZB4	Brasília			
	ZB5	Niterói			
	ZB6	Campo Grande			
	ZB7	Cuiabá			
	ZB8	Rio de Janeiro Belém			
Escritório	ZB1	Bento Gonçalves Campos do Jordão	ALT3	N	8BCS
	ZB2	Santa Maria São João del Rei			
	ZB3	Porto Alegre Belo Horizonte			
	ZB4	Brasília			
	ZB5	Niterói			
	ZB6	Campo Grande			
	ZB7	Cuiabá			
	ZB8	Rio de Janeiro Belém			

Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.3.1 Percentual das horas em conforto

Como esperado, as salas de aula e escritórios simuladas para as cidades da ZB1 apresentaram o maior POC (Figura 31 e 32). Na comparação entre cidades na mesma zona bioclimática, e com diferentes latitudes, na ZB1, ZB2 e ZB3 as cidades com menores latitudes apresentaram maiores quantidade de horas em conforto para os dois ambientes simulados. É possível que a combinação entre temperaturas externas mais próximas ao nível de conforto, maiores taxas de radiação solar incidente no BCS e o sombreamento proporcionado pelo dispositivo tenham contribuído para esse

resultado. Em contraste, a cidade do Rio de Janeiro (latitude 22,90 sul), apresentou uma quantidade de horas em conforto 27% maior que a cidade de Belém (latitude 01,45 sul), possivelmente devido às diferenças na temperatura externa entre as cidades, maiores em Belém.

Inesperadamente, a simulação dos escritórios nas cidades de Brasília e Niterói apresentaram valores de conforto elevados, semelhantes aos índices da ZB2 e ZB3 (Figura 31 e 32). Esse resultado é provavelmente devido à combinação de temperaturas externas intermediárias, embora mais quente que as cidades da ZB1 e ZB2 ainda próximas ao nível de conforto, e menor densidade de carga térmica interna. Com referência no POC, foi possível agrupar os resultados em três grupos: no primeiro estão as cidades da ZB1 com os maiores valores; no segundo as cidades da ZB2, ZB3, ZB4 e ZB5 com POCs intermediários; e o terceiro as cidades da ZB6, ZB7 e ZB8 com os menores valores de POC (Figuras 31 e 31) Os gráficos de cada cidade estão contidos no Apêndice C.

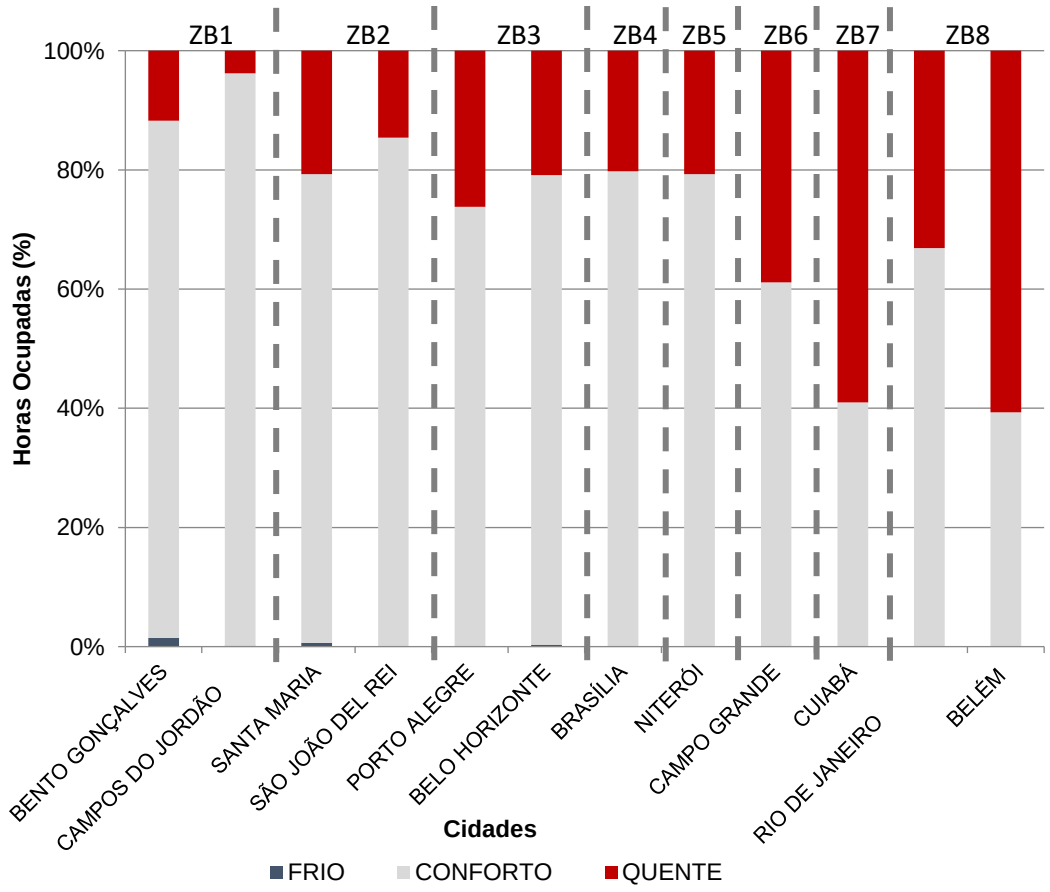

Figura 31 Condições de conforto para as salas de aula nas cidades analisadas na segunda etapa
Fonte: Elaborado pelo autor

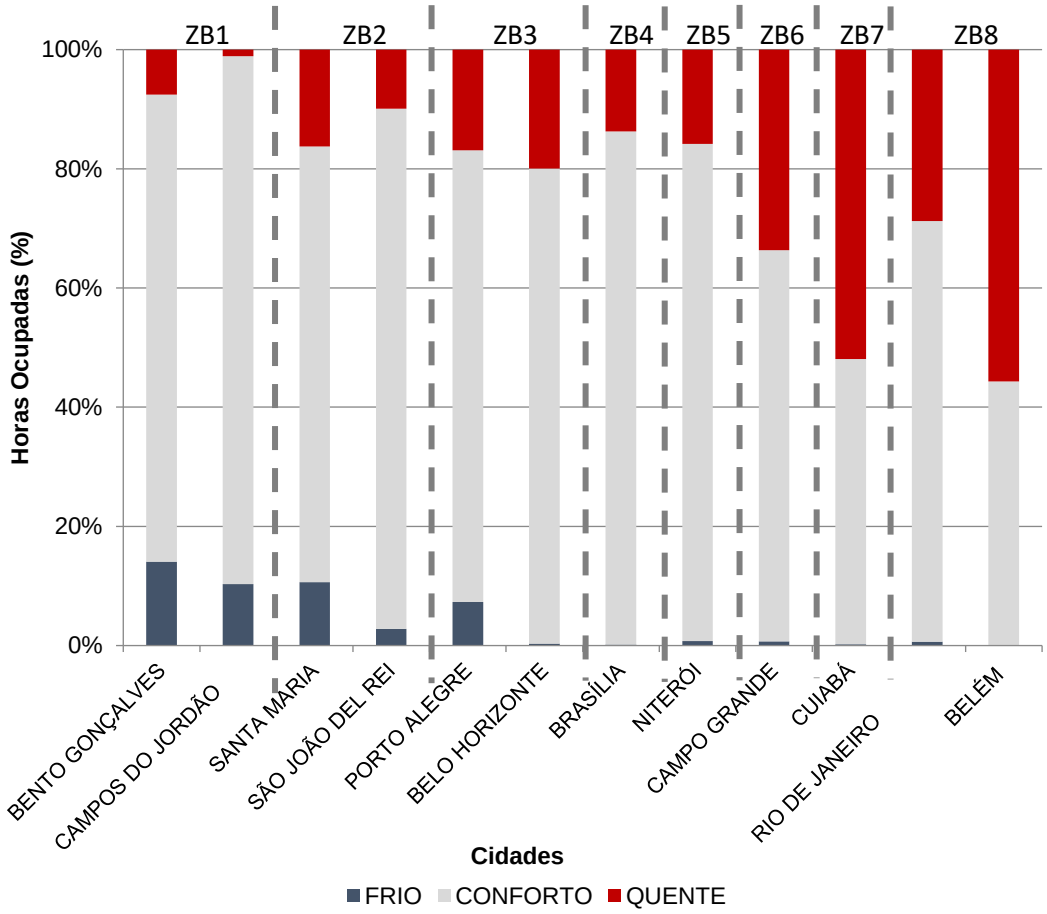

Figura 32 Condições de conforto para os escritórios nas cidades analisadas na segunda etapa
Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da comparação entre os ambientes com o BCS e seus respectivos CBs, foi possível afirmar que o dispositivo BCS proporcionou aumento significativo no número das horas em conforto e redução nas horas em desconforto por calor em todas as cidades analisadas (Tabela 17). Nas simulações das salas de aula, Belo Horizonte foi a cidade que apresentou o maior aumento das horas em conforto, 45%, seguida de Brasília, 39%, Niterói, 35% e São João del Rei, 35%. Em escritórios, o maior aumento das horas em conforto foi em Brasília, 35%, seguido de Porto Alegre, 30%, Niterói, 30% e São João del Rei 27% (Tabela 17).

Tabela 17 Condição de conforto na segunda etapa de simulação

ZB	Cidade	Conforto	Sala de Aula			Escritório		
			BCS	CB	Diferença	BCS	CB	Diferença
ZB1	Bento Gonçalves	Frio	1%	0%	1%	14%	6%	8%
		Conforto	87%	63%	24%	78%	67%	11%
		Calor	12%	36%	-24%	8%	26%	-18%
	Campos do Jordão	Frio	0%	0%	0%	10%	2%	8%
		Conforto	96%	67%	29%	89%	77%	12%
		Calor	4%	33%	-29%	1%	21%	-20%
ZB2	Santa Maria	Frio	1%	0%	1%	11%	5%	6%
		Conforto	79%	58%	21%	73%	63%	10%
		Calor	21%	42%	-21%	16%	32%	-15%
	São João del Rei	Frio	0%	0%	0%	3%	1%	2%
		Conforto	85%	50%	35%	87%	60%	27%
		Calor	15%	50%	-35%	10%	39%	-29%
ZB3	Porto Alegre	Frio	0%	0%	0%	7%	0%	7%
		Conforto	74%	55%	19%	76%	46%	30%
		Calor	26%	45%	-19%	17%	55%	-38%
	Belo Horizonte	Frio	0%	0%	0%	0%	3%	-3%
		Conforto	79%	33%	45%	80%	61%	19%
		Calor	21%	67%	-46%	20%	36%	-16%
ZB4	Brasília	Frio	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		Conforto	80%	41%	39%	86%	51%	35%
		Calor	20%	59%	-39%	14%	49%	-35%
ZB5	Niterói	Frio	0%	0%	0%	1%	0%	1%
		Conforto	79%	44%	35%	83%	54%	30%
		Calor	21%	56%	-35%	16%	46%	-30%
ZB6	Campo Grande	Frio	0%	0%	0%	1%	0%	1%
		Conforto	61%	31%	31%	66%	41%	25%
		Calor	39%	69%	-31%	34%	59%	-26%
ZB7	Cuiabá	Frio	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		Conforto	41%	18%	23%	48%	28%	20%
		Calor	59%	82%	-23%	52%	72%	-20%
ZB8	Rio de Janeiro	Frio	0%	0%	0%	1%	0%	1%
		Conforto	67%	49%	18%	71%	46%	25%
		Calor	33%	51%	-18%	29%	53%	-24%
	Belém	Frio	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		Conforto	39%	17%	22%	44%	32%	12%
		Calor	61%	83%	-22%	56%	68%	-12%

Legenda		
Frio	Conforto	Calor

Fonte: Elaborado pelo autor

Em média, na comparação com o CB, o aumento das horas em conforto foi de 28% em salas de aula e 21% em escritórios. Em relação as horas em desconforto o BCS apresentou uma contribuição relevante na redução das horas em desconforto por calor, em média 29% para salas de aula e 24% para escritórios. Entretanto, nos escritórios, o BCS causou um aumento de 5% nas horas em desconforto por frio nas cidades da ZB1, ZB2 e ZB3.

3.3.3.2 Renovação de ar

Os resultados da renovação de ar indicam que as maiores taxas foram obtidas nos escritórios, em média 3,3 a mais que nas salas de aula (Tabela 18 e 19). O aumento dessas taxas nos escritórios foi resultado do aumento da altura do BCS (ALT2 para salas de aula para ALT3 para escritórios).

As taxas de renovação de ar na ZB2 e ZB3 seguiram o mesmo padrão apresentado na primeira etapa de simulação para a ZB1, com valores maiores nos meses mais quentes e menores nos meses mais frios. A partir da ZB4 a distribuição da renovação foi mais uniforme, e não apresentou diferenças significativas entre os meses do ano (Tabela 18 e 19).

Tabela 18 Renovação de ar das salas de aula e escritório nas cidades analisadas na segunda etapa/ZB1, ZB2 e ZB3

Cidade	Mês	Sala de Aula	Escritório	Cidade	Mês	Sala de Aula	Escritório
		ALT2	**ALT3**			**ALT2**	**ALT3**
		Norte	**Norte**				
Bento Gonçalves	JAN	8,1	11,3	**Campos do Jordão**	JAN	7,2	10,6
	FEV	8,5	**12,2**		FEV	7,6	11,2
	MAR	7,9	11,5		MAR	7,4	11,0
	ABR	5,9	9,2		ABR	8,1	**12,1**
	MAI	4,6	7,8		MAI	5,8	9,3
	JUN	2,5	4,9		JUN	6,2	10,1
	JUL	3,8	6,8		JUL	6,3	10,3
	AGO	4,9	7,9		AGO	7,1	10,9
	SET	5,8	9,0		SET	6,0	9,4
	OUT	5,4	8,2		OUT	8,3	**12,2**
	NOV	7,9	11,3		NOV	5,8	8,6
	DEZ	8,4	11,8		DEZ	7,0	10,1
Santa Maria	JAN	9,4	**12,9**	**São João del Rei**	JAN	7,3	10,2
	FEV	8,2	11,3		FEV	8,4	11,9
	MAR	7,1	10,3		MAR	7,8	11,0
	ABR	6,1	9,3		ABR	7,3	10,9
	MAI	5,1	8,4		MAI	6,3	9,9
	JUN	2,4	4,5		JUN	5,7	9,3
	JUL	3,5	6,1		JUL	7,0	11,3
	AGO	5,1	8,3		AGO	7,6	11,2
	SET	5,9	9,3		SET	6,8	10,3
	OUT	7,5	10,7		OUT	6,7	10,0
	NOV	8,1	11,2		NOV	7,1	10,1
	DEZ	7,8	10,8		DEZ	7,0	9,8
Porto Alegre	JAN	8,8	**12,1**	**Belo Horizonte**	JAN	8,3	11,2
	FEV	8,4	**12,1**		FEV	8,2	11,4
	MAR	8,1	11,8		MAR	9,9	**13,5**
	ABR	6,3	9,9		ABR	7,9	11,5
	MAI	3,7	6,5		MAI	7,7	11,4
	JUN	3,8	6,6		JUN	7,6	11,6
	JUL	3,4	6,2		JUL	7,3	11,2
	AGO	4,2	7,1		AGO	8,4	11,9
	SET	6,3	9,9		SET	8,6	11,9
	OUT	7,7	11,3		OUT	8,3	11,9
	NOV	7,6	10,9		NOV	8,8	11,8
	DEZ	9,8	**13,3**		DEZ	6,8	9,6

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 19 Renovação de ar das salas de aula e escritório nas cidades analisadas na segunda etapa/ZB3, ZB4 e ZB5

Cidade	Mês	Sala de Aula	Escritório	Cidade	Mês	Sala de Aula	Escritório
		ALT2	**ALT3**			**ALT2**	**ALT3**
		Norte	**Norte**			**Norte**	**Norte**
Brasília	JAN	8,3	11,1	**Niterói**	JAN	7,4	10,2
	FEV	8,6	11,8		FEV	8,7	11,7
	MAR	7,6	10,8		MAR	7,5	10,5
	ABR	8,9	**12,6**		ABR	6,6	9,9
	MAI	8,1	12,0		MAI	6,1	9,2
	JUN	8,3	**12,1**		JUN	5,0	7,9
	JUL	8,5	**12,5**		JUL	6,1	9,8
	AGO	8,2	11,6		AGO	5,6	8,4
	SET	8,3	11,9		SET	5,0	7,5
	OUT	6,9	9,9		OUT	6,1	8,9
	NOV	6,8	9,6		NOV	6,6	9,2
	DEZ	6,8	9,6		DEZ	6,5	9,0
Cuiabá	JAN	8,4	11,3	**Campo Grande**	JAN	7,8	10,7
	FEV	9,4	**12,7**		FEV	8,6	11,9
	MAR	9,0	**12,6**		MAR	8,9	**12,5**
	ABR	8,3	11,7		ABR	8,3	11,9
	MAI	8,8	**12,4**		MAI	6,4	9,6
	JUN	7,7	11,4		JUN	6,7	10,3
	JUL	9,1	**13,1**		JUL	8,1	11,9
	AGO	9,8	**13,4**		AGO	8,6	11,8
	SET	9,3	**12,9**		SET	8,5	11,8
	OUT	9,3	**12,6**		OUT	8,7	12,0
	NOV	9,2	11,9		NOV	8,9	11,9
	DEZ	8,6	11,2		DEZ	8,6	11,4
Rio de Janeiro	JAN	8,2	11,0	**Belém**	JAN	6,6	10,5
	FEV	8,6	**12,0**		FEV	6,6	10,4
	MAR	8,8	**12,1**		MAR	7,5	10,9
	ABR	7,3	10,5		ABR	7,3	10,8
	MAI	7,0	10,4		MAI	7,5	11,0
	JUN	5,9	9,2		JUN	7,7	11,2
	JUL	7,5	11,5		JUL	7,9	11,4
	AGO	7,3	10,4		AGO	8,4	12,0
	SET	6,5	9,5		SET	8,3	11,9
	OUT	7,3	10,4		OUT	7,6	11,4
	NOV	7,6	10,6		NOV	7,3	11,1
	DEZ	7,2	9,8		DEZ	6,5	10,4

Fonte: Elaborado pelo autor

3.4 Conclusão

O presente artigo teve como objetivo avaliar o potencial do Brise-Chaminé-Solar (BCS), por meio da variação de parâmetros, para proporcionar conforto térmico e renovação de ar em dois ambientes: salas de aula e escritórios, com diferentes densidades de cargas térmicas internas, em diferentes cidades do zoneamento bioclimático brasileiro.

A partir dos climas analisados, os resultados apresentaram diferenças de até 80% no número de horas em conforto, além de uma grande variação de taxas de renovação de ar. Tais resultados reforçam que a correta seleção do clima em que se pretende instalar uma chaminé solar é fundamental para garantir o desempenho do dispositivo.

Em relação às renovações de ar, o dispositivo foi capaz de proporcionar uma média mensal entre 2,4 e 13,5 trocas por hora. É importante destacar que as renovações de ar obtidas através de chaminés solares são menores que as renovações obtidas por janelas mantidas abertas. Portanto, as taxas de renovação obtidas com o BCS foram consideradas satisfatórias e seu uso foi indicado para locais sem disponibilidade de vento ou quando não é possível ou desejável a abertura de janelas.

A partir da seleção dos melhores parâmetros e climas, os resultados obtidos por meio de simulação com o *EnergyPlus* comprovaram o desempenho do BCS em aumentar o POC e reduzir o desconforto por calor para todas as cidades analisadas. O aumento do POC em relação ao caso base foi: em média 28%, com máximo de 45% em salas de aula na cidade de Belo Horizonte; e média de 21%, com máximo de 35% em escritórios na cidade de Brasília-DF. A redução do desconforto por calor foi: em média 29%, com máximo de 46% para salas de aula na cidade de Belo Horizonte e média de 24% com máximo de 38% para escritórios na cidade de Porto Alegre.

Tendo como base esses resultados, foi possível identificar que as zonas bioclimáticas ZB1, seguidas da ZB2, ZB3, ZB4 e ZB5 foram os locais em que o BCS foi mais eficiente, o que torna esses climas potencialmente favoráveis para a utilização do dispositivo.

3.5 Referências Bibliográficas

AFLAKI, A.; MAHYUDDIN, N.; MAHMOUD, A.; BAHARUM, R. A review on natural ventilation applications through building façade components and ventilation openings in tropical climates. **Energy and Buildings.** v.101, p.153-162, 2015.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 55**: Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, 2013.

ASADI, S.; FAKHARI, M.; FAYAZ, R.; MAHDAVIPARSA, A. The effect of solar chimney layout on ventilation rate in buildings. **Energy and Buildings**. v.123, p.71-78, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS - ABNT. **NBR 15220-3.** Desempenho térmico de edificações - parte 3: Zoneamento bioclimáticos brasileiros e diretrizes construtivas para habitação unifamiliar de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

BARBOSA, S. **Thermal performance of naturally ventilated office buildings with double skin façade under Brazilian climate conditions**. Tese (Doutorado) - University of Brighton, Brighton, Reino Unido, 2016.

CÂNDIDO, C.; DE DEAR, R. e LAMBERTS, R. Combined thermal acceptability and air movement assessments in a hot humid climate zone. **Building and Environment**. v.46, p.379–385, 2011.

CÂNDIDO, C.; DE DEAR, R.; LAMBERTS, R. e BITTENCOURT, L. Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone. **Building and Environment**. v.45, p.222–229, 2010a.

CÂNDIDO, C.; LAMBERTS, R. BITTENCOURT, L e DE DEAR, R. Aplicabilidade dos limites da velocidade do ar para efeito de conforto em climas quentes e úmidos. **Ambiente Construído**. v. 10, p.59-68, 2010b.

COELHO, G. M.; GHISI, E. Correlação do consumo de energia com características construtivas e tipologias arquitetônicas de edifícios de escritórios localizados em Florianópolis. in: IX Encontro Nacional e V Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído**...Anais** Ouro Preto: ENCAC, 2007.

DE DEAR, R.; AKIMOTO, T.; ARENS, E. A.; BRAGER, G.; CÂNDIDO C.; CHEONG, K. W. D.; LI, B.; NISHIHARA, N.; SEKHAR, S. C.; TANABE, S.; TOFTUM, J.; ZHANG, H.; ZHU, Y. Progress in thermal comfort research over the last twenty years. In. **Indoor Air.** v.23, p.442-461, 2013.

DE DEAR, R.; BRAGER, G.; COOPER, D. **Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference: Final Report ASHRAE RP- 884**. 1997.

DE DEAR, R.; KIM, J.; CÂNDIDO, C.; DEUBLE, M. Adaptative thermal comfort in Australian school classrooms. **Building Research & Information**. v.43, p.383-398, 2015.

EFEOMA, M.; UDUKU, O. Assessing thermal comfort and energy efficiency in tropical African offices using the adaptive approach. **Structural Survey**. v.32, p.396-412, 2014.

HOLSIEN, M.; SELIM, S. Effects of the geometrical and operational parameters and alternative outer cover materials on the performance of solar chimney used for natural ventilation. **Energy and Buildings**. v.138, p.355-367, 2016.

JONSSON, A.; ROOS, A. Evaluation of Control Strategies for Different Smart Window Combinations Using Computer Simulations. **Solar Energy**. v.84, p.1-9, 2010.

KHANAL, R.; LEI, C. Solar chimney - A passive strategy for natural ventilation. **Energy and Buildings**. v.43, p.1811-1819, 2011.

LEE, K.; STRAND, R. Enhancement of natural ventilation in buildings using a thermal chimney. **Energy and Buildings**. v.41, p.615-621, 2009.

MACIEL, L. F. **Desenvolvimento de dispositivo de proteção solar com ênfase na ventilação natural: Um método de avaliação baseado em CFD**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2016.

MATHUR, J.; BANSAL, N.; MATHUR, S; JAIN, M.; ANUPMA. Experimental investigation on solar chimney for room ventilation**. Solar Energy.** v.80, p.927-935, 2006.

MICHAILIDIS, I.; BALDI, S.; PICHLER, M.; KOSMATOPOULOS, E.; SANTIAGO, J. Proactive control for solar energy exploitation: A German high-inertia building case study. **Applied Energy**. v.115, p.409-420, 2015.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanço Energético Nacional Ano Base 2016**. Disponível em <ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf> Acessado em outubro de 2017.

_____. **Requisitos técnicos da qualidade para o nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos**. Brasília, 2010.

NASCIMENTO, L.; BARBOSA, M. Análise da influência de variáveis construtivas e de variáveis de uso e ocupação no consumo de energia em edifícios de escritório. in: IX Encontro Nacional e V Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. **Anais...** Natal: ENCAC, 2009.

NEVES, L.; SILVA, S. Análise paramétrica de chaminés solares visando à otimização de desempenho em climas típicos do território brasileiro. **Ambiente Construído**. v.17, p.163-182, 2017.

PEREIRA, I.; ASSIS, E. Avaliação de modelos de índices adaptativos para uso no projeto arquitetônico bioclimático. **Ambiente Construído**. v.10, p.31-51, 2010.

SHI, L. ZHANG, G. CHENG, X. GUO, Y. WANG, J. CHEW, M. Developing an empirical model for roof solar chimney based on experimental data from various test rigs. **Building and Environment**. v.110, p.115-128, 2016.

STRAUB, K.; LEÃO, E.; KUCHEN, E.; LEÃO, M. Determinação da temperatura de neutralidade em salas de aula do ensino superior para as zonas bioclimáticas do estado de Mato Grosso. **Ambiente Construído.** v.17, p.97-109, 2017.

TAN, A.; WONG, N. Influences of ambient air speed and internal heat load on the performance of solar chimney in tropics. **Solar Energy.** v.102 p. 116-125, 2014.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA E FUNDAÇÃO DE AMPARO A PESQUISA DE MINAS GERAIS. Maciel, L. Villar, R. Carlo, J. Tibiriçá, A e Tibiriçá, A**. Brise-Chaminé-Solar**. BR1020160032237. 2016, Brasil.

ZHAI, X.; SONG, Z. e WANG, R. A review for the applications of solar chimneys in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v.15, p.3757-3667, 2011.

CAPÍTULO 4: CONCLUSÃO GERAL

Esta dissertação teve como objetivo investigar parâmetros e o potencial de um modelo especifico de chaminé solar, o Brise-Chaminé-Solar® (BCS), em proporcionar conforto térmico e renovação de ar em salas de aula e escritórios no clima brasileiro. A partir da identificação um campo pouco explorado pelos trabalhos disponíveis na literatura, a simulação anual de fluxos de ar resultados de chaminés solares, procurou-se preencher essa lacuna a por meio de simulação termoenergética no *EnergyPlus* de um dispositivo para um ano completo.

No Capítulo 2, foi avaliado o desempenho do *EnergyPlus* para análise dos efeitos da ventilação no dispositivo BCS por meio do teste de três métodos disponíveis no programa. Para validar o programa e eleger o melhor método de simulação, foi necessário comparar a simulação do BCS a um caso base já validado. Para realizar essa comparação, investigou-se indicadores estatísticos e parâmetros numéricos considerados aceitáveis para fluxos de ar em chaminés solares, não encontrados na literatura. Os resultados obtidos comprovaram que o modelo de cálculo *ThermalChimney* é o que apresentou maiores correlações entre a simulação e o caso base. Esse método apresentou indicadores estatísticos como Erro Absoluto Médio entre 37 e 52% e Erro Quadrático Médio entre 0,0005 e 0,0015 e, por meio da análise em gráficos de dispersão, coeficiente de determinação entre 0,696 e 0,789. Os valores apresentados foram considerados aceitáveis em virtude das limitações da simulação e possibilitaram o estudo de parâmetros adicionais no capítulo 3.

No Capítulo 3, buscou-se avaliar os parâmetros e o potencial das chaminés solares em proporcionar conforto térmico (POC) e renovação de ar em ambientes internos com diferentes densidades de cargas térmicas internas, no clima brasileiro. A simulação foi dividida em duas etapas. Na primeira, dois ambientes, uma sala de aula e um escritório foram simulados para duas cidades da ZB1 e duas cidades da ZB8. Nessa etapa foram realizadas variações de parâmetros como orientação solar da fachada, altura e número das chaminés solares instaladas no ambiente. Na segunda etapa, foram selecionados os melhores parâmetros, que proporcionaram maior número de horas em conforto e renovação de ar e aplicados às demais cidades selecionadas das zonas bioclimáticas ZB2, ZB3, ZB4, ZB5, ZB6 e ZB7.

Os resultados da primeira etapa apresentaram, para os mesmos ambientes, diferenças significativas no número de horas em conforto e nas taxas de renovação de ar. Esses valores reforçam a importância da seleção dos melhores parâmetros e clima em que se pretende instalar uma chaminé solar, para que o dispositivo possa contribuir no conforto térmico e renovação de ar de ambientes internos.

Os resultados da segunda etapa comprovaram o desempenho do BCS em aumentar o POC e reduzir o desconforto por calor para todas as cidades analisadas. O aumento do POC em relação ao caso base foi: em média 28%, com máximo de 45% em salas de aula na cidade de Belo Horizonte-MG; e média de 21%, com máximo de 35% em escritórios na cidade de Brasília-DF. A redução do desconforto por calor foi: em média 29% com máximo de 46% para salas de aula na cidade de Belo Horizonte-MG e em média de 24% com máximo de 38% para escritórios na cidade de Porto Alegre-RS.

Tendo como base esses resultados, foi possível identificar que as zonas bioclimáticas ZB1, seguidas da ZB2, ZB3, ZB4 e ZB5 foram os locais em que o BCS foi mais eficiente, o que torna esses climas potencialmente favoráveis para a utilização do dispositivo.

Em relação às renovações de ar, é importante destacar que os valores obtidos com as chaminés solares são menores que as renovações obtidas por janelas mantidas abertas. Portanto, as taxas de renovação de ar obtidas com o BCS foram consideradas satisfatórias e seu uso indicado para locais sem vento ou quando não é possível ou desejável a abertura de janelas. O dispositivo apresentou potencial para renovação de ar nas salas de aula e nos escritórios, principalmente nos pavimentos inferiores, porém recomenda-se que ela não ultrapasse a altura da edificação por fins de composição da fachada.

4.1 Contribuição da pesquisa

Neste trabalho, foram apresentados resultados de simulações de fluxo de ar que comprovam o desempenho de um modelo de chaminé solar em proporcionar conforto térmico em ambientes internos. A pesquisa aprofundou a investigação do dispositivo BCS e expandiu os estudos sobre seu potencial, ao investigá-lo de maneira mais próxima ao uso real em edificações.

