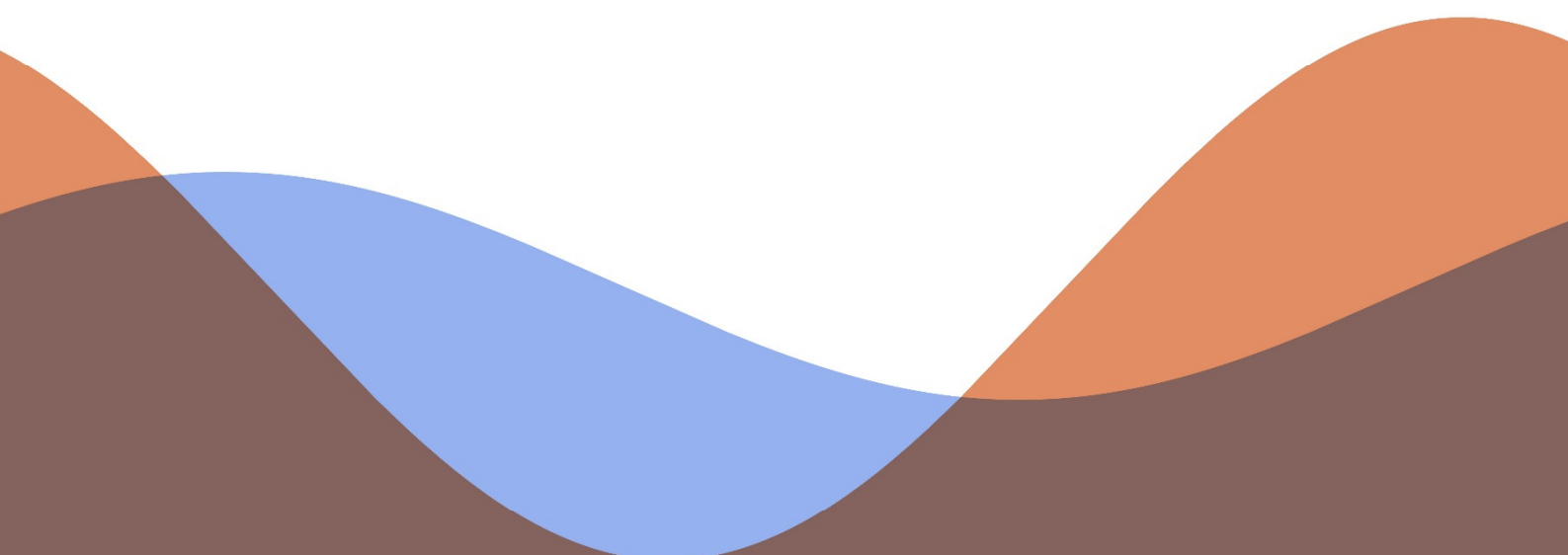


Universidade Federal da Paraíba  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação  
em Arquitetura e Urbanismo



# Materiais de mudança de fase (PCM) no condicionamento passivo de habitações no Semiárido Brasileiro

Diego Aristófanés Dias de Sousa

João Pessoa - PB  
Novembro de 2020



## **Materiais de mudança de fase (PCM) no condicionamento passivo de habitações no Semiárido Brasileiro**

Diego Aristófaes Dias de Sousa

Trabalho apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal da Paraíba – UFPB, como requisito à obtenção do grau de mestre em Arquitetura e Urbanismo

Orientador: Prof. Dr. Aluísio Braz de Melo  
Coorientador: Prof. Dr. Carlos Alejandro Nome Silva

João Pessoa - PB  
Novembro de 2020

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

S725m Sousa, Diego Aristófanés Dias de.

Materiais de mudança de fase (PCM) no condicionamento passivo de habitações no Semiárido Brasileiro / Diego Aristófanés Dias de Sousa. - João Pessoa, 2020.  
197 f. : il.

Orientação: Aluísio Braz de Melo.

Coorientação: Carlos Alejandro Nome.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

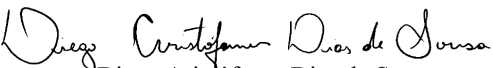
1. Habitação - Semiárido Brasileiro. 2. Material de Mudança de Fase. 3. Inércia Térmica. 4. Simulação termo energética - Edifício. 5. Conforto adaptativo. 6. Histerese de mudança de fase. I. Melo, Aluísio Braz de. II. Nome, Carlos Alejandro. III. Título.

UFPB/BC

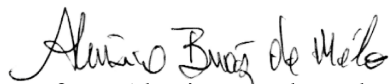
CDU 728:551.585(043)

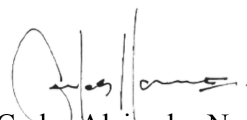
Materiais de mudança de fase (PCM) no condicionamento passivo de habitações no Semiárido Brasileiro

Por

  
Diego Aristófanes Dias de Sousa

Trabalho de pesquisa aprovado em 03 de novembro de 2020

  
Prof. Dr. Aluísio Braz de Melo  
(Orientador – UFPB)

  
Prof. Dr. Carlos Alejandro Nome Silva  
(Coorientador – UFPB)

  
Prof. Dr. Lucila Chebel Labaki  
(Avaliadora Interna – UFPB)

  
Prof. Dr. Raoni Venâncio dos Santos Lima  
(Avaliador Externo – UFCG)

**João Pessoa-PB - 2020**

## Agradecimentos

As palavras com as quais o leitor se depara primeiramente são, na realidade, as últimas que escrevo do longo desenvolvimento deste trabalho. E observando o decorrer desse desenvolvimento, não poderia deixar de reconhecer as muitas mãos que me ajudaram, sobretudo em um contexto de pandemia\* e sucateamento do ensino público superior no Brasil.

Agradeço assim, a todos os membros da minha banca de defesa final e qualificação: ao meu orientador Aluísio Braz, que me deu todo o suporte necessário ao desenvolvimento de uma pesquisa que tange tão diferentes aspectos, às longas orientações, revisões e ao suporte dado aos experimentos que acabaram não entrando na versão final desta dissertação, mas que espero que contribuam com o trabalho de futuros pesquisadores do LABEME; ao meu coorientador Calos Nome, por cada orientação e curtas conversas de corredor indispensáveis à estruturação dessa pesquisa e sua finalização, cuja contribuição me ajudou a desenvolver senso crítico e a melhor compreender a natureza de um trabalho científico; à Lucila Labaki, que fez parte do refinamento do meu projeto de pesquisa e que trouxe significativas contribuições referentes às noções de conforto ambiental; e ao Raoni Lima, sem cuja orientação não teria sido possível realizar as simulações computacionais que serviram de base ao processamento dos dados desta pesquisa.

A toda a minha família, especialmente aos meus pais Laurismar Alencar e Maria das Neves, que sempre me apoiaram em minha caminhada acadêmica, mesmo em meio a dias tão incertos enfrentados pelos pesquisadores brasileiros; e à minha irmã Natálie Catherine, que conviveu comigo nesses últimos 9 anos e sem cujo suporte diário eu não teria chegado aqui.

À Minna Miná, com quem tive a felicidade de compartilhar os desafios, frustrações e conquistas de estar realizando um mestrado ao mesmo tempo. Mesmo a um oceano de distância, ela muito me ajudou com seu suporte emocional, escutando minhas fatídicas epifanias sobre simulação computacional, termodinâmica e análise estatística, sem contar as excelentes dicas de diagramação da dissertação.

O desafio do desenvolvimento deste trabalho envolveu saberes e competências que geralmente não são exploradas a fundo na formação do arquiteto. Por isso, agradeço a todos os professores e amigos que contribuíram direta ou indiretamente com este:

A Júlio Gonçalves, João Martins, Larissa Lucena e Pollyanna Padre, pela ajuda com orientações e materiais bibliográficos sobre análise estatística. E novamente ao Júlio, por ter sido meu intermédio com a Companhia Estadual de Habitação Popular da Paraíba – CEHAP – instituição à qual estendo meus agradecimentos pelo projeto arquitetônico utilizado como referência.

A todos os meus colegas das engenharias de materiais e mecânica, por terem me ajudado com toda a parte de cálculo e teoria concernentes ao complexo universo da termodinâmica em situações transientes com mudança de fase de materiais, como Caio Torres, Dener, Henrique,

\*Nota: esse trabalho foi concluído em outubro de 2020, em meio à pandemia do COVID-19.

Israel, Jefferson e Jonattan. Pelo mesmo motivo, estendendo meus agradecimentos aos técnicos do CT dos laboratórios de química e engenharia de materiais que fizeram parte desse auxílio.

Aos companheiros da Casa Nordeste, onde esse projeto teve seu início.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da UFPB e colegas de programa, como aos pesquisadores de outras instituições com quem tive o prazer de intercambiar ideias em eventos e congressos, que muito me ajudaram no amadurecimento metodológico deste trabalho.

E por fim, meus agradecimentos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pelo apoio financeiro recebido ao longo de todo o Mestrado, através da qual estendo minha gratidão a todos que lutam pela expansão e consolidação do ensino público superior no Brasil. Este trabalho é fruto desse esforço.

## Resumo

Este trabalho possui como objeto de estudo paredes externas de habitações condicionadas naturalmente no contexto do Semiárido Brasileiro. Foca, especificamente, na promoção de Inércia Térmica para resfriamento a partir da aplicação de materiais com grande capacidade de armazenamento de calor latente, os Materiais de Mudança de Fase ou *Phase Change Materials* (PCM). A pesquisa possui natureza exploratória e abordagem quantitativa, cujos procedimentos metodológicos constituem a revisão de literatura, simulação computacional e coleta e análise sistemática de dados. Essa se ampara em softwares de simulação termo energética do edifício (especificamente o *EnergyPlus* 9.2) e dados de arquivos climáticos, bem como ferramentas estatísticas para análise de dados e plataformas de programação visual de algoritmos para automatização de processos computacionais (*Grashopper* + *Ladtbug* + *Honeybee*). As simulações levaram em conta o modelo computacional de um quarto em um edifício multifamiliar de interesse social, simulando propriedades de materiais, cargas internas e rotina de abertura de janelas específicas. As propriedades térmicas do Octadecano ( $C_{18}H_{38}$ ) foram utilizadas como referência para o PCM das simulações, considerando sua histerese de mudança de fase. A partir do modelo do quarto e de arquivos climáticos de municípios do Semiárido Brasileiro, dados de fluxo energético e temperatura superficial das paredes externas foram obtidos, bem como o cálculo da estimativa do Percentual de Conforto anual (modelo adaptativo). Nas análises de cada município, três fatores foram levados em conta quanto à implementação do PCM às paredes: orientação (posição nas faces externa ou interna); espessura da camada PCM (5 a 20 mm, com intervalo de 5 mm); e temperatura de fusão (19 a 31 °C, com intervalo de 2 °C). Os resultados das simulações para cada combinação de fatores foram comparados ao resultado de um quarto com paredes sem PCM. Nas circunstâncias estudadas, os resultados demonstraram que: paredes externas com PCM na face exterior apresentam maior Inércia Térmica, com efetiva redução dos ganhos de calor; as paredes com camada PCM 20mm apresentaram maior Inércia Térmica; uma maior Inércia Térmica nas paredes não guarda relação direta com o aumento de conforto ambiental, estimando-se que cerca de 23% dos municípios do Semiárido Brasileiro sejam prejudicados com o uso de PCMs; e que a Temperatura Média Anual é um fator ambiental mais determinante que a Amplitude Diária Média na predição da contribuição dos PCMs para o Incremento do Conforto. Apesar de não apresentar resultados otimistas quanto à incorporação de PCMs no contexto estudado, este trabalho contribui com a ampliação do escopo de estudos sobre aplicação de PCMs em contextos tropicais, levando em conta um ambiente condicionado por meio da ventilação natural e abarcando a realidade das habitações de interesse social brasileiras. O estudo também constitui uma adição ao até então reduzido número de pesquisas que simulam o efeito da histerese de PCMs sobre o desempenho térmico do edifício com o programa *EnergyPlus*.

**Palavras-chave:** Material de Mudança de Fase. Inércia Térmica. Semiárido Brasileiro. Simulação Termo Energética do Edifício. Conforto Adaptativo. Histerese de Mudança de Fase.

## Abstract

This work aims to study external walls of naturally conditioned houses in the context of the Brazilian Semi-arid. It specifically focuses on the promotion of thermal inertia by applying materials with large latent heat energy storage capacity, the Phase Change Materials – PCM. The research has an exploratory nature and a quantitative approach, with literature review, computer simulation and data collection and systematic analysis as methodological procedures. It relies on whole-building thermal energy simulation software (specifically *EnergyPlus* 9.2) and weather data files, as well as statistical tools for data analysis and visual algorithmic programming platforms for the automation of computational processes (*Grashopper* + *Ladtbug* + *Honeybee*). The simulations take into account a computational model of a room in a multifamily housing of social interest, simulating specific material properties, internal loads and window opening routine. The thermal properties of the Octadecane ( $C_{18}H_{38}$ ) were used as reference for the PCM simulations, considering its phase change hysteresis. From the model of the referred room and weather files of Brazilian Semi-arid municipalities, energy flow and surface temperature data of the external walls were obtained, as well as the estimation of the annual Comfort Percentage (adaptive model). In the analysis, for each municipality, three factors were taken into account regarding the implementation of the PCM into the walls: orientation (position according to external or internal faces); PCM layer thickness (5 to 20 mm range, with 5 mm interval); and melting temperature (19 to 31 °C range, with 2 °C interval). The results of the simulations for each combination of factors were compared to the result of a room without PCM. Under the studied circumstances, the results showed that: external walls with PCM on exterior surfaces present greater Thermal Inertia, with effective reduction of heat gains; the walls with 20mm PCM layer showed greater Thermal Inertia; greater Thermal Inertia on walls does not imply increment of environmental comfort, being estimated that near 23% of the municipalities in the Brazilian Semi-arid region is not benefited from the use of PCMs; and that the Annual Average Temperature is a more determinant climatic factor than the Average Daily Amplitude in the prediction of the contribution of PCMs to increase the comfort. Despite not presenting optimistic results regarding the use of PCMs in the studied context, this work contributes to the expansion of the scope of studies on the application of PCMs in tropical contexts, taking into account a naturally ventilated environment and embracing the reality of Brazilian social housing. Finally, the study is an addition to the hitherto reduced number of studies that simulate the effects of PCM hysteresis on building's thermal performance with *EnergyPlus*.

**Keywords:** Phase Change Material. Thermal Inertia. Brazilian Semi-arid. Whole-building Thermal-Energy Simulation. Adaptive Comfort. Phase Change Hysteresis.

## Lista de Figuras

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Mapa com delimitação do Semiárido Brasileiro. Fonte: Imagem editada pelo autor a partir dos <i>shapefiles</i> do INSA (2017) .....                                                                                                                                                                                                                       | 21 |
| Figura 2 - Ciclos de mudança de fase do PCM. Fonte: Imagem editada pelo autor a partir de < <a href="http://portuguese.andores.com/sale-9516717-phase-change-micro-capsule-paraffin-wax-pcm-for-intelligence-attenuation.html">http://portuguese.andores.com/sale-9516717-phase-change-micro-capsule-paraffin-wax-pcm-for-intelligence-attenuation.html</a> > ..... | 23 |
| Figura 3 - Render simulando o processo de montagem da CASA NORDESTE 1.0. Fonte: Acervo do LM+P .....                                                                                                                                                                                                                                                                | 27 |
| Figura 4 - Faixas de aceitabilidade de temperatura operativa para espaços condicionados naturalmente. Fonte: (ASHRAE, 2013) .....                                                                                                                                                                                                                                   | 34 |
| Figura 5 - Faixas de aceitabilidade de temperatura operativa e velocidade dos ar. Fonte: (ASHRAE, 2013) .....                                                                                                                                                                                                                                                       | 34 |
| Figura 6 - Carta Bioclimática Adaptada e suas Estratégias de Condicionamento Térmico. Fonte: (LAMBERTS et al., 1994) .....                                                                                                                                                                                                                                          | 36 |
| Figura 7 - Representação gráfica ilustrativa da resposta térmica de uma onda senoidal de calor se propagando por uma parede - fator decremental ( $A_e - A_i$ ); atraso térmico ( $\Phi$ ). Fonte: (VERBEKE; AUDENAERT, 2018) .....                                                                                                                                 | 38 |
| Figura 8 - Esboço do Diagrama Antropobioclimático proposto por Fernandes. Fonte: (FERNANDES, 2019) .....                                                                                                                                                                                                                                                            | 39 |
| Figura 9 - Zoneamento Bioclimático brasileiro, com destaque (em vermelho) para a delimitação do Semiárido Brasileiro. Fonte: Editado pelo autor a partir de ABNT (2005) .....                                                                                                                                                                                       | 40 |
| Figura 10 - Mapas com classificações climáticas para temperatura médias abaixo de 21°C (mapa superior), de 21 a 25 °C (mapa do meio) e acima de 25°C (mapa inferior). Fonte: (RORIZ, 2013) .....                                                                                                                                                                    | 42 |
| Figura 11 - Gráfico correlacionando aumento de temperatura e tempo de aquecimento de um material hipotético ao longo de suas mudanças de fase. Fonte: Editado pelo autor a partir de Regin et al. (2008) .....                                                                                                                                                      | 43 |
| Figura 12 - Classificação geral de PCMs. Fonte: (Rathod e Banerjee, 2013 apud JELLE; KALNÆS, 2017) .....                                                                                                                                                                                                                                                            | 45 |
| Figura 13 - Temperatura de fusão vs. entalpia de fusão para vários tipos de PCM. Fonte: (Dieckmann, 2013 apud JELLE; KALNÆS, 2017) .....                                                                                                                                                                                                                            | 46 |
| Figura 14 (esquerda) - Temperaturas de fusão e cristalização para materiais cristalinos puros. Fonte: (ASTM, 2012b) .....                                                                                                                                                                                                                                           | 47 |
| Figura 15 (direita) - Temperaturas de fusão e cristalização para materiais poliméricos. Fonte: (ASTM, 2012b) .....                                                                                                                                                                                                                                                  | 47 |
| Figura 16 (esquerda) - PCM macroencapsulado da empresa Puretemp. Fonte: (MARTINS, 2017) .....                                                                                                                                                                                                                                                                       | 48 |
| Figura 17 (direita) - PCM microencapsulado (sem marca específica) visto a olho nu. Fonte: (MARTINS, 2017) .....                                                                                                                                                                                                                                                     | 48 |
| Figura 18 - Cápsulas de PVDC látex com PCM. Fonte: (SYNTROLEUM, 2013) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 50 |
| Figura 19 - Diagrama isométrico da célula de teste, e fonte de aquecimento com 12 lâmpadas. Fonte: (KUZNIK et al., 2008) .....                                                                                                                                                                                                                                      | 50 |
| Figura 20 - Parede experimental com isolamento convencional (painel da esquerda) vs. isolamento reflexivo otimizado com PCM (painel da direita). Fonte: (KOSNY; YARBROUGH, 2008) .....                                                                                                                                                                              | 51 |
| Figura 21 - Representação em seção do modelo de referência e modelo equivalente simplificado (cotas em mm). Fonte: (LABEEE, 2018b) .....                                                                                                                                                                                                                            | 56 |
| Figura 22 - Croqui perspectivo de uma unidade habitacional de um edifício multifamiliar – em amarelo, as vedações externas; em vermelho, as superfícies adiabáticas correspondentes à divisão entre pavimentos; em azul transparente, a esquadrias; e em roxo, os elementos de sombreamento (contexto da simulação). Fonte: (SORGATO, 2015) .....                   | 56 |
| Figura 23 - Critérios para habilitar ventilação natural do usuário com comportamento intermediário. Fonte: (SORGATO, 2015) .....                                                                                                                                                                                                                                    | 58 |
| Figura 24 - Seções de paredes verdes sem isolamento, com 3 mm de isolamento e com 7 mm de isolamento (respectivamente da esquerda para a direita). Fonte: (OLIVIERI et al., 2017) .....                                                                                                                                                                             | 59 |
| Figura 25 - Diagrama ilustrando a integração entre <i>Ladybug</i> , <i>Honeybee</i> e demais softwares. Fonte: < <a href="https://github.com/ladybug-tools/honeybee-wiki">https://github.com/ladybug-tools/honeybee-wiki</a> >. Acesso em: 12 set. 2020 .....                                                                                                       | 59 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 26 - Diagrama ilustrando o processo de otimização para encontrar os valores das propriedades térmicas da parede verde. Fonte: (OLIVIERI et al., 2017) .....                                                                                                                                                                          | 60 |
| Figura 27 - Representação da distribuição dos nós de simulação ao longo das seções de materiais para um modelo Diferencial de Condução Finita. Fonte: (U.S.DOE, 2020a) .....                                                                                                                                                                | 61 |
| Figura 28 - Gráfico da função entalpia-temperatura com uma única curva. Fonte: (U.S.DOE, 2020c) .....                                                                                                                                                                                                                                       | 62 |
| Figura 29 (superior) - Seção das paredes com e sem PCM. Fonte:(KUZNIK et al., 2008 appud BRITO et al., 2017) ..                                                                                                                                                                                                                             | 64 |
| Figura 30 (inferior) - Intervalos de temperatura do ar interno resultantes de simulação computacional, com vedações sem e com PCMs de diversas espessuras e pontos de fusão, para as cidades de Brasília (Z4) e Cuiabá (Z7). Fonte: (BRITO et al., 2017) .....                                                                              | 64 |
| Figura 31 - Seção das paredes com PCM na face exterior, sem PCM e com PCM na face interior. Fonte: (LEI et al., 2016).....                                                                                                                                                                                                                  | 65 |
| Figura 32 - Gráficos de superfície da taxa de redução do ganho de calor ( $\eta$ ) em função dos fatores espessura (mm) e temperatura de mudança de fase (°C) – à esquerda a parede com PCM na face externa e à direita a parede com PCM na face interna. Fonte: (LEI et al., 2016) .....                                                   | 66 |
| Figura 33 - Gráfico da função entalpia-temperatura com duas curvas, para modelos PCM com histerese. Fonte: (U.S.DOE, 2020a) .....                                                                                                                                                                                                           | 67 |
| Figura 34 (superior) - Representação do processo de histerese da mudança de fase pela função temperatura-entalpia. Fonte: (ZASTAWNA-RUMIN et al., 2020) .....                                                                                                                                                                               | 68 |
| Figura 35 (inferior) - Curva de transição intermediária entre a curva de solidificação (a) e a curva de derretimento (b). Fonte: (ZASTAWNA-RUMIN et al., 2020) .....                                                                                                                                                                        | 68 |
| Figura 36 - Mapa com delimitação do Semiárido Brasileiro e localizações de estações meteorológicas. Fonte: Imagem editada pelo autor a partir de INSA (2017), LABEEE (2018a) e Roriz (2013). .....                                                                                                                                          | 72 |
| Figura 37 - Integração entre programas utilizados no processamento dos dados. Fonte: Produzida pelo autor .....                                                                                                                                                                                                                             | 73 |
| Figura 38 (esquerda) - Planta baixa do quarto utilizado como referência nas simulações computacionais (cotas em m). Fonte: Editado pelo autor a partir do acervo da CEHAP-PB.....                                                                                                                                                           | 77 |
| Figura 39 (direita) - Elevação da janela (J1) na fachada leste (cotas em m). Fonte: Editado pelo autor a partir do acervo da CEHAP-PB .....                                                                                                                                                                                                 | 77 |
| Figura 40 - Visão frontal (esquerda) e posterior (direita)do croqui perspectivo do quarto analisado – em amarelo, as vedações externas; em cinza, as superfícies adiabáticas correspondentes às vedações internas; em azul, a esquadria; e em roxo, os elementos de sombreamento (contexto da simulação). Fonte: Produzida pelo autor ..... | 78 |
| Figura 41 - Planta baixa das superfícies que delimitam a Zona Térmica do quarto nas orientações sudoeste e nordeste – destacadas em amarelo estão os três segmentos de paredes externas, marcados pelas letras A, B e C. Fonte: Produzida pelo autor .....                                                                                  | 79 |
| Figura 42 - Malha da distribuição das Zonas Térmicas replicadas em função dos fatores de implementação do PCM às paredes. Fonte: produzida pelo autor .....                                                                                                                                                                                 | 81 |
| Figura 43 (inferior) - Seções transversais das possibilidades de composição das paredes externas, com PCM no exterior (a), sem PCM (b) e com PCM no interior (c) – cotas em mm, e espessura do PCM variável (5, 10, 15 ou 20 mm). Fonte: Produzida pelo autor .....                                                                         | 82 |
| Figura 44 - Diagrama algorítmico dos critérios para habilitar ventilação natural nas simulações. Fonte: Produzida pelo autor.....                                                                                                                                                                                                           | 83 |
| Figura 45 - Gráfico das faixas de aceitabilidade de temperatura operativa e velocidade dos ar, com linhas de referência marcando a temperatura operativa mínima (aprox. 23,8°C) para a velocidade 0,3 m/s, considerando a ausência de controle da velocidade do ar pelo usuário. Fonte: Editada pelo autor com base em ASHRAE (2013) .....  | 84 |
| Figura 46 - Gráfico obtido por análise DSC do calor específico do Octadecano durante derretimento e solidificação. Fonte: (SYNTROLEUM, 2013) .....                                                                                                                                                                                          | 89 |
| Figura 47 - Ampliação e detalhamento do Fluxograma Metodológico nos procedimentos de transformação dos dados. Produzida pelo autor .....                                                                                                                                                                                                    | 92 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 48 - Representação diagramática das medidas referentes ao fluxo energético e temperaturas superficiais das paredes externas. Fonte: Produzida pelo autor .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 93  |
| Figura 49 - Recorte da planilha do Excel com as tabelas e gráficos de superfícies referentes ao município de Arapiraca-AL. Produzida pelo autor .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 97  |
| Figura 50 - Fluxograma dos testes de comparação entre os valores das variáveis dependentes agrupadas em função dos fatores de implementação do PCM. Fonte: produzida pelo autor .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 100 |
| Figura 51 - Fluxograma dos testes de correlação entre as variáveis dependentes. Fonte: produzida pelo autor .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 101 |
| Figura 52 - Fluxograma do teste de correlação entre <b>Iconf</b> e <b>ConfSIMP</b> . Fonte: produzida pelo autor.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 103 |
| Figura 53 - Fluxograma da Regressão Linear Múltipla de <b>Iconf</b> em função de <b>TMA</b> e <b>AMA</b> . Fonte: produzida pelo autor.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 104 |
| Figura 54 - Fluxograma das Estatísticas Descritivas de <b>Iconf</b> e <b>confRORIZ</b> . Fonte: Produzida pelo autor .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 106 |
| Figura 55 - Fluxograma da análise do comportamento das paredes de casos característicos. Fonte: produzida pelo autor .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 106 |
| Figura 56 - Indicação das posições dos sete casos característicos (setas vermelhas), relativas à distribuição dos dados de Incremento do Conforto ( <b>Iconf</b> ). Fonte: Produzido pelo autor.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 123 |
| Figura 57 - Diagramas ilustrando a tendência de dispersão dos dados das variáveis dependentes (setas vermelhas) com relação a zero (linha tracejada), considerando sua categorização em função da Orientação da disposição do PCM ( <b>ori</b> ). Amplitudes da dispersão dos dados ilustradas pelas barras em laranja (PCM externo) e azul (PCM interno). Destaque em roxo para o Dec. Percentual do Ganho de Calor ( <b>DPgc</b> ), que apresenta diferença brusca na distribuição dos dados entre as duas orientações. Fonte: Produzido pelo autor .....                                  | 131 |
| Figura 58 - Diagramas ilustrando a tendência de dispersão dos dados das variáveis dependentes (seta laranja) com relação a zero (linha tracejada), considerando sua categorização em função da Espessura da camada PCM ( <b>esp</b> ). Em todos os casos, existe uma tendência de aumento da amplitude da dispersão dos dados à medida em que a espessura da camada aumenta (linhas azuis). Destaque em roxo para o Inc. do Conforto ( <b>Iconf</b> ), que é a única das variáveis dependentes que apresenta tanto resultados positivos, quanto negativos. Fonte: Produzido pelo autor ..... | 132 |
| Figura 59 - Diagrama ilustrando, em azul, a tendência de concentração de valores altos do Incremento do Conforto ( <b>Iconf</b> ) em municípios com alto Percentual de conforto anual alcançado com parede simples ( <b>ConfSIMP</b> ); e em laranja a tendência da concentração dos valores negativos. Em destaque (círculo roxo) Mossoró-RN apresenta o maior valor de <b>Iconf</b> , apesar de alcançar apenas 53,57% de <b>ConfSIMP</b> . Fonte: Produzido pelo autor .....                                                                                                              | 137 |
| Figura 60 - Histograma da distribuição dos dados de Incremento do Conforto ( <b>Iconf</b> ), com destaque (em vermelho) para a faixa dos 23% dos municípios que obtiveram resultados negativos e, com linha tracejada azul, a marca da média dos resultados ( <b>Iconf</b> = 4,08%). Fonte: Produzido pelo autor.....                                                                                                                                                                                                                                                                        | 138 |