Foi definido o melhor método de simulação termoenergética para chaminés solares no *EnergyPlus,* assim como indicadores estatísticos como EQM e EAM para a comparação entre fluxos de ar anuais e valores de referência considerados aceitáveis nesse tipo de simulação.

A pesquisa explorou parâmetros que proporcionam aumento no desempenho de um ambiente com chaminés solares, relacionou esses dispositivos aos índices de conforto térmico adaptativo e contribuiu para a investigação da aplicação desses dispositivos de acordo com o zoneamento bioclimático brasileiro.

4.2 Limitações do trabalho

As principais limitações encontradas no trabalho foram relacionadas às simplificações na simulação com o *EnergyPlus* devido às limitações do programa em simular mais de uma chaminé por zona (ambiente) e de integrar o modelo de rede ao cálculo das chaminés solares. Recomenda-se, sempre que possível, que sejam realizados testes para calibrar e realizar o maior número de ajustes de variáveis ambientais e parâmetros construtivos.

4.3 Sugestão para trabalhos futuros

A partir dos resultados obtidos ao final desse trabalho, são sugeridas algumas recomendações de continuação para essa pesquisa:

- Continuar a investigação do potencial em proporcionar conforto térmico e trocas de ar do BCS a partir da simulação em *CFD* dos melhores casos identificados.
- Investigar um maior número de cidades na ZB1, ZB2, ZB3, ZB4 e ZB5 visto que os resultados apresentaram variações nas horas em conforto.
- Investigar o desempenho do dispositivo em outros ambientes, que tradicionalmente operam com janelas fechadas, como indústrias e hospitais. Esses ambientes apresentam uma complexidade a mais, devido a exigências e normas de salubridade, renovação de ar e segurança do trabalho mais restritas.

- Analisar os custos relativos à produção, transporte, instalação, manutenção do dispositivo e benefícios na economia de energia em comparação a utilização de condicionamento artificial.
- Associar o BCS a sistemas passivos de resfriamento como pré-resfriamento com dutos enterrados e sistemas de resfriamento evaporativo com micro aspersores, além de sistemas de geração de energia solar com células fotovoltaicas e exaustores de ar.

Apêndice

Apêndice A: Análise das geometrias dos ambientes simulados

Salas de Aula

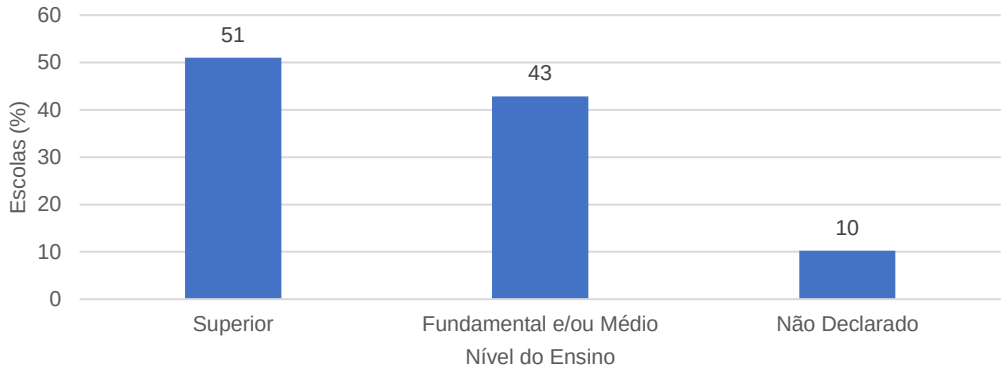

Figura 33 Frequência de ocorrência do nível de ensino das salas de aula analisadas
Fonte: Elaborado pelo autor

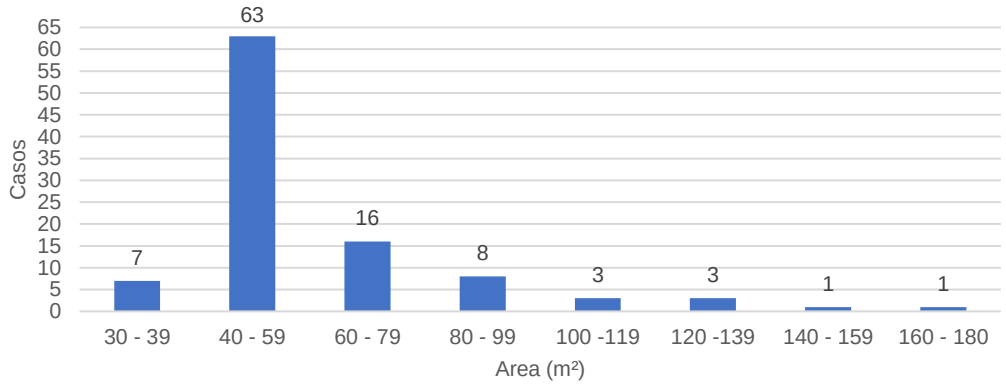

Figura 34 Frequência de ocorrência das áreas entre 30 a 180m² das salas de aula analisadas
Fonte: Elaborado pelo autor

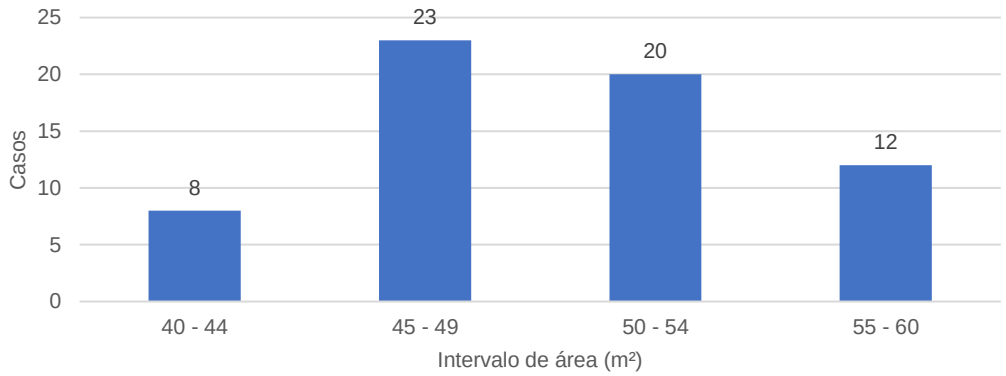

Figura 35 Frequência de ocorrência das áreas entre 40 a 60m² das salas de aula analisadas
Fonte: Elaborado pelo autor

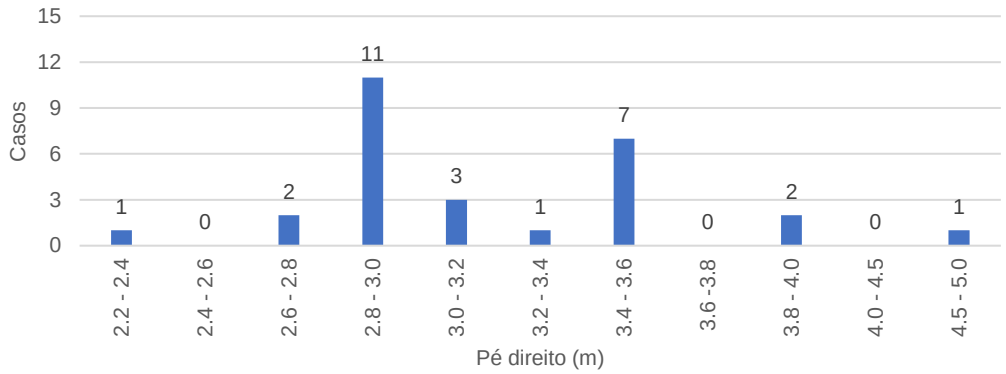

Figura 36 Frequência de ocorrência do pé direito das salas de aula analisadas
Fonte: Elaborado pelo autor

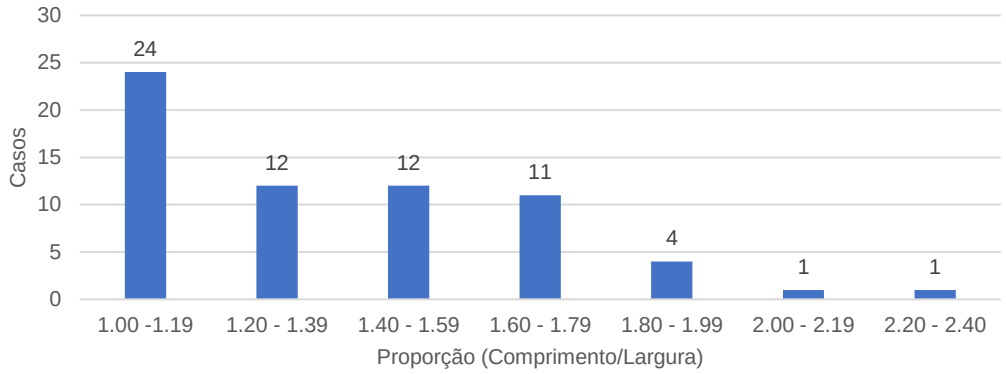

Figura 37 Frequência de ocorrência da proporção entre as dimensões dos ambientes das salas de aula analisadas
Fonte: Elaborado pelo autor

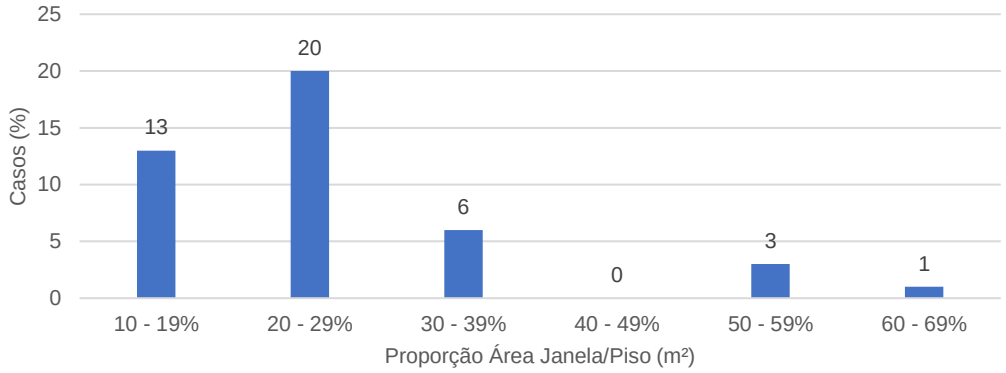

Figura 38 Frequência de ocorrência da proporção entre a área da janela em relação a área do piso das salas de aula analisadas
Fonte: Elaborado pelo autor

Escritórios

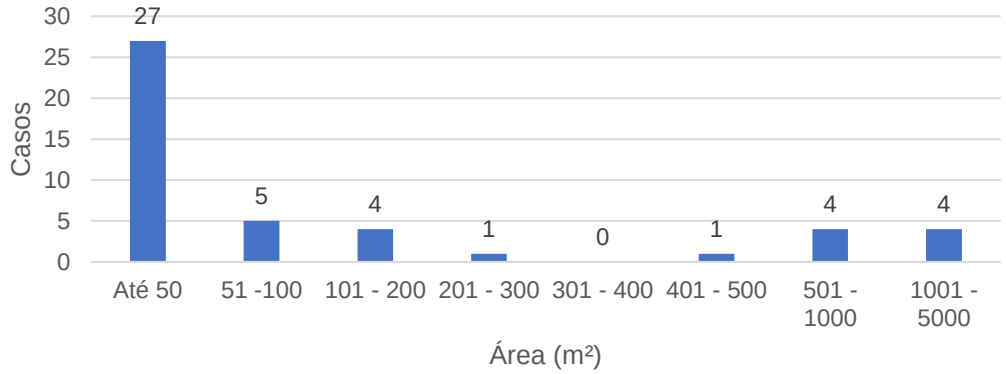

Figura 39 Frequência de ocorrência das áreas dos escritórios analisados
Fonte: Elaborado pelo autor

Apêndice B: Condições de conforto para as salas de aula e escritórios na primeira etapa

Salas de Aula

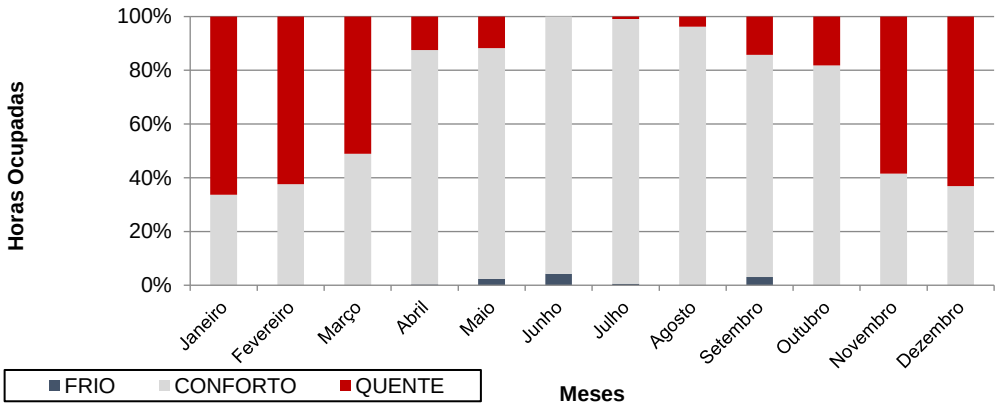

Figura 40 POC Bento Goncalves 4BCS Leste Alt1
Fonte: Elaborado pelo autor

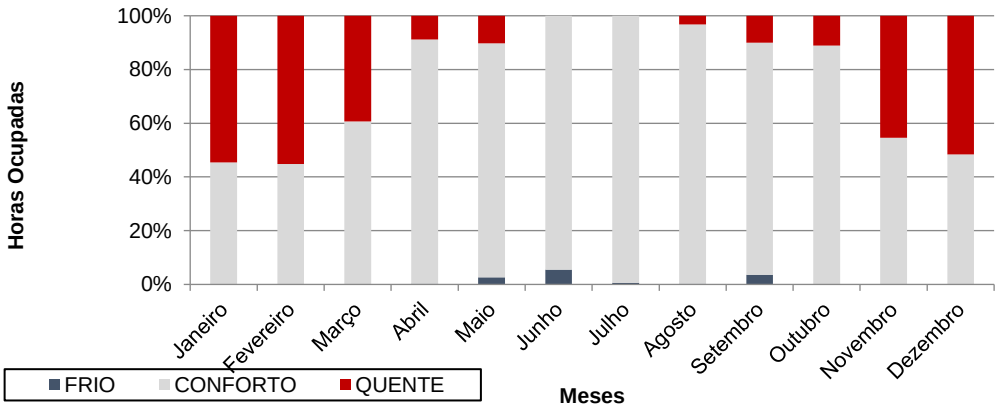

Figura 41 POC Bento Goncalves 4BCS Leste Alt2
Fonte: Elaborado pelo autor

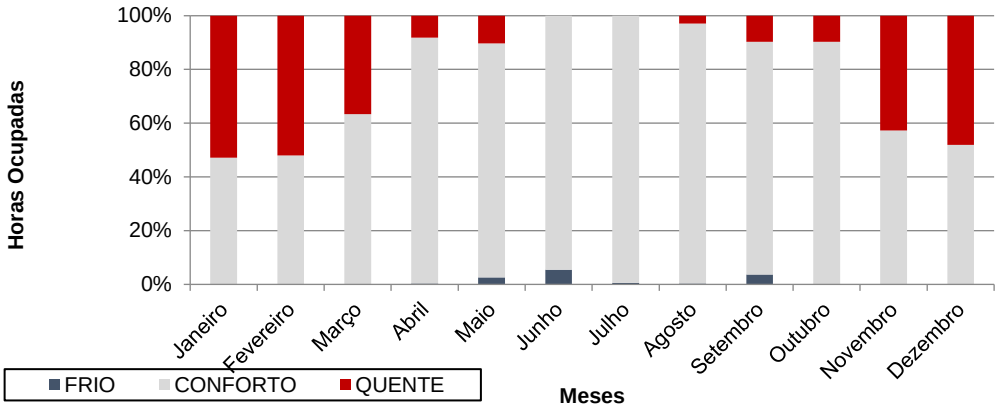

Figura 42 POC Bento Goncalves 4BCS Leste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

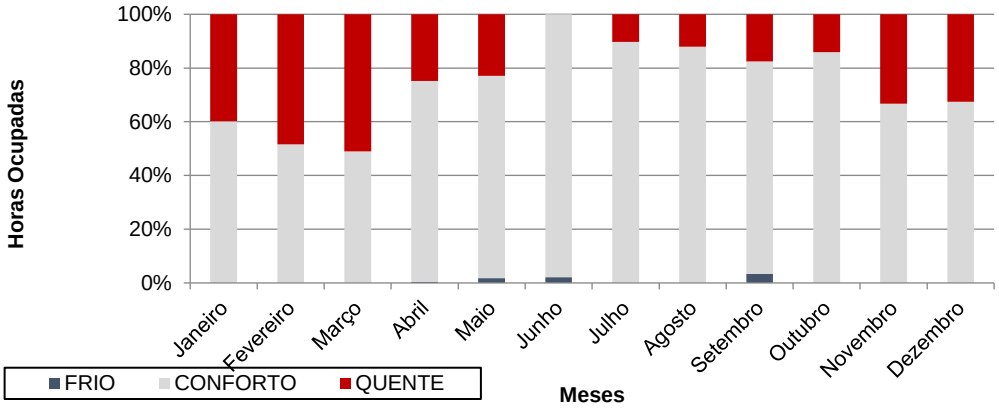

Figura 43 POC Bento Goncalves 4BCS Norte Alt1
Fonte: Elaborado pelo autor

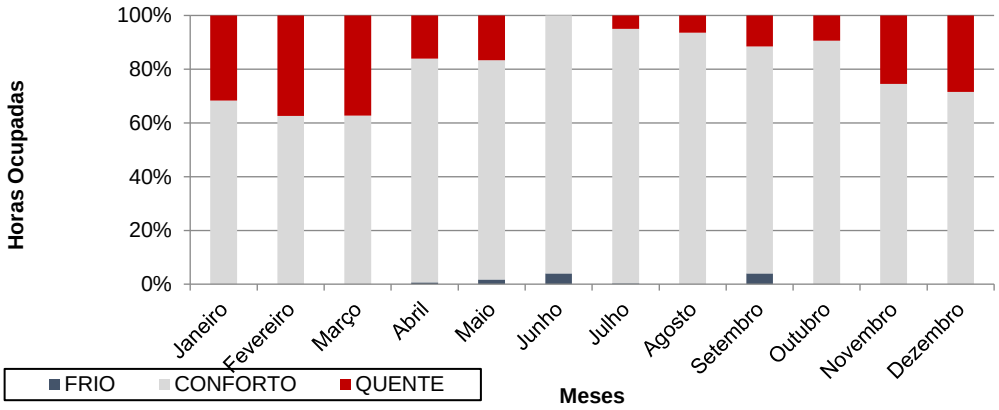

Figura 44 POC Bento Goncalves 4BCS Norte Alt2
Fonte: Elaborado pelo autor

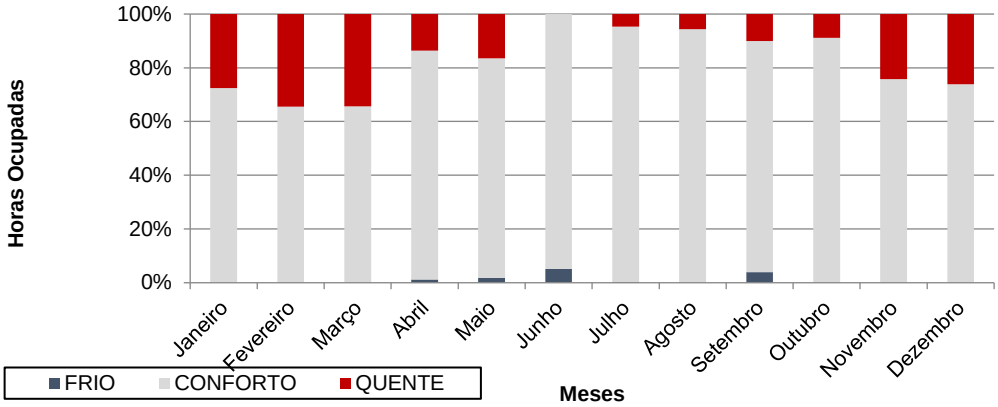

Figura 45 POC Bento Goncalves 4BCS Norte Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

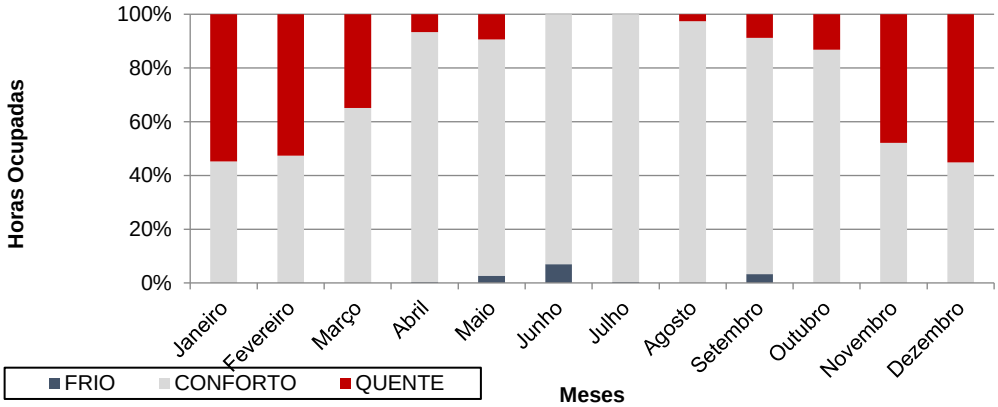

Figura 46 POC Bento Goncalves 4BCS Oeste Alt1
Fonte: Elaborado pelo autor

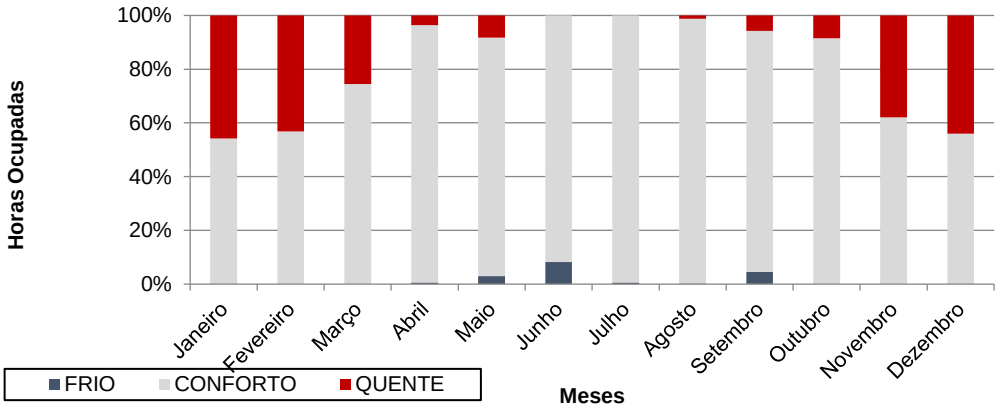

Figura 47 POC Bento Goncalves 4BCS Oeste Alt2
Fonte: Elaborado pelo autor

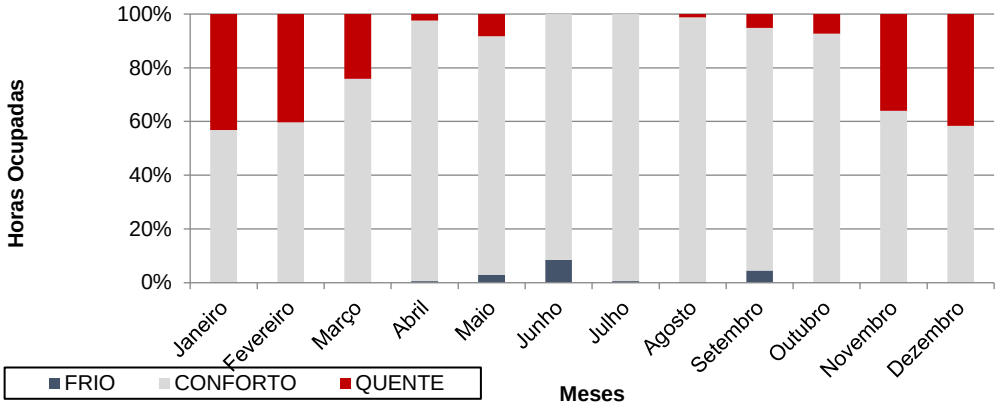

Figura 48 POC Bento Goncalves 4BCS Oeste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

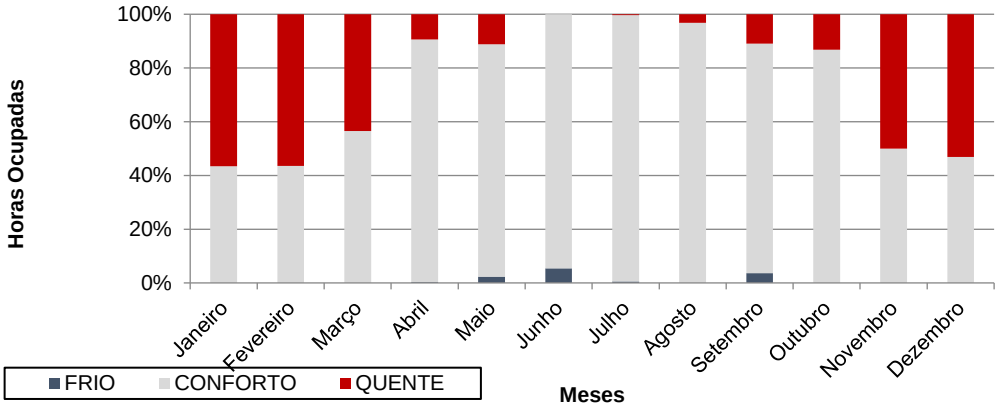

Figura 49 POC Bento Goncalves 8BCS Leste Alt1
Fonte: Elaborado pelo autor

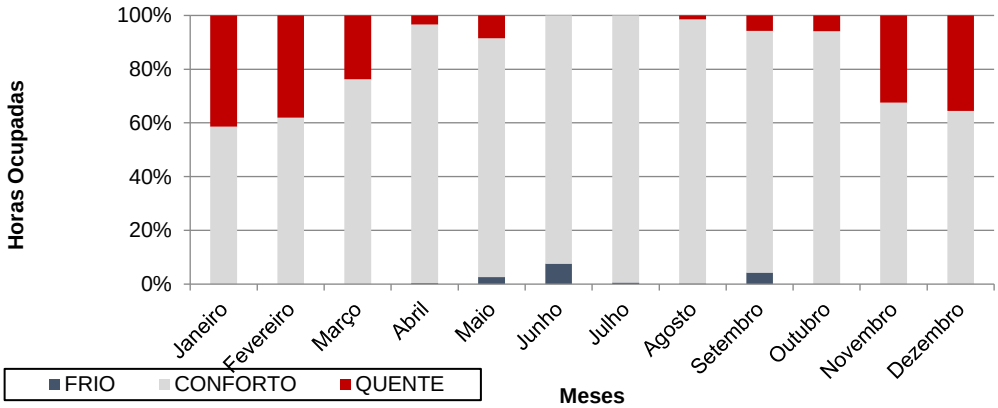

Figura 50 POC Bento Goncalves 8BCS Leste Alt2
Fonte: Elaborado pelo autor

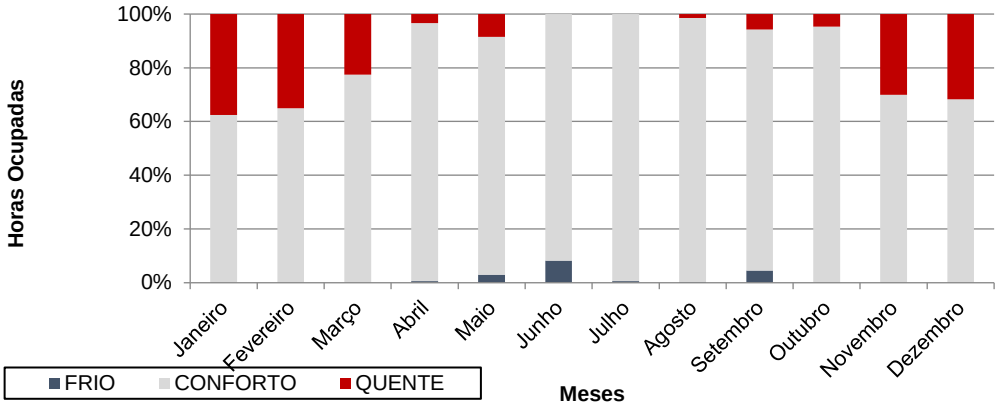

Figura 51 POC Bento Goncalves 8BCS Leste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