## Lista de Tabelas

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 - Cálculo da constante <b>A</b> em função da velocidade do vento ( <b>vr</b> ). Fonte: (ASHRAE, 2013) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 33  |
| Tabela 2 - Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis para cada tipo de parede externa. Fonte: (ABNT, 2005) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 37  |
| Tabela 3 (superior) - Composição das camadas e propriedades térmicas dos materiais do modelo simplificado da parede de alvenaria com bloco cerâmico de seis furos e argamassa interna e externa. Fonte: (LABEEE, 2018b) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 82  |
| Tabela 4 - Propriedades térmicas do Octadecano. Produzido pelo autor com base em Faden et al. e Syntroleum (2019; 2013).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 90  |
| Tabela 5 - Incremento do Conforto (%) em função da orientação, espessura e temperatura de fusão do PCM para o município de Arapiraca-AL. Fonte: Produzida pelo autor.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 97  |
| Tabela 6 - Recorte das 5 primeiras células da tabela de variáveis para análises estatísticas das saídas do processamento de dados. Fonte: Produzido pelo autor .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 99  |
| Tabela 7 - Recorte das 5 primeiras células da tabela de variáveis para análises estatísticas dos casos de maior influência no Incremento do Conforto. Fonte: Produzido pelo autor .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 103 |
| Tabela 8 - Correlações bilaterais entre as variáveis Inc. do Conforto ( <b>Iconf</b> ), Dec. Percentual do Ganho de Calor ( <b>DPgc</b> ), Dec. da Média Anual da Temp. Superficial Interna ( <b>Dtmed</b> ), Dec. da Amplitude diária da Temp. Superficial Interna ( <b>Dtamp</b> ), Dec. do Pico diário da Temp. Superficial Interna ( <b>Dtpico</b> ) e Inc. do Atraso Térmico ( <b>Iatraso</b> ) – em branco as correlações com efeito de tamanho franco, em amarela claro as com efeito médio e em amarelo escuro as com efeito forte. Fonte: Produzido pelo autor ..... | 115 |
| Tabela 9 - Coeficientes de regressão. Fonte: Produzido pelo autor .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 119 |
| Tabela 10 (superior) - Estatísticas descritivas do Incremento do Conforto ( <b>Iconf</b> ) e Incremento do Conforto calculado para os municípios da tabela de Roriz ( <b>IconfRORIZ</b> ). Fonte: Produzido pelo autor.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 120 |
| Tabela 11 (inferior) - Percentis da distribuição de dados do Incremento do Conforto ( <b>Iconf</b> ) e Incremento do Conforto calculado para os municípios da tabela de Roriz ( <b>IconfRORIZ</b> ). Fonte: Produzido pelo autor .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 120 |
| Tabela 12 - Valores absolutos e diferenciais de desconforto por calor ou frio nos sete casos característicos selecionados - em vermelho, há aumento do desconforto com relação ao quarto com parede simples; em verde, há diminuição do desconforto com relação ao quarto com parede simples. Fonte: Produzido pelo autor .....                                                                                                                                                                                                                                               | 126 |
| Tabela 13 - Valores de Inc. do Conforto, Dec. Percentual do Ganho de Calor, Dec. da Amplitude diária da Temp. Superficial Interna e Inc. do Atraso Térmico, resultantes do processamento de dados do município de Jaguaruana-CE. Destaque (em roxo) para a coluna dos valores da situação com camada PCM 20mm externa, onde se observam os valores mais distantes de zero. Fonte: Produzido pelo autor .....                                                                                                                                                                  | 134 |

## Lista de Quadros

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 - Características térmicas de materiais, elementos e componentes construtivos. Fonte: (ABNT, 2005) .....                            | 35 |
| Quadro 2 - Cargas térmicas por área da Zona Térmica. Fonte: Editado pelo autor a partir de ASHRAE, BRASIL e SORGATO (2013; 2012; 2015) ..... | 85 |
| Quadro 3 - Subscritos, variáveis e equações da TRANSFORMAÇÃO A. Fonte: Produzido pelo autor.....                                             | 94 |
| Quadro 4 - Subscritos, variáveis e equações da TRANSFORMAÇÃO B. Fonte: Produzido pelo autor .....                                            | 95 |
| Quadro 5 - Subscritos, variáveis e equações da TRANSFORMAÇÃO C. Fonte: Produzido pelo autor.....                                             | 96 |

## Lista de Gráficos

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gráficos 1 - Diagramas de Caixa e Bigodes da distribuição dos valores de Inc. do Conforto ( <b>Iconf</b> ) (a), Dec. Percentual do Ganho de Calor ( <b>DPgc</b> ) (b), Dec. da Média Anual da Temp. Superficial Interna ( <b>Dtmed</b> ) (c), Dec. da Amplitude diária da Temp. Superficial Interna ( <b>Dtamp</b> ) (d), Dec. do Pico diário da Temp. Superficial Interna ( <b>Dtpico</b> ) (e) e Inc. do Atraso Térmico ( <b>Iatraso</b> ) (f), categorizados em função da Orientação da disposição do PCM ( <b>ori</b> ). Fonte: Produzido pelo autor ..... | 110 |
| Gráficos 2 - Diagramas de Caixa e Bigodes da distribuição dos valores de Inc. do Conforto ( <b>Iconf</b> ) (a), Dec. Percentual do Ganho de Calor ( <b>DPgc</b> ) (b), Dec. da Média Anual da Temp. Superficial Interna ( <b>Dtmed</b> ) (c), Dec. da Amplitude diária da Temp. Superficial Interna ( <b>Dtamp</b> ) (d), Dec. do Pico diário da Temp. Superficial Interna ( <b>Dtpico</b> ) (e) e Inc. do Atraso Térmico ( <b>Iatraso</b> ) (f), categorizados em função da Espessura da camada PCM ( <b>esp</b> ). Fonte: Produzido pelo autor .....         | 112 |
| Gráficos 3 - Diagramas de Caixa e Bigodes da distribuição dos valores de Inc. do Conforto ( <b>Iconf</b> ) (a), Dec. Percentual do Ganho de Calor ( <b>DPgc</b> ) (b), Dec. da Média Anual da Temp. Superficial Interna ( <b>Dtmed</b> ) (c), Dec. da Amplitude diária da Temp. Superficial Interna ( <b>Dtamp</b> ) (d), Dec. do Pico diário da Temp. Superficial Interna ( <b>Dtpico</b> ) (e) e Inc. do Atraso Térmico ( <b>Iatraso</b> ) (f), categorizados em função da Temperatura de Fusão do PCM ( <b>tfus</b> ). Fonte: Produzido pelo autor .....    | 114 |
| Gráfico 4 - Diagramas de Caixa e Bigodes da distribuição dos valores mais influentes de Incremento do Conforto ( <b>Iconf</b> ) categorizados em função da Temperatura de Fusão do PCM ( <b>tfus</b> ). Fonte: Produzido pelo autor .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 117 |
| Gráfico 5 - Dispersão dos escores em função do Incremento do Conforto ( <b>Iconf</b> ) e do Percentual de conforto anual alcançado na Zona Térmica com parede simples ( <b>ConfSIMP</b> ). Fonte: Produzido pelo autor .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 118 |
| Gráfico 6 - Histograma do Incremento do Conforto calculado para os municípios da tabela de Roriz ( <b>IconfRORIZ</b> ). Fonte: Produzido pelo autor .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 121 |
| Gráfico 7 - Histograma do Incremento do Conforto ( <b>Iconf</b> ). Fonte: Produzido pelo autor .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 121 |
| Gráfico 8 - Diagramas de Caixa e Bigodes da distribuição dos valores mais influentes de Incremento do Conforto nas categorias <b>Iconf</b> e <b>IconfRORIZ</b> . Fonte: Produzido pelo autor .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 122 |
| Gráfico 9 (superior) - Temperatura do ar externa e Temperaturas superficiais da parede OESTE com e sem PCM, de um dia médio do mês de dezembro, para a cidade de Mossoró-RN. Produzido pelo autor .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 124 |
| Gráfico 10 (inferior) - Temperatura do ar externa e Temperaturas superficiais da parede LESTE com e sem PCM, de um dia médio do mês de dezembro, para a cidade de Campina Grande-PB. Produzido pelo autor .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 124 |
| Gráfico 11 (superior) - Temperatura do ar externa e Temperaturas superficiais da parede OESTE com e sem PCM, de um dia médio do mês de dezembro, para a cidade de Jaguaruana-CE. Produzido pelo autor.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 125 |
| Gráfico 12 (inferior) - Fluxos de calor pela parede OESTE com e sem PCM, de um dia médio de todos os meses do ano, para a cidade de Jaguaruana-CE. Produzido pelo autor.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 125 |
| Gráfico 13 (superior) - Conforto e Desconforto por frio ou calor diário médio mensal do quarto Sudoeste, para a cidade de Jaguaruana-CE. Produzido pelo autor .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 128 |
| Gráfico 14 (inferior) - Conforto e Desconforto por frio ou calor diário médio mensal do quarto Sudoeste, para a cidade de Arcoverde-PE. Produzido pelo autor .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 128 |
| Gráfico 15 (superior) - Conforto e Desconforto por frio ou calor diário médio mensal do quarto Sudoeste, para a cidade de Mossoró-RN. Produzido pelo autor.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 129 |
| Gráfico 16 (inferior) - Conforto e Desconforto por frio ou calor diário médio mensal do quarto Nordeste, para a cidade de Mossoró-RN. Produzido pelo autor.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 129 |

## Lista de Abreviaturas e Siglas

|        |   |                                                                                                       |
|--------|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ABNT   | - | Associação Brasileira de normas técnicas                                                              |
| ASHRAE | - | American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers                             |
| ASTM   | - | American Society for Testing and Materials                                                            |
| CEHAP  | - | Companhia Estadual de Habitação Popular da Paraíba                                                    |
| CNC    | - | Controlado Numericamente por Computador                                                               |
| CondFD | - | Conduction Finite Difference Solution Algorithm                                                       |
| DOE    | - | United States Department of Energy                                                                    |
| DSC    | - | Differential Scanning Calorimetry                                                                     |
| ENCAC  | - | Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído                                                  |
| EPW    | - | Energyplus Weather Data                                                                               |
| EUA    | - | Estados Unidos da América                                                                             |
| IBGE   | - | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística                                                       |
| INMET  | - | Instituto Nacional de Meteorologia                                                                    |
| INSA   | - | Instituto Nacional do Semiárido                                                                       |
| IWEC   |   | International Weather for Energy Calculations                                                         |
| LABEEE | - | Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da UFSC                                           |
| LABEME | - | Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas da UFPB                                              |
| LM+P   | - | Laboratório de Modelos e Prototipagem da UFPB                                                         |
| NASA   | - | United States National Aeronautics and Space Administration                                           |
| NBR    | - | Norma Brasileira                                                                                      |
| PCM    | - | Phase Change Material                                                                                 |
| PMV    | - | Predicted Mean Vote                                                                                   |
| PPD    | - | Percentage of People Dissatisfied                                                                     |
| PROCEL | - | Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica                                                  |
| RTQr   | - | Regulamento Técnico de Qualidade para<br>o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais |
| SUDENE | - | Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste                                                       |
| SWERA  |   | Solar and Wind Energy Resource Assessment                                                             |
| TMY    | - | Typical Meteorological Year                                                                           |
| TRY    |   | Test Reference Year                                                                                   |
| UFPB   | - | Universidade Federal da Paraíba                                                                       |

## Lista de Variáveis e Subscritos

### No Referencial teórico:

#### Subscritos

|       |   |                             |
|-------|---|-----------------------------|
| $i$   | = | Nó sendo simulado           |
| $nov$ | = | Passo atual da simulação    |
| $ant$ | = | Passo anterior da simulação |

#### Variáveis

|                   |   |                                                                                                                   | Unidade             |
|-------------------|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| $\phi$            | = | Atraso térmico                                                                                                    | h                   |
| $Cp$              | = | Calor específico do material                                                                                      | J/kg.K              |
| $A$               | = | Constante dada em função da velocidade do ar ( $v_r$ )                                                            | -                   |
| $h$               | = | Entalpia                                                                                                          | J/kg                |
| $FS_o$            | = | Fator solar                                                                                                       | %                   |
| $HTF$             | = | Função da variação de entalpia-temperatura                                                                        | -                   |
| $Q$               | = | Ganho de calor                                                                                                    | MJ/m <sup>2</sup>   |
| $Q_{PCM}$         | = | Ganhos de calor pela envoltória com PCM                                                                           | MJ/m <sup>2</sup>   |
| $Q_{SEM\_PCM}$    | = | Ganhos de calor pela envoltória sem PCM                                                                           | MJ/m <sup>2</sup>   |
| $\eta$            | = | Taxa de redução do Ganho de Calor ( $Q$ )                                                                         | %                   |
| $T$               | = | Temperatura                                                                                                       | °C                  |
| $T_a$             | = | Temperatura do ar                                                                                                 | °C                  |
| $T_o$             | = | Temperatura operativa                                                                                             | °C                  |
| $\overline{T_r}$  | = | Temperatura radiante média                                                                                        | °C                  |
| $T_L$             | = | Temperatura do PCM no estado Líquido                                                                              | K                   |
| $T_S$             | = | Temperatura do PCM no estado Sólido                                                                               | K                   |
| $T_{FUS}$         | = | Pico da Temperatura de fusão do PCM                                                                               | °C                  |
| <b>EstadoFase</b> | = | Corresponde ao estado do PCM, se no sólido, líquido, ou em transição de fase em um determinado passo de simulação | -                   |
| $f$               | = | Função para determinação do Calor Específico ( $Cp$ ) considerando a histerese do PCM                             | -                   |
| $U$               | = | Transmitância Térmica                                                                                             | W/m <sup>2</sup> .K |
| $v_r$             | = | Velocidade do ar                                                                                                  | m/s                 |

### Na transformação dos dados:

#### Subscritos

|       |   |                                                     |
|-------|---|-----------------------------------------------------|
| $a$   | = | Hora no ano (8760 no total)                         |
| $h$   | = | Hora do dia (24 no total)                           |
| $d$   | = | Dia do mês (número total varia de acordo com o mês) |
| $nd$  | = | Número de dias em determinado mês                   |
| $m$   | = | Mês do ano (12 no total)                            |
| $p$   | = | Paredes externas das Zonas Térmicas (3 no total)    |
| $max$ | = | Valor máximo de um conjunto de dados                |
| $min$ | = | Valor mínimo de um conjunto de dados                |
| $z$   | = | Zona Térmica por arquivo IDF (57 no total)          |

|             |   |                                                       |
|-------------|---|-------------------------------------------------------|
| <b>os</b>   | = | Orientação solar (2 no total)                         |
| <b>mun</b>  | = | Município analisado (68 no total)                     |
| <b>simp</b> | = | Se refere à única Zona Térmica "z" com parede simples |

| Variáveis                                       |   |                                                                                                                   | Unidade |
|-------------------------------------------------|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| <b><math>TSIp_{(p,a)}</math></b>                | = | Temperatura Superficial Interna de cada parede externa, para uma dada hora do ano                                 | °C      |
| <b><math>TSI_{(a)}</math></b>                   | = | Temperatura Superficial Interna média de todas as paredes externas, para cada hora do ano.                        | °C      |
| <b><math>TSI_{(m,d,h)}</math></b>               | = | Representação matricial de <b><math>TSI_{(a)}</math></b> para cada hora do dia, do mês do ano.                    | °C      |
| <b><math>\overline{TSI}_{(m,h)}</math></b>      | = | Temperaturas Superficiais Internas de cada hora de um dia médio do mês                                            | °C      |
| <b><math>\overline{TSI}_{max(m)}</math></b>     | = | <b><math>\overline{TSI}</math></b> máxima do mês                                                                  | °C      |
| <b><math>\overline{TSI}_{min(m)}</math></b>     | = | <b><math>\overline{TSI}</math></b> mínima do mês                                                                  | °C      |
| <b><math>\overline{TSI}h_{(m)}</math></b>       | = | Hora da <b><math>\overline{TSI}</math></b> máxima do mês                                                          | h       |
| <b><math>TSImed</math></b>                      | = | Média Anual da Temperatura Superficial Interna                                                                    | °C      |
| <b><math>TSIamp</math></b>                      | = | Média Anual da amplitude diária da Temperatura Superficial Interna                                                | °C      |
| <b><math>TSIpic</math></b>                      | = | Média Anual do pico diário da Temperatura Superficial Interna                                                     | °C      |
| <b><math>TSIhor</math></b>                      | = | Média Anual da hora do pico diário da Temperatura Superficial Interna                                             | h       |
| <b><math>Flux_{(p,a)}</math></b>                | = | Fluxos de calor de cada parede externa, para uma dada hora do ano (positivo se do exterior para o interior)       | kWh     |
| <b><math>GC_{(p,a)}</math></b>                  | = | Ganho de calor de cada parede externa para cada hora do ano                                                       | kWh     |
| <b><math>GCan</math></b>                        | = | Ganho de Calor total de todas as paredes no ano                                                                   | kWh     |
| <b><math>Conf_{(z,os,mun)}</math></b>           | = | Percentual de Conforto Anual de uma dada Zona Térmica, por orientação solar, por município                        | %       |
| <b><math>GCan_{(z,os,mun)}</math></b>           | = | Ganho de Calor Anual total de “ “ “ “ “ “ “ “                                                                     | kWh     |
| <b><math>TSImed_{(z,os,mun)}</math></b>         | = | Média Anual da Temperatura Superficial Interna de “ “ “ “ “ “ “ “                                                 | °C      |
| <b><math>TSIamp_{(z,os,mun)}</math></b>         | = | Média Anual da amplitude diária da Temperatura Superficial Interna de uma “ “ “ “ “ “ “ “                         | °C      |
| <b><math>TSIpic_{(z,os,mun)}</math></b>         | = | Média Anual do pico diário da Temperatura Superficial Interna de “ “ “ “ “ “ “ “                                  | °C      |
| <b><math>TSIhor_{(z,os,mun)}</math></b>         | = | Média Anual da hora do pico diário da Temperatura Superficial Interna de “ “ “ “ “ “ “ “                          | h       |
| <b><math>\overline{Conf}_{(z,mun)}</math></b>   | = | Média dos valores de <b><math>Conf</math></b> de cada orientação, para uma dada Zona Térmica de um dado município | %       |
| <b><math>\overline{GCan}_{(z,mun)}</math></b>   | = | Média dos valores de <b><math>GCan</math></b> de “ “ “ “ “ “ “ “ “ “                                              | kWh     |
| <b><math>\overline{TSImed}_{(z,mun)}</math></b> | = | Média dos valores de <b><math>TSImed</math></b> de “ “ “ “ “ “ “ “ “ “                                            | °C      |
| <b><math>\overline{TSIamp}_{(z,mun)}</math></b> | = | Média dos valores de <b><math>TSIamp</math></b> de “ “ “ “ “ “ “ “ “ “                                            | °C      |
| <b><math>\overline{TSIpic}_{(z,mun)}</math></b> | = | Média dos valores de <b><math>TSIpic</math></b> de “ “ “ “ “ “ “ “ “ “                                            | °C      |
| <b><math>\overline{TSIhor}_{(z,mun)}</math></b> | = | Média dos valores de <b><math>TSIhor</math></b> de “ “ “ “ “ “ “ “ “ “                                            | h       |
| <b><math>Iconf_{(z,mun)}</math></b>             | = | Incremento do Conforto de uma dada Zona Térmica de um dado município                                              | %       |

|                     |   |                                                                                      |    |
|---------------------|---|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| $DPgc_{(z,mun)}$    | = | Decremento Percentual do Ganho de Calor de “ “ “ “ “ “ “ “                           | %  |
| $Dtmed_{(z,mun)}$   | = | Decremento da Média Anual da Temperatura Superficial Interna de “ “ “ “ “ “ “ “      | °C |
| $Dtamp_{(z,mun)}$   | = | Decremento da Amplitude diária da Temperatura Superficial Interna de “ “ “ “ “ “ “ “ | °C |
| $Dtpico_{(z,mun)}$  | = | Decremento do Pico diário da Temperatura Superficial Interna de “ “ “ “ “ “ “ “      | °C |
| $Iatraso_{(z,mun)}$ | = | Incremento do Atraso Térmico de “ “ “ “ “ “ “ “                                      | h  |

## Nas análises estatísticas:

| Variáveis    |                                                                                                                                                             | Unidade |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| $cel$        | = Cada Zona Térmica analisada enquanto unidade independente                                                                                                 | -       |
| $est$        | = Estado (UF) do município                                                                                                                                  | -       |
| $mun$        | = Município do arquivo climático                                                                                                                            | -       |
| $ori$        | = Orientação da disposição do PCM – interna ou externa                                                                                                      | -       |
| $esp$        | = Espessura da camada PCM                                                                                                                                   | mm      |
| $tfus$       | = Temperatura de Fusão do PCM                                                                                                                               | °C      |
| $Iconf$      | = Incremento do Conforto                                                                                                                                    | %       |
| $DPgc$       | = Decremento Percentual do Ganho de Calor                                                                                                                   | %       |
| $Dtmed$      | = Decremento da Média Anual da Temperatura Superficial Interna                                                                                              | °C      |
| $Dtamp$      | = Decremento da Amplitude diária da Temperatura Superficial Interna                                                                                         | °C      |
| $Dtpico$     | = Decremento do Pico diário da Temperatura Superficial Interna                                                                                              | °C      |
| $Iatraso$    | = Incremento do Atraso Térmico                                                                                                                              | h       |
| $TMA$        | = Temperatura média anual                                                                                                                                   | C       |
| $AMA$        | = Amplitude média anual                                                                                                                                     | C       |
| $ConfSIMP$   | = Percentual de conforto anual alcançado na Zona Térmica com parede simples (sem PCM), em um dado município                                                 | %       |
| $IconfRORIZ$ | = Incremento do conforto calculado para os municípios da tabela de Roriz (Apêndice B) a partir da equação de regressão dos casos mais influentes de $Iconf$ | %       |
| $b$          | = Coeficiente de regressão                                                                                                                                  | -       |
| $\beta$      | = Coeficiente padronizado de regressão                                                                                                                      | -       |

## Sumário

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introdução .....                                                      | 20 |
| 2. Motivação .....                                                       | 25 |
| 3. Objetivos .....                                                       | 29 |
| 4. Referencial teórico .....                                             | 31 |
| 4.1. As medidas da Inércia Térmica .....                                 | 32 |
| 4.1.1. Conforto térmico ambiental .....                                  | 32 |
| 4.1.2. Desempenho térmico de vedações externas segundo a NBR.....        | 34 |
| 4.1.3. A medida do desempenho da Inércia Térmica .....                   | 37 |
| 4.1.4. Uma forma diferente de caracterização bioclimática no Brasil..... | 40 |
| 4.2. PCMs – Materiais e Mudança de Fase .....                            | 43 |
| 4.2.1. Conceituação, classificação e propriedades .....                  | 43 |
| 4.2.2. Aplicação de PCMs na Construção Civil.....                        | 48 |
| 4.3. Simulação computacional com PCMs.....                               | 53 |
| 4.3.1. Pesquisas de simulação .....                                      | 53 |
| 4.3.2. Simulação termo energética do edifício .....                      | 54 |
| 4.3.3. Simulação PCM com o EnergyPlus .....                              | 60 |
| 5. Procedimentos teórico-metodológicos .....                             | 69 |
| 5.1. Coleta e filtragem de dados .....                                   | 71 |
| 5.1.1. Filtro 1: Seleção de Arquivos Climáticos .....                    | 71 |
| 5.1.2. Filtro 2: Geoprocessamento .....                                  | 71 |
| 5.2. Processamento de dados.....                                         | 73 |
| 5.2.1.1. Zonas térmicas .....                                            | 75 |
| 5.2.1.1.1. A referência geométrica / o objeto arquitetônico.76           |    |
| 5.2.1.1.2. As variáveis e a multiplicação das Zonas Térmicas .....       | 79 |
| 5.2.1.1.3. As constantes.....                                            | 81 |
| 5.2.1.2. Os demais dados de entrada.....                                 | 86 |
| 5.2.1.2.1. Linhas de código adicionais.....                              | 87 |
| 5.2.2. Cálculo de Conforto.....                                          | 91 |
| 5.2.3. A transformação dos dados .....                                   | 92 |
| 5.3. Análise de dados .....                                              | 98 |

|                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.3.1. Análise estatística das saídas do processamento de dados .....                 | 98  |
| 5.3.1.1. A formatação tabular dos dados .....                                         | 98  |
| 5.3.1.2. Os procedimentos estatísticos .....                                          | 100 |
| 5.3.2. Análise dos casos de maior influência no Incremento do Conforto .....          | 102 |
| 5.3.2.1. As variáveis .....                                                           | 102 |
| 5.3.2.2. A correlação entre as Variáveis Dependentes.....                             | 103 |
| 5.3.2.3. Regressão Linear Múltipla .....                                              | 103 |
| 5.3.3. A medida da influência do PCMs no Incremento de Conforto no Semiárido .....    | 105 |
| 5.3.4. Análise de casos característicos.....                                          | 106 |
| 6. Resultados .....                                                                   | 108 |
| 6.1. Das saídas do processamento de dados.....                                        | 109 |
| 6.1.1. Comparação dos valores das Variáveis Dependentes baseados em <b>ori</b> .....  | 109 |
| 6.1.2. Comparação dos valores das Variáveis Dependentes baseados em <b>esp</b> .....  | 111 |
| 6.1.3. Comparação dos valores das Variáveis Dependentes baseados em <b>tfus</b> ..... | 113 |
| 6.1.4. Correlações bilaterais entre as Variáveis Dependentes .....                    | 115 |
| 6.2. Dos casos de maior influência no Incremento do Conforto                          | 117 |
| 6.2.1. Correlação entre <b>Iconf</b> e <b>ConfSIMP</b> .....                          | 117 |
| 6.2.2. Regressão Linear .....                                                         | 118 |
| 6.3. Da medida da influência do PCM no Incremento de Conforto no Semiárido .....      | 120 |
| 6.4. Dos casos característicos .....                                                  | 123 |
| 7. Discussões .....                                                                   | 130 |
| 8. Conclusões.....                                                                    | 139 |
| 9. Referências .....                                                                  | 142 |

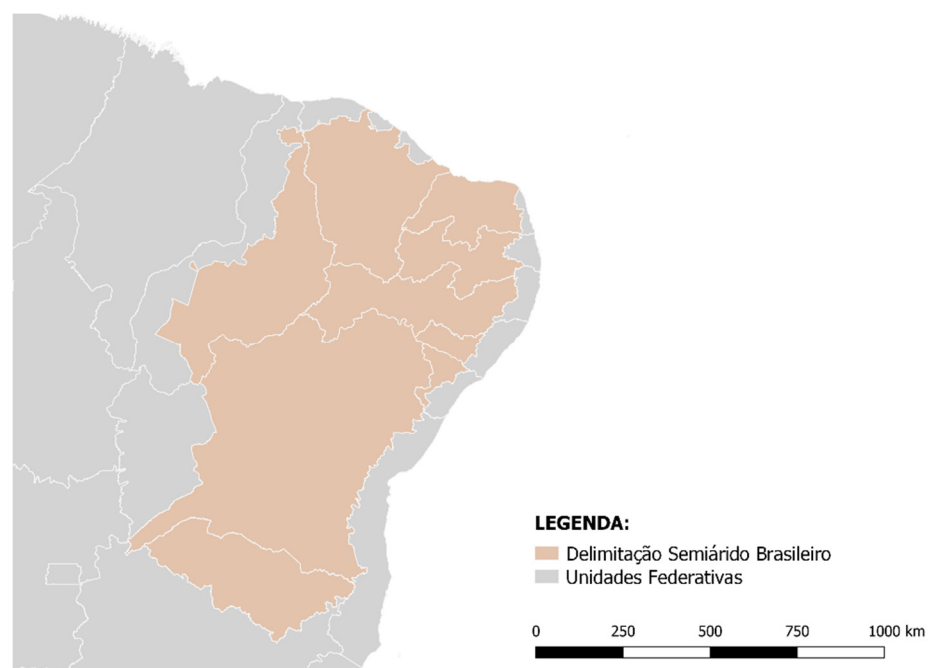
# **1. Introdução**

Esta dissertação trata de uma pesquisa de natureza aplicada, tendo como objeto de estudo paredes externas de habitações condicionadas naturalmente no contexto do Semiárido Brasileiro. Esta se debruça, especificamente, sobre a promoção de Inércia Térmica para resfriamento a partir da aplicação de materiais com grande capacidade de armazenamento de energia na forma de calor latente, os Materiais de Mudança de Fase ou *Phase Change Materials* (PCM), capazes de alterar o desempenho térmico das vedações com quantidades significativamente reduzidas de material. A pesquisa se ampara em softwares de simulação termo energéticas do edifício e dados de arquivos climáticos, bem como ferramentas estatísticas para análise de dados e plataformas de programação de algoritmos para automatização de processos computacionais.

O Semiárido Brasileiro consiste em uma delimitação geopolítica definida pela Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste – SUDENE (Figura 1), com critérios estabelecidos em lei<sup>1</sup>, sendo estes: precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm; índice de Aridez de Thornthwaite igual ou inferior a 0,50; e percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60% (IBGE, 2017). Dado aos baixos índices pluviométricos e de umidade, comumente se associa a região semiárida brasileira a uma região de clima quente seco.

Autores da área da arquitetura bioclimática (GIVONI, 1976; OLGYAY, 1998) são unânimes quanto à necessidade de partidos arquitetônicos que possuam vedações com Inércia Térmica elevada

Figura 1 - Mapa com delimitação do Semiárido Brasileiro. Fonte: Imagem editada pelo autor a partir dos *shapefiles* do INSA (2017)



<sup>1</sup> Lei Complementar nº 125, de 3 de janeiro de 2007.

no clima quente seco, acarretando no amortecimento do fluxo de calor e no atraso do número de horas que este levará para atravessar a vedação do exterior para o interior. Essa necessidade decorre da grande variação térmica diária presente em locais com baixa umidade relativa do ar.

Comumente se associa o uso de paredes pesadas e espessas à Inércia Térmica, ao ponto desta propriedade ser conhecida em parte da literatura e normas de desempenho como “Massa térmica para resfriamento” (VERBEKE; AUDENAERT, 2018). A própria norma de desempenho térmico brasileira recomenda para esse fim a adoção de vedações externas pesadas com elevado atraso térmico e baixos fator solar e transmitância térmica (ABNT, 2005). Entretanto, a proposta desta pesquisa parte de um contraponto a esta concepção, apresentando a seguinte questão como centro da discussão: seria possível atingir, mesmo com paredes leves e de pequena espessura, a Inércia Térmica necessária ao condicionamento passivo de edificações no contexto do Semiárido Brasileiro? E complementar à primeira pergunta, em que medida essa estratégia de condicionamento passivo é de fato benéfica às habitações no referido contexto?

Estudos e experiências europeias apontam para o fato de ser possível atingir melhoras no desempenho térmico de edificações, obtendo-se elevada Inércia Térmica, a partir da incorporação de determinados materiais à composição das vedações (CABEZA et al., 2007; KUZNIK et al., 2008; MARTINS, 2017; SERRANO et al., 2012). Os PCMs, amplamente utilizados em sistemas de armazenamento de energia térmica, seriam apresentados como alternativa no condicionamento passivo de edificações.

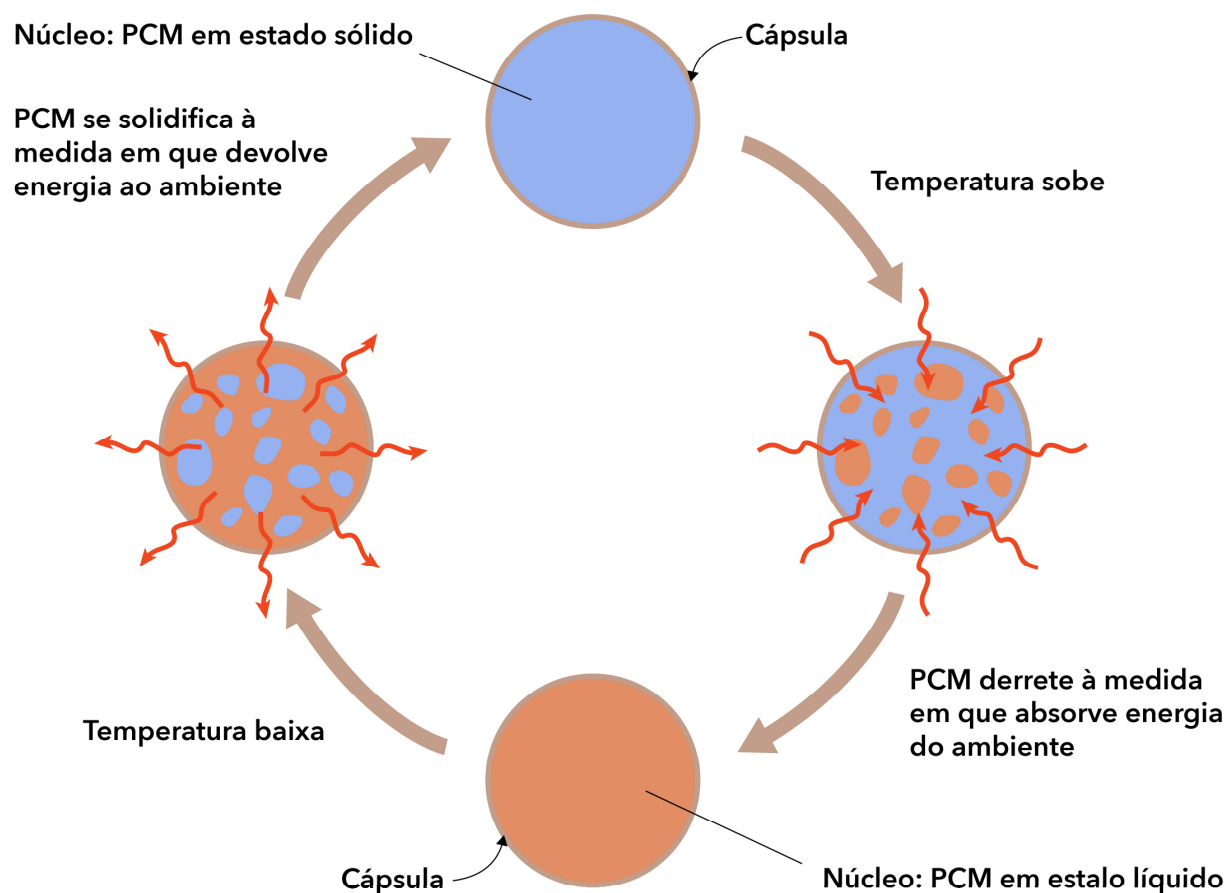
PCM é a sigla utilizada para o termo em inglês *Phase Change Material*, traduzido para o português como “Material de Mudança de Fase” (MARTINS, 2017). Essencialmente, essa se trata de uma classificação associada a materiais com grande capacidade de armazenamento de calor latente, ou seja, capazes de absorver e devolver calor ao ambiente sem alterar significativamente sua temperatura enquanto atravessam uma mudança de fase (REGIN et al., 2008). Em função de suas propriedades termoquímicas, PCMs se configuram como efetivos reguladores de temperatura, chegando a armazenar entre 5 a 14 vezes mais calor por unidade de volume com relação a outros materiais. Entretanto, a escolha do material deve

atender a especificidades térmicas, físicas, químicas e econômicas de acordo com a sua aplicação (SHARMA et al., 2009; REGIN et al., 2008).

Martins (2017) realiza um estudo do estado da arte do uso de PCMs na construção civil, destacando exemplos de trabalhos acadêmicos e produtos comerciais do mercado europeu que incorporam este tipo de material a componentes construtivos, como pavimentos, esquadrias, forros e paredes.

Kuznik et al. (2008) realizaram um experimento em um cômodo de escala real, composto por vedações leves, e situações ambientais controladas em laboratório que simulavam o verão europeu. Nesse estudo foram comparados os desempenhos térmicos de paredes de gesso acartonado com e sem a incorporação de PCM, mostrando que a adição de uma camada 5mm de PCM microencapsulado na composição das paredes foi capaz de reduzir flutuações de temperatura do ar e ampliar a Inércia Térmica das vedações, permitindo que armazenassem o dobro da energia com relação às placas convencionais.

Figura 2 - Ciclos de mudança de fase do PCM.  
Fonte: Imagem editada pelo autor a partir de <<http://portuguese.andores.com/sale-9516717-phase-change-micro-capsule-paraffin-wax-pcm-for-intelligence-attemperation.html>>



Brito et al. (2017), autores brasileiros, indicam o quanto o estudo de aplicação de PCMs em habitações para diferentes contextos climáticos ainda é escasso, não abrangendo, por exemplo, países de clima tropical. É assim que, com base no Zoneamento Bioclimático Brasileiro, estes realizaram um trabalho que objetiva identificar propriedades específicas de PCMs adequadas a cada contexto bioclimático. No entanto, o trabalho se limitou a um recorte reduzido de apenas oito cidades, uma para cada Zona Bioclimática.

Inúmeros pesquisadores utilizam ferramentas computacionais de simulação termo energética do edifício para avaliar o impacto da implementação de PCMs aos componentes construtivos das edificações. Diferentes fatores, tais como capacidade de armazenamento de calor latente e temperatura de fusão do material, são analisados comparativamente de forma a se entender como estes exercem influência sobre o desempenho térmico das envoltórias e as condições de conforto ambientais (BRITO et al., 2017; Lei et al., 2016). Na última década, pesquisas vem sendo lançadas no sentido de validar e aprimorar algoritmos para simulação de PCMs no edifício da forma mais precisa possível (GOIA et al., 2018; TABARES-VALESCO et al., 2012; ZASTAWNA-RUMIN et al., 2020).

A presente pesquisa se enquadra efetivamente na Linha 03 do Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da UFPB, uma vez que abarca questões de conforto térmico associadas à qualidade do ambiente construído. Particularmente, se associa ao LABEME – Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas – e ao LM+P – Laboratório de Modelos e Prototipagem.

## **2. Motivação**

A motivação inicial deste trabalho parte das pesquisas em desenvolvimento no projeto pesquisa “Solar Decathlon: CASA NORDESTE”, inserido na Linha 02 do Programa de Pós-Graduação. A CASA NORDESTE se configura como a resposta que o LM+P UFPB oferece ao *Solar Decathlon*, uma competição internacional de estudantes que visa projetar e construir casas eficientes sustentáveis, com enfoque na inovação tecnológica aplicada. Em sua versão latino-americana, as soluções projetuais devem concentrar suas atenções às comunidades em situação de vulnerabilidade social na América do Sul, Central e Caribe. Nesse contexto, o projeto arquitetônico da CASA NORDESTE visa solucionar problemas contemporâneos habitacionais para o Nordeste brasileiro.

Um forte princípio que norteia as tomadas de decisão da CASA NORDESTE consiste na busca por materiais e tecnologias do Nordeste para atender às necessidades do próprio Nordeste. Observa-se, entretanto, que boa parte das discussões dentro do projeto de pesquisa, em especial das que tratam do bioclimatismo e das estratégias de condicionamento passivo, se concentram na faixa litorânea do Nordeste.

O sistema construtivo desenvolvido para a CASA NORDESTE consiste em um sistema leve, composto por peças de compensado naval cortadas por meio de fresa CNC<sup>2</sup> para formar vigas, colunas, pisos e vedações que podem ser facilmente montadas e desmontadas (Figura 3). Em se tratando de estratégias de condicionamento passivo, construções leves, bem sombreadas e permeáveis ao vento, se apresentam como alternativa satisfatória a edificações no litoral nordestino, de clima quente e úmido, correspondendo às estratégias para a Zona Bioclimática Brasileira de número 8 (ABNT, 2005). Entretanto o sistema construtivo em questão, especialmente em se tratando das vedações externas, necessita de materiais que agreguem maior Inércia Térmica para operar efetivamente em cidades no interior do Nordeste que possuam maiores amplitudes térmicas. É neste sentido que o projeto CASA NORDESTE e a presente pesquisa se alinham.