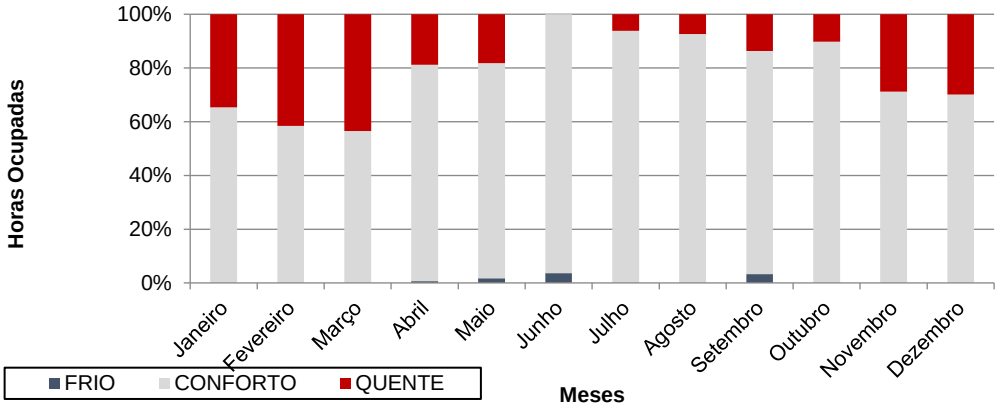

Figura 52 POC Bento Goncalves 8BCS Norte Alt1
Fonte: Elaborado pelo autor

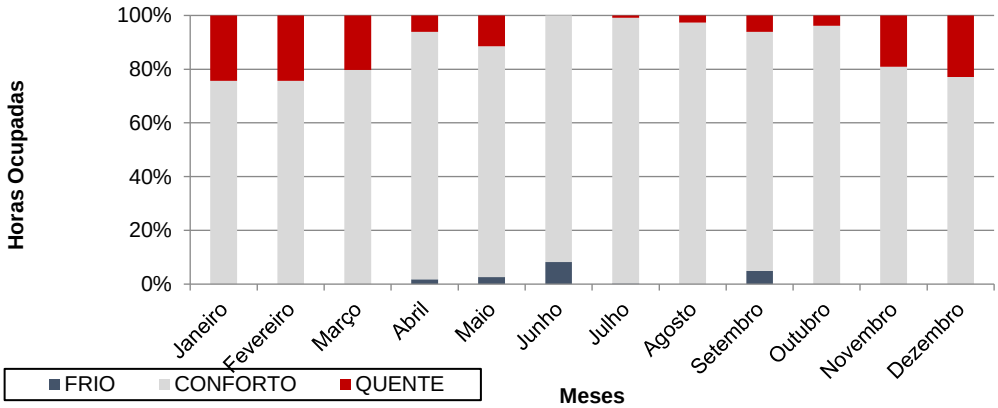

Figura 53 POC Bento Goncalves 8BCS Norte Alt2
Fonte: Elaborado pelo autor

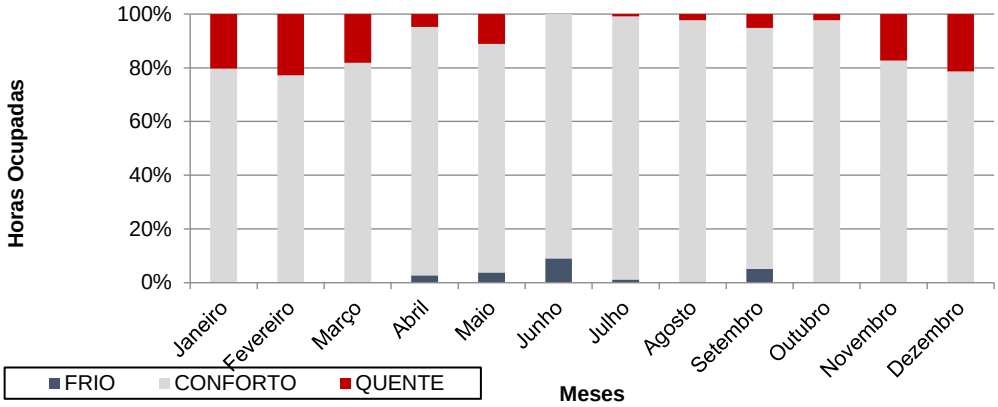

Figura 54 POC Bento Goncalves 8BCS Norte Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

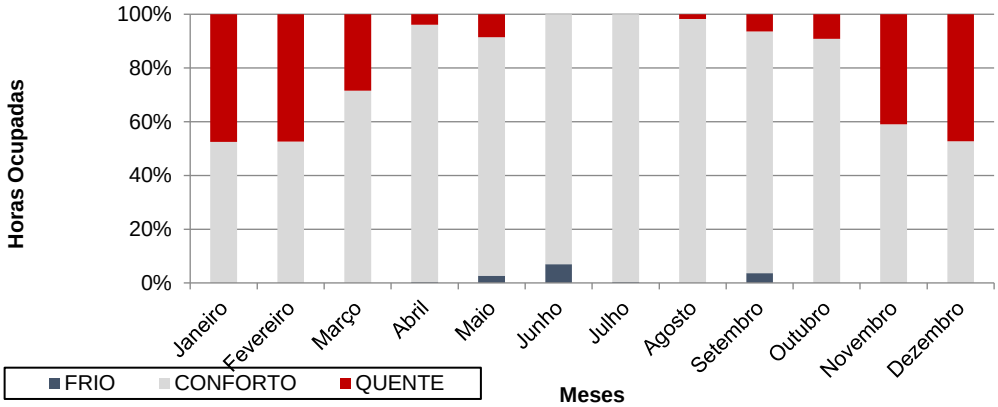

Figura 55 POC Bento Goncalves 8BCS Oeste Alt1
Fonte: Elaborado pelo autor

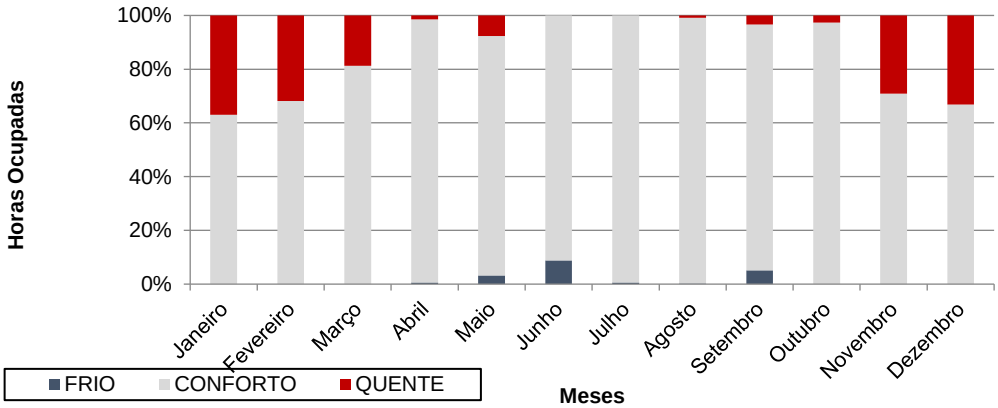

Figura 56 POC Bento Goncalves 8BCS Oeste Alt2
Fonte: Elaborado pelo autor

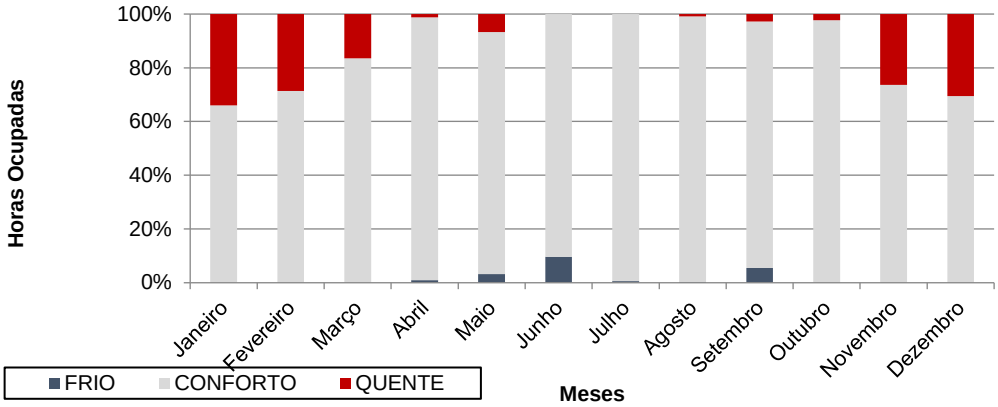

Figura 57 POC Bento Goncalves 8BCS Oeste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

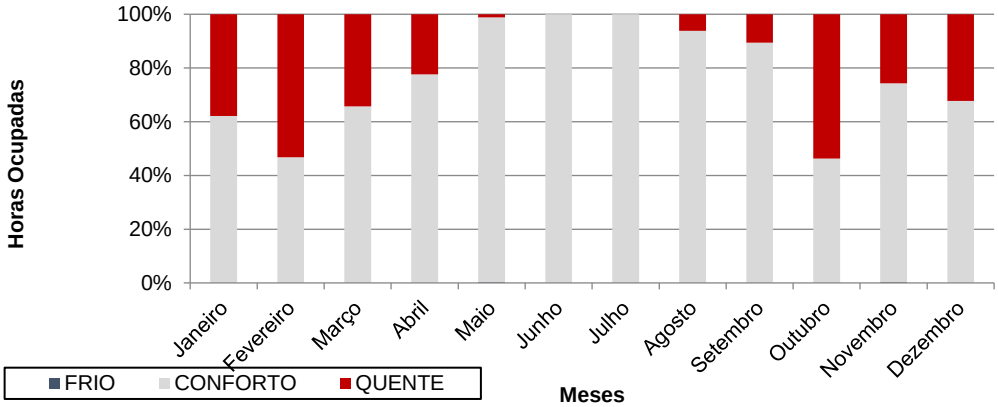

Figura 58 POC Campos do Jordão 4BCS Leste Alt1
Fonte: Elaborado pelo autor

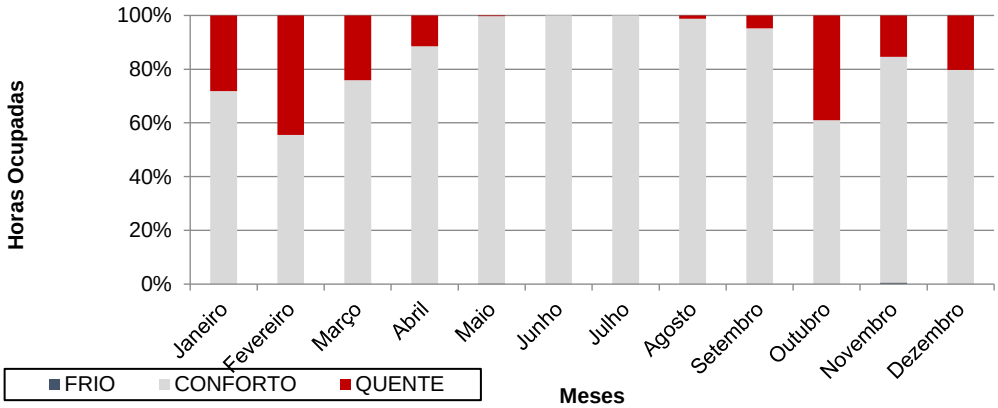

Figura 59 POC Campos do Jordão 4BCS Leste Alt2
Fonte: Elaborado pelo autor

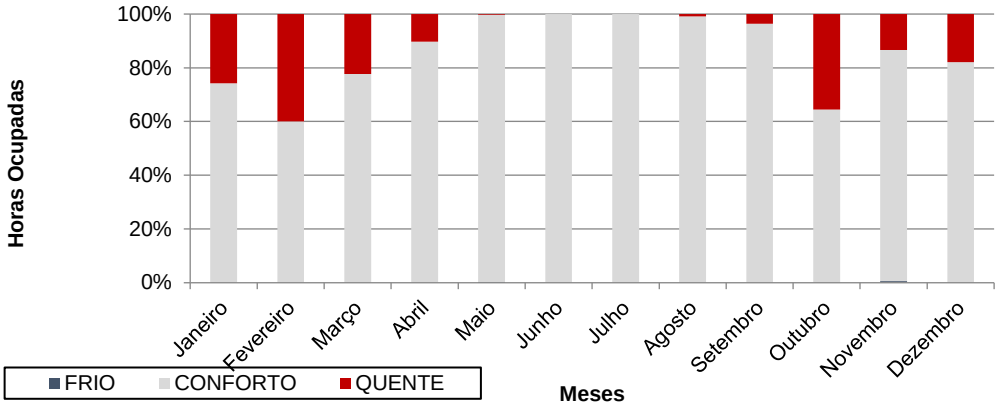

Figura 60 POC Campos do Jordão 4BCS Leste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

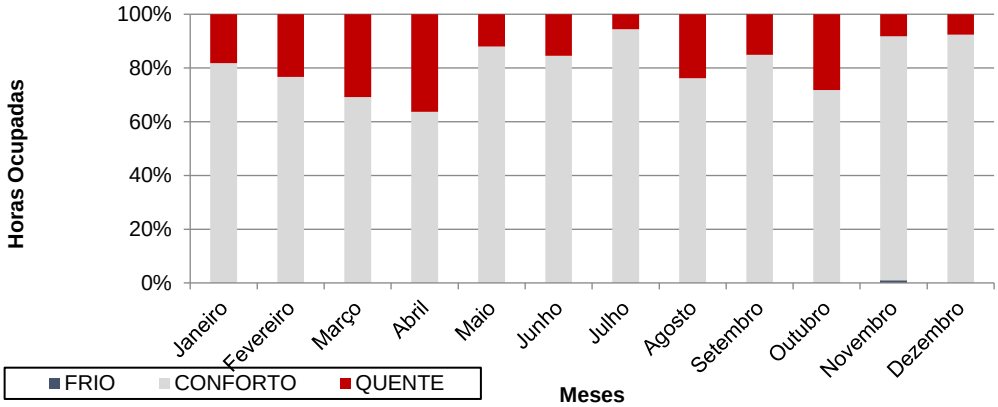

Figura 61 POC Campos do Jordão 4BCS Norte Alt1
Fonte: Elaborado pelo autor

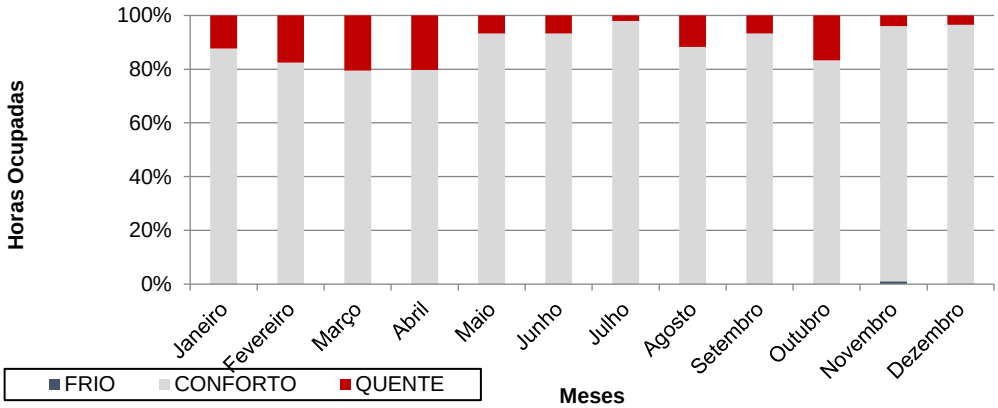

Figura 62 POC Campos do Jordão 4BCS Norte Alt2
Fonte: Elaborado pelo autor

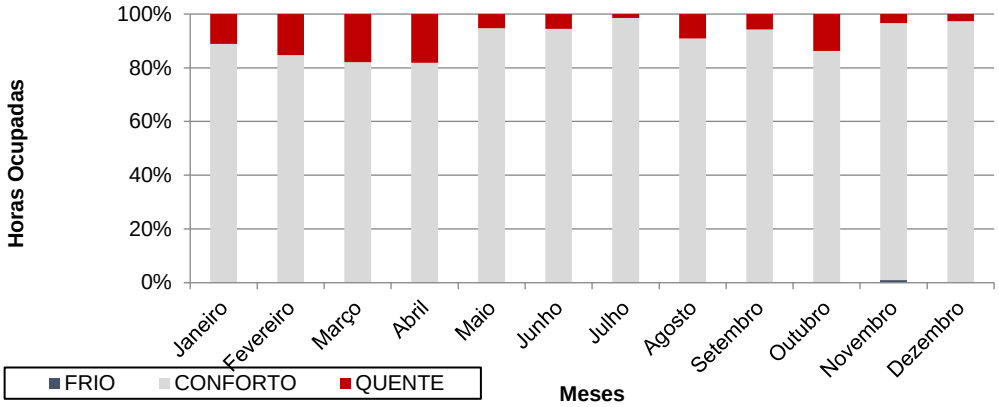

Figura 63 POC Campos do Jordão 4BCS Norte Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

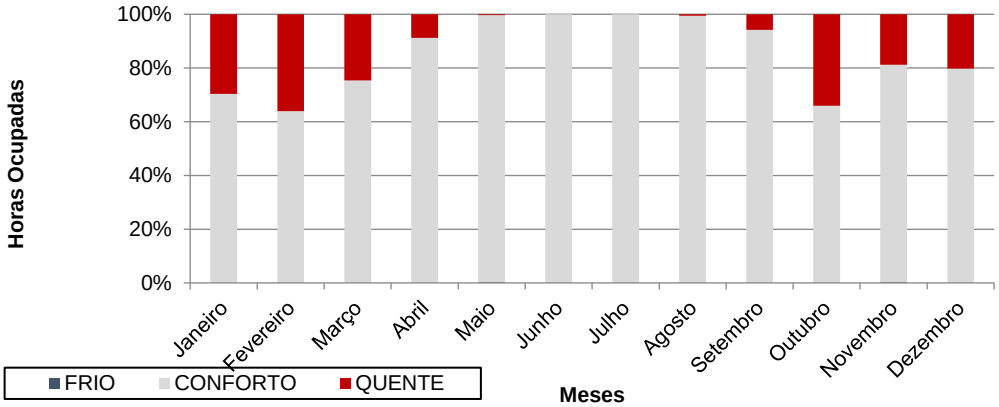

Figura 64 POC Campos do Jordão 4BCS Oeste Alt1
Fonte: Elaborado pelo autor

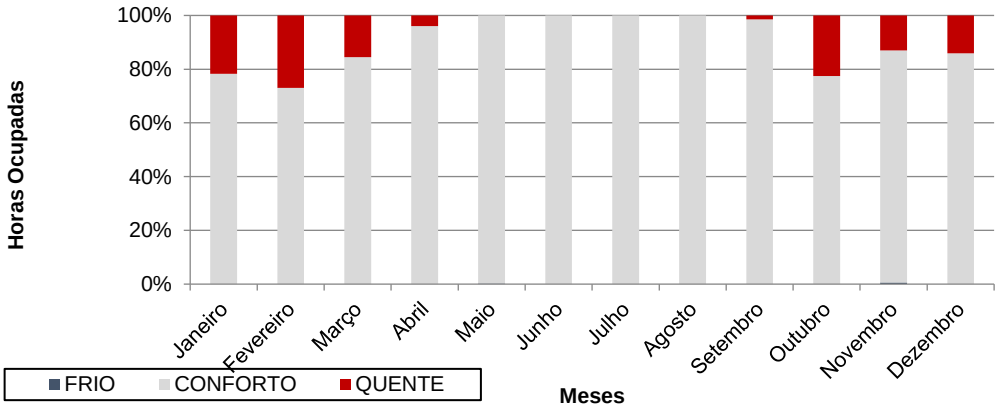

Figura 65 POC Campos do Jordão 4BCS Oeste Alt2
Fonte: Elaborado pelo autor

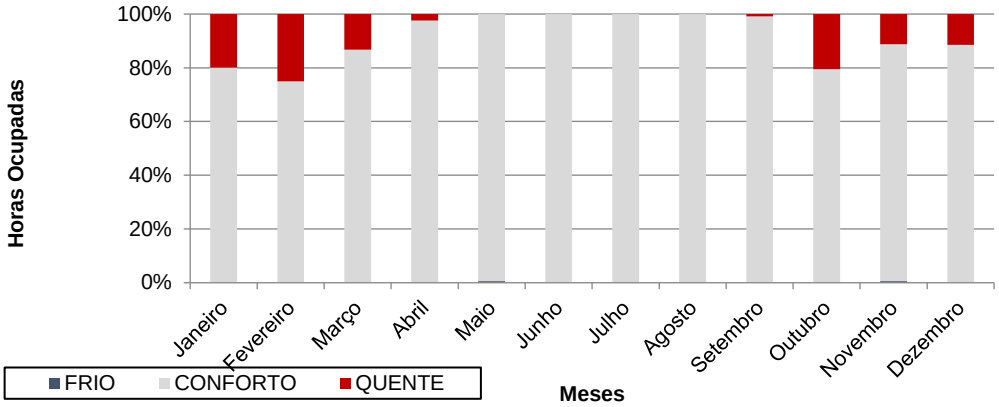

Figura 66 POC Campos do Jordão 4BCS Oeste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

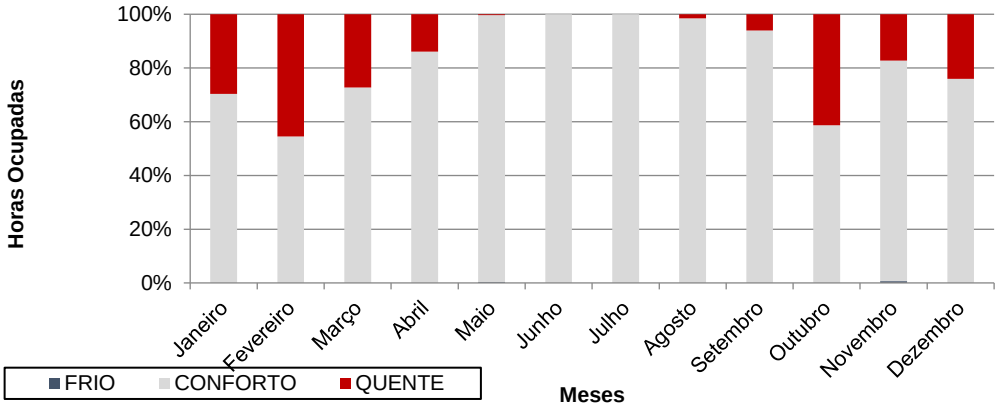

Figura 67 POC Campos do Jordão 8BCS Leste Alt1
Fonte: Elaborado pelo autor

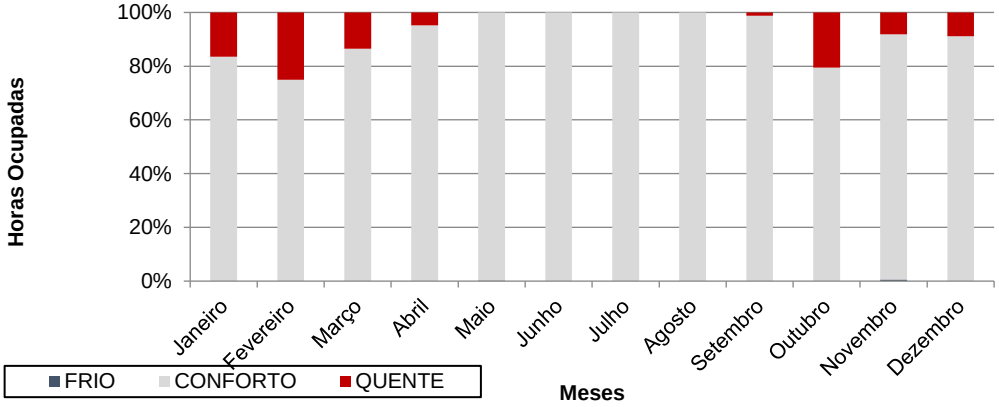

Figura 68 POC Campos do Jordão 8BCS Leste Alt2
Fonte: Elaborado pelo autor

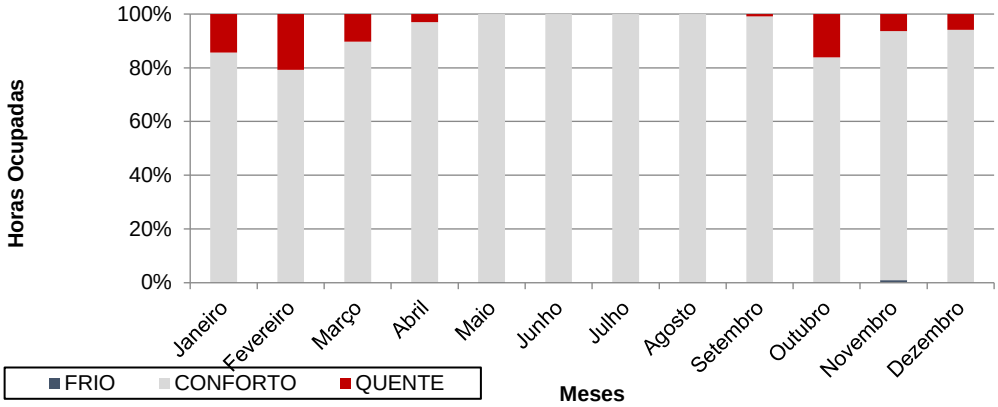

Figura 69 POC Campos do Jordão 8BCS Leste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

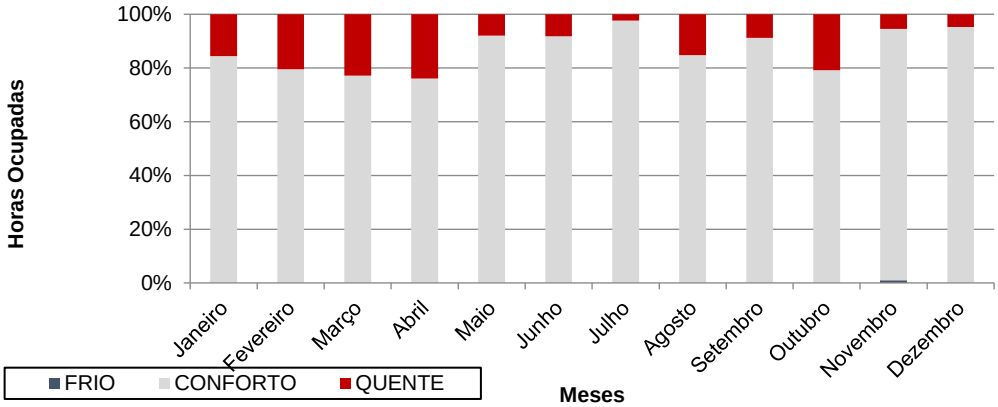

Figura 70 POC Campos do Jordão 8BCS Norte Alt1
Fonte: Elaborado pelo autor

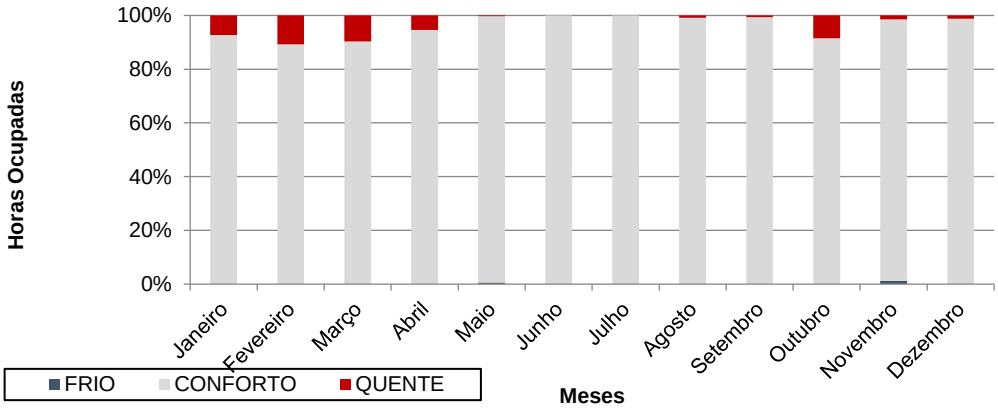

Figura 71 POC Campos do Jordão 8BCS Norte Alt2
Fonte: Elaborado pelo autor

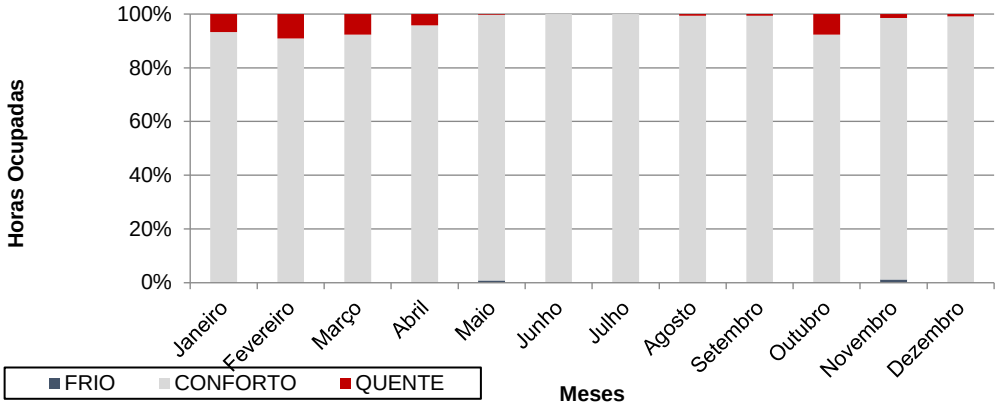

Figura 72 POC Campos do Jordão 8BCS Norte Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

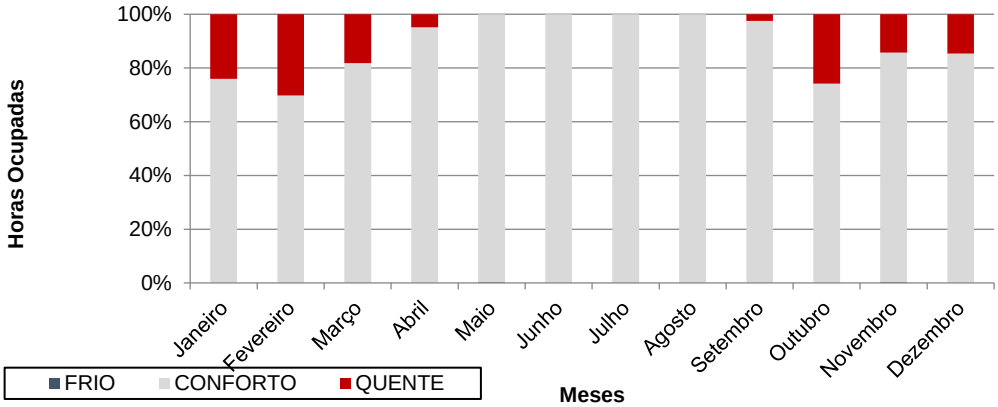

Figura 73 POC Campos do Jordão 8BCS Oeste Alt1
Fonte: Elaborado pelo autor

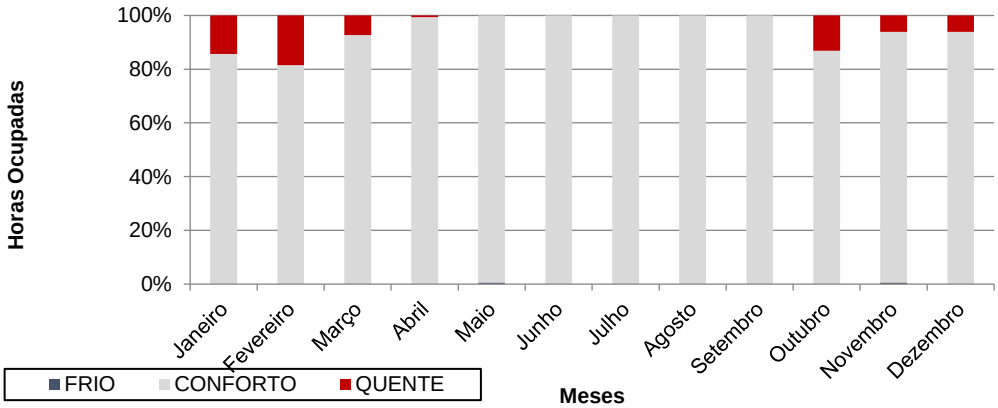

Figura 74 POC Campos do Jordão 8BCS Oeste Alt2
Fonte: Elaborado pelo autor

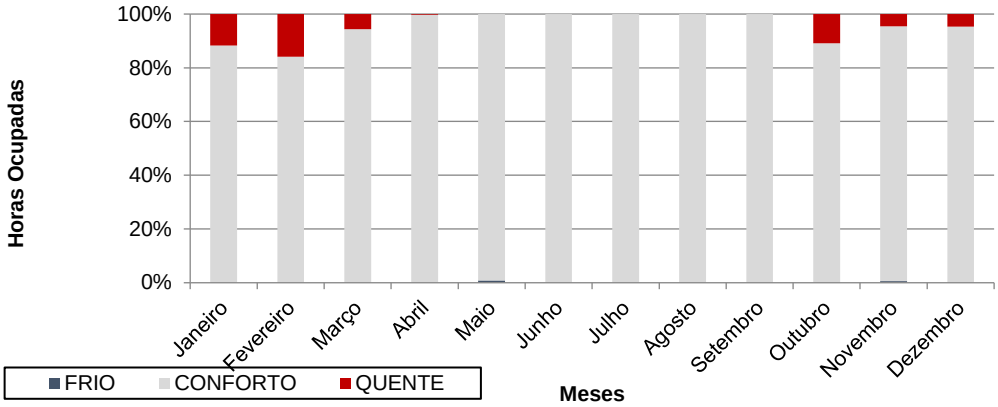

Figura 75 POC Campos do Jordão 8BCS Oeste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