Segundo o IBGE (2017), o Semiárido Brasileiro corresponde a uma área de cerca de 982.563,3km<sup>2</sup>, estando 89,5% deste território concentrado apenas no Nordeste. Dessa forma, estudar formas de

<sup>2</sup> Fresa CNC: Máquina de corte Controlada Numericamente por Computador.

otimizar elementos opacos de vedações verticais externas para que atendam às demandas de desempenho térmico do Semiárido Brasileiro significa ampliar as possibilidades de aplicação do sistema construtivo em desenvolvimento pelo LM+P para outras regiões que não apenas o litoral nordestino.

Por se tratar de uma pesquisa que investiga o incremento da Inércia Térmica de sistemas de vedações que ainda não tenham atingido seu ponto ótimo de desempenho (vedações leves em geral), há que se considerar ainda a contribuição dessa pesquisa para o campo da construção civil, ao estudar materiais potencialmente capazes de baratear o custo de estruturas com a diminuição do peso das paredes em edificações multifamiliares com múltiplos pavimentos.

Mais outra motivação ligada a esta pesquisa e à própria origem do *Solar Decathlon*, inaugurado nos EUA em 2002 por iniciativa do Departamento de Energia dos EUA, se encontra na contribuição com desenvolvimento de tecnologias e pesquisas aplicadas na área da eficiência energética em edificações. Segundo Lechner (2014), da energia total consumida nos Estados Unidos, 40% corresponde ao consumo por operação do edifício, considerando-se demandas de aquecimento, resfriamento, iluminação e aparelhos eletrônicos diversos. Ainda segundo o autor, questões de desenho básico da edificação como localização, orientação, cor, forma, etc., e estratégias de condicionamento passivo seriam capazes de reduzir em até 80% as demandas de consumo energético por operação do

Figura 3 - Render simulando o processo de montagem da CASA NORDESTE 1.0. Fonte: Acervo do LM+P



edifício. A crise energética enfrentada pelos EUA na década de 70 (século XX) seria o mote que conduziria à elaboração de estudos e normas na área, processo que também se observa no Brasil com a crise energética ocorrida em 2001, com resposta imediata pelo governo com a promulgação da Lei de Eficiência Energética (nº. 10.295/2001) e o surgimento do PROCEL<sup>3</sup> (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2015). Esta pesquisa se acresce ao conjunto dos trabalhos acadêmicos realizados no Brasil no sentido de contribuir com a obtenção de edificações energeticamente eficientes, por meio do estudo de estratégias passivas de condicionamento.

<sup>3</sup> PROCEL: Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica.

## **3. Objetivos**

**Geral:**

- Investigar o uso de PCMs para o incremento da Inércia Térmica para resfriamento em paredes externas de habitações condicionadas naturalmente no contexto do Semiárido Brasileiro.

**Específicos:**

- Investigar quais fatores, na implementação dos PCMs às paredes externas, influenciam no seu desempenho térmico e nas condições de conforto ambiental em diferentes municípios do Semiárido Brasileiro;
- Verificar de que forma medidas de conforto e de desempenho térmico se relacionam no contexto analisado;
- Analisar em que medida a implementação de PCMs para o incremento da Inércia Térmica para resfriamento contribui para as condições de conforto no Semiárido Brasileiro.

## **4. Referencial teórico**

## 4.1. As medidas da Inércia Térmica

Os itens a seguir consistem nos estudos realizados pelo autor na busca por conceituar as medidas quantitativas associadas à Inércia Térmica enquanto estratégia passiva de condicionamento. O conforto térmico seria a expressão da eficácia dessa estratégia no condicionamento de um ambiente, em uma dada localidade, com um determinado arranjo de materiais compondo as vedações; enquanto o desempenho térmico diria respeito às propriedades térmicas dos materiais das envoltórias, a partir dos quais seria possível descrever numericamente esse fenômeno.

### 4.1.1. Conforto térmico ambiental

O termo “conforto térmico” é apresentado pela NBR 15220 como sendo a “satisfação psicofisiológica de um indivíduo com as condições térmicas do ambiente” (ABNT, 2005). A partir deste conceito, é possível perceber ao menos dois aspectos que podem vir a influenciar na noção de conforto: o aspecto ambiental, intrinsecamente objetivo; e os aspectos psicológicos e fisiológicos, de caráter mais subjetivo e variável de pessoa para pessoa. Vale ressaltar, no entanto, que a ideia de conforto ambiental vem se modificando com o tempo, abarcando diferentes variáveis e até pondo em cheque os próprios conceitos clássicos de conforto enquanto uma condição estática e homogênea.

O modelo de conforto de Fanger (1970) foi desenvolvido para ambientes de temperaturas constantes, condicionados artificialmente e baseado no modelo de balanço térmico do corpo humano. Esse modelo é conhecido como PMV-PPD e objetiva a predição da sensação térmica média de um grupo de pessoas e o seu respectivo percentual de indivíduos insatisfeitos com um dado ambiente térmico. O mesmo é calculado com base em seis variáveis, sendo duas individuais (metabolismo e vestimenta) e quatro ambientais (temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e umidade), constituindo-se referência para a norma internacional ISO 7730 e ASHRAE 55, *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy* (ASHRAE, 2013; RUPP; VÁSQUEZ; LAMBERTS, 2015).

A segunda abordagem se refere ao “modelo adaptativo”, que toma por base os trabalhos de autores como Nicol e Humphreys

(1973), Auliciems (1981) e De Dear, Brager e Cooper (1997). Este se baseia no princípio de que, quando uma mudança ocorre ao ponto de produzir desconforto, as pessoas reagem de maneira a restaurar o seu conforto adaptando-se comportamental, fisiológica e psicologicamente ao ambiente térmico. Esta abordagem se aplica de forma mais adequada a edifícios ventilados naturalmente e em condições térmicas variáveis, tendo sido incorporada pela ASHRAE 55 em 2004 (ASHRAE, 2013; RUPP et al., 2015).

Segundo a ASHRAE 55, o cálculo da preferência de conforto adaptativo se baseia na relação entre a temperatura média predominante do ar externo e temperatura operativa do ambiente interno (ASHRAE, 2013). A temperatura operativa é calculada a partir das temperaturas internas de um dado ambiente a partir da seguinte equação:

$$T_o = A \cdot T_a + (1 - A) \cdot \overline{T_r}$$

Onde:

$T_o$  = temperatura operativa

$T_a$  = temperatura do ar

$\overline{T_r}$  = temperatura radiante média

E o valor de  $A$  é dado em função da velocidade do ar ( $v_r$ ), de acordo com a Tabela 1:

Tabela 1 - Cálculo da constante  $A$  em função da velocidade do vento ( $v_r$ ).  
Fonte: (ASHRAE, 2013)

| $v_r$ | < 0,2 m/s | 0,2 a 0,6 m/s | 0,6 a 1,0 m/s |
|-------|-----------|---------------|---------------|
| $A$   | 0,5       | 0,6           | 0,7           |

A temperatura média predominante do ar externo ( $T_{mpa(ext)}$ ), consiste na média aritmética das temperaturas do ar de uma sequência de dias do mês, devendo ter esta sequência pelo menos 7 dias consecutivos. Assim, os limites superior e inferior de temperaturas operativas aceitáveis para um determinado mês são calculados com base nas equações:

Limite superior de 80% de aceitabilidade =  $0,31 \cdot T_{mpa(ext)} + 21,3$

Limite inferior de 80% de aceitabilidade =  $0,31 \cdot T_{mpa(ext)} + 14,3$

A ASHRAE 55 adota como norma a preferência de 80% da população (ASHRAE, 2013). Entretanto, também é possível adotar

um parâmetro mais rígido ao se calcular os limites para 90% de aceitabilidade. A Figura 4 demonstra graficamente as faixas de aceitabilidade para 80 e 90% da população.

A ASHRAE também estabelece faixas de aceitabilidade de velocidade do ar e temperatura operativa, conforme nível de vestimenta e possibilidade de controlar a velocidade do ar, ilustrados graficamente na Figura 5.

#### 4.1.2. Desempenho térmico de vedações externas segundo a NBR

A NBR 15575-4 (ABNT, 2013) é a norma brasileira que trata do desempenho de vedações verticais para edificações habitacionais, sejam elas internas ou externas, com ou sem função estrutural. Por definição, vedações verticais são os elementos da edificação que, além de definir volumetria e compartimentar os espaços, possuem como

Figura 4 - Faixas de aceitabilidade de temperatura operativa para espaços condicionados naturalmente. Fonte: (ASHRAE, 2013)

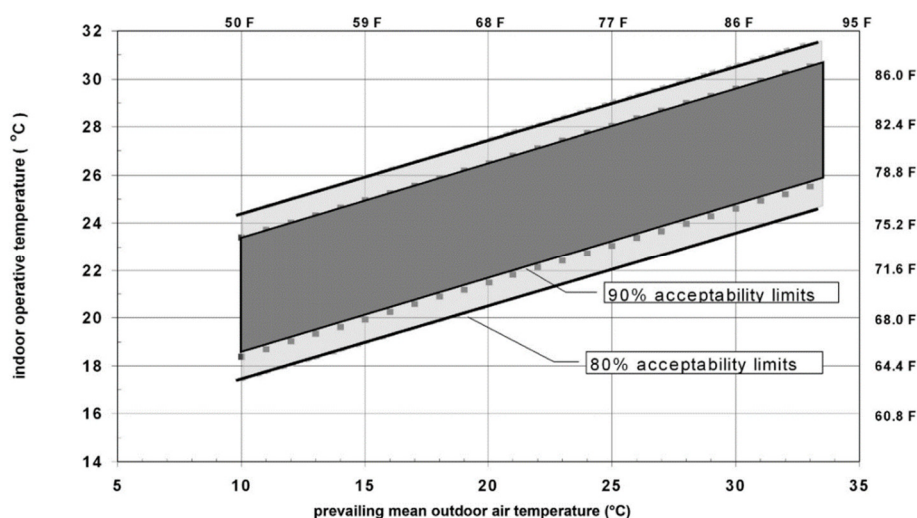
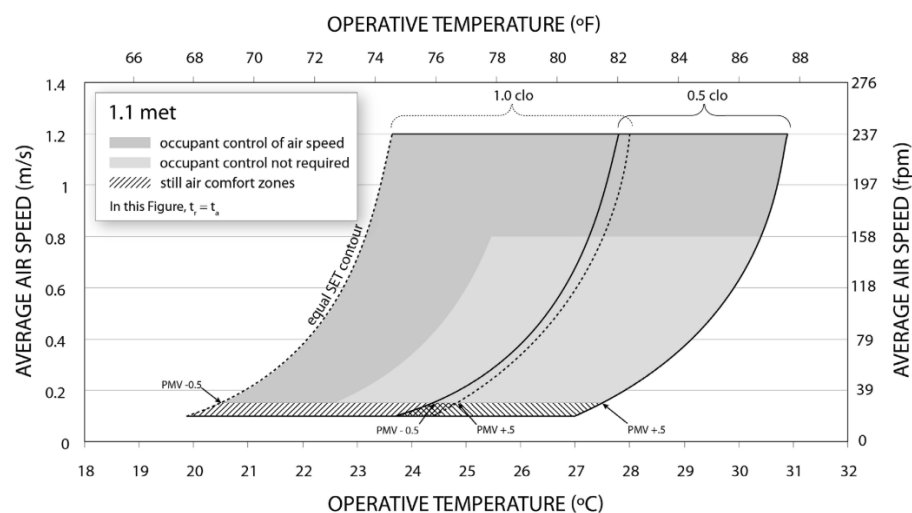


Figura 5 - Faixas de aceitabilidade de temperatura operativa e velocidade dos ar. Fonte: (ASHRAE, 2013)



função a estanqueidade à água, isolamento térmico e acústico, capacidade de fixação de peças suspensas, capacidade de suporte a esforços de uso, compartimentação em casos de incêndio, etc.

Por definição, desempenho é o “comportamento em uso de uma edificação e de seus sistemas” (ABNT, 2013), sendo estabelecidos na norma critérios de desempenho para diversos aspectos, dentre eles o desempenho estrutural, lumínico, acústico, de segurança ao fogo e térmico. No que diz respeito ao desempenho térmico, a mesma trata exclusivamente das vedações verticais externas, uma vez que estas constituem a envoltória responsável pelo controle da influência dos elementos ambientais externos sobre a arquitetura, baseando-se na NBR 15220.

A ideia de desempenho térmico segundo a NBR 15220 está associada às propriedades térmicas dos materiais que compõem os elementos construtivos. Em sua segunda parte, são apresentados os métodos de cálculo para obtenção dos valores de transmitância térmica, capacidade térmica, fator solar e atraso térmico de elementos homogêneos e heterogêneos (ABNT, 2005), cujas definições se encontram no Quadro 1.

Em sua terceira parte, a NBR 15220 apresenta recomendações quantitativas específicas que as vedações devem atender, no sentido de se formular recomendações técnico-construtivas de adequação climáticas no Brasil. Para tal, realizou-se a divisão do território nacional em 8 zonas denominadas Zonas Bioclimáticas (ABNT, 2005). O método para classificação bioclimática adotado pela NBR15220 toma por base uma adaptação da Carta Bioclimática do Edifício sugerida por Givoni (LAMBERTS, Roberto et al., 1994),

Quadro 1 - Características térmicas de materiais, elementos e componentes construtivos. Fonte: (ABNT, 2005)

| Propriedade                                                | Definição                                                                                                                                                                              | Unid.               |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| <b>Transmitância térmica</b>                               | Inverso do somatório do conjunto de resistências térmicas correspondentes às camadas de um elemento ou componente, incluindo as resistências superficiais interna e externa.           | W/m <sup>2</sup> .K |
| <b>Capacidade térmica</b>                                  | Quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema.                                                                                                 | J/K                 |
| <b>Fator de ganho de calor solar (de elementos opacos)</b> | Quociente da taxa de radiação solar transmitida através de um componente opaco pela taxa da radiação solar total incidente sobre a superfície externa do mesmo.                        | -                   |
| <b>Atraso térmico</b>                                      | Tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor. | h                   |

onde cada Zona é definida a partir da necessidade da adoção de estratégias de design específicas à obtenção do conforto térmico. O potencial impacto de uma dada estratégia de condicionamento é estimado a partir da projeção dos dados médios mensais de temperatura e umidade do ar de cada município sobre a Carta Bioclimática, verificando-se sobre quais polígonos eles mais se concentram (Figura 6).

Na NBR 15220 não se faz referência ao termo “Inércia Térmica para resfriamento”, como estratégia de condicionamento passivo. Entretanto, esse pode equivaler ao termo “Massa Térmica para resfriamento”, que diz respeito à estratégia de adotar vedações “pesadas” para conter o calor do dia em seu interior e, posteriormente, dissipá-lo por meio da ventilação noturna (ABNT, 2005).

As recomendações de desempenho térmico da NBR 15220 para as paredes externas se baseiam em três propriedades térmicas, seguindo os valores da Tabela 2.

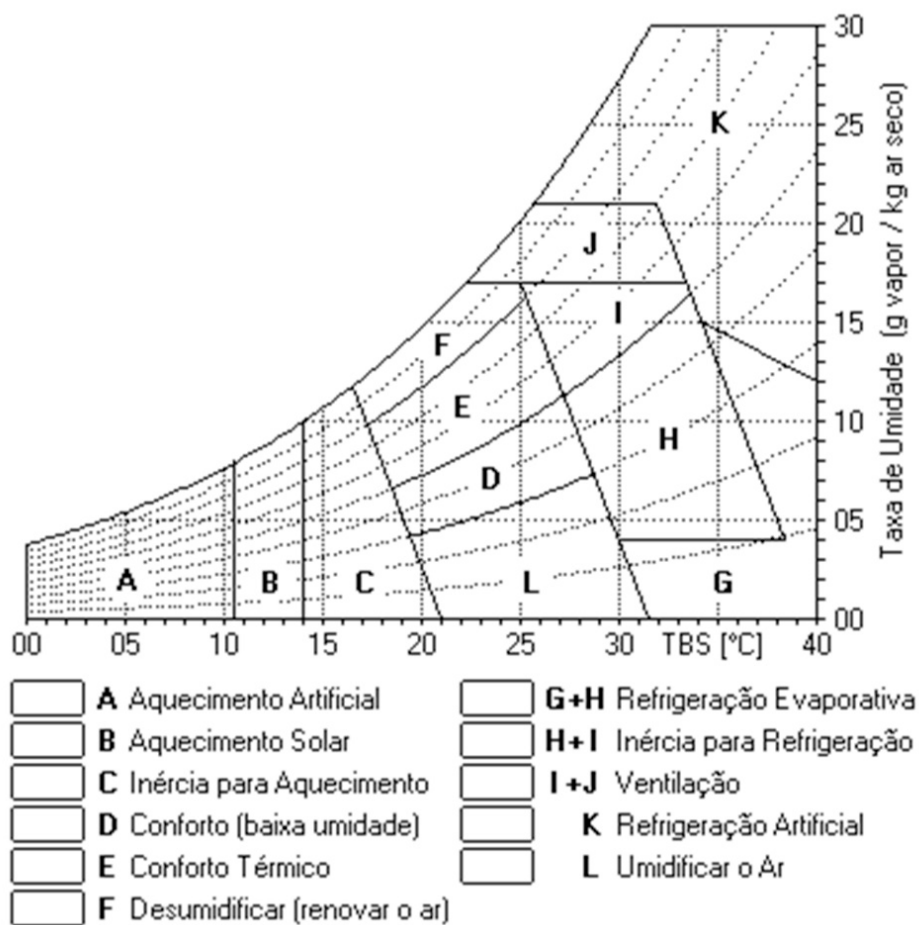


Figura 6 - Carta Bioclimática Adaptada e suas Estratégias de Condicionamento Térmico. Fonte: (LAMBERTS et al., 1994)

Tabela 2 - Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis para cada tipo de parede externa. Fonte: (ABNT, 2005)

|                          | Transmitância Térmica - U<br>(W/m <sup>2</sup> .K) | Atraso térmico - $\phi$ (h) | Fator solar - FSo (%) |
|--------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Paredes Leves            | $U \leq 3,00$                                      | $\phi \leq 4,3$             | FSo $\leq 5,0$        |
| Paredes Leves Refletoras | $U \leq 3,60$                                      | $\phi \leq 4,3$             | FSo $\leq 4,0$        |
| Paredes Pesadas          | $U \leq 2,20$                                      | $\phi \geq 6,5$             | FSo $\leq 3,5$        |

#### 4.1.3. A medida do desempenho da Inércia Térmica

Segundo Verbeke e Audenaert (2018) não existe consenso na literatura quanto à definição do termo “Inércia Térmica” que, apesar de usada por diversos autores, carece de definição formal e propriedades físicas que o descrevam. Uma definição recorrente ao longo de seu artigo é a desta se tratar de um comportamento térmico transiente, a partir do qual se apresenta uma reação reduzida e atrasada a uma excitação inicial. Esta definição apresenta duas propriedades e uma condição, essenciais para o entendimento do fenômeno (VERBEKE; AUDENAERT, 2018):

- *Fator decremental*: é a propriedade que expressa o amortecimento térmico ou redução da amplitude em uma curva senoidal de calor que se propaga por um material ou componente construtivo (Figura 7);
- *Atraso térmico*: é a propriedade que expressa quanto tempo leva para que o calor atravesse uma dada espessura de material (Figura 7);
- *Condição transiente*: ou seja, o pressuposto de que o material ou componente construtivo não está sujeito a condições ambientais estáticas e unidirecionais, mas a condições térmicas dinâmicas e variáveis ao longo do tempo.

Verbeke e Audenaert destacam que diversos autores da literatura não científica utilizam a terminologia “massa térmica”, que surge da ideia de associação do incremento da Inércia Térmica ao aumento da espessura dos elementos opacos de vedação. O simples acréscimo de massa a um componente construtivo, entretanto, não pode ser o único parâmetro de referência a definir o desempenho de um sistema composto por múltiplas camadas, cuja ordem de disposição de materiais pode levar a diferentes valores de atraso e

amortecimento térmicos, mesmo que a massa total do sistema seja a mesma. Além disto, o termo “massa térmica” apenas se aplica ao calor sensível, mas não a sistemas baseados em armazenamento de calor latente (VERBEKE; AUDENAERT, 2018).

Ainda segundos os mesmos autores, caracterizar as propriedades térmicas de um componente construtivo através de sua Resistência térmica ou Transmitância tem sido prática comum, adotada por diversas normas e códigos de desempenho. Entretanto, estas propriedades só se aplicam a situação constantes e unidirecionais de transferência de calor, não sendo aplicáveis à complexidade do fenômeno da Inércia Térmica, que é muitas vezes mal compreendido pelos projetistas (VERBEKE; AUDENAERT, 2018). A NBR 15220 pode ser tomada como exemplo desta prática, uma vez que fundamenta toda a sua base de cálculo na Resistência Térmica dos materiais e equações de condições não transientes (ABNT, 2005-1).

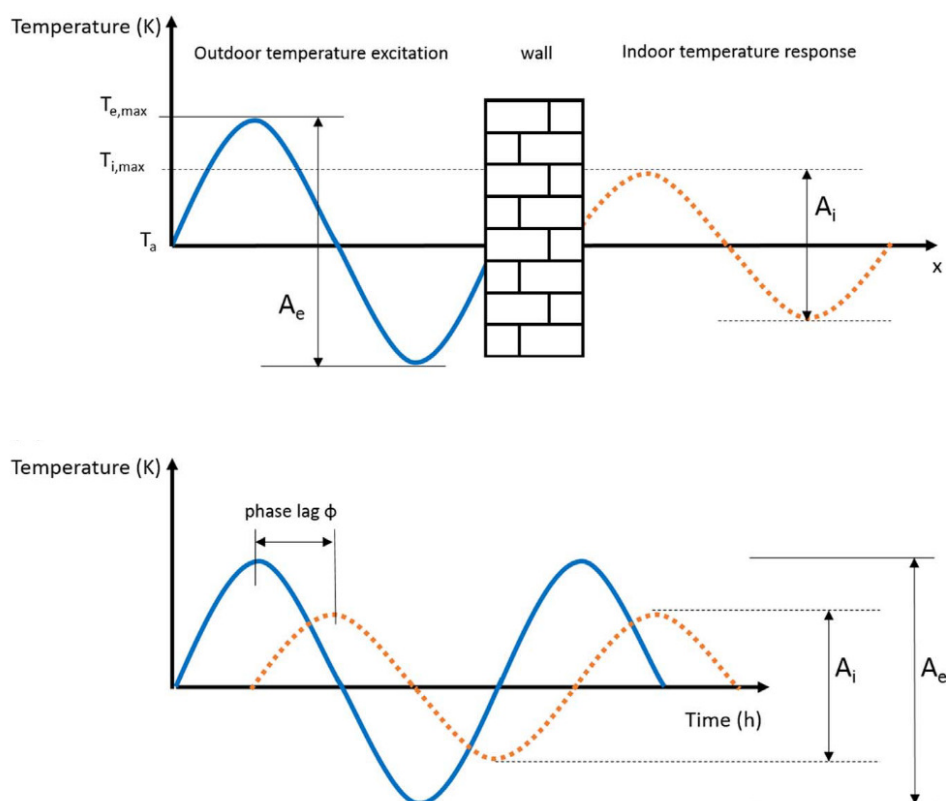


Figura 7 - Representação gráfica ilustrativa da resposta térmica de uma onda senoidal de calor se propagando por uma parede - fator decremental ( $A_e - A_i$ ); atraso térmico ( $\Phi$ ). Fonte: (VERBEKE; AUDENAERT, 2018)

Em seu mais recente trabalho, Fernandes (2019) estuda a criação de um novo Diagrama de Análise Climática para auxílio ao projeto de edificações energeticamente eficientes, embasado no modelo de Conforto Adaptativo. O autor justifica esse desenvolvimento no fato dos diagramas bioclimáticos convencionais serem pouco adequados à ideia de aclimação, por se basearem em modelos estáticos de conforto; enquanto que os diagramas de conforto adaptativo não apresentam zonas de recomendações de estratégias de condicionamento (FERNANDES, 2019).