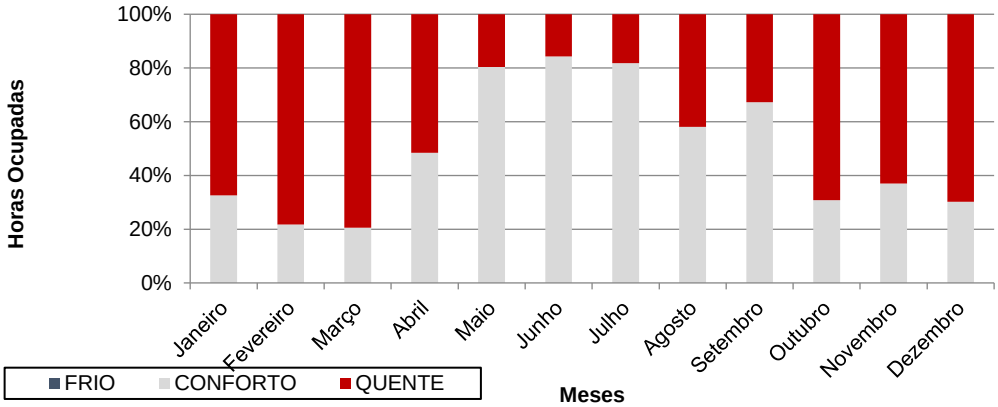

Figura 76 POC Rio de Janeiro 4BCS Leste Alt1
Fonte: Elaborado pelo autor

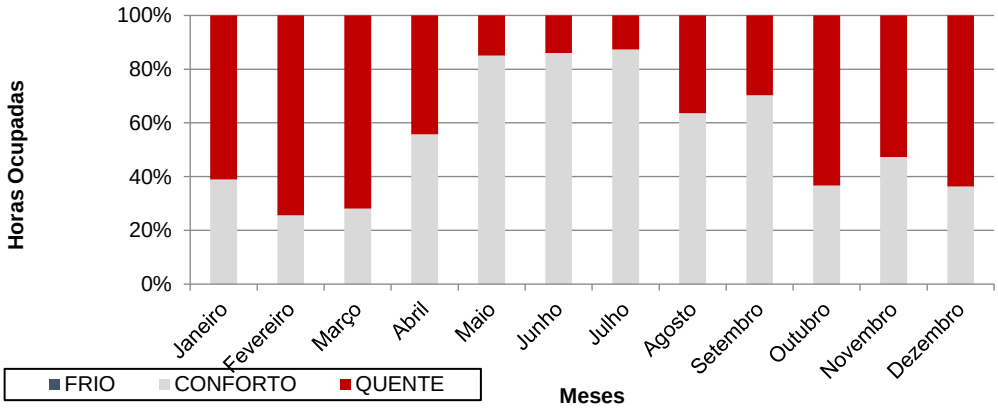

Figura 77 POC Rio de Janeiro 4BCS Leste Alt2
Fonte: Elaborado pelo autor

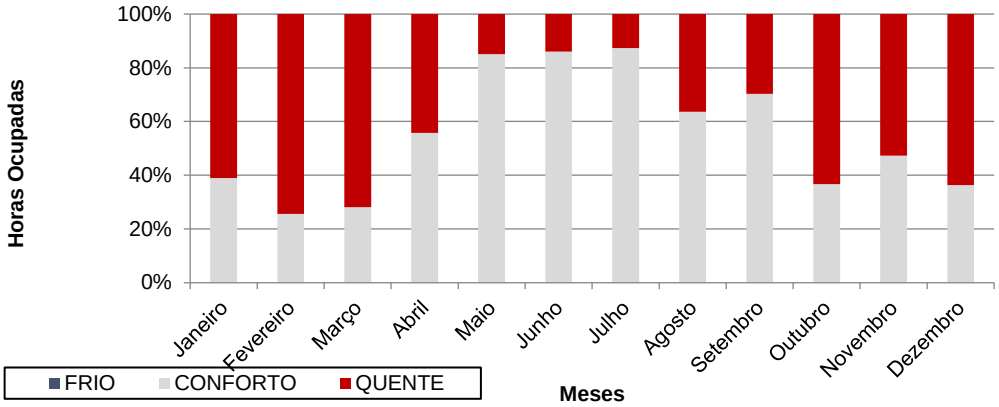

Figura 78 POC Rio de Janeiro 4BCS Leste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

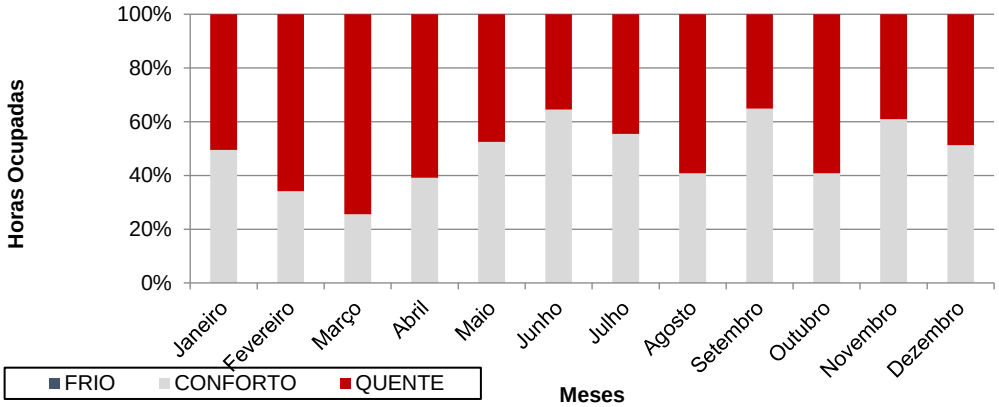

Figura 79 POC Rio de Janeiro 4BCS Norte Alt1
Fonte: Elaborado pelo autor

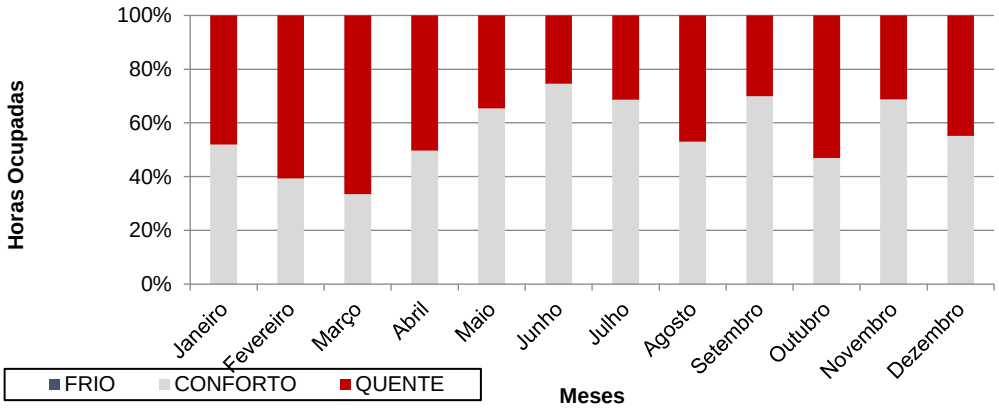

Figura 80 POC Rio de Janeiro 4BCS Norte Alt2
Fonte: Elaborado pelo autor

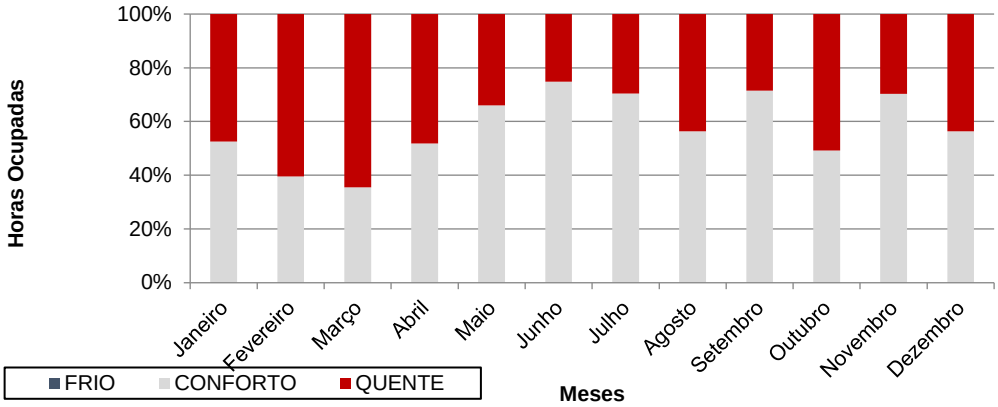

Figura 81 POC Rio de Janeiro 4BCS Norte Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

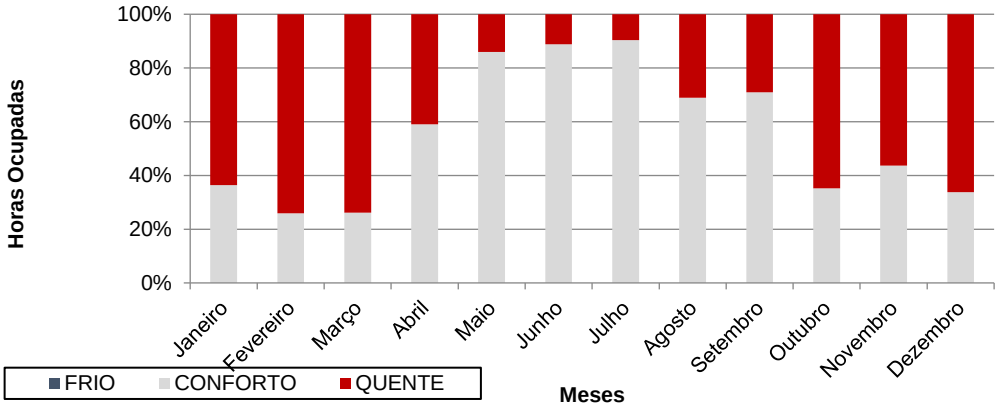

Figura 82 POC Rio de Janeiro 4BCS Oeste Alt1
Fonte: Elaborado pelo autor

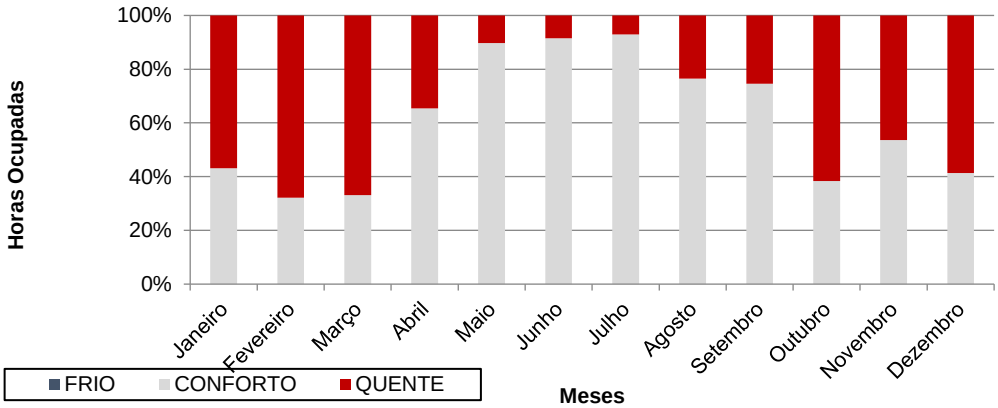

Figura 83 POC Rio de Janeiro 4BCS Oeste Alt2
Fonte: Elaborado pelo autor

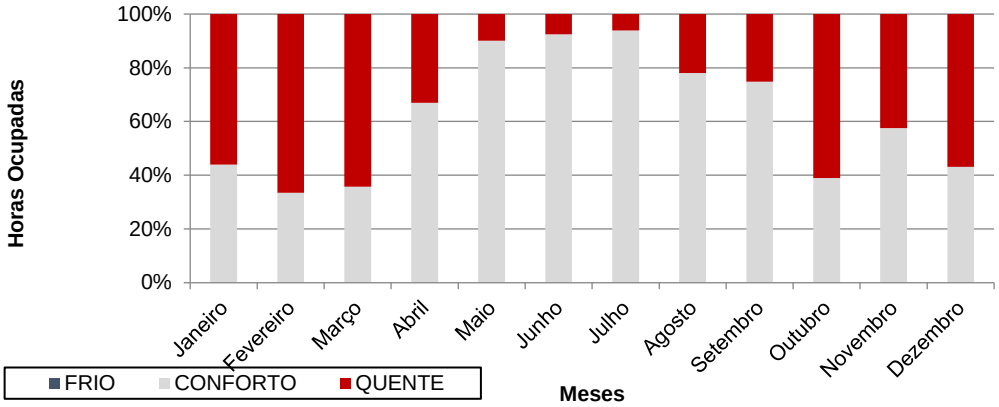

Figura 84 POC Rio de Janeiro 4BCS Oeste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

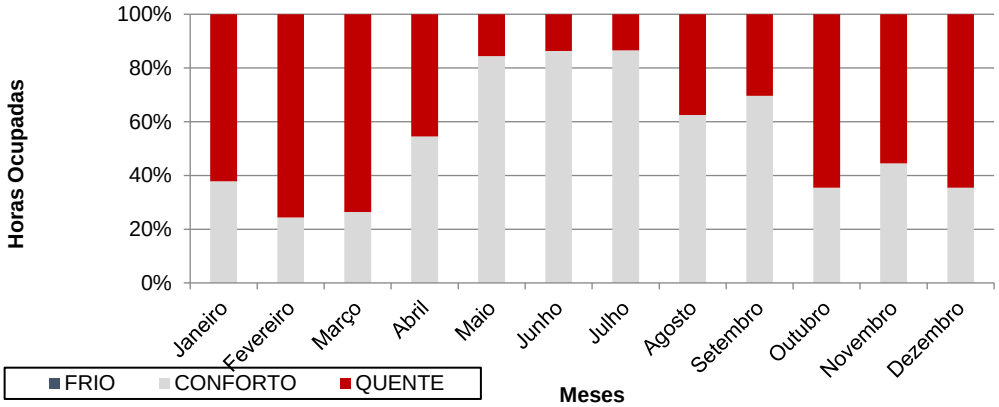

Figura 85 POC Rio de Janeiro 8BCS Leste Alt1
Fonte: Elaborado pelo autor

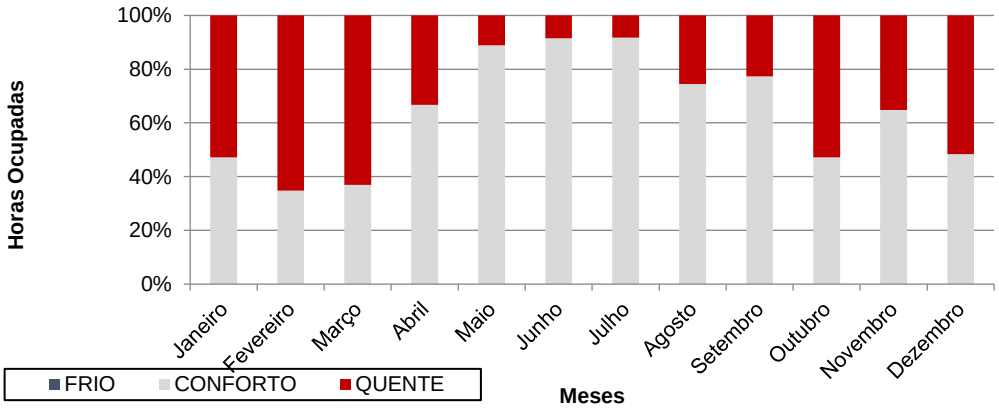

Figura 86 POC Rio de Janeiro 8BCS Leste Alt2
Fonte: Elaborado pelo autor

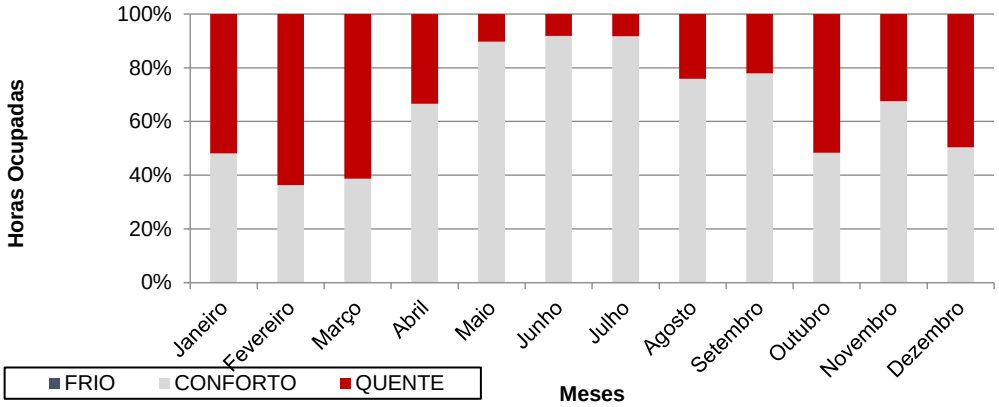

Figura 87 POC Rio de Janeiro 8BCS Leste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

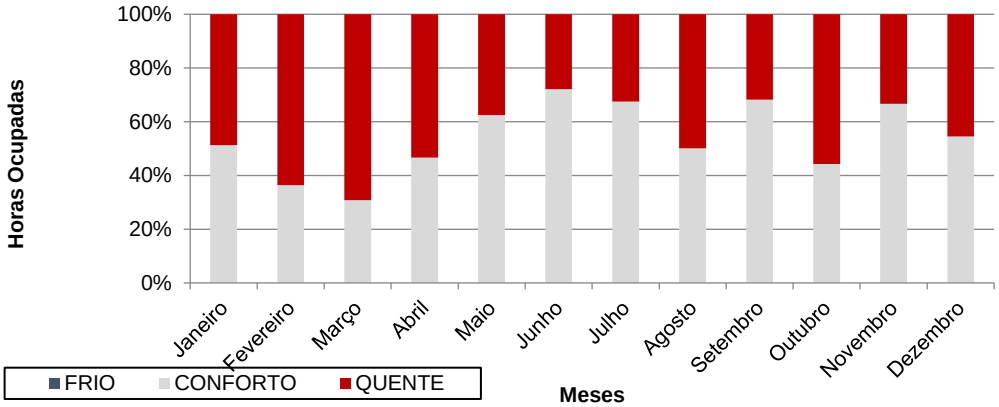

Figura 88 POC Rio de Janeiro 8BCS Norte Alt1
Fonte: Elaborado pelo autor

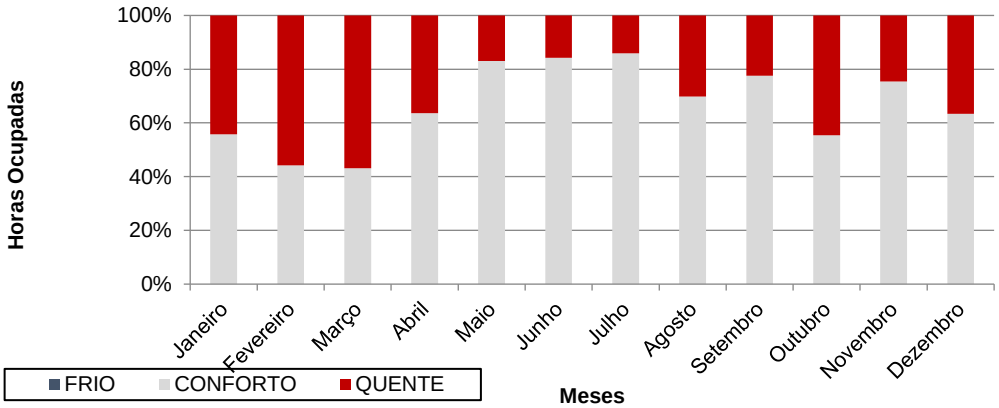

Figura 89 POC Rio de Janeiro 8BCS Norte Alt2
Fonte: Elaborado pelo autor

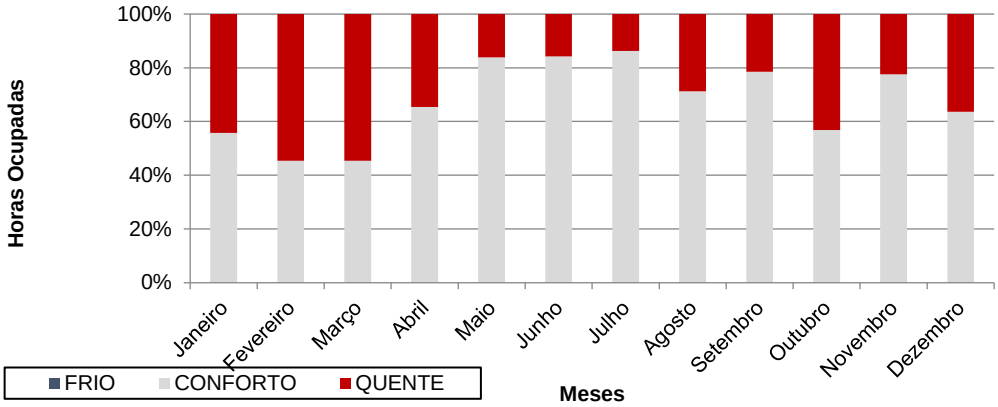

Figura 90 POC Rio de Janeiro 8BCS Norte Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

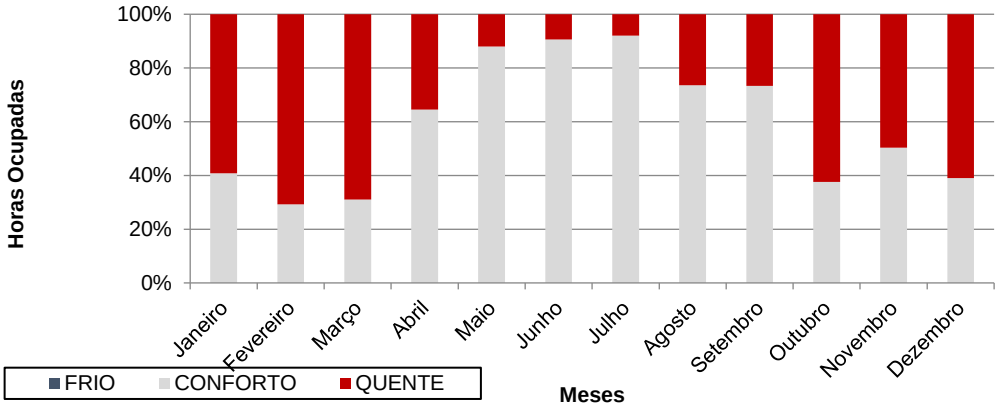

Figura 91 POC Rio de Janeiro 8BCS Oeste Alt1
Fonte: Elaborado pelo autor

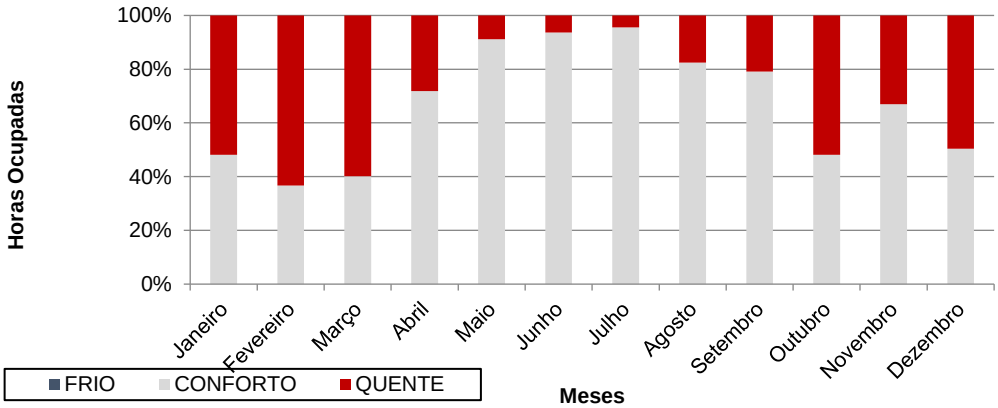

Figura 92 POC Rio de Janeiro 8BCS Oeste Alt2
Fonte: Elaborado pelo autor

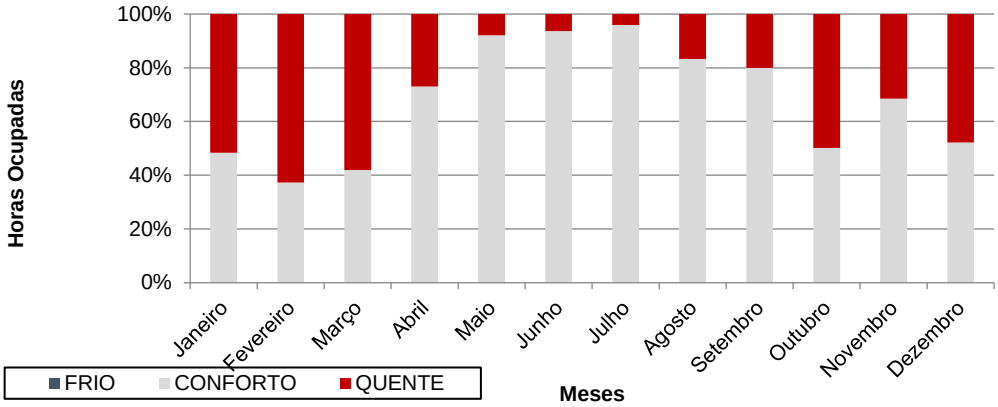

Figura 93 POC Rio de Janeiro 8BCS Oeste Alt3 8BCS
Fonte: Elaborado pelo autor

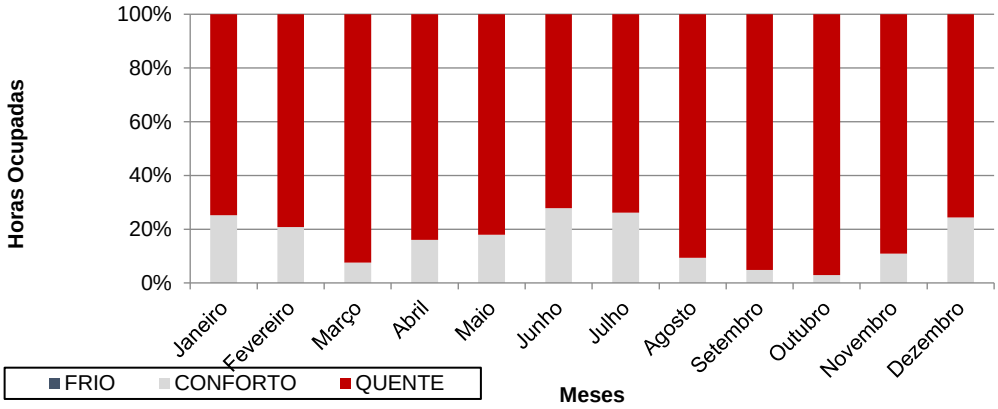

Figura 94 POC Belém 4BCS Leste Alt1
Fonte: Elaborado pelo autor

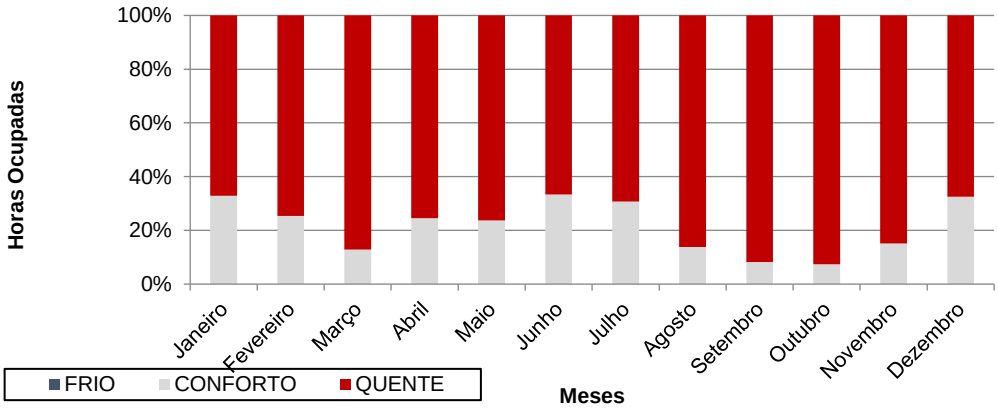

Figura 95 POC Belém 4BCS Leste Alt2
Fonte: Elaborado pelo autor

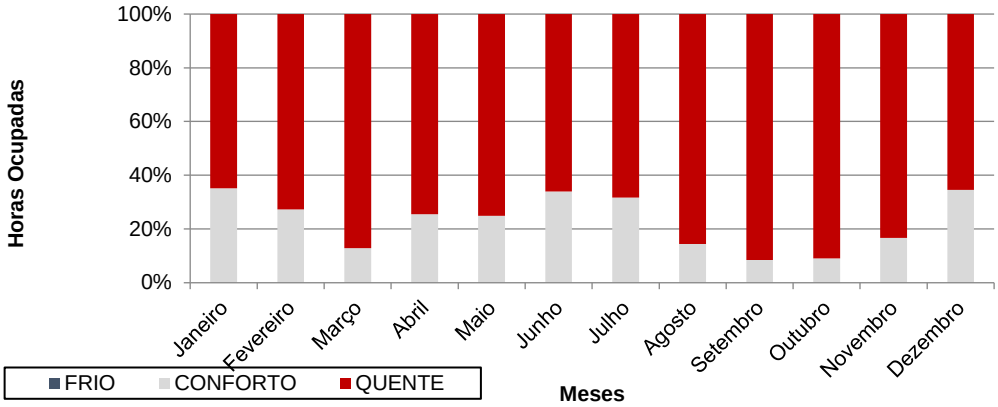

Figura 96 POC Belém 4BCS Leste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

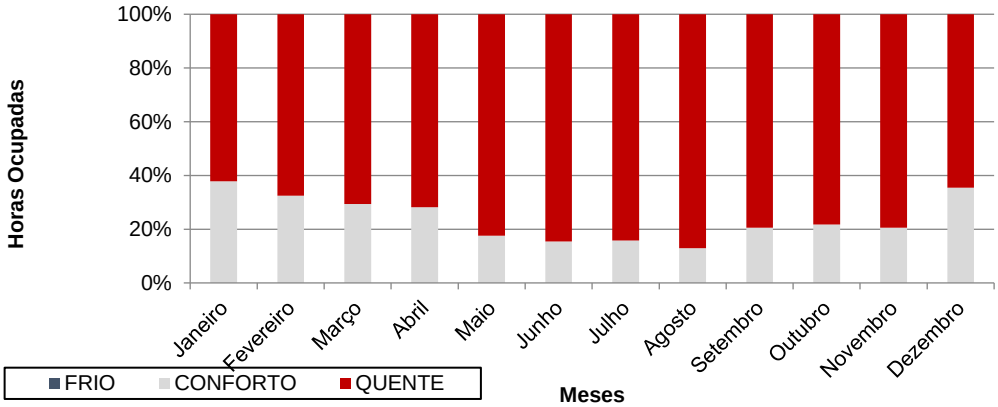

Figura 97 POC Belém 4BCS Norte Alt1
Fonte: Elaborado pelo autor

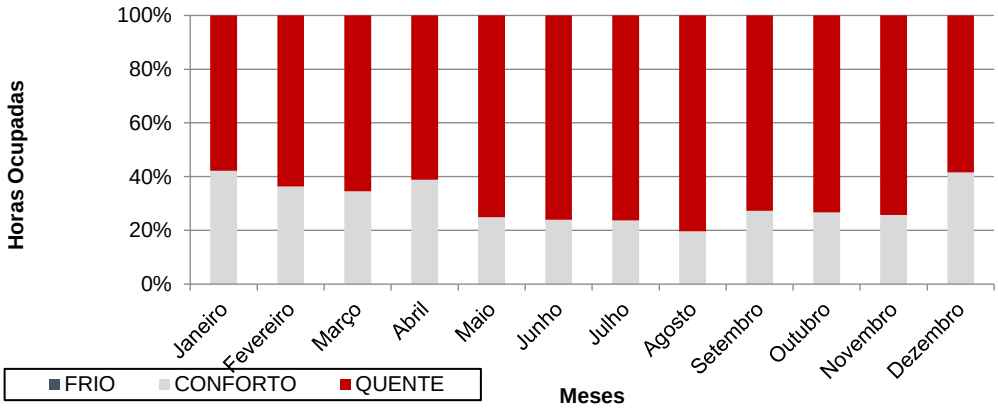

Figura 98 POC Belém 4BCS Norte Alt2
Fonte: Elaborado pelo autor

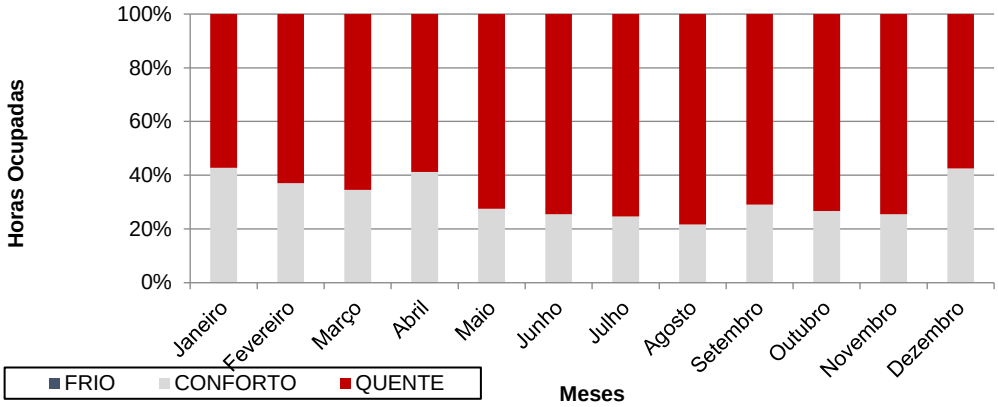

Figura 99 POC Belém 4BCS Norte Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

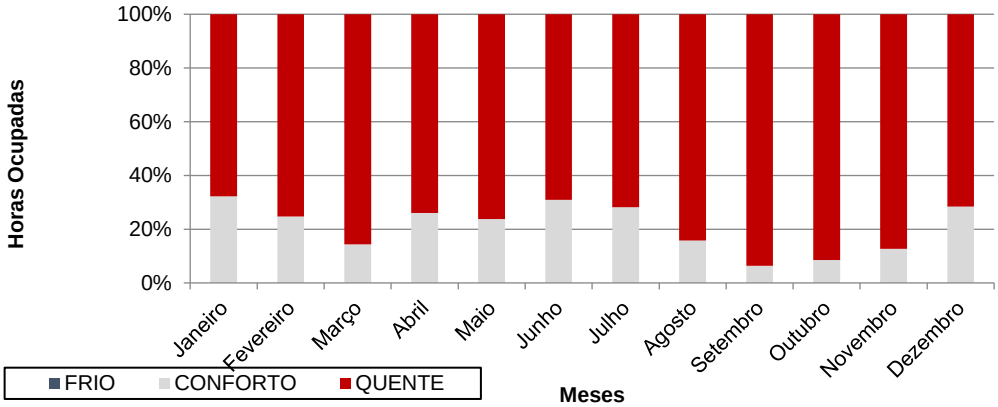

Figura 100 POC Belém 4BCS Oeste Alt1
Fonte: Elaborado pelo autor

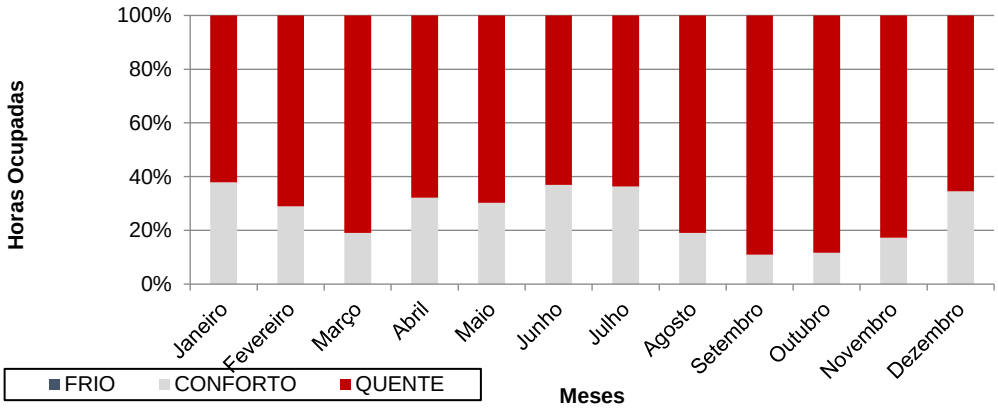

Figura 101 POC Belém 4BCS Oeste Alt2
Fonte: Elaborado pelo autor

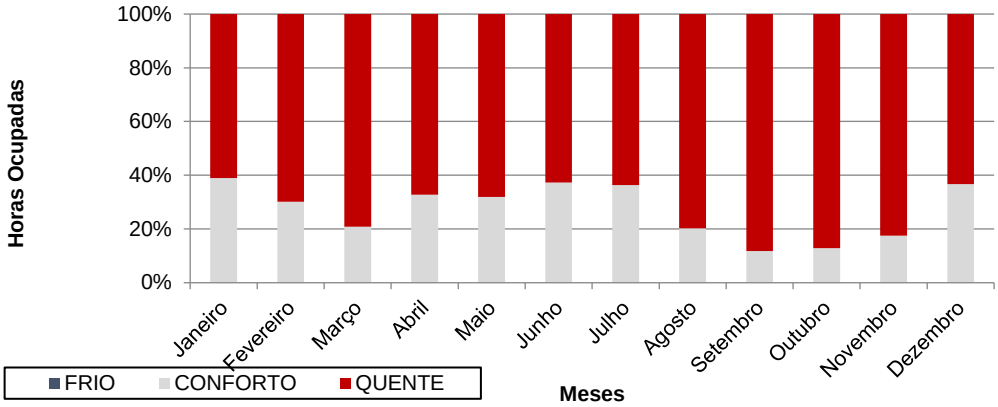

Figura 102 POC Belém 4BCS Oeste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

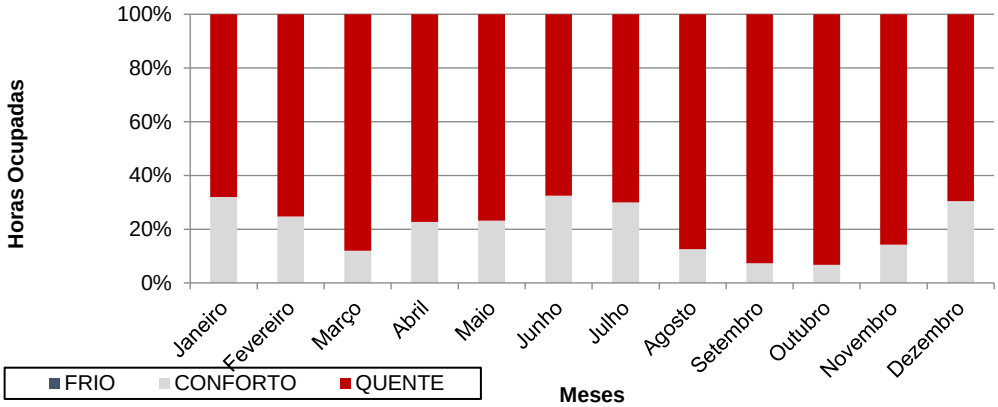

Figura 103 POC Belém 8BCS Leste Alt1
Fonte: Elaborado pelo autor

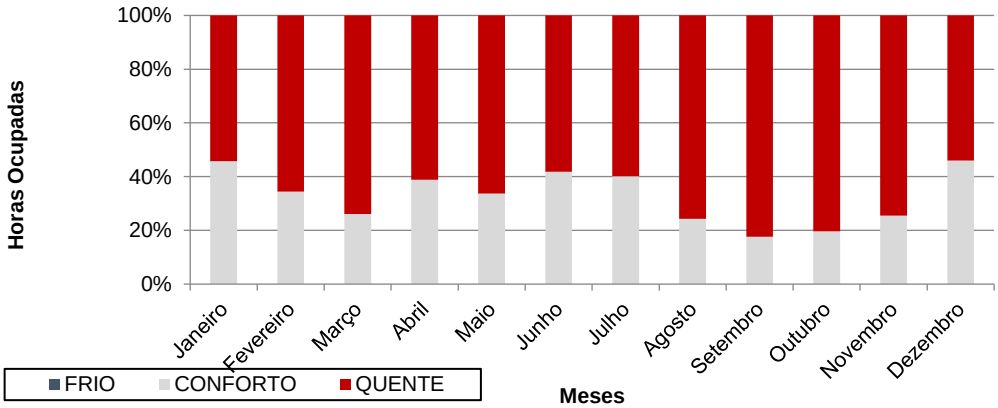

Figura 104 POC Belém 8BCS Leste Alt2
Fonte: Elaborado pelo autor

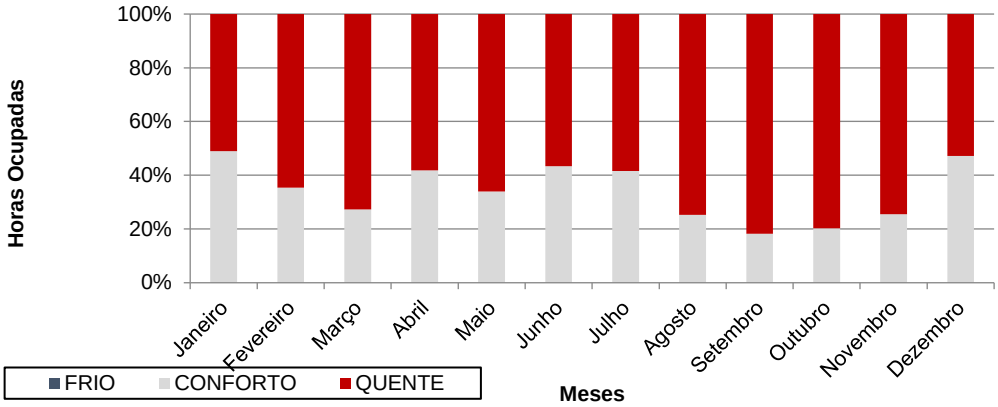

Figura 105 POC Belém 8BCS Leste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

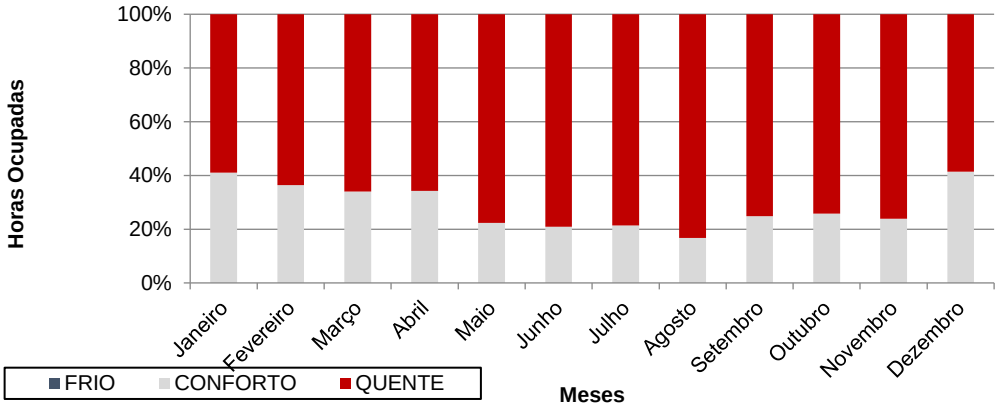

Figura 106 POC Belém 8BCS Norte Alt1
Fonte: Elaborado pelo autor

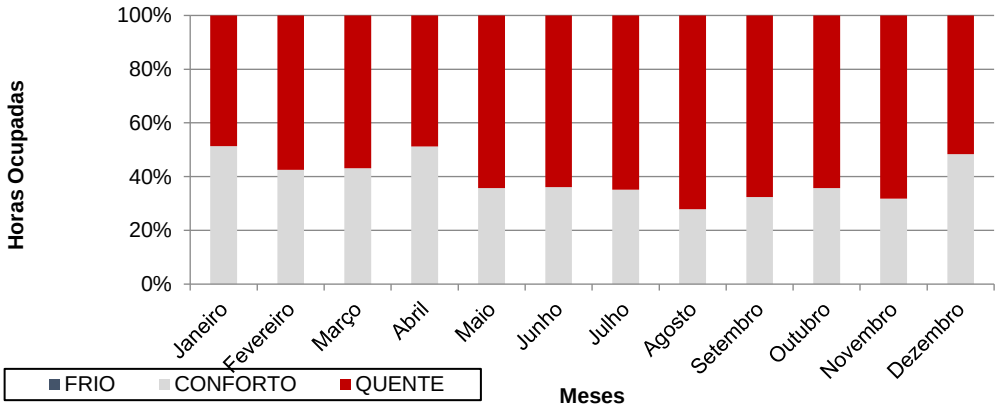

Figura 107 POC Belém 8BCS Norte Alt2
Fonte: Elaborado pelo autor

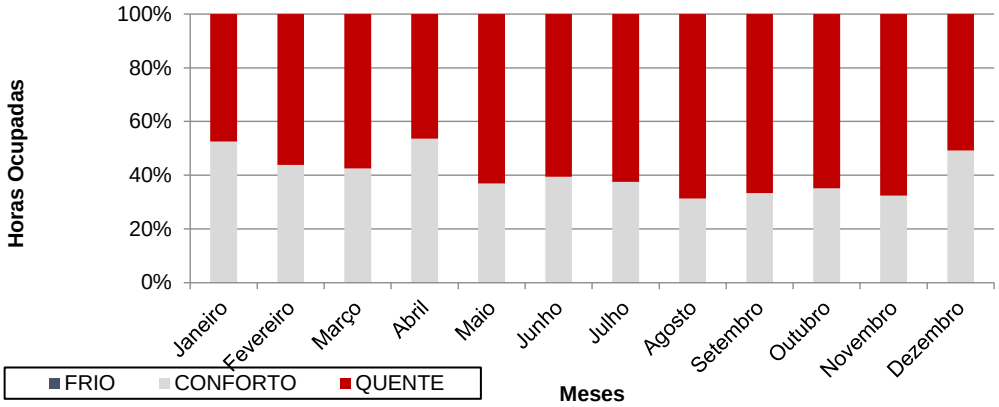

Figura 108 POC Belém 8BCS Norte Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

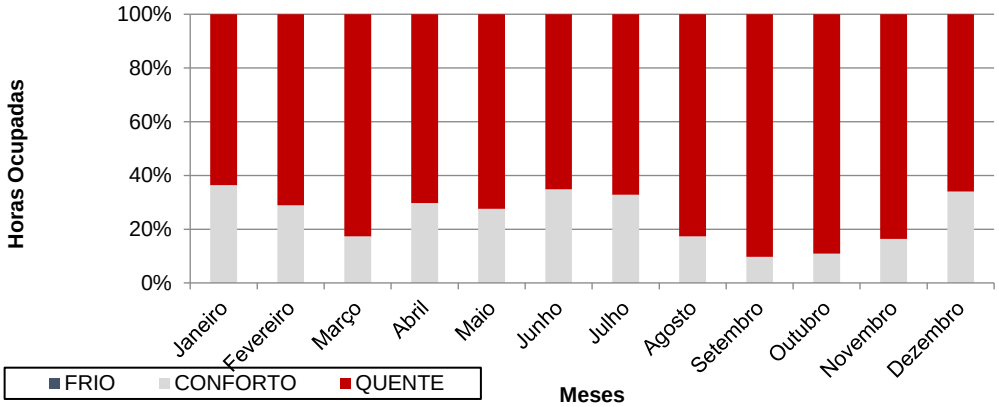

Figura 109 POC Belém 8BCS Oeste Alt1
Fonte: Elaborado pelo autor

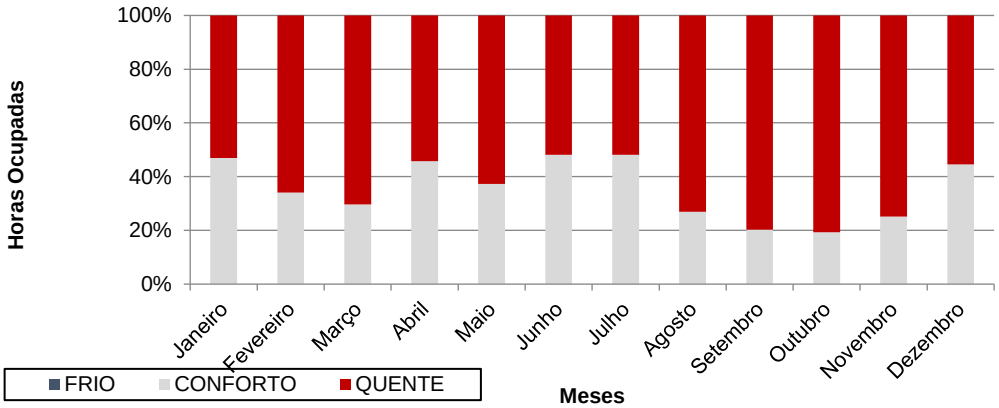

Figura 110 POC Belém 8BCS Oeste Alt2
Fonte: Elaborado pelo autor

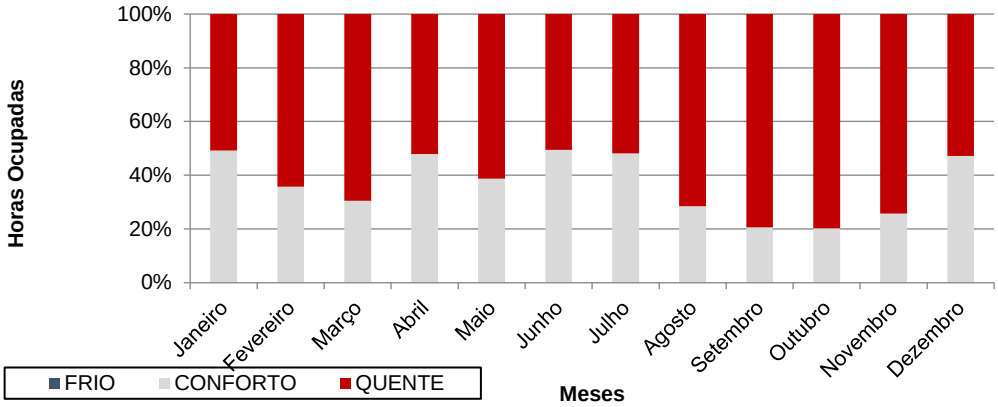

Figura 111 POC Belém 8BCS Oeste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

Escritórios

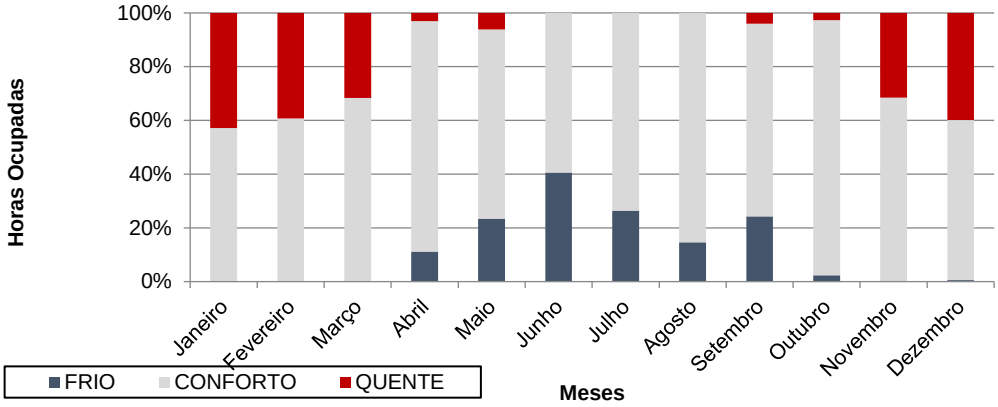

Figura 112 POC Bento Goncalves 4BCS Leste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

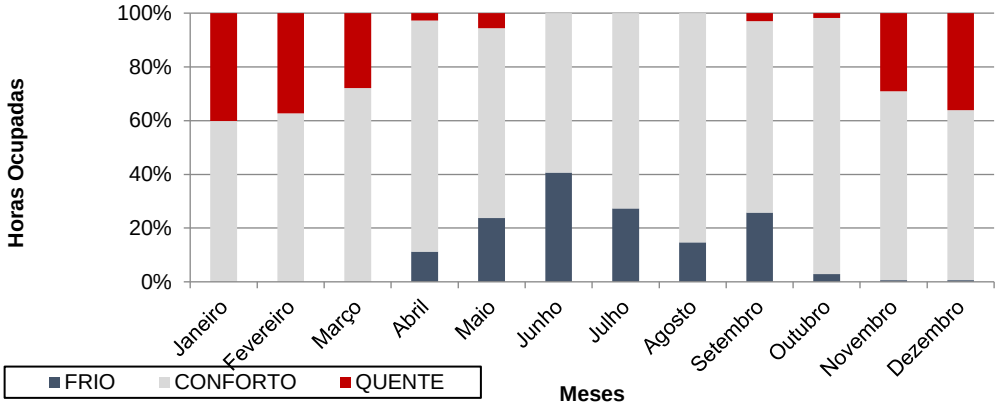

Figura 113 POC Bento Goncalves 4BCS Leste Alt5
Fonte: Elaborado pelo autor

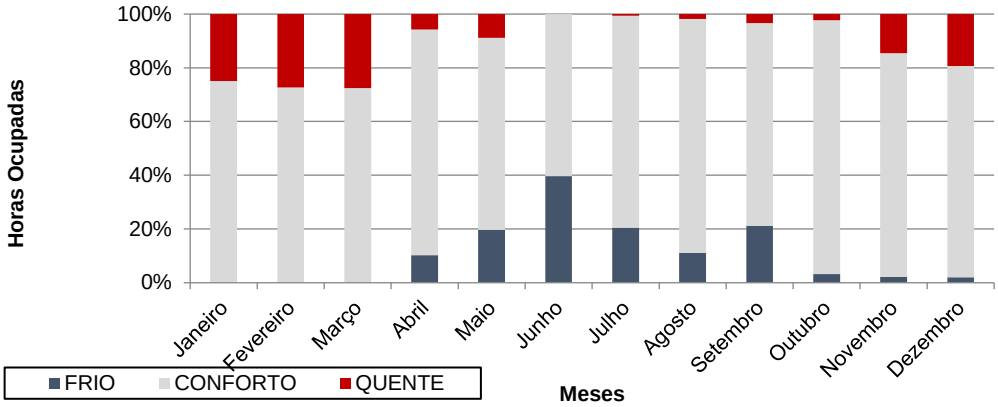

Figura 114 POC Bento Goncalves 4BCS Norte Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

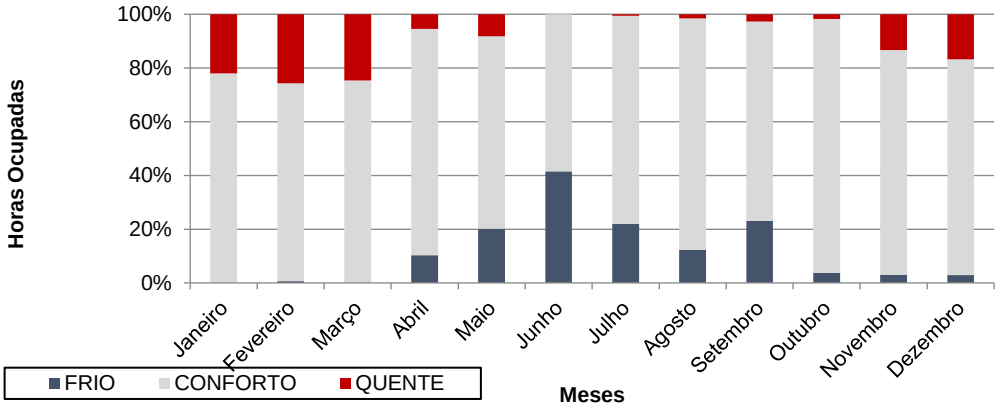

Figura 115 POC Bento Goncalves 4BCS Norte Alt5
Fonte: Elaborado pelo autor

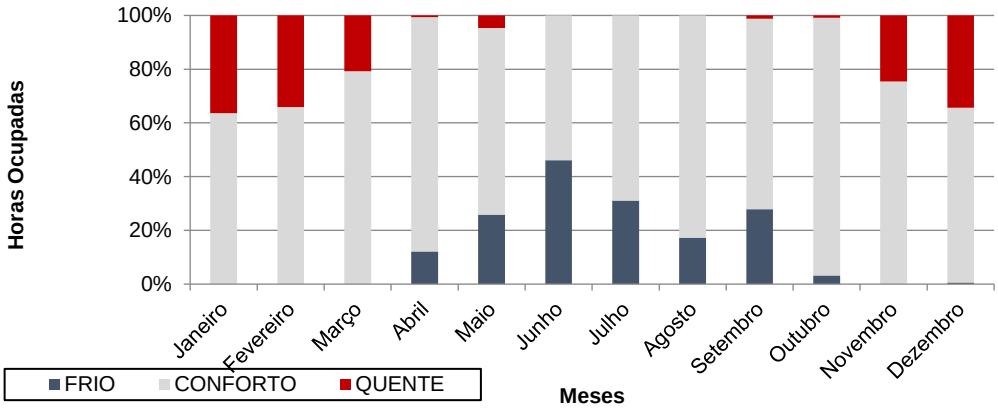

Figura 116 POC Bento Goncalves 4BCS Oeste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

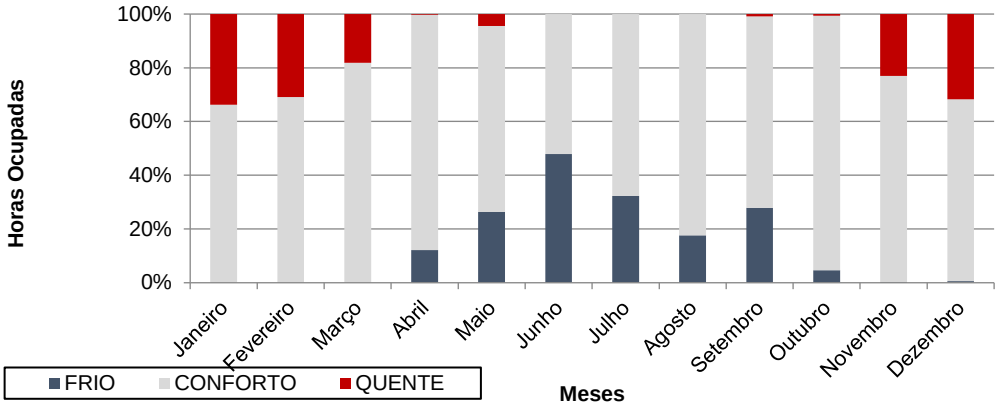

Figura 117 POC Bento Goncalves 4BCS Oeste Alt5
Fonte: Elaborado pelo autor

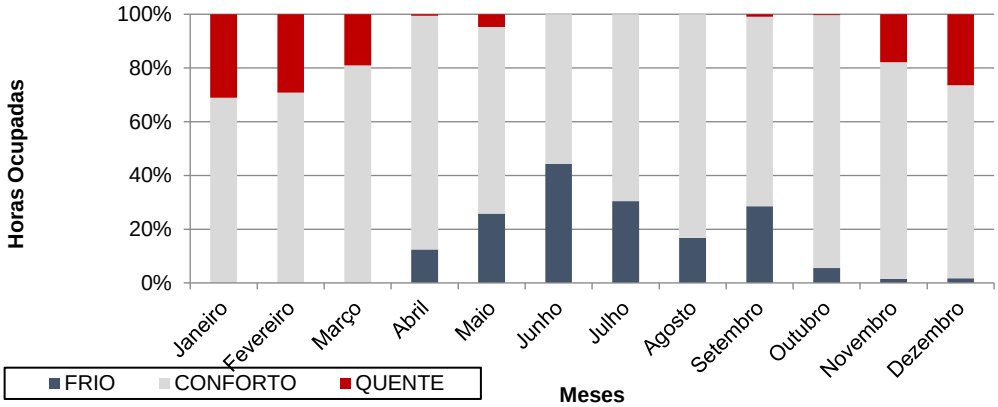

Figura 118 POC Bento Goncalves 8BCS Leste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