Os eixos principais do diagrama proposto por Fernandes são definidos por duas variáveis: amplitude térmica diária; e a diferença entre temperatura média predominante do ar externo e temperatura operativa estimada (Figura 8). Por estar em fase de desenvolvimento, o diagrama ainda necessita passar por um processo de validação mais sólido. Por outro lado, contribui com o presente trabalho ao expressar graficamente a estreita relação proporcional entre demanda por Inércia Térmica e amplitudes térmicas diárias, relação também associada por Verbeke e Audenaert (2018, apud FERNANDES, 2019).

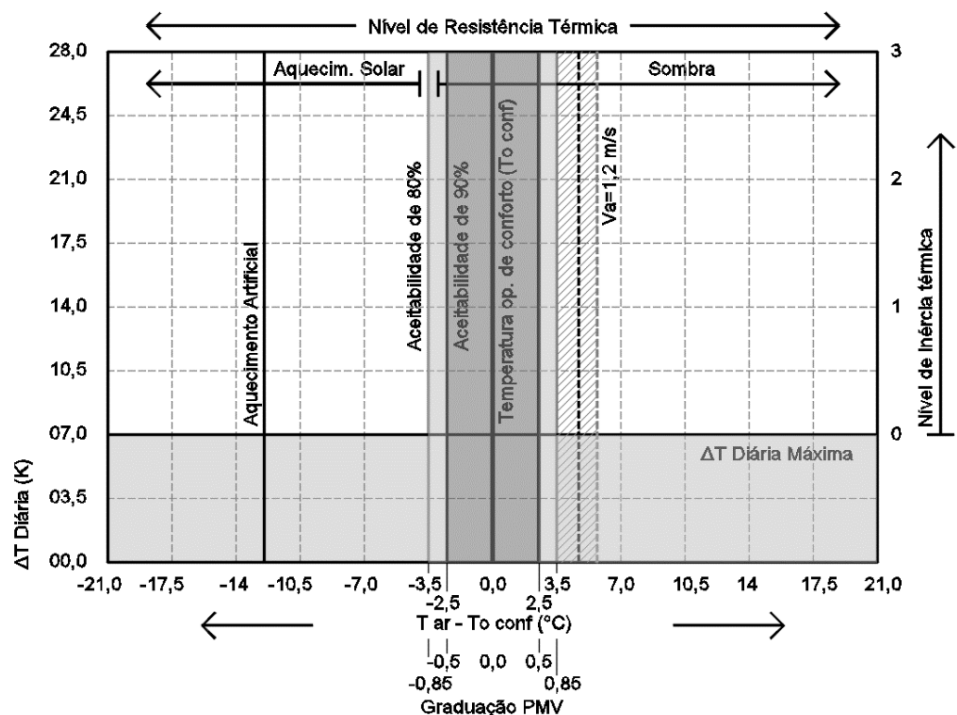


Figura 8 - Esboço do Diagrama Antropobioclimático proposto por Fernandes. Fonte: (FERNANDES, 2019)

#### 4.1.4. Uma forma diferente de caracterização bioclimática no Brasil

Ao se comparar os mapas do Zoneamento Bioclimático Brasileiro com a delimitação do Semiárido do INSA, é possível, perceber que este é permeado por diversas Zonas, cada uma com recomendações específicas de desempenho para paredes (Figura 9). Entretanto, conforme discutido no *Item 4.1.3.*, a recomendação por paredes mais ou menos pesadas com base na NBR 15220 se mostra insuficiente para a presente pesquisa que, além de se propor a explorar o conceito de Inércia Térmica sob condições transientes, o explora sob a perspectiva do uso do calor latente com a mudança de fase de materiais.

Somado a esse fato, Roriz (2013) destaca que desde a vigência da norma brasileira em 2005, ela vem sofrendo inúmeras críticas, dentre elas o número insuficiente de zonas que reflitam a diversidade climática do Brasil. Em parte, esta carência é ocasionada pela baixa quantidade de dados acessíveis à época de seu desenvolvimento (quando o acesso a dados climáticos era escasso e privativo). Na última década, no entanto, vem-se observando um esforço por

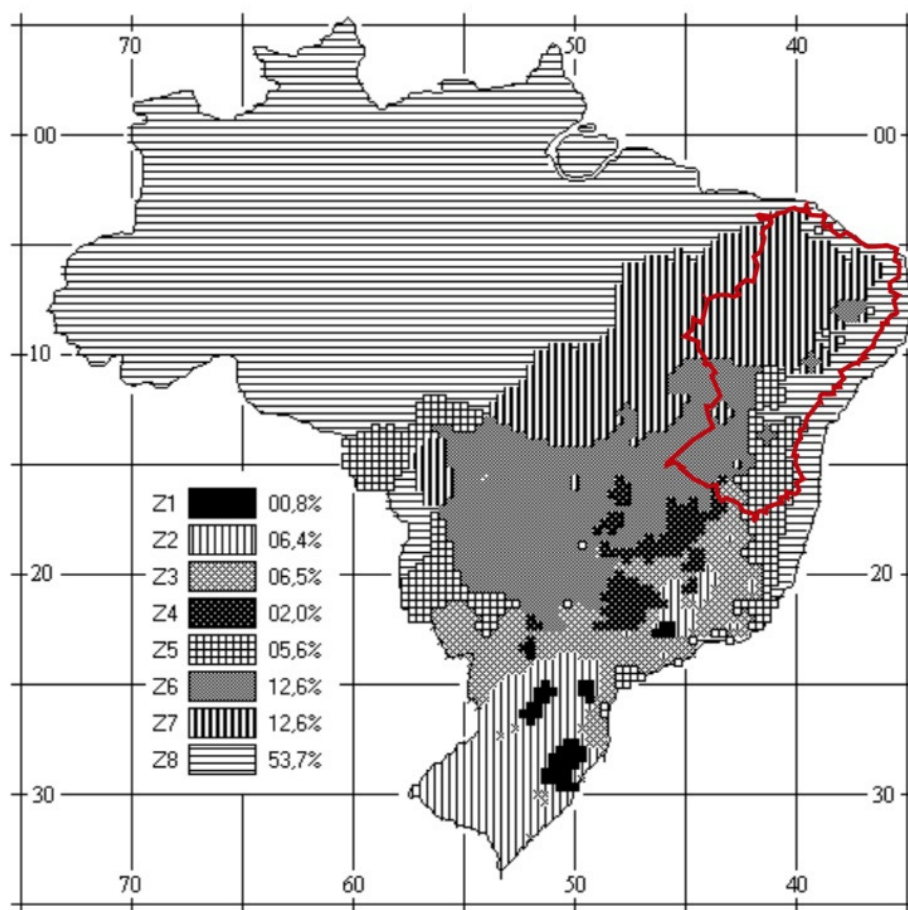


Figura 9 - Zoneamento Bioclimático brasileiro, com destaque (em vermelho) para a delimitação do Semiárido Brasileiro. Fonte: Editado pelo autor a partir de ABNT (2005)

Figura 1 - Zoneamento bioclimático brasileiro.

remediar os pontos deficientes presentes na norma de desempenho térmico brasileira, alguns destes trabalhos desenvolvidos pelos próprios integrantes do projeto normativo original.

*Towards a Brazilian Standard on Thermal Comfort* (LAMBERTS, R. et al., 2013), por exemplo, consiste em um trabalho direcionado para a definição de parâmetros para *Condições de conforto térmico humano em ambientes*, desenvolvido com base na norma ASHRAE 55-2010 e aplicando o modelo de conforto adaptativo no cenário brasileiro. O mesmo não objetiva diretamente a consolidação de um novo Zoneamento Bioclimático e a definição de parâmetros de desempenho de sistemas construtivos, mas é certamente uma base metodológica importante para os desenvolvimentos realizados atualmente pelos autores (LAMBERTS, 2019).

Por outro lado, os trabalhos realizados por Roriz (2013, 2014) se concentraram em estabelecer um “Mapeamento dos Climas no Brasil”. Estes serviriam como base para uma segunda etapa onde, por meio de simulações computacionais, novos Zoneamentos Bioclimáticos específicos para diferentes tipologias construtivas seriam definidos, junto às suas respectivas recomendações para estratégias construtivas (RORIZ, 2013). Essa etapa se encontra em pleno desenvolvimento, conduzida por García (2019).

O trabalho de mapeamento climático de Roriz possui como fontes os dados mensais de temperaturas mínimas e máximas, obtidos diretamente de estações meteorológicas ou informações de satélite da NASA. É a partir de 4 variáveis – temperatura média anual; desvio padrão das temperaturas médias mensais; amplitude térmica diária média anual; e desvio padrão das amplitudes térmicas diárias mensais – que foram classificados 24 grupos climático (Figura 10) Cada grupo indica uma necessidade geral por aquecimento ou resfriamento, a variação dessa demanda ao longo do ano (entre diferentes estações), e a estabilidade térmica diária de uma dada localidade (RORIZ, 2014).

A caracterização de contextos climáticos com relação às suas médias anuais e amplitudes diárias de temperatura do ar pode ser a chave para compreender a demanda por Inércia Térmica no condicionamento de edificações no recorte deste estudo.

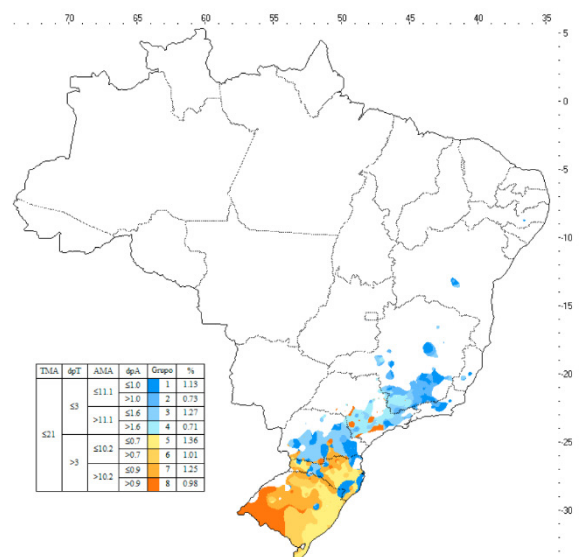


Figura 2: Grupos Climáticos 1 a 8

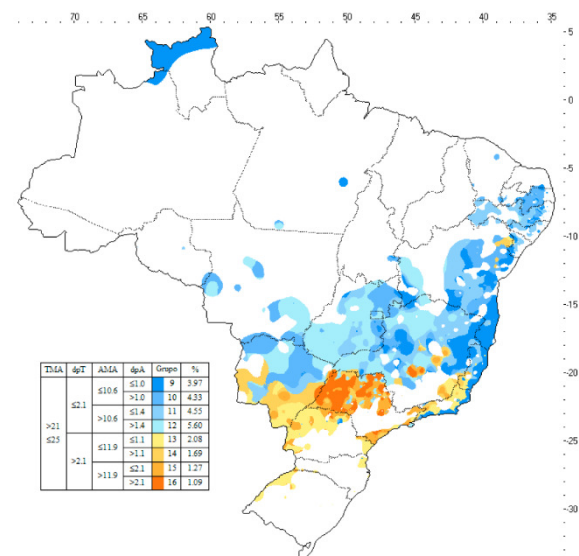


Figura 3: Grupos Climáticos 9 a 16

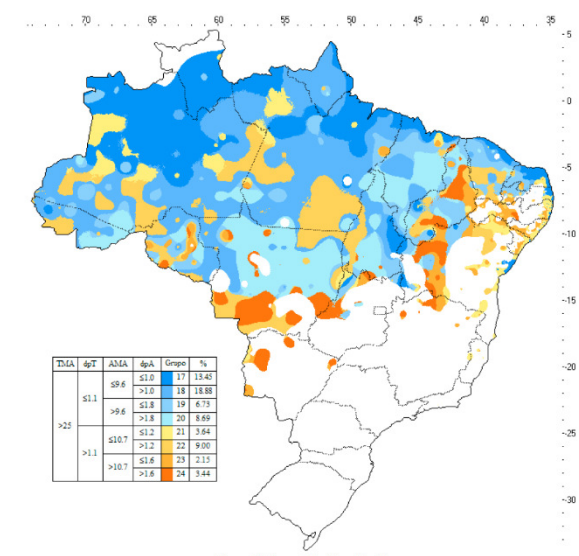


Figura 4: Grupos Climáticos 17 a 24

Figura 10 - Mapas com classificações climáticas para temperatura médias abaixo de 21°C (mapa superior), de 21 a 25 °C (mapa do meio) e acima de 25°C (mapa inferior).  
Fonte: (RORIZ, 2013)

## 4.2. PCMs - Materiais e Mudança de Fase

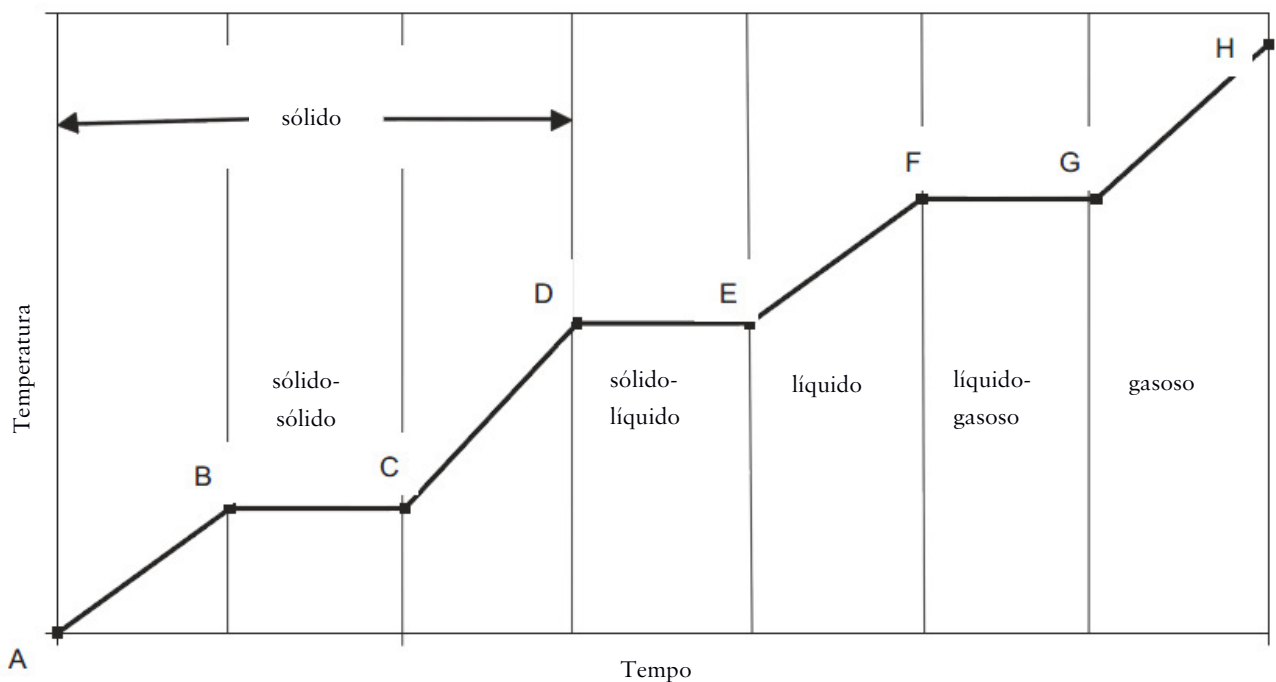
### 4.2.1. Conceituação, classificação e propriedades

Duas das principais referências acerca da conceituação e classificação de PCMs, já referenciados na introdução deste trabalho, são Regin et al. e Sharma et al. (2008; 2009), que constituem fontes primárias para os demais trabalhos aqui referenciados. Ambos os trabalhos consistem em revisões de literatura da aplicação destes materiais em sistemas de armazenamento de energia térmica, tanto para o resfriamento quanto para o aquecimento, o que inclui os sistemas de condicionamento passivo para arquitetura bioclimática.

Regin et al. (2008) dividem os sistemas de armazenamento de energia térmica em basicamente dois tipos: os que armazenam calor sensível e os que armazenam calor latente. O armazenamento de calor sensível se processa durante o aquecimento de um material sem que ocorra mudança de fase; neste, a temperatura do material se eleva à medida em que a energia é acumulada. Já o armazenamento de calor latente se processa durante uma mudança física, seja uma mudança de fase sólido-líquido, líquido-gasoso, sólido-gasoso ou mesmo transformações sólido-sólido nas quais se operam rearranjos de estruturas cristalinas de um dado material.

A Figura 11 ilustra diagramaticamente o aumento de temperatura de um material hipotético puro, em função de seu

Figura 11 - Gráfico correlacionando aumento de temperatura e tempo de aquecimento de um material hipotético ao longo de suas mudanças de fase. Fonte: Editado pelo autor a partir de Regin et al. (2008)



progressivo aquecimento ao longo do tempo. Os intervalos A-B, C-D, E-F e G-H representam momentos de armazenamento de calor sensível, pois apresentam alteração de temperatura; enquanto os intervalos B-C, D-E e F-G representam momentos de armazenamento de calor latente, por apresentarem uma mudança física e não ocorrer alteração de temperatura durante o processo (Regin et al., 2008). Para os autores o processo de armazenamento de calor latente é particularmente atrativo aos sistemas térmicos, uma vez que a partir deste se acumulam maiores quantidades de energia por unidade de massa quando comparado ao armazenamento de energia por calor sensível. PCMs, dado a sua grande capacidade de armazenamento de calor latente, constituem peças fundamentais nestes sistemas.

Sharma et al. (2009) apontam a existência de um grande número de PCMs disponíveis, capazes de operar a quaisquer faixas de variação de temperatura desejáveis. No entanto, suas características devem ser sempre levadas em conta no momento da escolha. A água, por exemplo, é um PCM bastante comum no cotidiano e que possui uma entalpia de ebulição com valores na ordem dos 2260 kJ/kg. Porém, a sua temperatura de ebulição (100 °C) não é compatível com a faixa de temperatura média de conforto do ser humano, além de gerar problemas de contenção de fluidos em detrimento da pressão gerada pelos vapores liberados durante sua mudança de fase (MARTINS, 2017).

Diferente dos autores anteriores, Jelle e Kalnæs (2017) realizaram um estudo do estado da arte do uso de PCMs especificamente aplicados à arquitetura, para a obtenção de edificações energeticamente eficientes. Os autores adotaram a classificação de Rathod and Banerjee (2013 apud JELLE; KALNÆS, 2017) que divide os PCMs em três grupos: orgânicos, inorgânicos e misturas eutéticas<sup>4</sup> (Figura 12).

PCMs orgânicos, como parafinas e ácidos graxos, tendem a apresentar maior estabilidade ao longo dos ciclos de mudança de fase, mantendo sua temperatura de fusão constante e dificilmente reagindo em contato com outros materiais. Essas características se revelam perfeitas em se considerando o ciclo de vida de um edifício. Por outro lado, PCMs orgânicos apresentam a desvantagem de serem

<sup>4</sup> Mistura eutética: mistura de um ou mais componentes, cujo resultado possui um ponto de fusão estável.

considerados moderadamente inflamáveis e possuem baixa condutividade térmica (JELLE; KALNÆS, 2017).

Os PCMs inorgânicos por outro lado, mais especificamente os sais hidratados, além de facilmente obtidos e terem baixo custo, possuem calor latente por unidade de volume relativamente mais alto, não são inflamáveis e possuem maior condutividade térmica que os PCMs orgânicos. Porém, esses materiais tendem a ser corrosivos, reagindo com materiais metálicos, e perdendo sua estabilidade e capacidade de acumulo de calor latente ao longo do tempo, não correspondendo ao ciclo de vida de um edifício (JELLE; KALNÆS, 2017).

Misturas eutéticas consistem na composição de dois ou mais componentes reunidos, podendo ser o resultado da mistura de componentes orgânicos e/ou inorgânicos. Sua vantagem se encontra na versatilidade em se obter propriedades térmicas que atendam a requisitos específicos, porém, tendem a possuir custo mais elevado (JELLE; KALNÆS, 2017).

Ao tratar dos PCMs para a obtenção do conforto térmico em uma edificação, Brito et al. (2017) destacam duas propriedades determinantes na seleção dos materiais: capacidade de armazenamento térmico latente e pontos de fusão e cristalização. Os trabalhos de revisão bibliográfica e de pesquisa de mercado são unânimes em apresentar esses dois fatores para caracterizar os PCMs, utilizando diferentes termos: “ponto de fusão” é também referenciado como “temperatura de mudança de fase”, com unidade em °C; e “capacidade de armazenamento térmico latente” é também

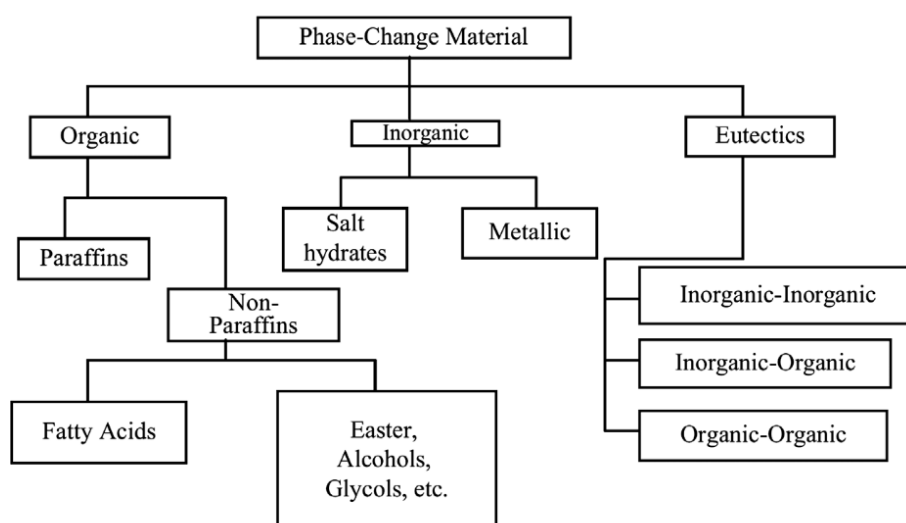


Figura 12 - Classificação geral de PCMs. Fonte: (Rathod e Banerjee, 2013 apud JELLE; KALNÆS, 2017)

referenciada como “calor latente”, “calor de fusão”, ou “capacidade de calor latente”, com unidades em kJ/kg ou J/g (BRITO et al., 2017; JELLE; KALNÆS, 2017; MARTINS, 2017; PIELICHOWSKA; PIELICHOWSKI, 2014; SHARMA et al., 2009). Alguns trabalhos ainda apresentam outros fatores de caracterização, como condutividade térmica, uma vez que essa indica a capacidade de trocas térmicas entre PCM e meio, e a consequente completude dos ciclos de mudança de fase do material.