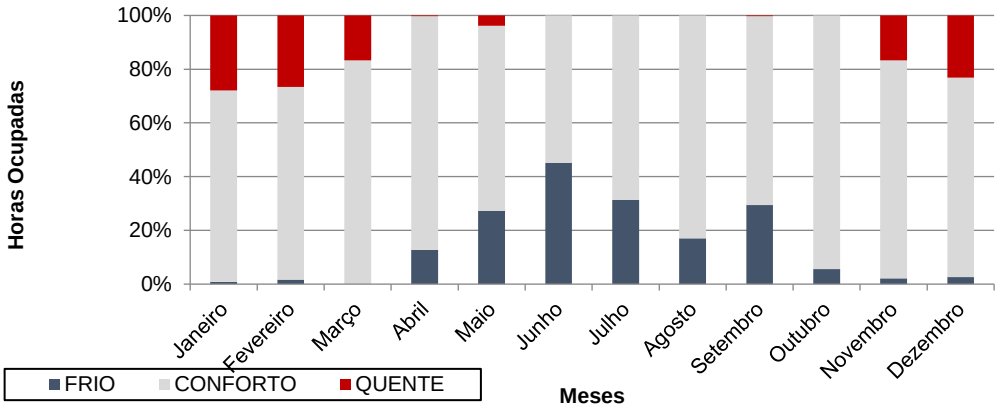

Figura 119 POC Bento Goncalves 8BCS Leste Alt5
Fonte: Elaborado pelo autor

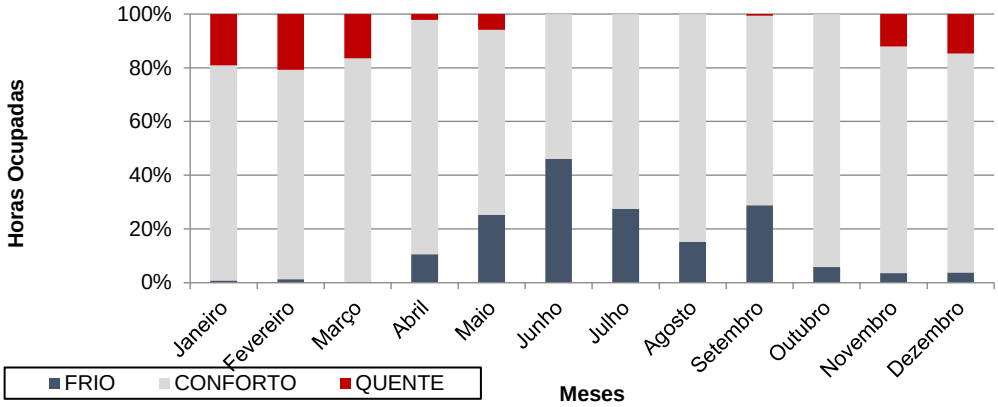

Figura 120 POC Bento Goncalves 8BCS Norte Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

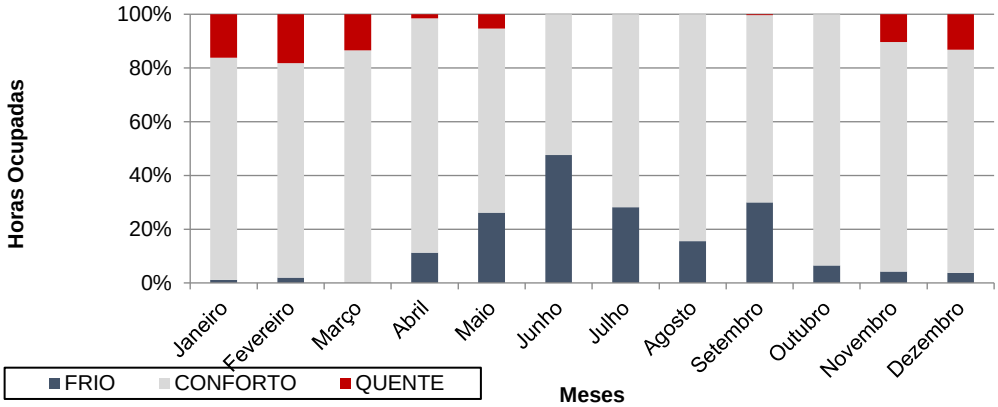

Figura 121 POC Bento Goncalves 8BCS Norte Alt5
Fonte: Elaborado pelo autor

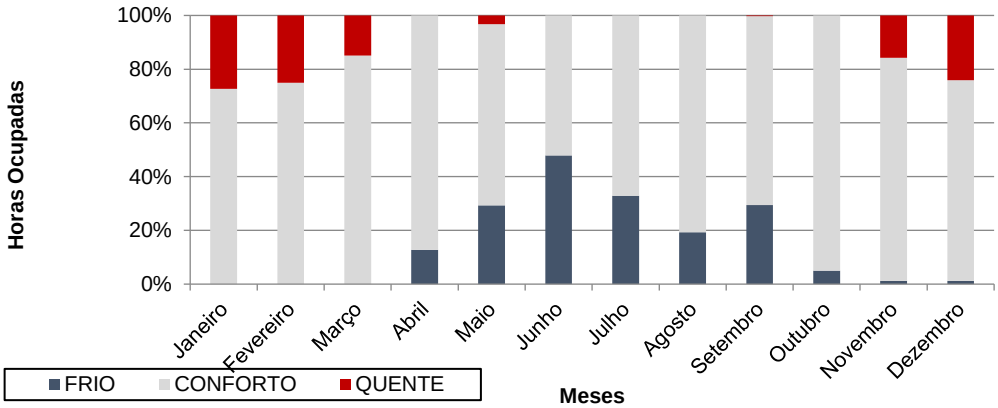

Figura 122 POC Bento Goncalves 8BCS Oeste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

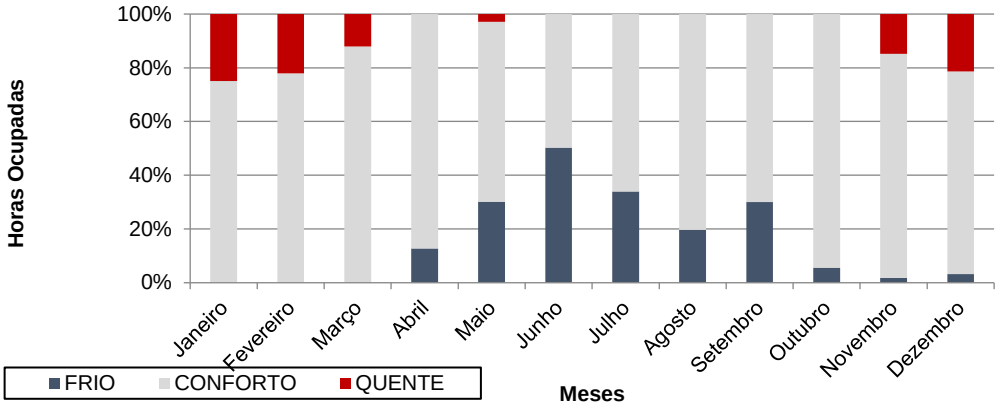

Figura 123 POC Bento Goncalves 8BCS Oeste Alt5
Fonte: Elaborado pelo autor

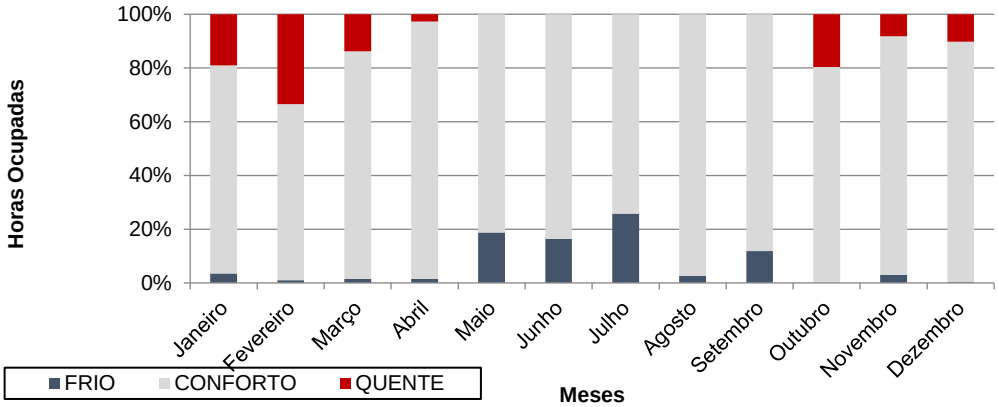

Figura 124 POC Campos do Jordão 4BCS Leste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

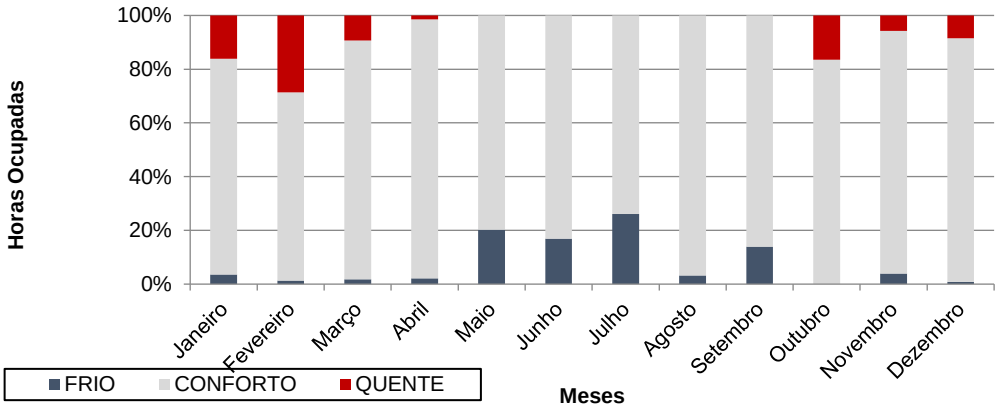

Figura 125 POC Campos do Jordão 4BCS Leste Alt5
Fonte: Elaborado pelo autor

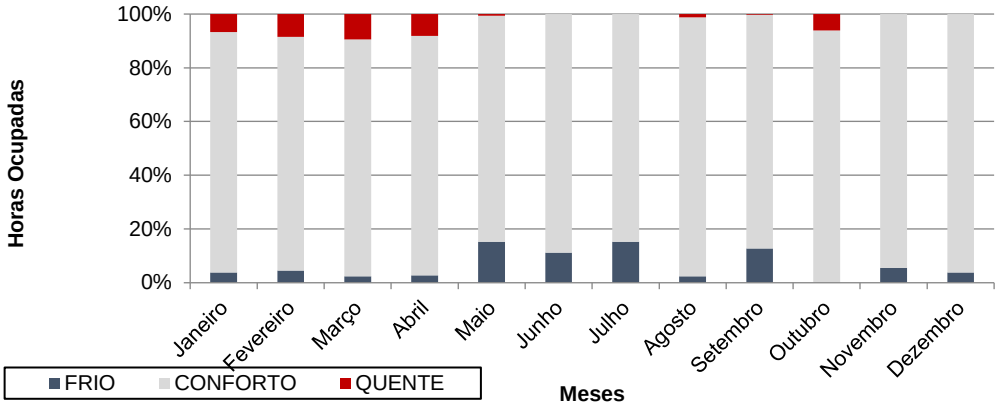

Figura 126 POC Campos do Jordão 4BCS Norte Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

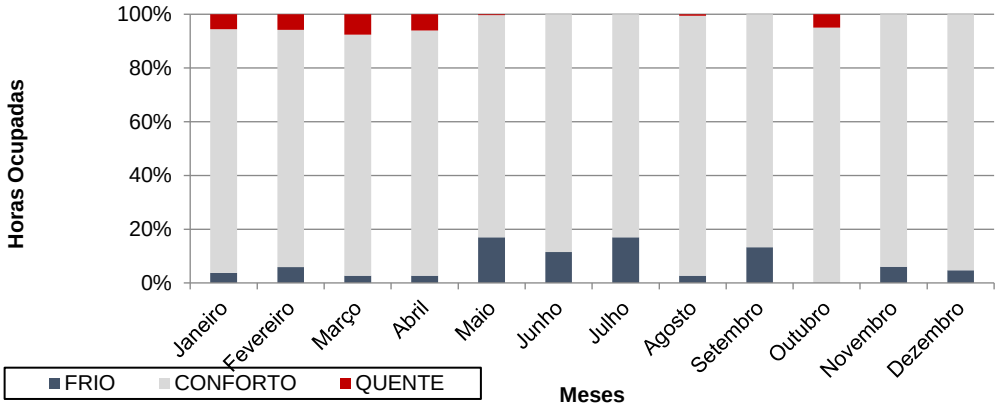

Figura 127 POC Campos do Jordão 4BCS Norte Alt5
Fonte: Elaborado pelo autor

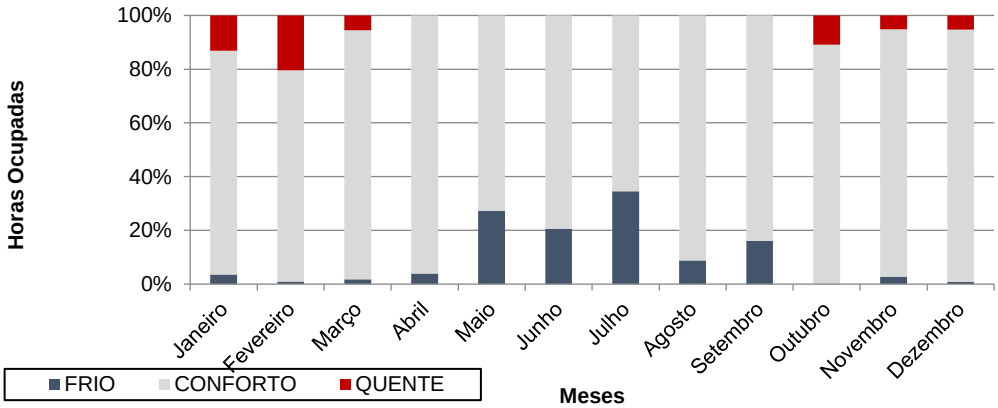

Figura 128 POC Campos do Jordão 4BCS Oeste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

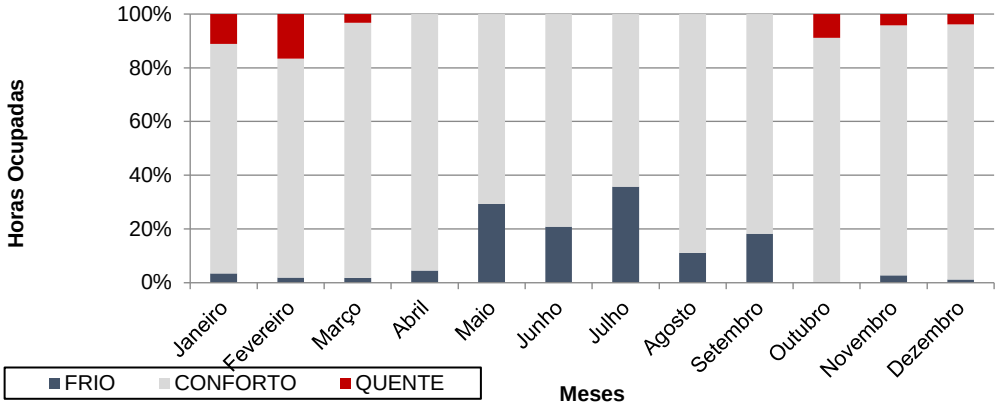

Figura 129 POC Campos do Jordão 4BCS Oeste Alt5
Fonte: Elaborado pelo autor

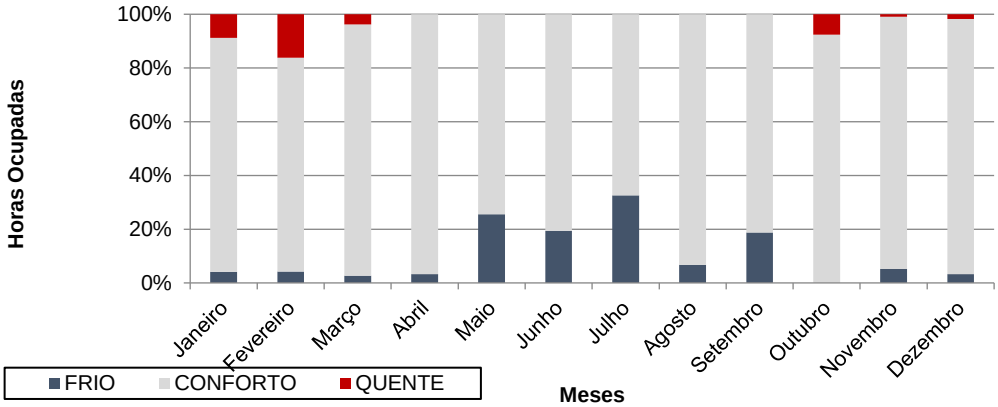

Figura 130 POC Campos do Jordão 8BCS Leste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

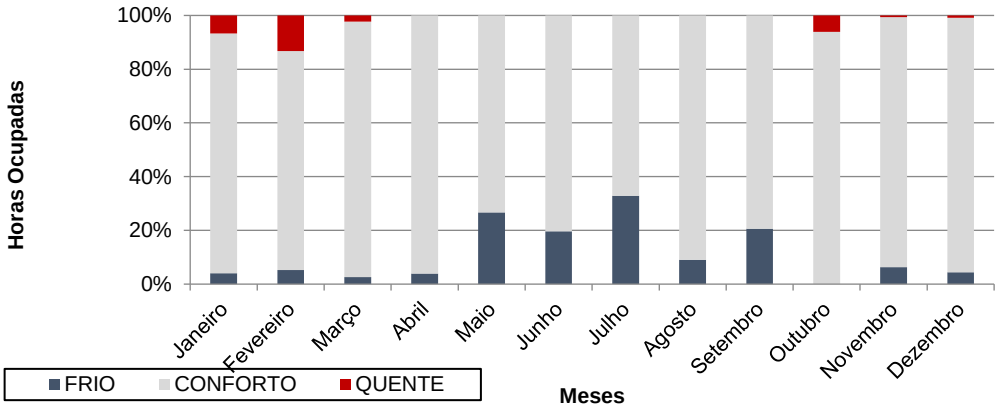

Figura 131 POC Campos do Jordão 8BCS Leste Alt5
Fonte: Elaborado pelo autor

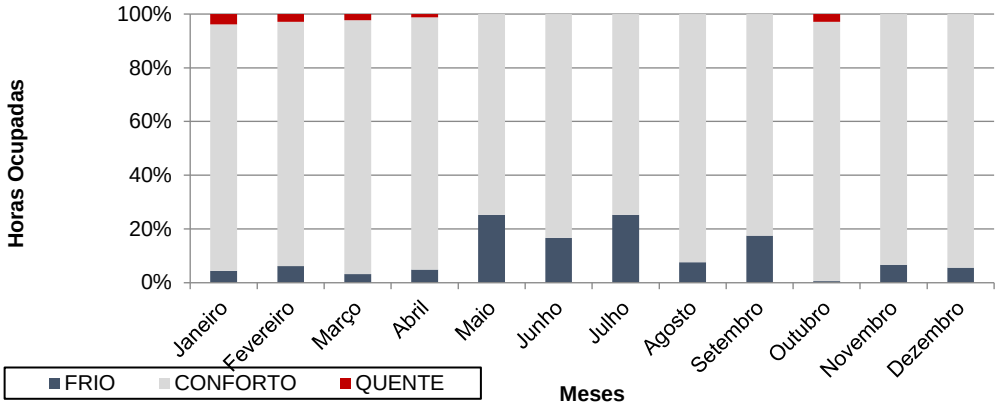

Figura 132 POC Campos do Jordão 8BCS Norte Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

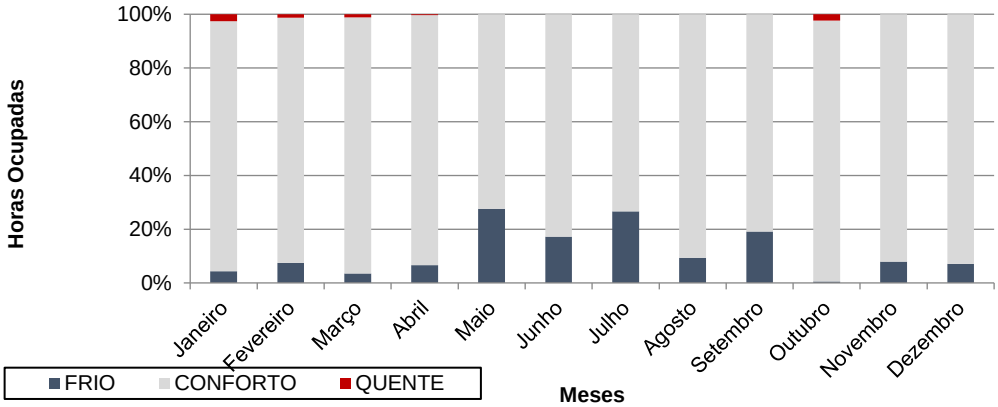

Figura 133 POC Campos do Jordão 8BCS Norte Alt5
Fonte: Elaborado pelo autor

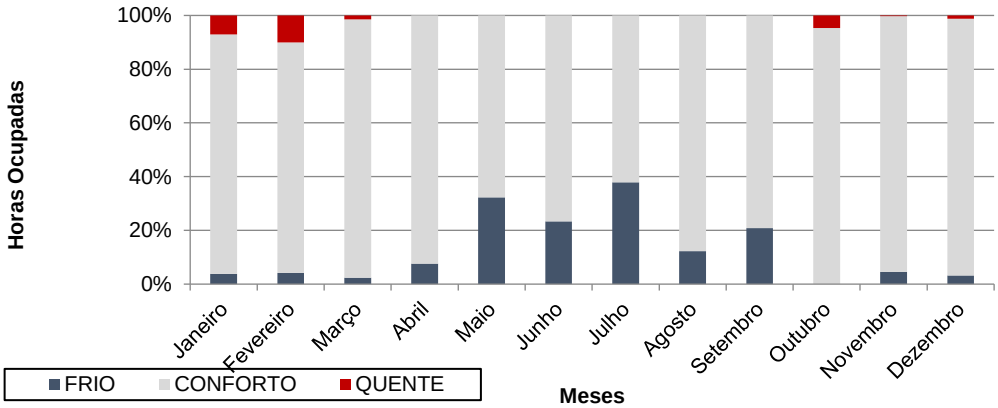

Figura 134 POC Campos do Jordão 8BCS Oeste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

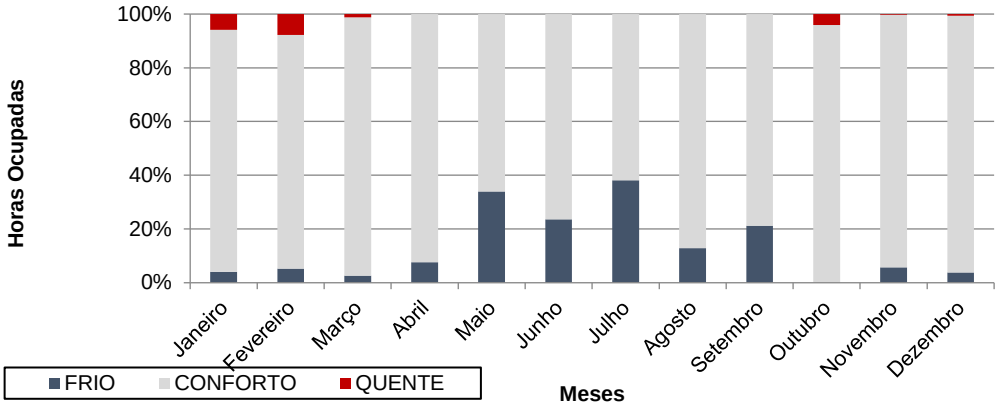

Figura 135 POC Campos do Jordão 8BCS Oeste Alt5
Fonte: Elaborado pelo autor

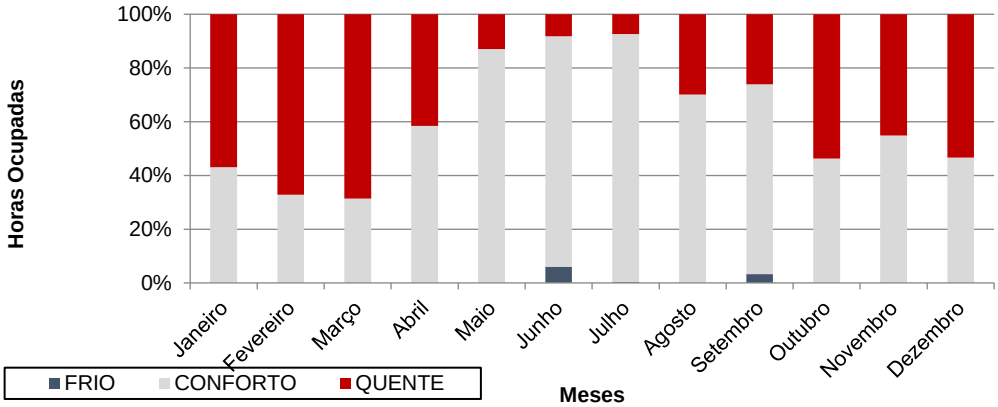

Figura 136 POC Rio de Janeiro 4BCS Leste_Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

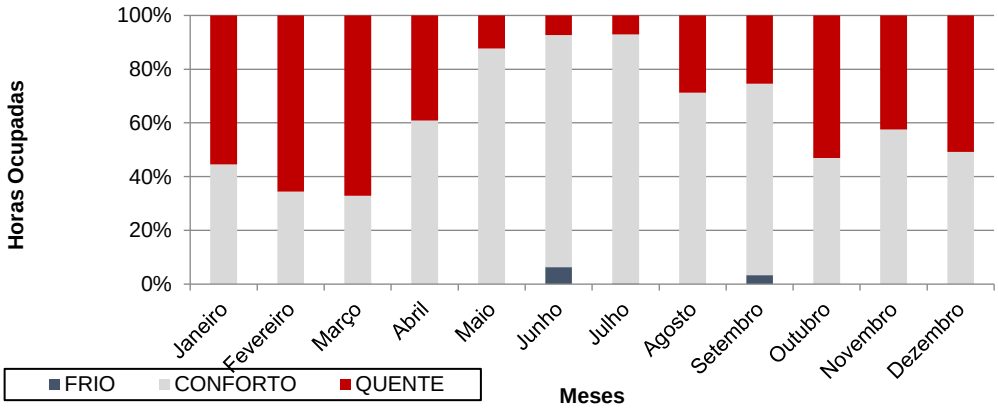

Figura 137 POC Rio de Janeiro 4BCS Leste Alt5
Fonte: Elaborado pelo autor

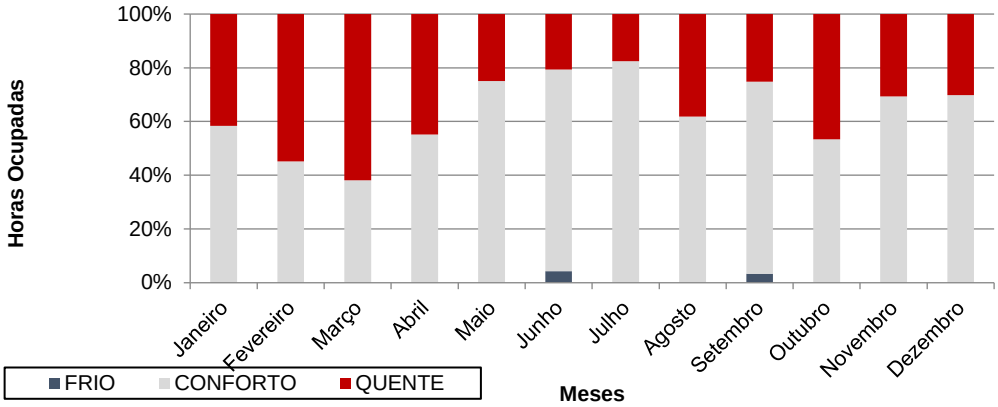

Figura 138 POC Rio de Janeiro 4BCS Norte Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

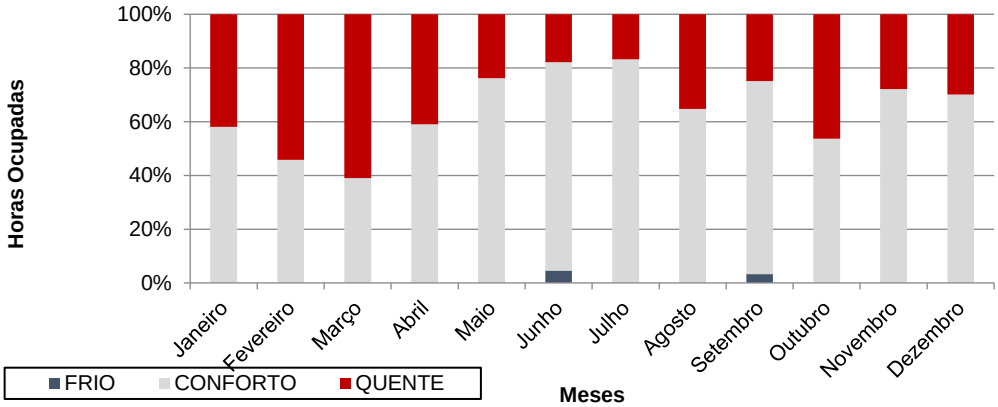

Figura 139 POC Rio de Janeiro 4BCS Norte Alt5
Fonte: Elaborado pelo autor

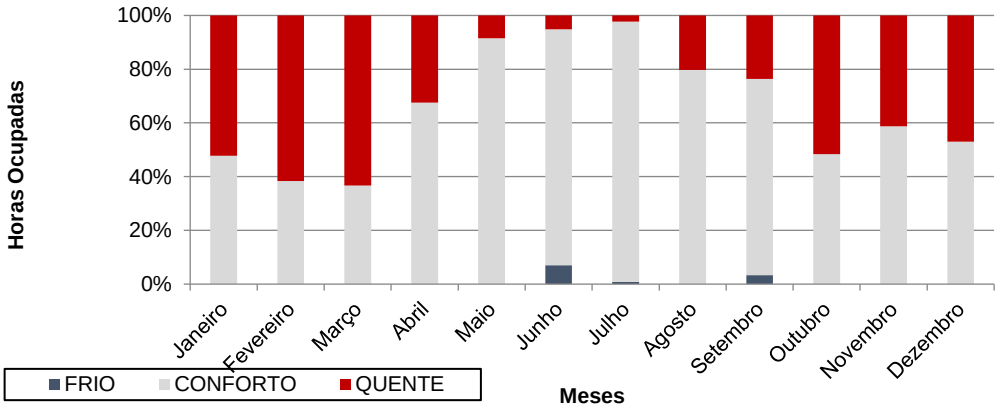

Figura 140 POC Rio de Janeiro 4BCS Oeste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

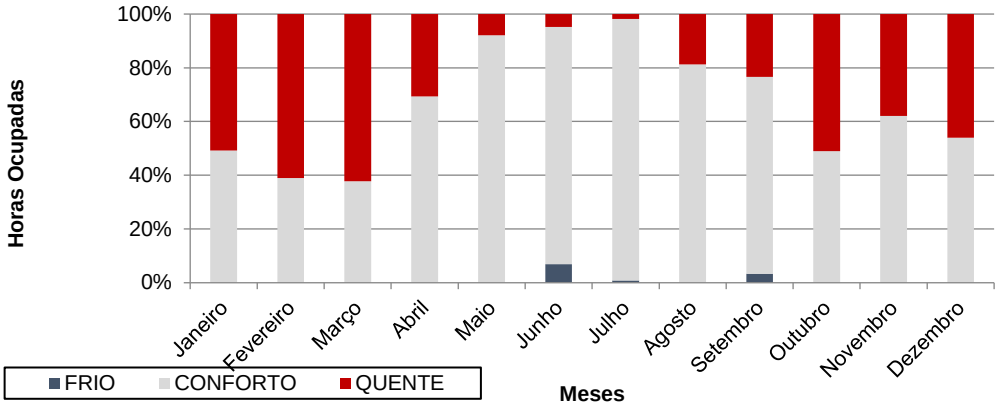

Figura 141 POC Rio de Janeiro 4BCS Oeste Alt5
Fonte: Elaborado pelo autor

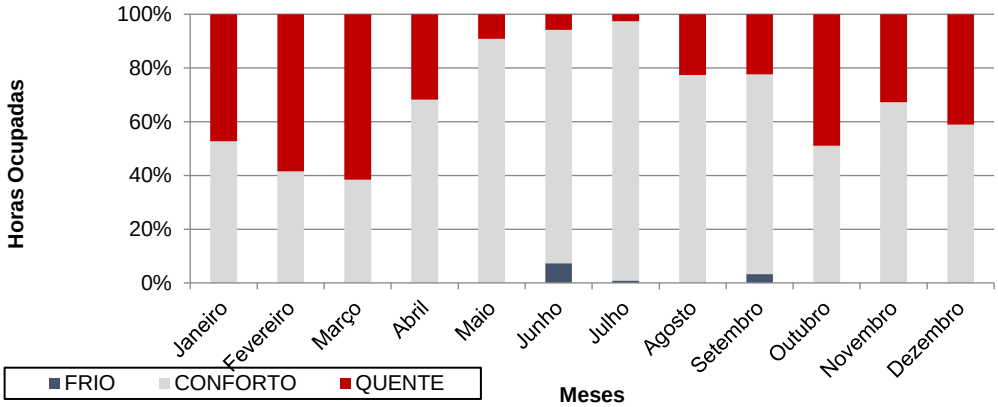

Figura 142 POC Rio de Janeiro 4BCS Leste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

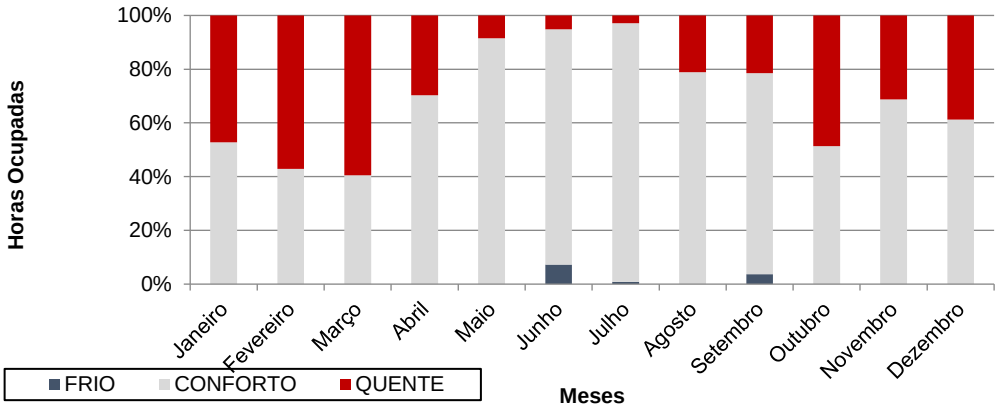

Figura 143 POC Rio de Janeiro 4BCS Leste Alt5
Fonte: Elaborado pelo autor

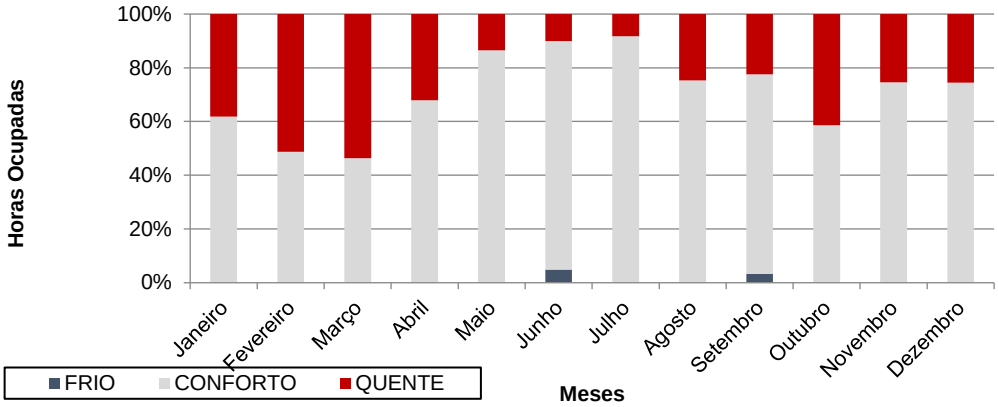

Figura 144 POC Rio de Janeiro 8BCS Norte Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

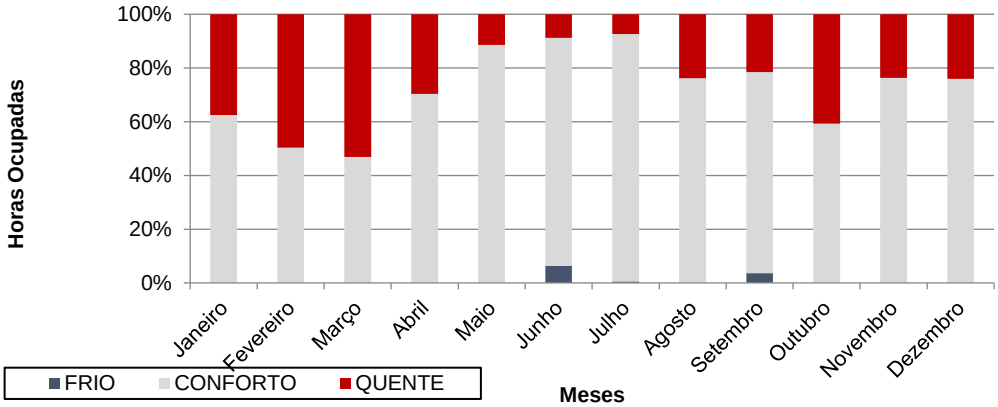

Figura 145 POC Rio de Janeiro 8BCS Norte Alt5
Fonte: Elaborado pelo autor

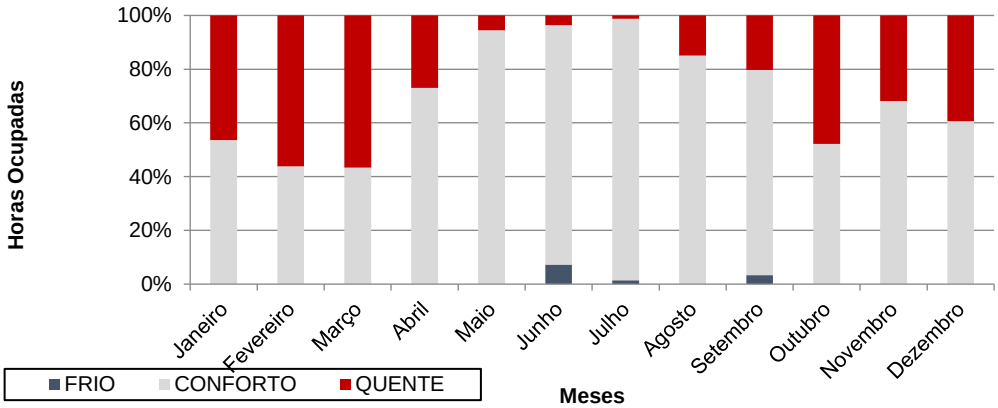

Figura 146 POC Rio de Janeiro 8BCS Oeste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

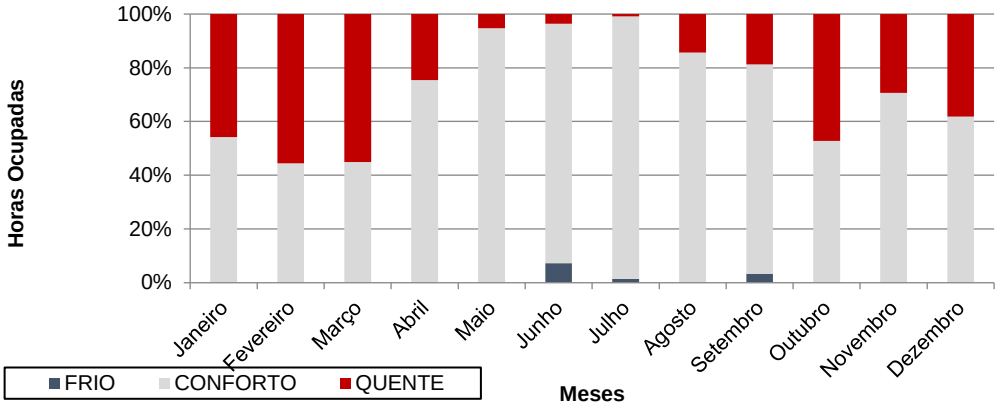

Figura 147 POC Rio de Janeiro 8BCS Oeste Alt5
Fonte: Elaborado pelo autor

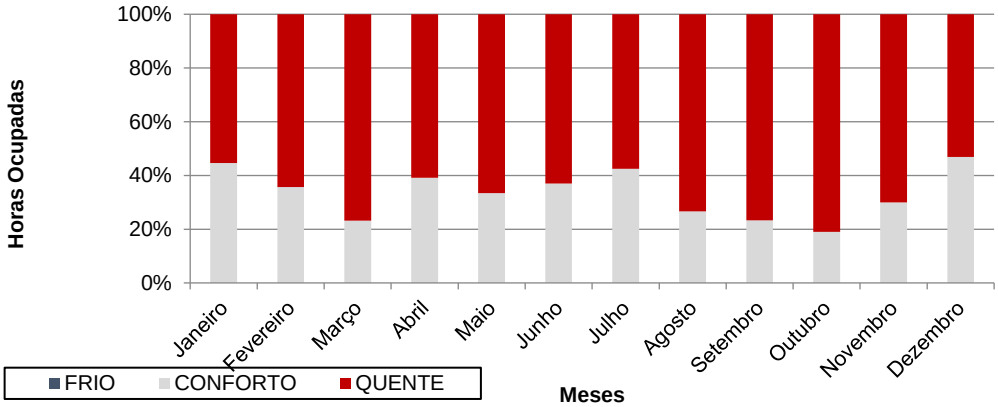

Figura 148 POC Belém 4BCS Leste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

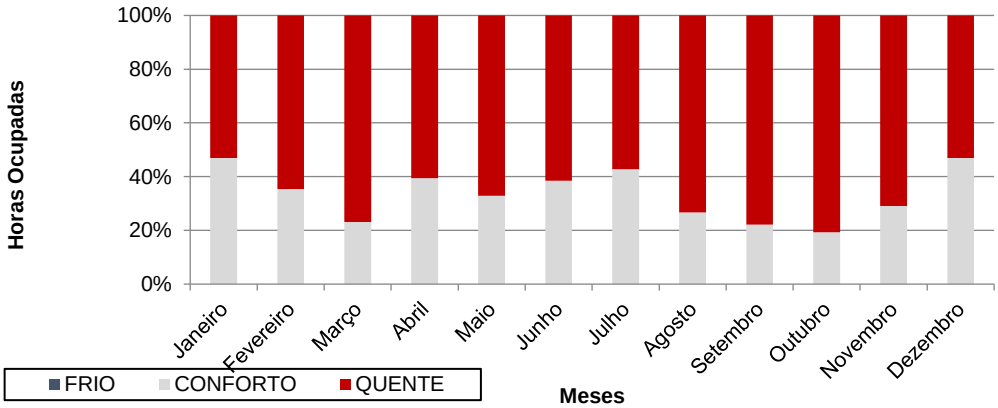

Figura 149 POC Belém 4BCS Leste Alt5
Fonte: Elaborado pelo autor

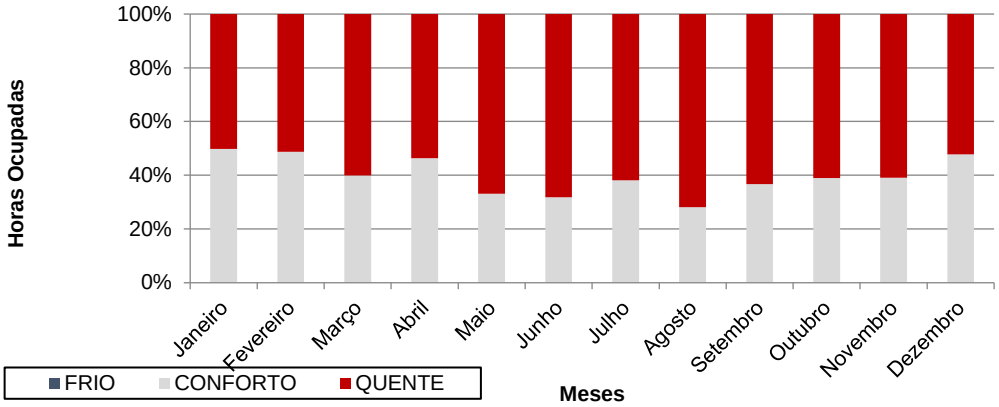

Figura 150 POC Belém 4BCS Norte Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

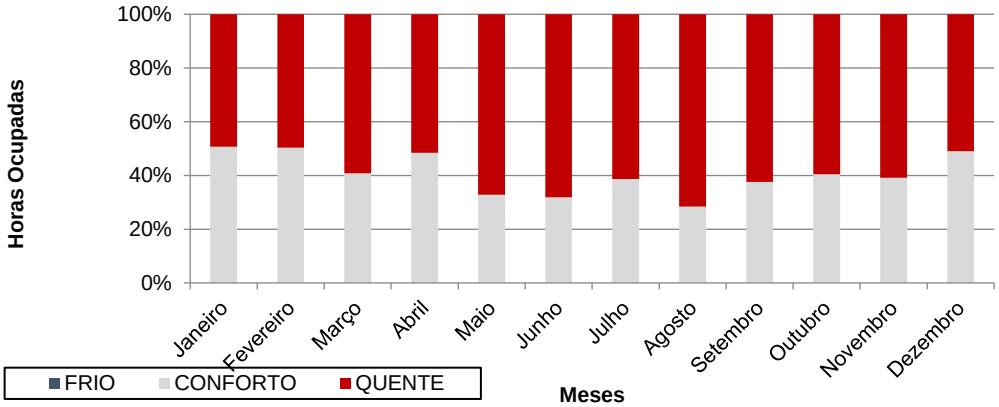

Figura 151 POC Belém 4BCS Norte Alt5
Fonte: Elaborado pelo autor

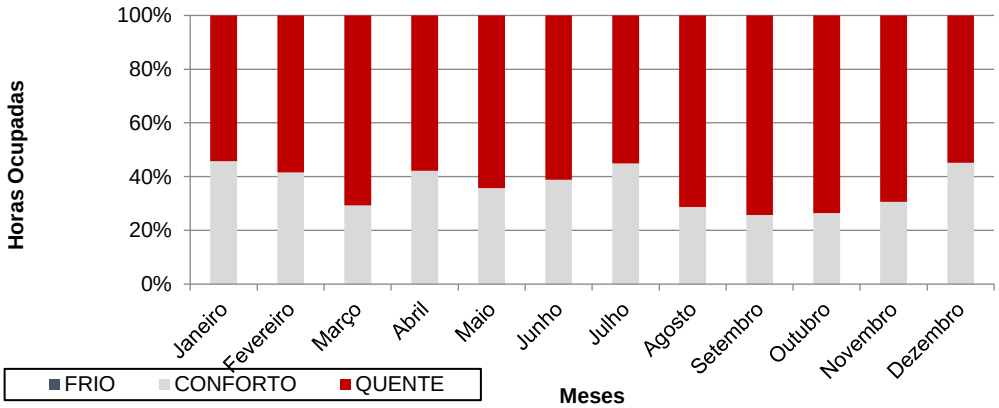

Figura 152 POC Belém 4BCS Oeste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

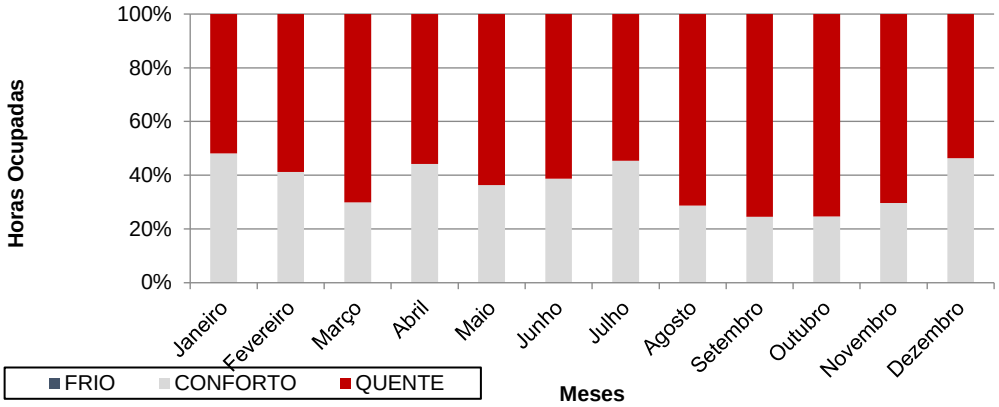

Figura 153 POC Belém 4BCS Oeste Alt5
Fonte: Elaborado pelo autor

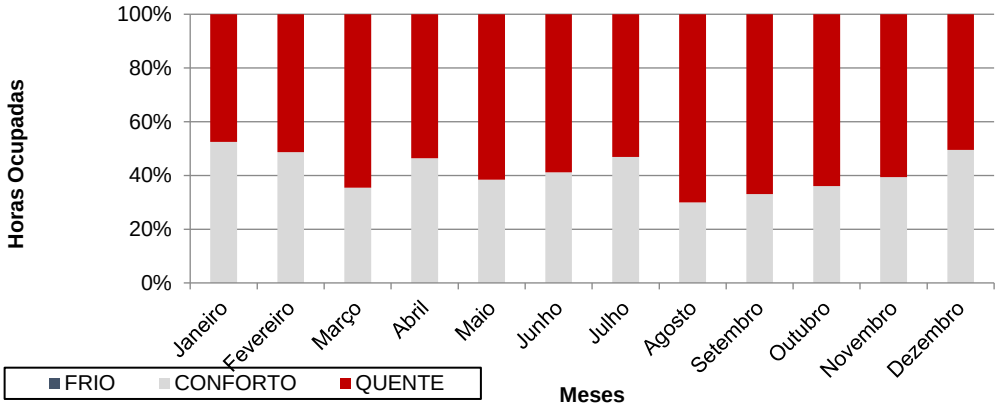

Figura 154 POC Belém 8BCS Leste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

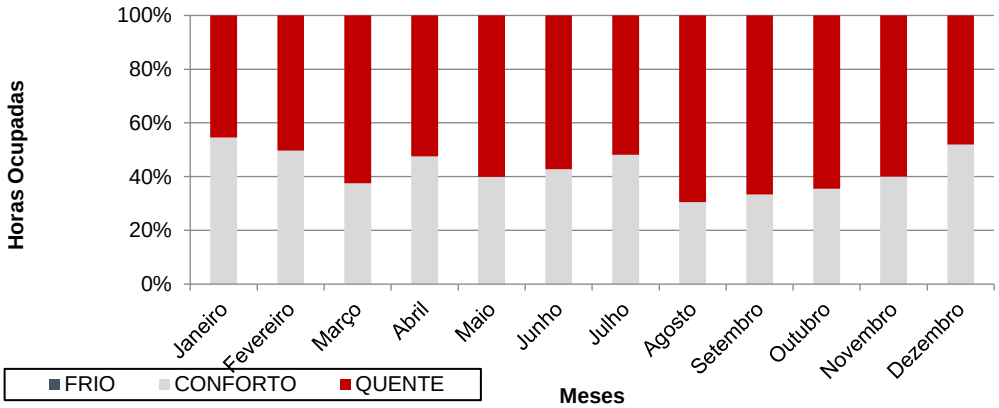

Figura 155 POC Belém 8BCS Leste Alt5
Fonte: Elaborado pelo autor

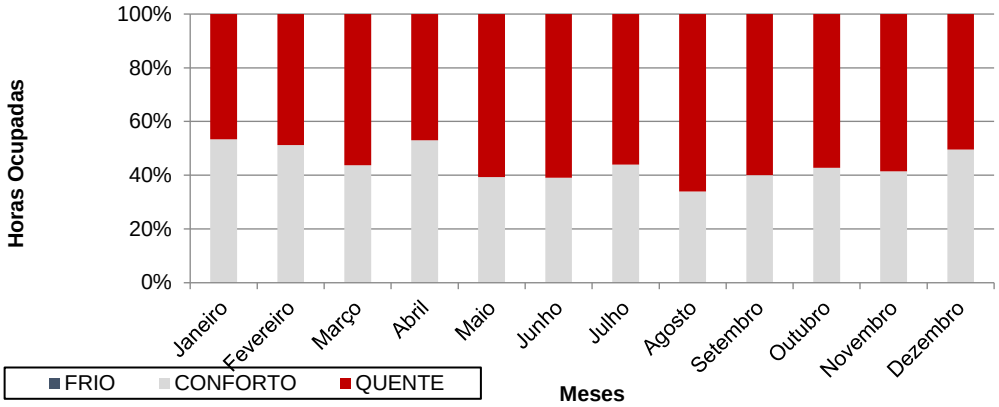

Figura 156 POC Belém 8BCS Norte Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

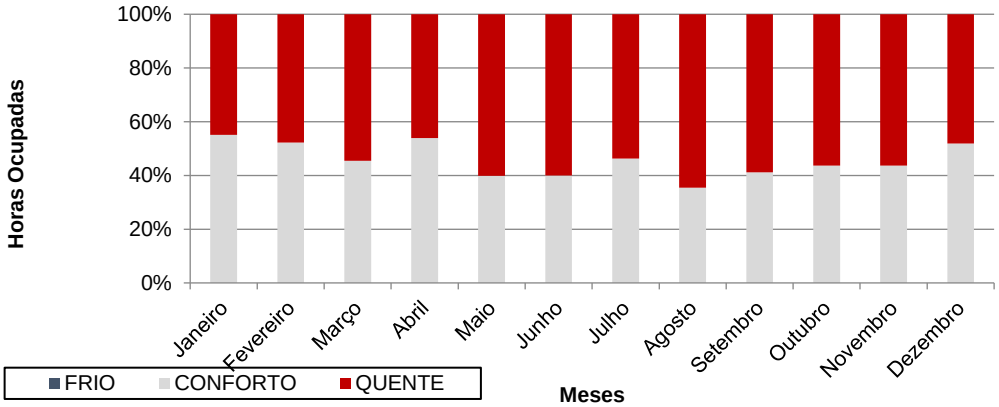

Figura 157 POC Belém 8BCS Norte_Alt5
Fonte: Elaborado pelo autor

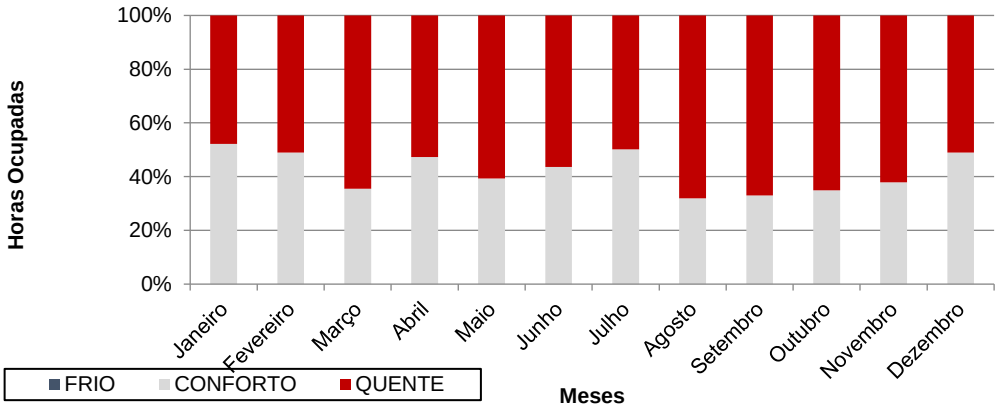

Figura 158 POC Belém 8BCS Oeste Alt3
Fonte: Elaborado pelo autor

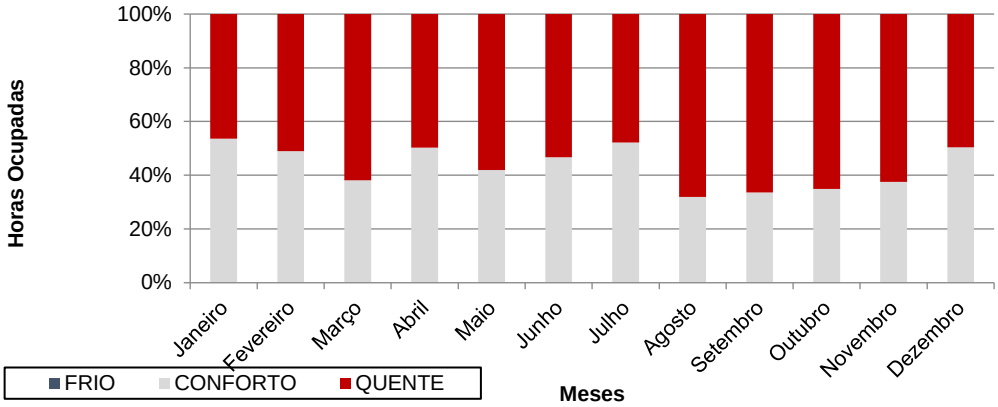

Figura 159 POC Belém 8BCS Oeste Alt5
Fonte: Elaborado pelo autor

Apêndice C: Condições de conforto para as salas de aula e escritórios na segunda etapa