Jelle e Kalnæs (2017) demonstram como a forma de classificação dos PCMs em orgânicos, inorgânicos ou misturas eutéticas facilita a visualização das faixas de temperatura de fusão e do calor de fusão de cada grupo, conforme se pode observar no gráfico de Dieckmann (Figura 13).

Os mesmos autores apontam que um dos métodos mais usados para se determinar as propriedades termo físicas de PCMs é o DSC – *Differential Scanning Calorimetry* – ou Calorimetria Exploratória Diferencial. A partir deste, é possível identificar temperaturas de transição de fase e a entalpia envolvidas no processo. A técnica se baseia na medição da diferença dos fluxos da energia fornecida a uma substância analisada e a um material de referência termicamente inerte, enquanto são submetidos a uma variação de temperatura programada (IONASHIRO; GIOLITO, 2005).

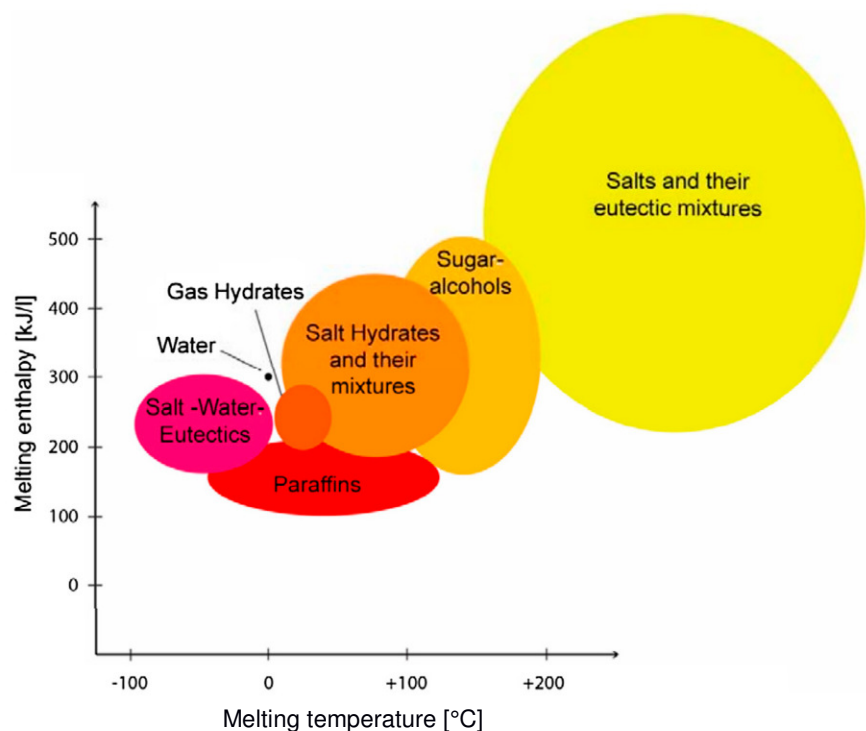


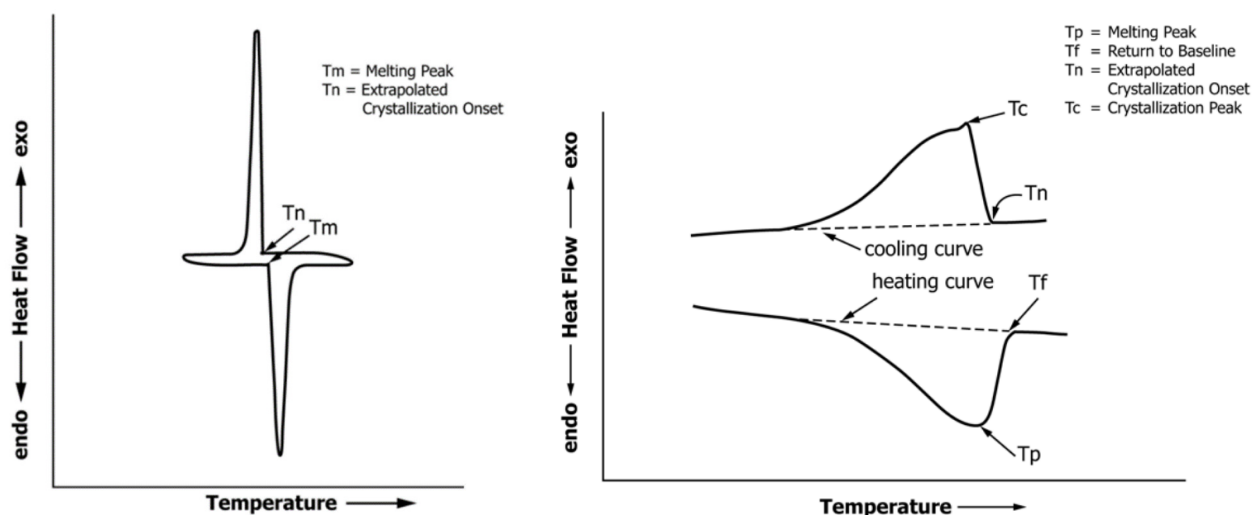
Figura 13 - Temperatura de fusão vs. entalpia de fusão para vários tipos de PCM. Fonte: (Dieckmann, 2013 apud JELLE; KALNÆS, 2017)

A leitura dos valores apresentados por uma análise DSC difere das substâncias puras para as impuras e polímeros, uma vez que estes últimos apresentam não um ponto específico de transição de fase, mas uma faixa de temperatura de transição. Uma mudança de fase é identificada a partir de um pico endotérmico ou exotérmico na curva que representa a função da relação entre fluxo diferencial de calor e variação de temperatura. De acordo com a norma internacional de métodos de teste para determinação de temperaturas de fusão e cristalização (ASTM, 2012b), as substâncias puras apresentam uma curva com pico mais acentuado (Figura 14); enquanto polímeros e substâncias impuras apresentam uma curva mais suave, sendo necessário descrever o início, o pico e o final da curva de transição de fase (Figura 15). A entalpia de transição de fase é definida graficamente a partir da área da curva para uma dada massa da amostra analisada (ASTM, 2012a).

Além da imprecisão em se definir um ponto específico de transição de fase para algumas substâncias, é necessário atentar para o fato de que nem sempre a temperatura de fusão corresponde à temperatura de cristalização do material (JELLE; KALNÆS, 2017). Esse fenômeno de atraso do ponto de retorno do material ao seu estado inicial é definido como histerese, e é endereçada como ponto crucial a ser solucionado para fins de modelagem numérica (GOIA et al., 2018; TABARES-VALESCO et al., 2012; ZASTAWNA-RUMIN et al., 2020). Essa característica reforça a ideia de se considerar não um ponto, mas uma faixa de temperatura de transição de fase, que deve corresponder à faixa de amplitude térmica diária do local.

Figura 14 (esquerda) - Temperaturas de fusão e cristalização para materiais cristalinos puros. Fonte: (ASTM, 2012b)

Figura 15 (direita) - Temperaturas de fusão e cristalização para materiais poliméricos. Fonte: (ASTM, 2012b)



#### 4.2.2. Aplicação de PCMs na Construção Civil

A aplicação de PCMs na Construção Civil envolve uma relação direta na forma como estes materiais irão interagir com os elementos que compõem um edifício. Martins (2017) apresenta em seu estudo de revisão de literatura três processos a partir dos quais PCMs podem ser incorporados a componentes construtivos: impregnação, imersão e encapsulamento. A impregnação consiste na adição do PCM em solução aquosa (estado líquido) ou solução pulverizada (estado sólido) a uma mistura – por exemplo, adicionando o Material de Mudança de Fase como traço na mistura que compõe o gesso ou o concreto. Já a imersão consiste na absorção do PCM por capilaridade em materiais porosos, como o próprio concreto ou a cerâmica. O grande problema destes dois processos se encontra na possível incompatibilidade de materiais, resultando em reações químicas adversas, ou ainda no eventual vazamento do PCM ao longo dos ciclos de mudança de fase, diminuindo a eficiência térmica do produto ao longo do tempo (MARTINS, 2017).

O método do encapsulamento, para a incorporação de PCMs a componentes construtivos, é o que resulta em maior sucesso em situações reais, uma vez que o material permanecerá isolado e as incompatibilidades químicas ou vazamentos serão evitados. Esse método se divide em duas categorias: macroencapsulamento e microencapsulamento, fazendo referência ao tamanho dos recipientes que encapsulam o PCM. Macrocápsulas (Figura 16) são mais fáceis de se manusear e de se obter, possibilitando a eventual substituição de um PCM, mas não apresentam a mesma eficiência que as microcápsulas em termos de promoção de trocas térmicas, cuja superfície de contato com o meio é bem maior. Os métodos de obtenção de microcápsulas são, no entanto, mais complexos,

Figura 16 (esquerda) - PCM macroencapsulado da empresa Puretemp. Fonte: (MARTINS, 2017)

Figura 17 (direita) - PCM microencapsulado (sem marca específica) visto a olho nu. Fonte: (MARTINS, 2017)



envolvendo procedimentos em laboratório e dimensões que variam de um milímetro a sessenta micrómetros (Figura 17) e impossibilitam manutenções de longo prazo (MARTINS, 2017).

O processo de microencapsulamento confere ao material encapsulado a aparência de um pó (Figura 17), que pode ser facilmente agregado a misturas de concreto, gesso, painéis de gesso acartonado e até mesmo misturas de solo-cimento. Cabeza et al. (2007) estudaram a aplicação do material ao concreto, analisando o seu desempenho térmico e impacto sobre a estabilidade estrutural. Já Serrano et al. (2012) estudaram a aplicação do PCM microencapsulado à composição de quatro tipos de parede de terra compactada com a adição de diferentes estabilizadores estruturais, visando averiguar o seu desempenho térmico, resistência e impacto ambiental. Ambos os trabalhos utilizaram o mesmo PCM microencapsulado, com temperatura de fusão de 26°C e capacidade de armazenamento de calor latente de 110 kJ/kg. Os trabalhos obtiveram resultados satisfatórios, com melhoras de desempenho térmico sem o comprometimento da estabilidade estrutural dos componentes construtivos.

Hasan et al. (2018) realizaram um experimento no qual se utilizou a parafina comum (vendida comercialmente) como PCM, com temperatura de fusão em torno de 44 °C, sendo essa isolada por duas chapas de alumínio que formavam uma camada de 1 centímetro na composição das paredes em estudo – o que pode ser caracterizado como um macroencapsulamento da parafina. Objetivando, reduções em picos de calor, o experimento resultou em reduções de temperatura na ordem entre 2 e 3 °C.

Ainda se tratando de materiais parafínicos, a Syntroleum (2013) desenvolveu um processo para a síntese de PCMs de baixo custo, que consistem em uma mistura de parafinas majoritariamente compostas por octadecanos<sup>5</sup> obtidos a partir da hidroxidação de óleos vegetais e gordura animal. A mistura parafínica obtida possuía temperaturas de fusão na ordem de 18 a 25 °C e calor de fusão na ordem de 170 a 210 J/g. Essas foram encapsuladas em pílulas de aproximadamente 2 mm de diâmetro, compostas por PVDC látex e recobertas com silicato de cálcio em pó (Figura 18), passando a

<sup>5</sup> Octadecanos: Hidrocarbonetos compostos por uma cadeia de 18 carbonos (C<sub>18</sub>H<sub>38</sub>).

apresentar, quando revestidas, temperatura de fusão de 22 a 24 °C e calor de fusão de 82 a 113 J/g.

Jelle e Kalnæs (2017), assim como Brito et al. (2017), destacam que, em se tratando da sua aplicação às envoltórias, os PCMs são particularmente mais efetivos em vedações leves, sendo preferivelmente aplicados nas superfícies internas das vedações. Os dois trabalhos citados utilizam como referência para essa argumentação o estudo realizado por Kuznik et al. (2008), no qual um PCM microencapsulado é incorporado às superfícies internas das vedações de um cômodo em escala real (Figura 19). Entretanto, vale

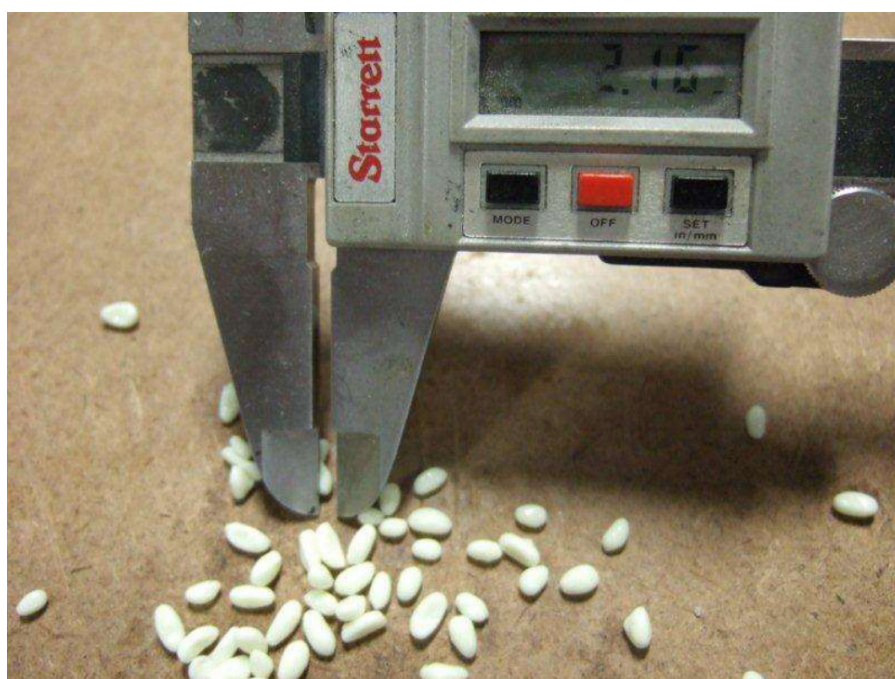


Figura 18 - Cápsulas de PVDC látex com PCM. Fonte: (SYNTROLEUM, 2013)

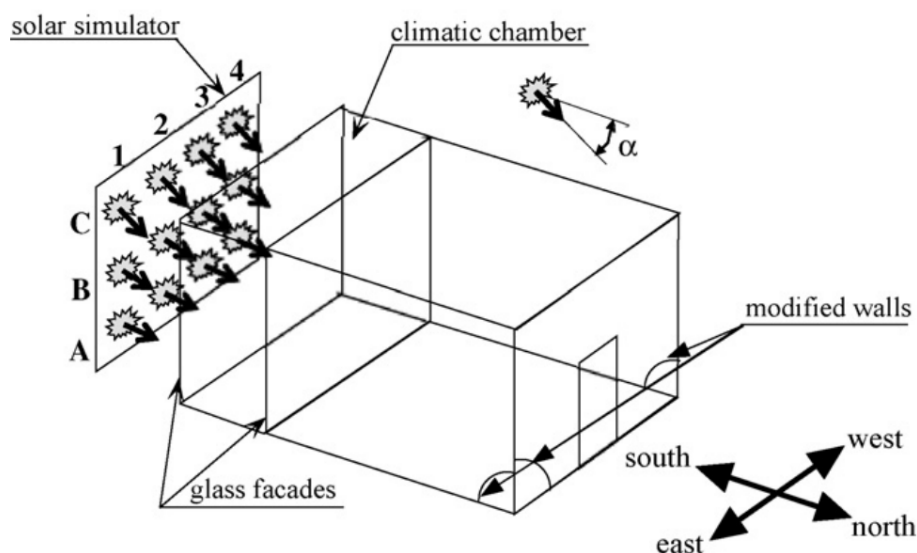


Figura 19 - Diagrama isométrico da célula de teste, e fonte de aquecimento com 12 lâmpadas. Fonte: (KUZNIK et al., 2008)

ressaltar que Kuznik et al. não objetivavam estudar o atraso e amortecimento da passagem do calor do exterior para o interior da edificação através de vedações externas, mas estudar como partições internas eram capazes de diminuir as flutuações de temperaturas internas em um cômodo com uma única fachada externa envidraçada, através da qual se simulava a radiação solar de verão (KUZNIK et al., 2008). A interpretação de que o estudo de Kuznik et al. (2008) possa ser aplicado ao desempenho de vedações externas, sem levar em consideração o contexto de aplicação do estudo e as necessárias adaptações, pode levar a conclusões precipitadas, como a de que PCMs devem apenas ser aplicados nas superfícies internas das vedações, e de que uma imediata troca térmica com o meio seja sempre desejável.

Diante de críticas por parte da indústria da construção, dado à moderada inflamabilidade de materiais parafinicos, e em face do desenvolvimento de novas tecnologias de encapsulamento de PCMs à época, Kosny e Yarbrough (2008) realizaram uma série de testes em laboratório e experimentos de campo de escala reduzida, na cidade de Oak Ridge - TN, EUA, aplicando PCMs às faces externas das vedações. Um dos estudos de campo, realizado no período de verão, compara a eficiência de um isolamento convencional contra um isolamento com material reflexivo (alumínio) otimizado com PCM e permeável à ventilação natural – ambos com o mesmo valor-R (resistência térmica) – (Figura 20). O isolamento com PCM demonstrou um amortecimento de 60% no pico do fluxo de calor pela vedação, além de um atraso térmico de oito horas. O isolamento convencional apresentou em média temperaturas superficiais

Figura 20 - Parede experimental com isolamento convencional (painel da esquerda) vs. isolamento reflexivo otimizado com PCM (painel da direita). Fonte: (KOSNY; YARBROUGH, 2008)



internas entre 6 a 10 °F (aproximadamente 3,33 a 5,55 °C) maiores que o isolamento com PCM. Apesar das condições de controle das variáveis dos experimentos serem questionáveis, estes indicam como PCMs não precisam necessariamente estarem expostos ao interior do ambiente (KOSNY; YARBROUGH, 2008).

## **4.3. Simulação computacional com PCMs**

### **4.3.1. Pesquisas de simulação**

Groat e Wang (2013) são autores que tratam de métodos e estratégias de pesquisa aplicadas à arquitetura, apontando a Pesquisa de Simulação como uma das possíveis abordagens metodológicas. O conceito de simulação em si não está atrelado ao computador, mas à replicação de fenômenos do mundo real sem as implicações das possíveis perdas no mundo real (por exemplo, testar a aplicação de diferentes materiais em um edifício, sem as implicações dos custos de se construir efetivamente esse edifício). A triangulação de dados de experimentos reais e simulação é comumente adotada em pesquisas sobre tecnologia ambiental (GROAT; WANG, 2013).

Uma pesquisa de simulação trata diretamente com Modelos, definidos como um sistema geral que simula a realidade em estudo, podendo se expressar de forma concreta, como em uma maquete de escala reduzida, ou até um quarto construído em escala real; ou de forma abstrata, como em modelos matemáticos (GROAT; WANG, 2013). Modelos estatísticos são excelentes exemplos de representações matemáticas de fenômenos do mundo real, com a vantagem de dispor de testes validados para verificar se um dado modelo corresponde significativamente à realidade (FIELD, 2009). A aderência de um modelo à realidade é um dos principais pontos ao qual um pesquisador deve atentar para a obtenção de resultados significativos em pesquisas de simulação (GROAT; WANG, 2013).

Para Groat e Wang, modelos computacionais de simulação são todos, em algum ponto, matemáticos, pois envolvem sistemas de códigos numéricos que traduzem as relações do mundo real em valores abstratos quantificáveis. O conceito de simulação computacional de Lima (2012) se alinha ao conceito de simulação de Groat e Wang, que diz:

“O método de simulação computacional presume a elaboração de uma imitação virtual de várias características da edificação para estimar, através de cálculos complexos, o suposto desempenho do edifício conforme determinado escopo de análise” (LIMA, 2012).

Para o autor existe uma estreita relação entre o suporte de natureza quantitativa oferecido pelas ferramentas computacionais e a possibilidade de se otimizar um dado desempenho na edificação. Em particular, o foco do estudo de Lima se encontra no uso de ferramentas de simulação térmica no processo projetual de arquitetura.

#### **4.3.2. Simulação termo energética do edifício**

Segundo Lima (2012), ferramentas de análise térmica e energética são capazes de calcular “fluxos térmicos, cargas de aquecimento/resfriamento, consumo energético e prediz[er] variáveis ambientais nos ambientes internos”. Estes cálculos se amparam em arquivos climáticos horários e levam em consideração parâmetros de conforto e inúmeras variáveis que visam representar uma edificação em termos de geometria, ocupação/uso, materiais e sistemas (LIMA, 2012).

Os arquivos climáticos são um requisito fundamental para as simulações termo energéticas de uma edificação, pois nestes se encontram os dados das variáveis climáticas externas de cada hora do ano. Todavia, um relatório sobre arquivos climáticos do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina (LABEEE, 2015) aponta para uma limitação existente em termos de quantidade e qualidade desses dados, tais como: a localização das estações climáticas que geram esses dados, geralmente situadas em áreas suburbanas; defeitos em equipamentos ou interrupção na leitura dos dados; e a ausência de leitura de dados de radiação solar na maior parte dessas estações. Segundo o referido relatório, dentre os arquivos climáticos existentes no Brasil, destacam-se:

- Test Reference Year (TRY);
- Typical Meteorological Year (TMY);
- Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA);
- International Weather for Energy Calculations (IWEC);
- e INMET (dados medidos nas estações automáticas do INMET, com extensão .epw).

Ainda segundo o mesmo relatório, os arquivos INMET são os que se apresentam em maior quantidade no Brasil, elaborados pelo professor Maurício Roriz entre 2000 e 2010 a partir de dados de estações meteorológicas do INMET. Entretanto, os dados originais se caracterizavam por apresentar uma série de lacunas e interrupções nas medições, que tiveram que ser preenchidas e substituídas com procedimentos de controle de qualidade de dados climáticos, e formatados para a extensão .epw, que é a utilizada no programa *EnergyPlus* (LABEEE, 2015).

No site do LABEEE (2018a) se encontram disponíveis para download arquivos INMET, TMY e alguns poucos TRY. García (2019), em sua palestra ao ENCAC 2019, aponta para os arquivos TMY como sendo os que apresentam valores mais confiáveis, e que estes sejam usados caso um mesmo município apresente mais de um tipo de arquivo climático.

Dentre os inúmeros programas de simulação termo energética existentes, o *EnergyPlus* consiste em um programa de simulação do edifício inteiro, de código aberto, financiado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. A sua estrutura foi intencionalmente pensada de forma a facilitar conexões com outros programas, abrangendo o maior número possível de soluções de simulação, bem como a interação com interfaces que facilitem entrada e leitura dos dados de simulação – pois o *EnergyPlus* foi criado para ser uma *engine* de simulação, e não uma interface do usuário (U.S.DOE, 2020b).