Salas de Aula

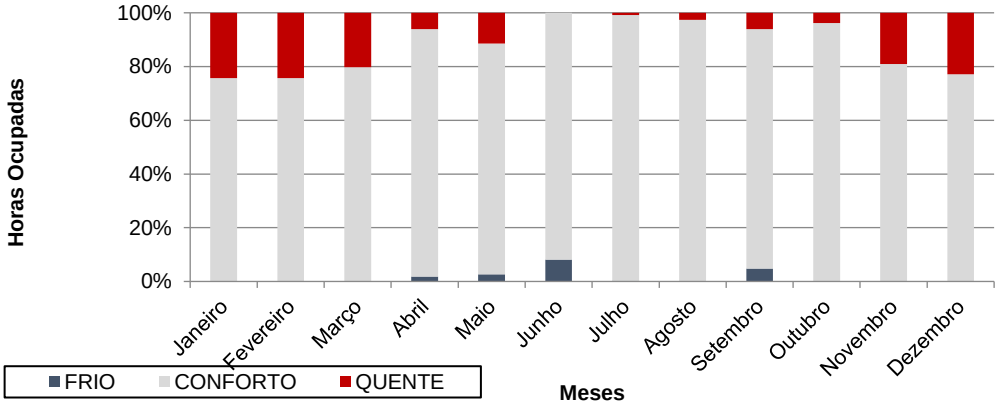

Figura 160 POC de Bento Gonçalves
Fonte: Elaborado pelo autor

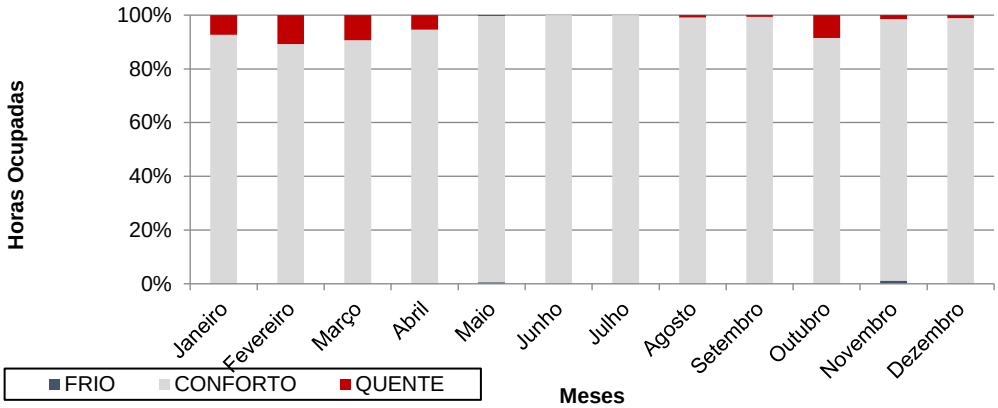

Figura 161 POC de Campos do Jordão
Fonte: Elaborado pelo autor

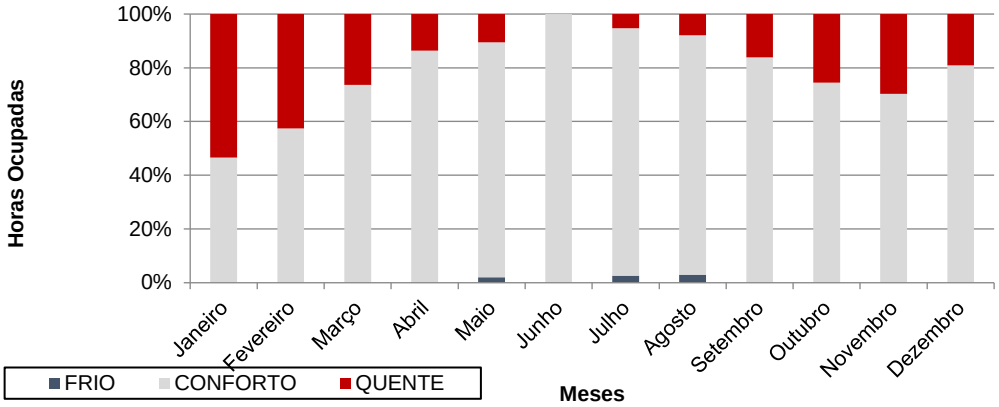

Figura 162 POC de Santa Maria
Fonte: Elaborado pelo autor

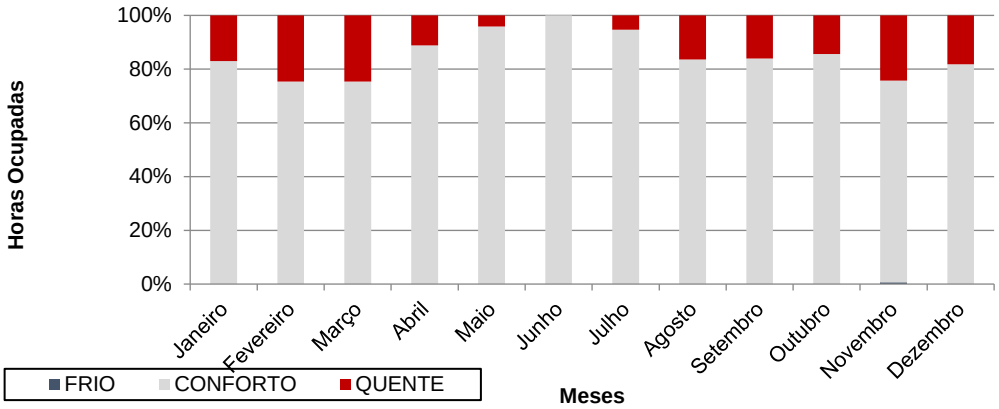

Figura 163 POC de São Jão del Rei
Fonte: Elaborado pelo autor

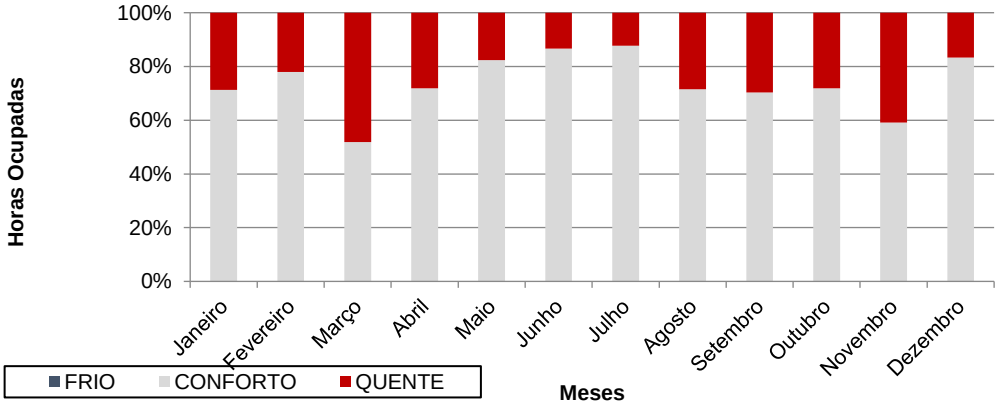

Figura 164 POC de Belo Horizonte
Fonte: Elaborado pelo autor

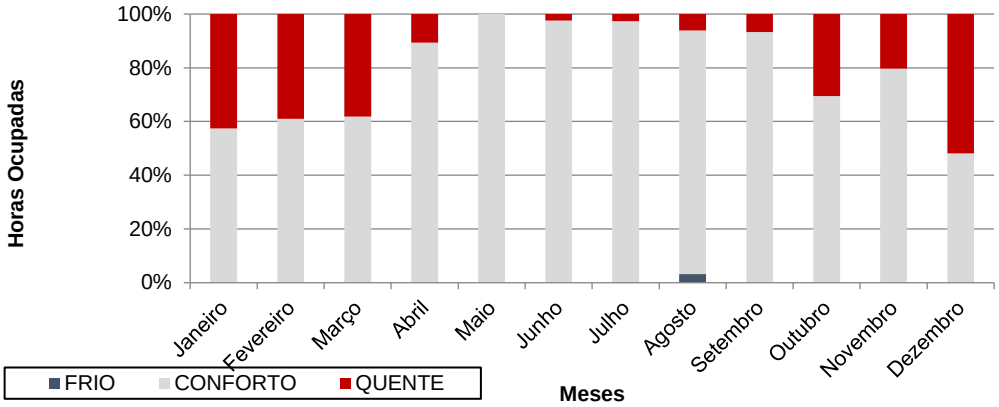

Figura 165 POC de Porto Alegre
Fonte: Elaborado pelo autor

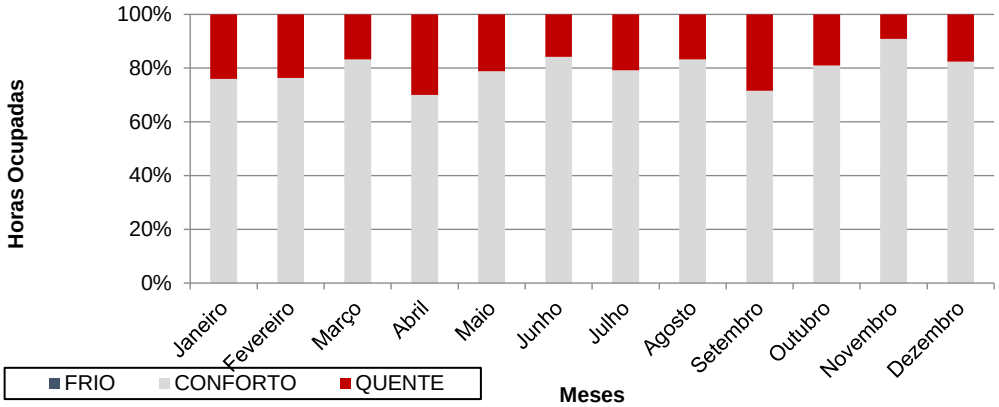

Figura 166 POC de Brasília
Fonte: Elaborado pelo autor

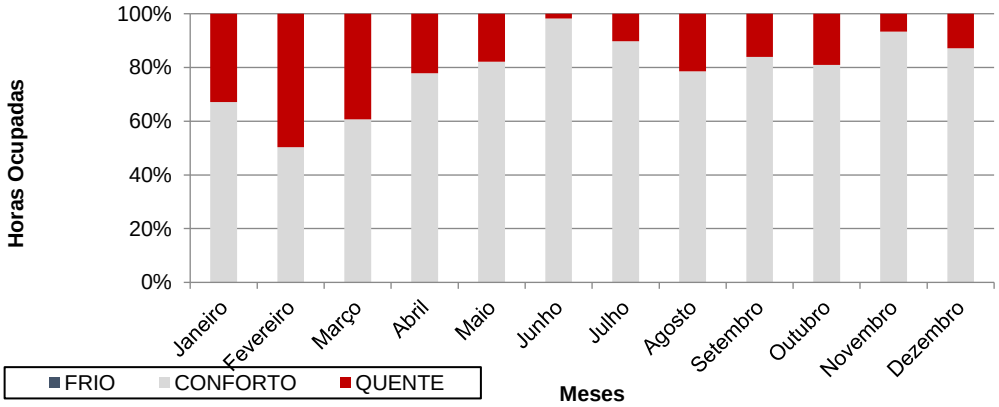

Figura 167 POC de Niterói
Fonte: Elaborado pelo autor

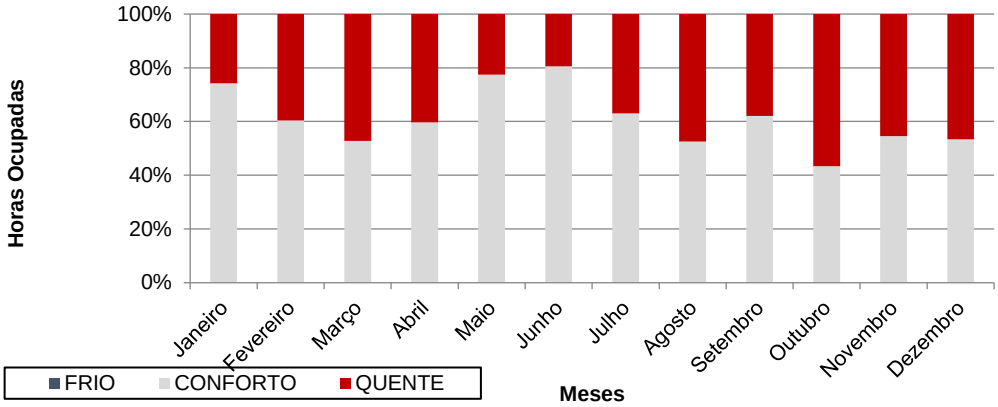

Figura 168 POC de Campo Grande
Fonte: Elaborado pelo autor

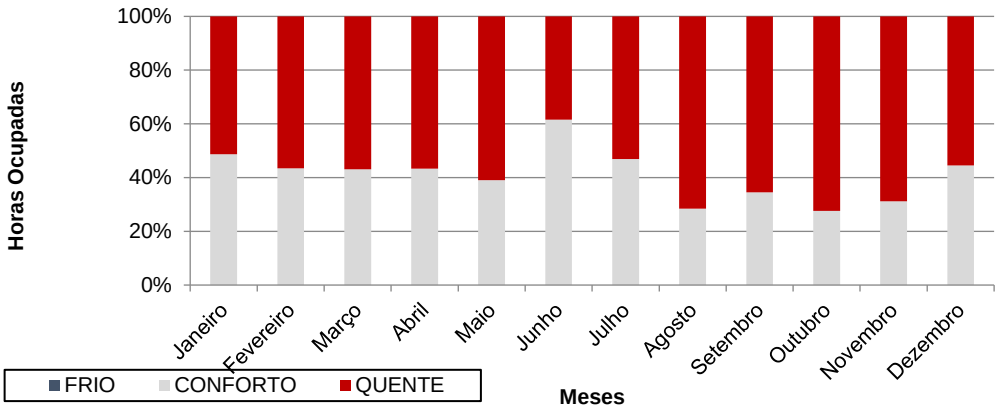

Figura 169 POC de Cuiabá
Fonte: Elaborado pelo autor

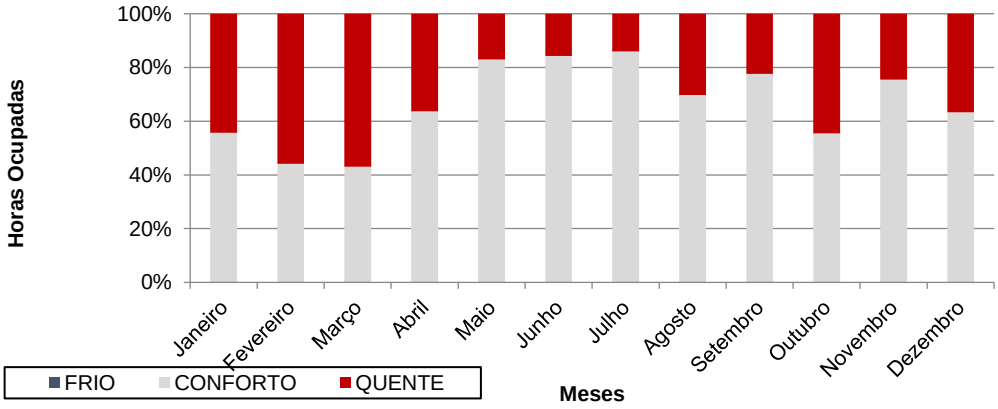

Figura 170 POC do Rio de Janeiro
Fonte: Elaborado pelo autor

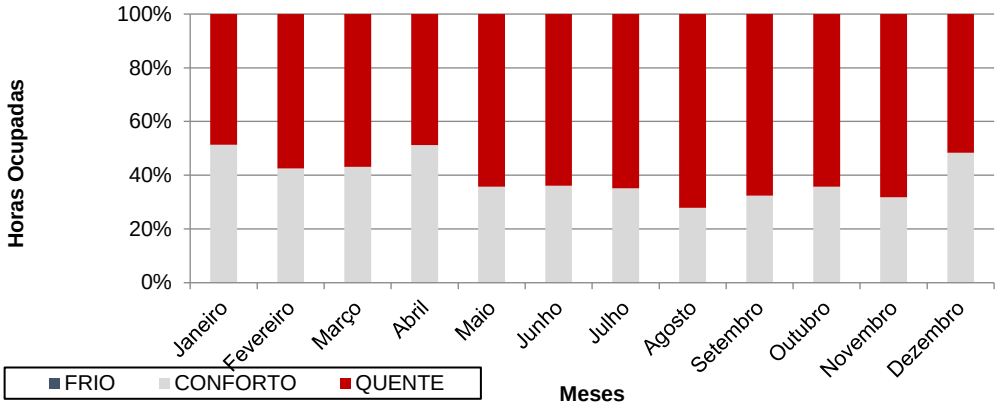

Figura 171 POC de Belém
Fonte: Elaborado pelo autor

Escritórios

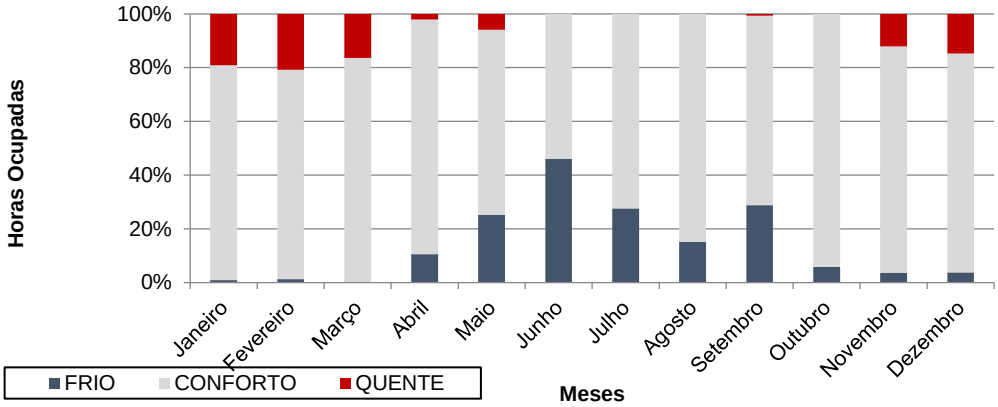

Figura 172 POC de Bento Gonçalves
Fonte: Elaborado pelo autor

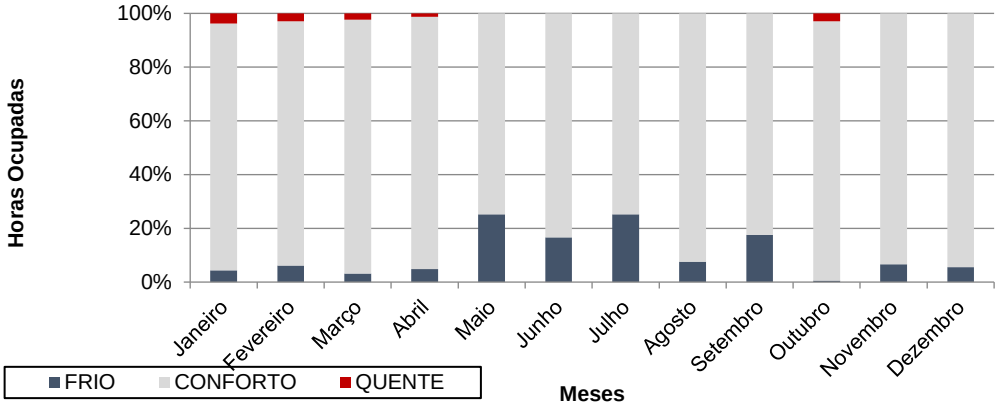

Figura 173 POC de Campos do Jordão
Fonte: Elaborado pelo autor

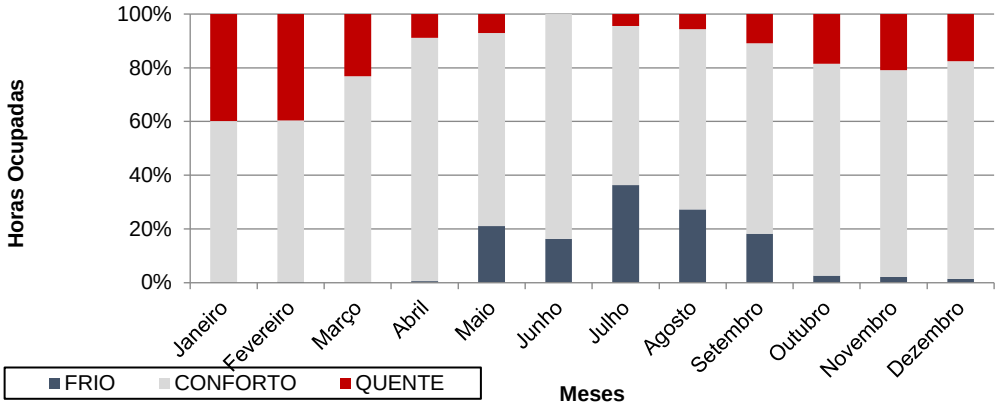

Figura 174 POC de Santa Maria
Fonte: Elaborado pelo autor

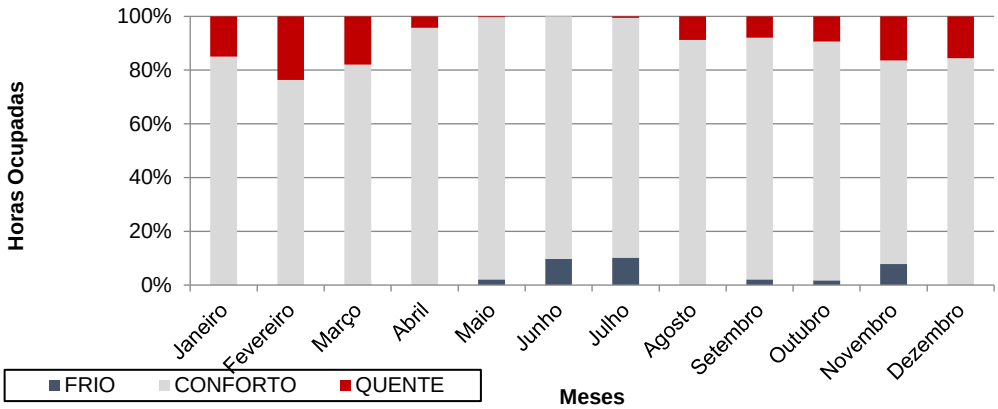

Figura 175 POC de São João del Rei
Fonte: Elaborado pelo autor

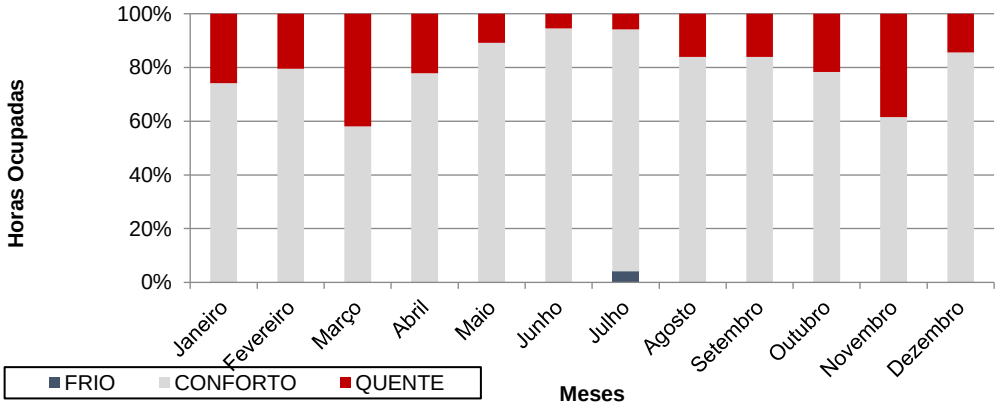

Figura 176 POC de Belo Horizonte
Fonte: Elaborado pelo autor

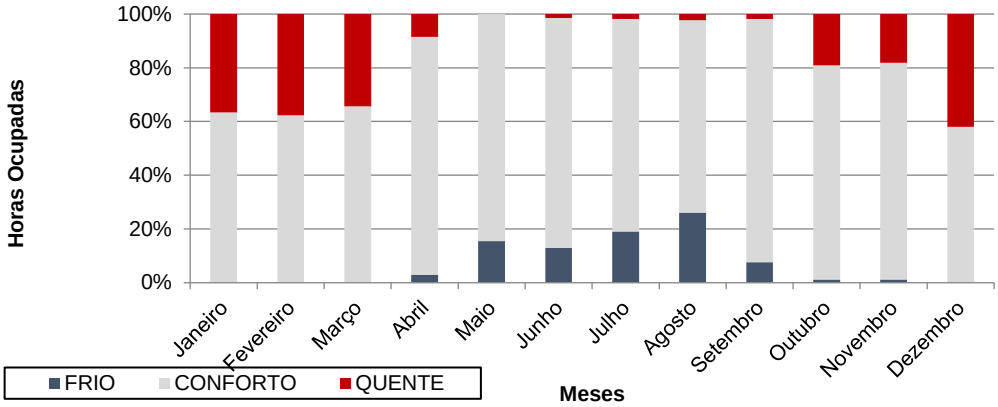

Figura 177 POC de Porto Alegre
Fonte: Elaborado pelo autor

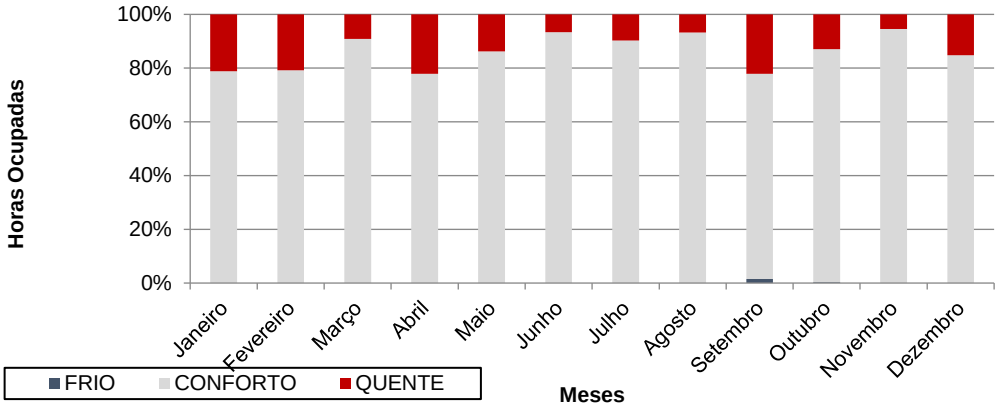

Figura 178 POC de Brasília
Fonte: Elaborado pelo autor

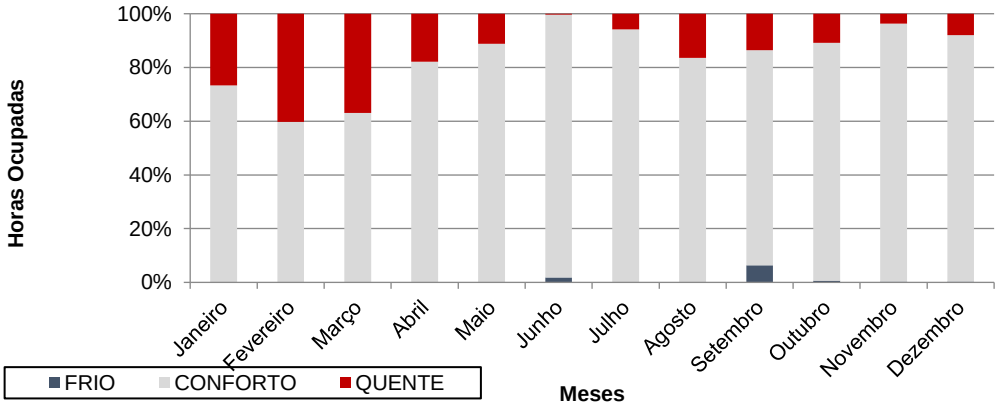

Figura 179 Distribuição mensal das horas em conforto na cidade de Niterói
Fonte: Elaborado pelo autor

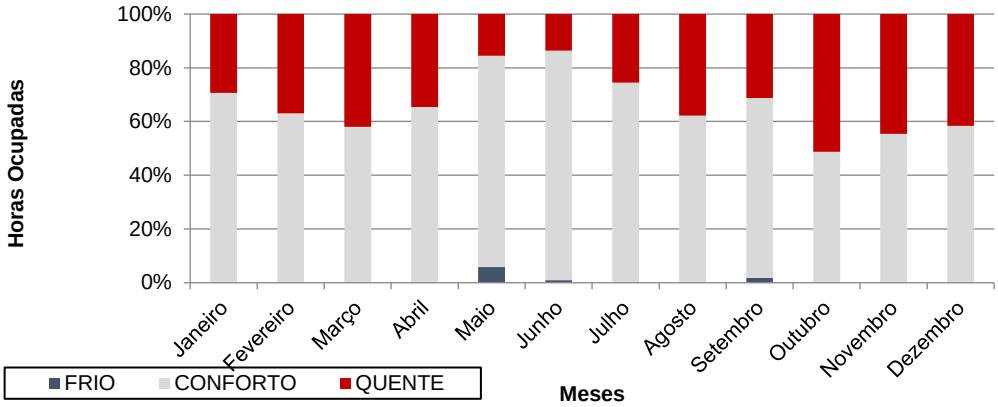

Figura 180 POC de Campo Grande
Fonte: Elaborado pelo autor

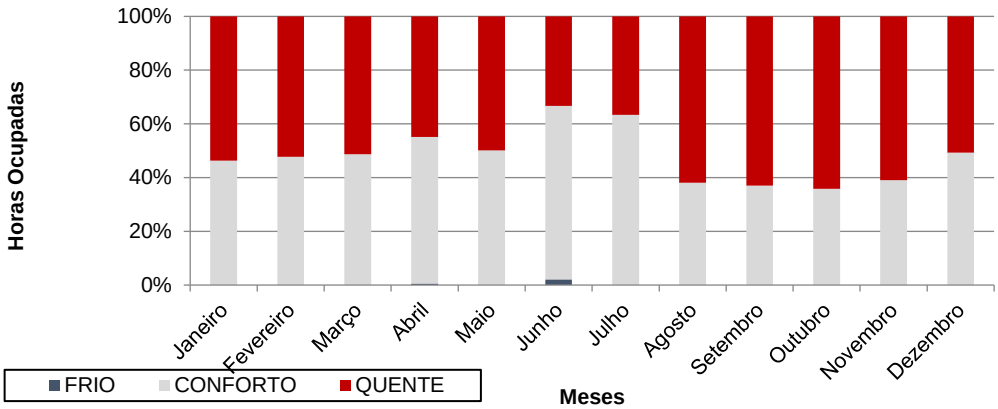

Figura 181 POC de Cuiabá
Fonte: Elaborado pelo autor

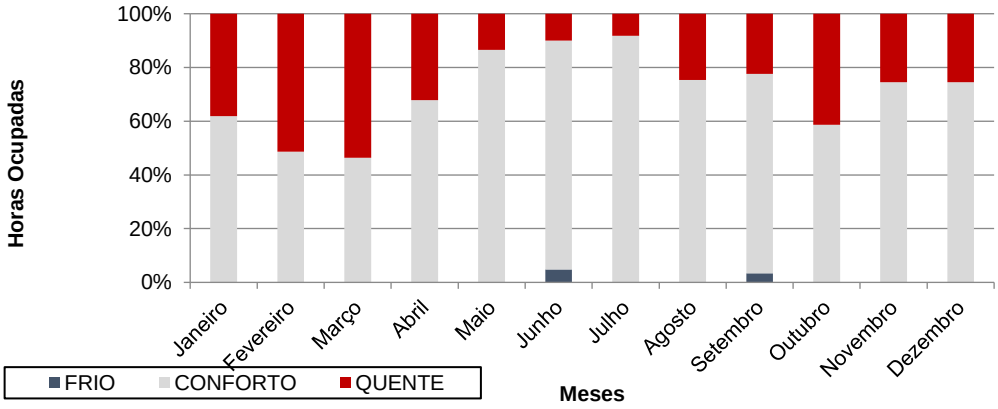

Figura 182 POC do Rio de Janeiro
Fonte: Elaborado pelo autor

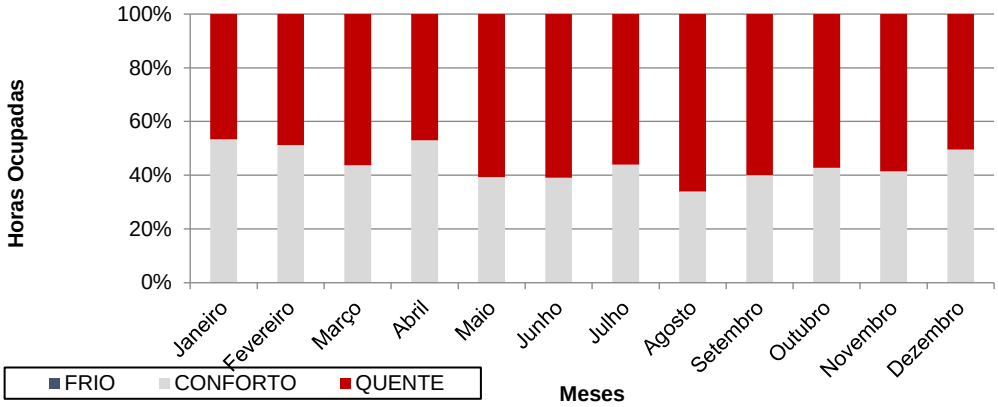

Figura 183 POC na cidade de Belém
Fonte: Elaborado pelo autor