O *EnergyPlus* trabalha com o conceito de Zona Térmica, que é a representação do volume de ar, a uma temperatura uniforme, delimitado pelas superfícies que circundam um dado espaço (U.S.DOE, 2020b). Dessa forma a representação geométrica do edifício não é realizada por elementos dotados de espessura, mas por elementos bidimensionais (superfícies) que trazem consigo as propriedades específicas de transferência e armazenamento de calor de elementos construtivos reais.

Segundo o relatório de caracterização de componentes construtivos brasileiros para o programa *EnergyPlus*, realizado pelo LABEEE (2018b), as informações dos materiais que compõem um elemento construtivo, como uma parede, precisam estar dispostas na forma de camadas em série para a simulação. Para contornar essa limitação, o estudo apresenta um método de determinação de

modelos equivalentes, também apresentando uma biblioteca de componentes construtivos que representem, no *EnergyPlus*, os elementos mais comumente utilizados no Brasil (Figura 21).

Além das superfícies com capacidade de realização de trocas térmicas, o *EnergyPlus* dispõe das Superfícies Adiabáticas, que representam superfícies comuns entre duas Zonas Térmicas cujas temperaturas são tipicamente as mesmas (U.S.DOE, 2020c). Em outras palavras, através das Superfícies Adiabáticas não são computadas trocas térmicas entre uma dada Zona Térmica e o meio externo, o que pode ser útil para a realização de análises isoladas de um cômodo específico de uma habitação, ou de um único andar de um edifício multifamiliar isoladamente (Figura 22).

Figura 21 - Representação em seção do modelo de referência e modelo equivalente simplificado (cotas em mm). Fonte: (LABEEE, 2018b)

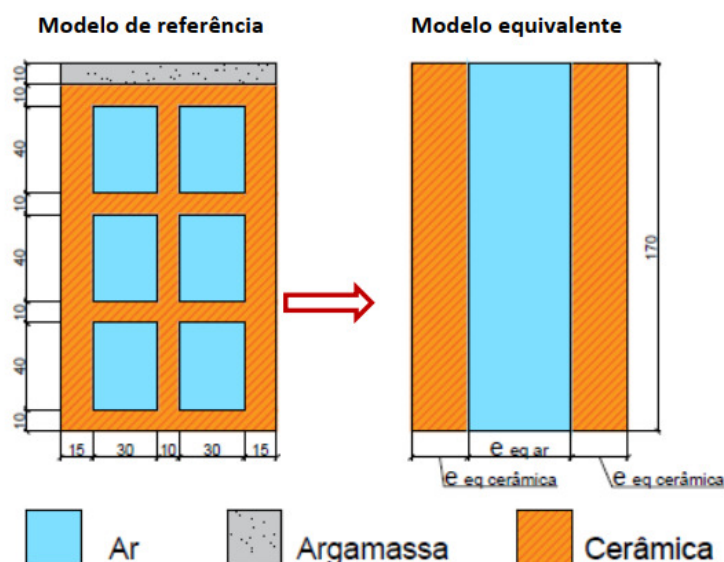
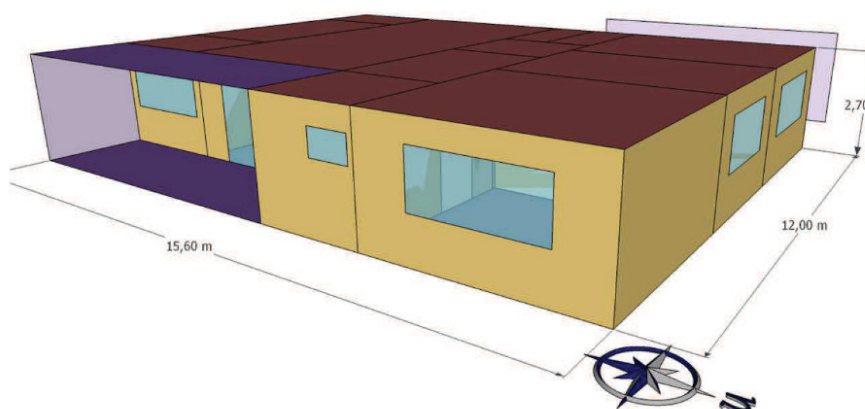


Figura 22 - Croqui perspectivo de uma unidade habitacional de um edifício multifamiliar – em amarelo, as vedações externas; em vermelho, as superfícies adiabáticas correspondentes à divisão entre pavimentos; em azul transparente, a esquadrias; e em roxo, os elementos de sombreamento (contexto da simulação). Fonte: (SORGATO, 2015)

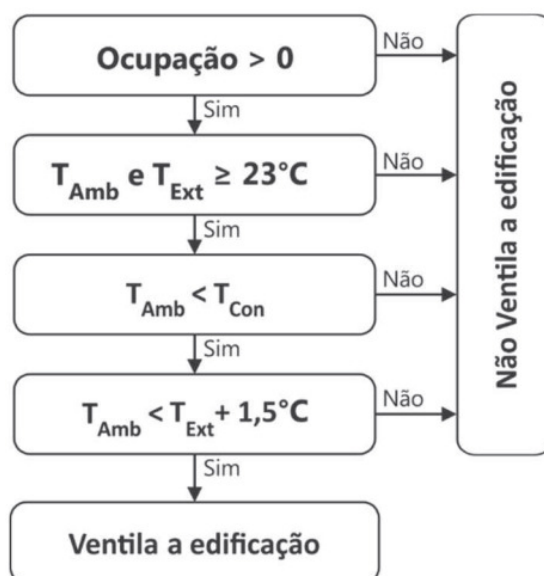


Além das informações climáticas e das propriedades térmicas dos componentes construtivos, as simulações termo energéticas do edifício demandam uma série de outros dados de entrada. O RTQr – Regulamento Técnico de Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais – apresenta alguns valores de referência a serem utilizados em simulações objetivando a classificação da eficiência energética de edificações brasileiras, como: valores para sistemas de ventilação natural, padrão de ocupação, padrão de uso da Iluminação e cargas internas de equipamentos (BRASIL, 2012).

Sorgato (2015) também constitui uma importante fonte para dados de entrada, uma vez que sua tese trata especificamente de como padrões de comportamento dos usuários impactam o desempenho térmico e energético das edificações, utilizando-se de análises estatísticas de regressão e correlação para identificar os fatores mais influentes. O autor dá um passo além na forma como define esses padrões de comportamento dos usuários, uma vez que não adota valores típicos fixos, mas se utiliza de algoritmos e ferramentas de co-simulação – *Energy Management Systems* – para realizar controles avançados durante o processo de simulação. Como exemplo, o autor foi capaz de criar rotinas com base em parâmetros dinâmicos para definir quando, em uma mesma análise, a ventilação natural ou sistemas de condicionamento ativos seriam utilizados (SORGATO, 2015).

Outro ponto digno de nota no trabalho de Sorgato diz respeito à definição de um algoritmo para controle de abertura das janelas, no qual ele estabelece um valor mínimo a partir do qual as janelas são fechadas (de 23°C para baixo), mas não define um limite superior, estabelecendo que as janelas só serão fechadas a partir de uma determinada diferença entre a temperatura externa e interna. O exemplo da Figura 23 ilustra o caso de um usuário medianamente ativo, que fecha a janela ao sentir que o ar externo está ligeiramente mais quente que o interno (1,5°C mais quente). Esse padrão de controle permite a reprodução de comportamentos mais próximos da realidade do que o simples estabelecimento de um cronograma de abertura das janelas, o que pode ser determinante na avaliação de edificações em contextos com grandes amplitudes térmicas e que dependem da Inércia Térmica como estratégia passiva de condicionamento (SORGATO, 2015).

Figura 23 - Critérios para habilitar ventilação natural do usuário com comportamento intermediário. Fonte: (SORGATO, 2015)



Os dados de entrada e saída do *EnergyPlus* consistem em simples arquivos de textos – arquivos IDF –, sendo recomendada a utilização de outros softwares para definir e ler estes dados (U.S.DOE, 2020b). *Ladybug* e *Honeybee* são dois plug-ins de código aberto desenvolvidos para a realização de análises ambientais do edifício, desenvolvidos para o software *Grasshopper*, que por sua vez é um plug-in do software *Rhinoceros* (ROUDSARI; PAK, 2013). O *Ladybug* importa dados de arquivos climático com extensão “.epw” – EnergyPlus Weather Files – para o ambiente virtual do *Grasshopper*, provendo uma variedade de gráficos interativos 3D para tomadas de decisão durante fases iniciais de projeto; enquanto o *Honeybee* conecta o *Grasshopper* a programas de simulação termo energéticas e de radiação solar, como *EnergyPlus*, *Radiance*, *Daysim* e *OpenStudio* (Figura 25).

Além de facilitar a edição de arquivos IDF e leitura dos dados de saída de uma simulação, a natureza algorítmica do *Grasshopper* – que é uma interface de programação visual para construção de algoritmos – permite a realização automatizada de uma série de operações definidas de forma simples, e sem a necessidade do domínio de linguagens de programação (TEDESCHI, 2014, p. 22). Algoritmos consistem em um determinado número de passos para se alcançar um determinado objetivo, compostos basicamente por: um conjunto de dados de entrada; um conjunto de instruções de operações definidas; e uma saída, podendo esta ser um número, uma decisão (sim ou não, verdadeiro ou falso) ou uma geometria (TEDESCHI, 2014, p. 24).

Olivieri et al. (2017) desenvolvem um excelente exemplo de como as capacidades algorítmicas do *Grasshopper* são capazes de auxiliar pesquisas de simulação computacional. O estudo trata de uma análise do desempenho térmico de paredes verdes no verão, mediante a ausência ou adição de camadas de material isolante térmico às paredes, visando identificar o impacto que a variação da espessura do isolamento exerce (Figura 24).

A limitação com a qual os pesquisadores se depararam foi com a ausência inicial de dados suficientes para a realização das simulações energéticas, uma vez que o *EnergyPlus* dispõe de um tipo

Figura 25 - Diagrama ilustrando a integração entre *Ladybug*, *Honeybee* e demais softwares. Fonte: <<https://github.com/ladybug-tools/honeybee-wiki>>. Acesso em: 12 set. 2020.

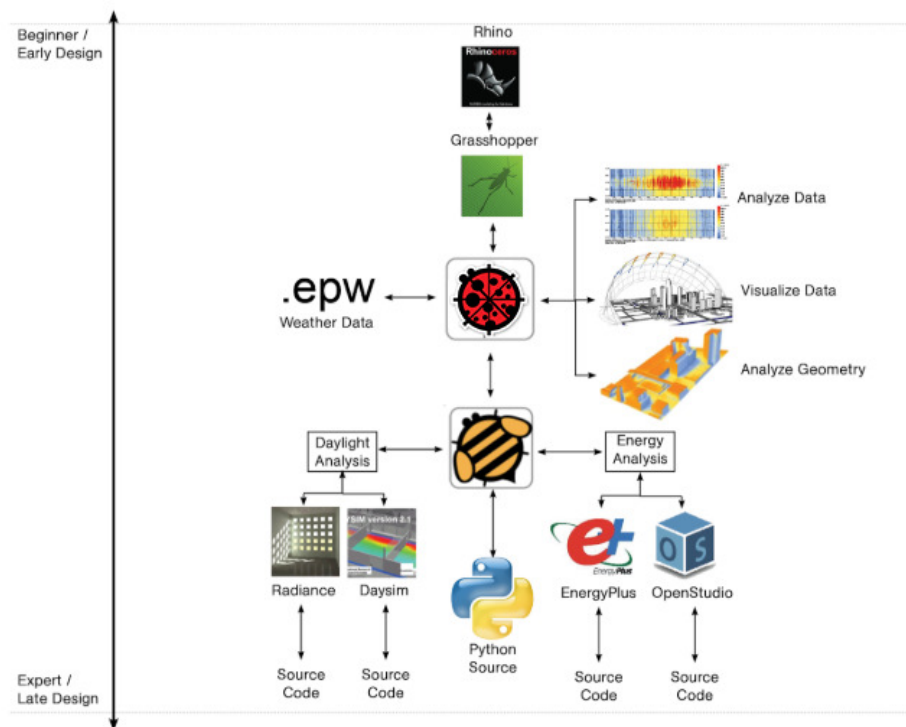
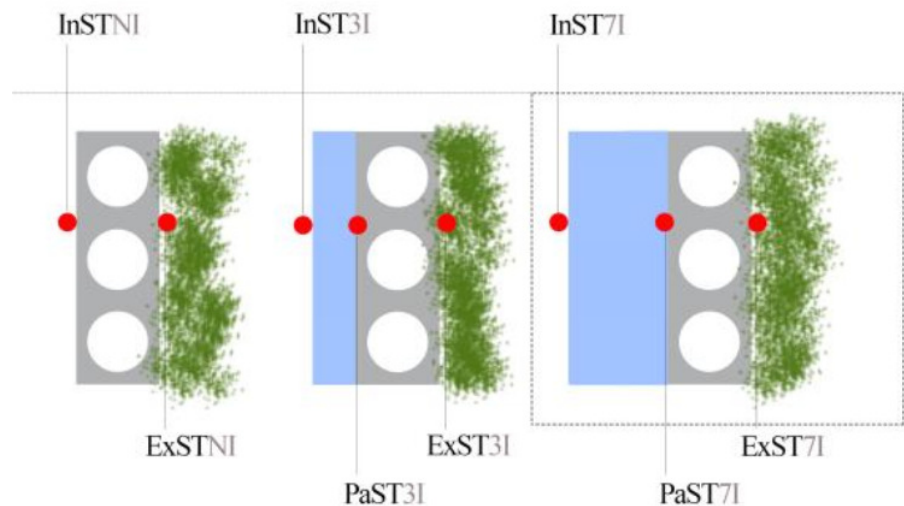
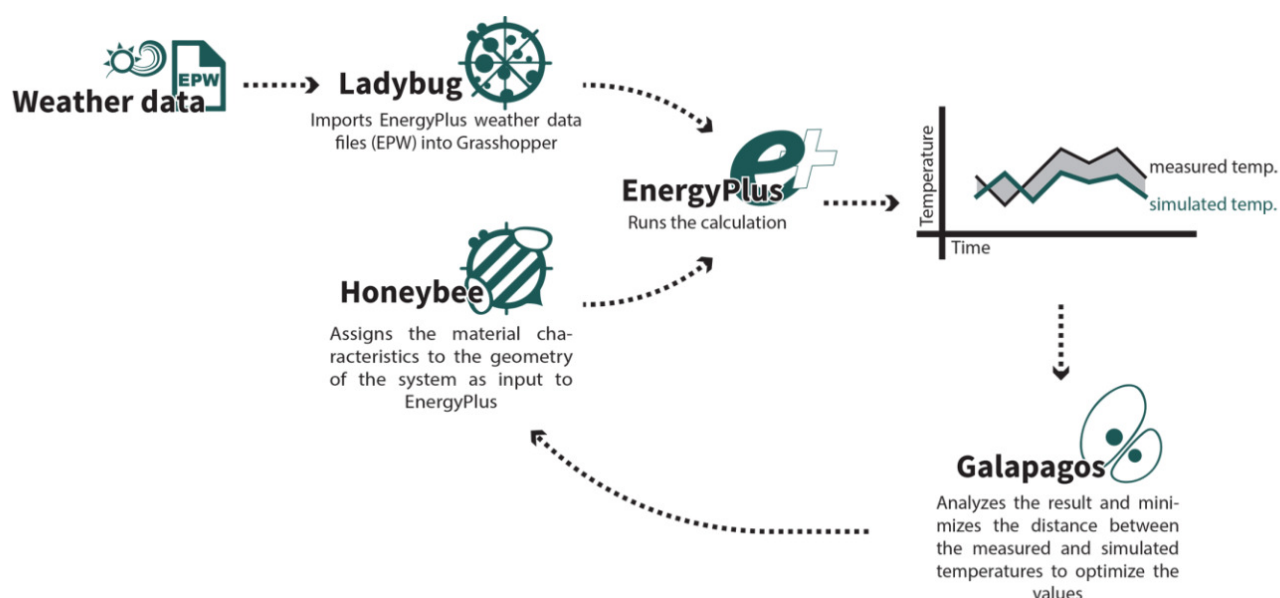


Figura 24 - Seções de paredes verdes sem isolamento, com 3 mm de isolamento e com 7 mm de isolamento (respectivamente da esquerda para a direita). Fonte: (OLIVIERI et al., 2017)



de material específico (*RoofVegetation*) que demanda dados muito específicos e de difícil obtenção – como altura das plantas, índice de área, refletividade e emissividade das folhas, saturação volumétrica da umidade no solo, dentre outros. O estudo realizou apenas 3 experimentos e, a partir dos seus resultados, identificou quais os valores específicos relativos às plantas e características do solo que mais se aproximavam da realidade por meio de um algoritmo de otimização evolutivo do *Grasshopper*, o *Galapagos* (Figura 26). Finalmente, resolvida a aderência dos valores do modelo à realidade, os autores puderam realizar simulações variando as espessuras de isolamento e identificar qual apresentava o melhor desempenho (OLIVIERI et al., 2017).

Figura 26 - Diagrama ilustrando o processo de otimização para encontrar os valores das propriedades térmicas da parede verde. Fonte: (OLIVIERI et al., 2017)



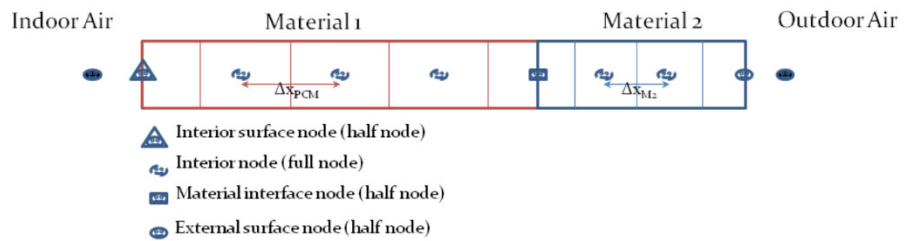
#### 4.3.3. Simulação PCM com o EnergyPlus

A possibilidade de realizar simulações termo energéticas do edifício no *EnergyPlus*, considerando a mudança de fase de materiais que compõem os elementos construtivos, passou a ser possível com a implementação do algoritmo de solução diferencial de condução finita, o *CondFD – Conduction Finite Difference Solution Algorithm* – com a versão 7.1 do software (TABARES-VELASCO et al., 2012).

O algoritmo resolve a condução de calor pelos materiais de forma unidimensional, ao distribuir nós de computação equidistantemente ao longo da espessura de cada camada, de cada

material que compõe um componente construtivo (Figura 27). O número de nós por camada é definido em função número de passos de simulação por hora (*timesteps*), sendo maior o número de nós quanto maior for o número de passos. A cada passo, o algoritmo resolve de forma dinâmica as interações térmicas entre nós subjacentes e dos seus valores no passo atual com relação ao passo anterior. As equações usadas nesse algoritmo se encontram descritos na Documentação de Referência de Engenharia do EnergyPlus (U.S.DOE, 2020a).

Figura 27 - Representação da distribuição dos nós de simulação ao longo das seções de materiais para um modelo Diferencial de Condução Finita. Fonte: (U.S.DOE, 2020a)



Para a simulação da mudança de fase considera-se que, a cada passo da simulação, a entalpia e consequentemente o calor específico do material variam em função da variação de temperatura do nó computado (U.S.DOE, 2020a). Essa variação é descrita pelas equações:

$$h_i = HTF(T_i)$$

$$Cp = \frac{h_{i,nov} - h_{i,ant}}{T_{i,nov} - T_{i,ant}}$$

Onde:

**Cp** = calor específico do material

**h** = entalpia

**T** = temperatura

**HTF** = função da variação de entalpia-temperatura

E os subscritos:

**i** = nó sendo simulado

**nov** = passo atual da simulação

**ant** = passo anterior da simulação

Em resumo, o calor específico do material ( $C_p$ ), em um determinado nó e passo da simulação, é igual à diferença dos valores de entalpia ( $h$ ) do passo atual com o passo anterior naquele nó, dividido pela diferença dos valores de temperatura ( $T$ ) do passo atual com o passo anterior no mesmo nó. Já o valor da entalpia é dado a partir da função **HTF** pela variação de  $T$ .

A função **HTF** é descrita por uma curva, definida como dado de entrada pelo próprio usuário a partir da interpolação linear de pontos de referência, dados pela relação tabular em pares dos valores de temperatura e entalpia. O exemplo da Figura 28, dado pelo próprio Departamento de Energia dos EUA em sua documentação de referência, é obtido a partir de quatro valores de entalpia e suas respectivas temperaturas.

O trabalho de Tabares-Velasco et al. (2012) registra os procedimentos de validação do algoritmo para simulação de PCMs no *EnergyPlus*, baseado no Método Normativo para Teste e Avaliação de Programas de Simulação Computacional Energéticos do Edifício da ASHRAE 140. A correção de alguns erros de rotina no algoritmo levou à versão 8 do software. Como conclusão, os autores destacam alguns pontos para que se obtenha valores de simulação mais consistentes e próximos da realidade:

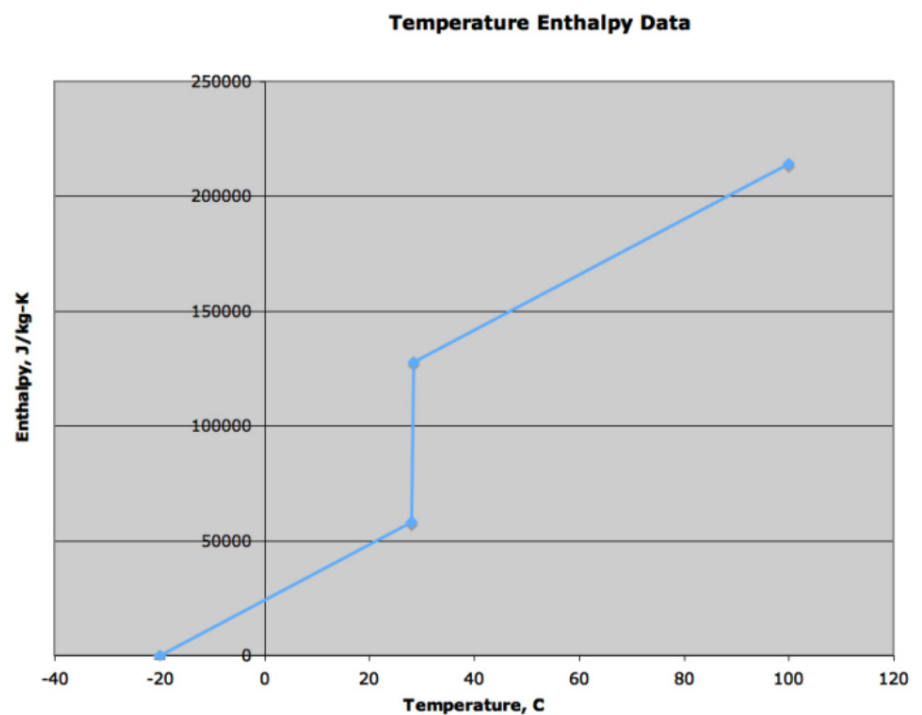


Figura 28 - Gráfico da função entalpia-temperatura com uma única curva. Fonte: (U.S.DOE, 2020c)

- O valor do *timestep* deve ser definido em pelo menos 20, o que equivale a um passo de simulação a cada 3 minutos;
- A precisão do modelo diminui à medida em que o PCM utilizado na simulação apresenta maior histerese;
- CondFD apresenta valores mensais e anuais satisfatórios, mas para análises mais precisas do comportamento horário da performance dos materiais, faz-se necessário uma menor distância nodal de simulação (às custas de maior tempo de processamento).

Como é de se notar, até este ponto não era possível simular o efeito da histerese dos PCMs em simulações com o *EnergyPlus*, embora alguns trabalhos relevantes para a presente dissertação tenham sido realizados desta maneira, como são os casos de Brito et al. e Lei et al. (2017; 2016).

Brito et al. (2017) estudam, a partir de simulações com o *EnergyPlus*, como a variação da capacidade de armazenamento de calor latente (pelo acréscimo da espessura da camada PCM) e variação da temperatura de fusão do PCM são capazes de alterar o nível de desempenho térmico da envoltória de uma mesma edificação, avaliando-a a partir de arquivos climáticos de diferentes Zonas Bioclimáticas Brasileiras. A medida desse desempenho foi aferida com base nas amplitudes diárias da temperatura do ar externo e interno, verificando se atendiam a dois critérios:

- Se a temperatura do ar interna era menor que a externa (com base na NBR 15575);
- E se as temperaturas do ar interior estavam compreendidas no intervalo (fixo) entre 22 e 29°C, correspondendo a uma faixa de conforto inspirada na ASHRAE 55.

Brito et al. realizaram simulações comparando um cômodo com paredes sem PCM e a outras versões do mesmo cômodo com paredes com PCM (Figura 29). A faixa de espessuras da camada PCM estudada foi de 5 a 20 mm, com intervalo de 5 mm; enquanto a faixa de temperaturas de fusão foi de 22 a 34 °C com intervalo de 4°C, derivadas de um PCM original com 22°C (Figura 30).

Os valores das propriedades do PCM utilizados por Brito et al. partem de valores iniciais obtidos no já mencionado estudo experimental de Kuznik et al. (2008), alterando-os por valores

hipotéticos para fins de simulação e comparação de resultados. Algumas críticas a serem levantadas dizem respeito ao tratamento das paredes, que no estudo experimental de Kuznik et al. consistiam em partições internas isoladas termicamente por uma câmara, enquanto no estudo de Brito et al. essas vedações foram expostas à radiação solar direta, como se fossem as envoltórias externas da edificação (BRITO et al., 2017).

Apesar de limitado em termos de amostragem de arquivos climáticos (restringindo-se a um arquivo climático por Zona Bioclimática), esse estudo deixa evidente como a maior ou menor capacidade de armazenamento de calor latente do PCM resulta em um maior ou menor incremento da Inércia Térmica do sistema construtivo; enquanto a variação do ponto de fusão resulta em uma maior ou menor eficácia do material com relação a uma determinada faixa de temperatura climática (BRITO et al., 2017).

Figura 29 (superior) -  
Seção das paredes com e  
sem PCM.  
Fonte: (KUZNIK et al.,  
2008 appud BRITO et al.,  
2017)

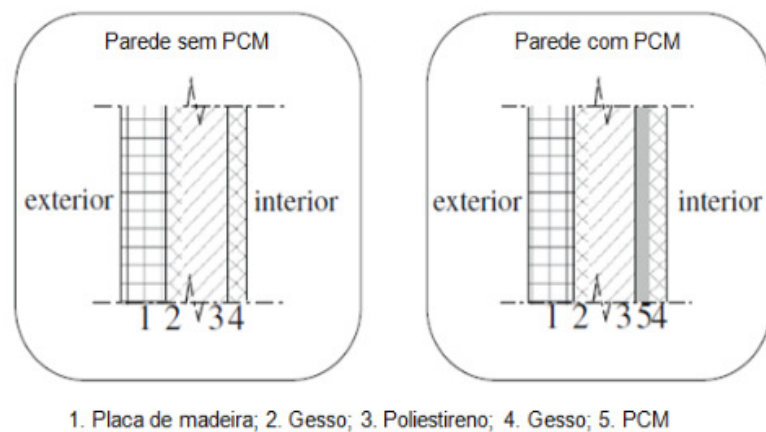
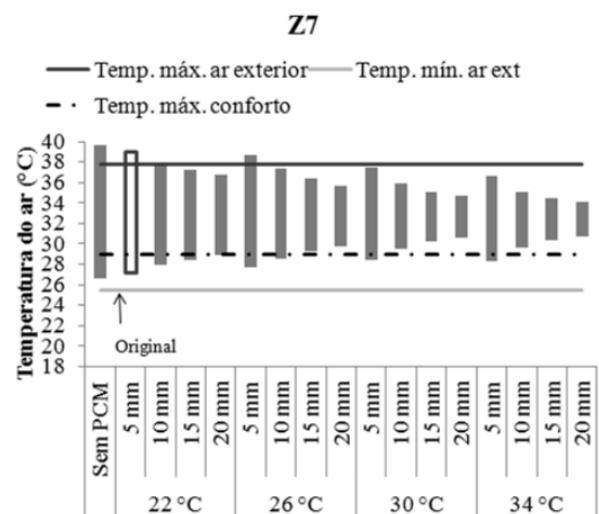
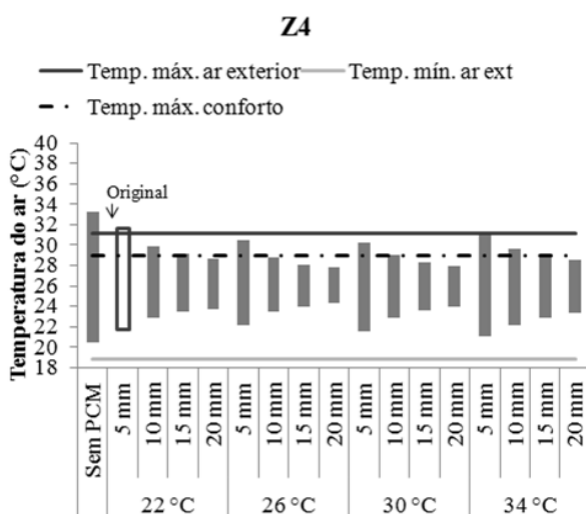
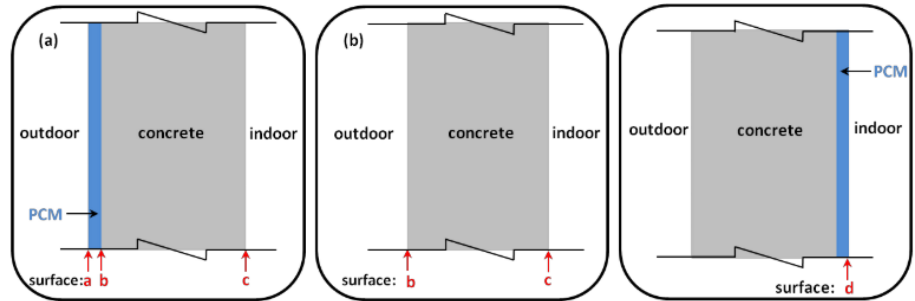


Figura 30 (inferior) -  
Intervalos de temperatura  
do ar interno resultantes  
de simulação  
computacional, com  
vedações sem e com PCMs  
de diversas espessuras e  
pontos de fusão, para as  
cidades de Brasília (Z4) e  
Cuiabá (Z7). Fonte:  
(BRITO et al., 2017)



Diferente do estudo de Brito et al. no qual a camada de PCM foi aplicada em apenas uma posição, mais próxima do interior do cômodo estudado (Figura 29), Lei et al. (2016) estudaram também a diferença na implementação da camada PCM nas superfícies exteriores e interiores das vedações (Figura 31).

Figura 31 - Seção das paredes com PCM na face exterior, sem PCM e com PCM na face interior.  
Fonte: (LEI et al., 2016)



O referido estudo foi realizado com o arquivo climático da cidade-estado de Singapura, situada no sudeste asiático, cujas amplitudes diárias variam entre 5 e 7°C. O ambiente simulado, com 3 x 3 x 2,8 metros, é definido por três versões de um envelope de concreto com 150 mm de espessura: sem PCM, com PCM no exterior e com PCM no interior (Figura 31). A caixa de concreto simula um ambiente completamente fechado e condicionado artificialmente para manter a temperatura interna constante a 25°C (LEI et al., 2016).

Diferentemente de Brito et al. que utilizaram as temperaturas do ar externo e interno e uma faixa de conforto como referência do desempenho, aqui foi avaliado o ganho de calor por todas as superfícies da envoltória ( $Q$ ) e a taxa de redução desse ganho ( $\eta$ ), definida pela equação:

$$\eta = \left(1 - \frac{Q_{PCM}}{Q_{SEM\_PCM}}\right) \cdot 100\%$$

Onde:

$Q_{PCM}$  = Ganhos de calor pela envoltória com PCM

$Q_{SEM\_PCM}$  = Ganhos de calor pela envoltória sem PCM

Além de variar a orientação da disposição do PCM como fator de análise, variações da espessura e temperaturas de fusão também foram consideradas: a faixa de espessuras da camada PCM estudada foi de 3 a 20 mm, com intervalo de 1 mm; enquanto a faixa

de temperaturas de fusão foi de 22 a 32 °C com intervalo de 1°C, derivadas de um PCM original com 28°C (Figura 32) (LEI et al., 2016).

Nas condições analisadas, o estudo de Singapura indicou: que PCMs são capazes de reduzir ganhos de calor pela envoltória do edifício ao longo do ano inteiro entre 21-32%; que existe uma faixa de temperatura de mudança de fase ideal para esse contexto climático, que muda ligeiramente a depender da orientação externa ou interna da disposição do PCM; e que uma redução maior do ganho de calor é observado quando PCMs são aplicados na face externa da envoltória (LEI et al., 2016).

A simulação do efeito da histerese dos PCMs no *EnergyPlus* passa efetivamente a ser possível com a sua versão 8.9 (GOIA et al., 2018), ao incorporar não uma, mais duas curvas da função entalpia por temperatura: uma para o processo de fusão do material e outra para o processo de cristalização (Figura 33).

Ao invés de descrever as curvas em termos de valores de entalpia e suas respectivas temperaturas de referência, a simulação de histerese do *EnergyPlus* possui como dados de entrada, para cada uma das duas curvas: o pico da curva em °C; a diferença do início e do final da mudança de fase com relação ao pico; e a entalpia envolvida na mudança de fase (U.S.DOE, 2020a, c). Os dados de entrada correspondem aos valores obtidos por meio de análises DSC, representadas por curvas de ajuste polinomial geradas a partir da teoria de mudança de fase de Ginzburg-Landau (GOIA et al., 2018).

Figura 32 - Gráficos de superfície da taxa de redução do ganho de calor ( $\eta$ ) em função dos fatores espessura (mm) e temperatura de mudança de fase (°C) – à esquerda a parede com PCM na face externa e à direita a parede com PCM na face interna.  
Fonte: (LEI et al., 2016)

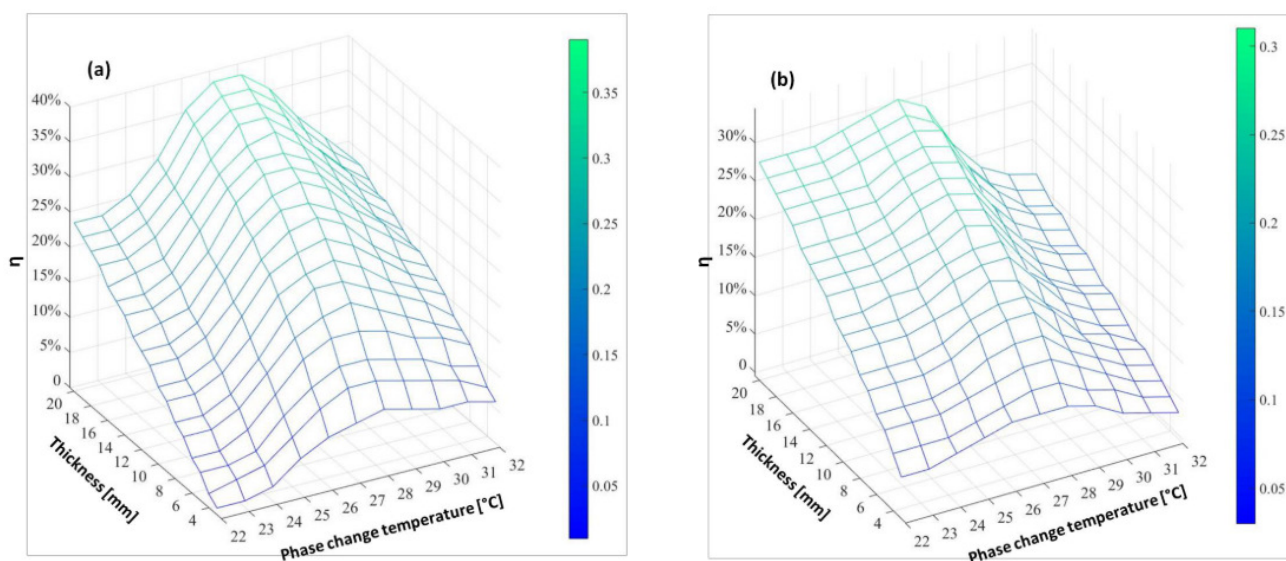
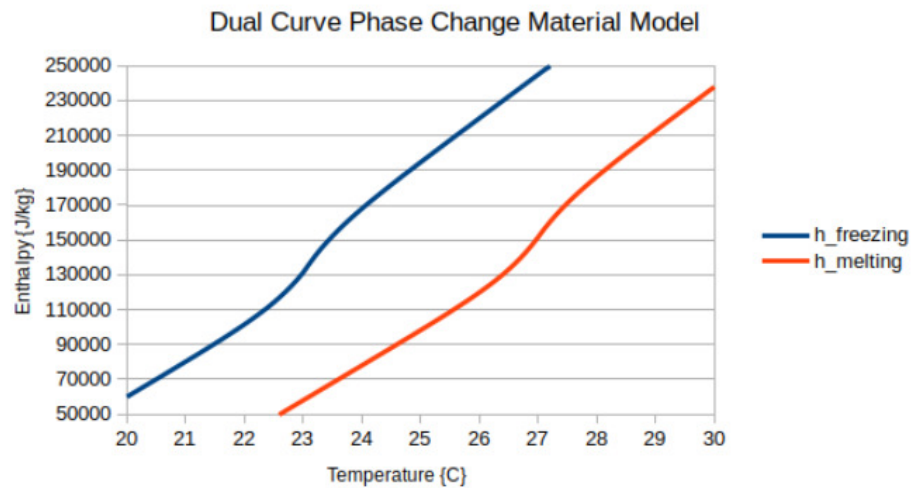


Figura 33 - Gráfico da função entalpia-temperatura com duas curvas, para modelos PCM com histerese. Fonte: (U.S.DOE, 2020a)



Uma questão a levar em consideração com a utilização de duas curvas de entalpia é que o cálculo da variação do calor específico passa a ter que considerar não apenas a temperatura de um nó no passo atual e anterior, como também o estado do material em ambos os passos (U.S.DOE, 2020a). Assim, a equação para o cálculo do calor específico  $C_p$  passa a ser:

$$C_p = f(T_{i,nov}, T_{i,ant}, EstadoFase_{i,nov}, EstadoFase_{i,ant})$$

Onde:

**EstadoFase** = corresponde ao estado do material, se no sólido, líquido, ou em transição de fase em um determinado passo de simulação

**f** = função para determinação de  $C_p$

A função **f** não recebe qualquer detalhamento na documentação de Engenharia do EnergyPlus (U.S.DOE, 2020a). Em Goia et al. (2018) há uma breve menção a dois métodos para determinação de  $C_p$ : o *curve switch* e o *curve track*. O primeiro método é usado para transições parciais de fase; enquanto o segundo é utilizado para transformações completas do material.

O referido trabalho de Goia et al. consiste em um estudo de validação do algoritmo de simulação da histerese dos PCMs no EnergyPlus para componentes com múltiplas camadas, que resultou na sua implementação no EnergyPlus 8.9. Mediante uma validação cruzada com dados experimentais, os autores chegaram à conclusão de que se obteve um algoritmo mais robusto, confiável e

computacionalmente eficiente que os seus antecessores. Entretanto, os casos com processos de derretimento/solidificação incompletos do PCM apresentaram resultados questionáveis (GOIA et al., 2018).

A falta de clareza sobre as equações que envolvem a função  $f$  para determinação de  $C_p$  no *EnergyPlus* é criticada por Zastawna-Rumin et al. (2020). Os autores lançam uma proposta de algoritmo para o *EnergyPlus*, que cria uma curva intermediária para simular as mudanças de fase incompletas, deixando claras as equações e condições utilizadas para simular a variação de  $C_p$  (Figuras 34 e 35). Como resultado, os autores obtiveram diferenças de menos de 1% entre os valores de simulação e experimentos (ZASTAWNA-RUMIN et al., 2020).

Até o presente momento, em sua versão 9.3, o *EnergyPlus* não implementou mudanças em seu algoritmo de simulação de mudança de fase com relação à versão 9.2, que foi avaliada por Zastawna-Rumin et al. Entretanto, a simulação da histerese do *EnergyPlus* segue superior em comparação aos algoritmos convencionais, que levam em conta apenas uma única curva de transição de fase para ambas fusão e cristalização.

Figura 34 (superior) - Representação do processo de histerese da mudança de fase pela função temperatura-entropia. Fonte: (ZASTAWNA-RUMIN et al., 2020)

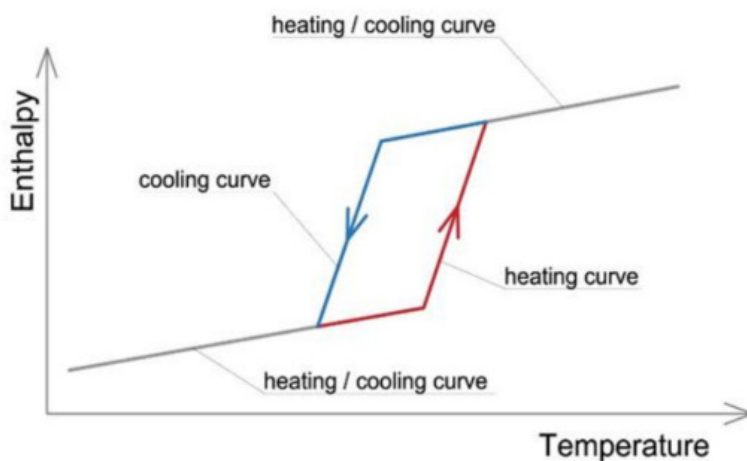
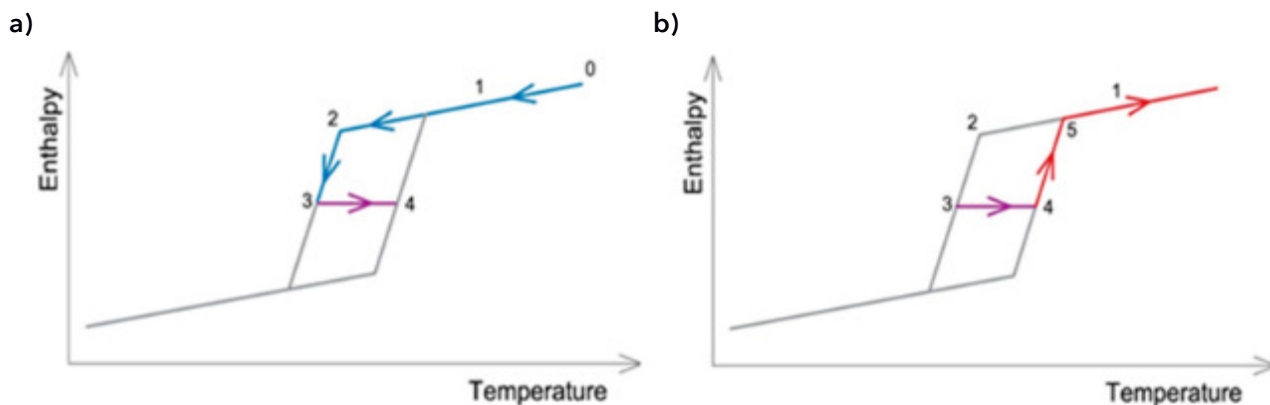


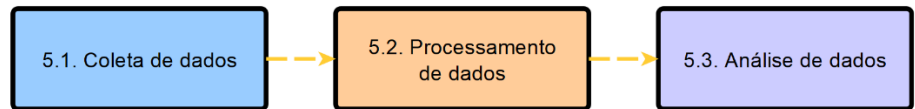
Figura 35 (inferior) - Curva de transição intermediária entre a curva de solidificação (a) e a curva de derretimento (b). Fonte: (ZASTAWNA-RUMIN et al., 2020)



## **5. Procedimientos teórico-metodológicos**

Esta pesquisa possui natureza exploratória e abordagem quantitativa, cujos procedimentos metodológicos constituem a revisão de literatura, simulação computacional e coleta e análise sistemática de dados.

Os procedimentos estão organizados em três etapas:



A revisão de literatura fundamenta a escolha dos parâmetros de simulação computacional e a formulação de hipóteses para a análise dos dados; a simulação computacional é o meio pelo qual os dados são processados, utilizando-se a integração de diversos softwares de modelagem tridimensional, definição de algoritmos e análise de eficiência energética (integração descrita no *Item 5.2 – Figura 37*); e as ferramentas estatísticas são utilizadas para as análises dos dados processados.

Para uma melhor orientação no decorrer da leitura, o *Apêndice A* apresenta um Fluxograma Metodológico descrevendo o percurso dos dados no decorrer dos procedimentos metodológicos, bem como os *Itens* da dissertação associados aos mesmos.

## 5.1. Coleta e filtragem de dados

Os dados que servem de base para as etapas subsequentes desta pesquisa são, essencialmente, informações climáticas oriundas de estações meteorológicas de municípios dos estados da região Nordeste e Minas Gerais.

Os principais dados consistem em arquivos climáticos EPW disponibilizados no site do LABEEE (2018a). Suas informações, expressas na forma de dados horários, são utilizadas para realizar as simulações computacionais.

Um segundo conjunto de dados se encontra expresso de forma sumária em uma tabela, apresentando médias anuais de temperatura e médias anuais de amplitude média diária de cada município (RORIZ, 2013). Estes são utilizados tão somente a título de comparação com os dados principais, evidenciando (ou não) como diferentes fontes podem apresentar resultados diferentes.

O número inicial de arquivos climáticos desta pesquisa é de 326; enquanto a quantidade inicial de municípios dos estados do Nordeste e Minas Gerais contidas na tabela de Roriz é de 749.

### 5.1.1. Filtro 1: Seleção de Arquivos Climáticos

Conforme apresentado no *Item 4.3.2*, os arquivos climáticos disponibilizados no site do LABEEE (2018a) são de três tipos: INMET, TRY e TMY.

A primeira filtragem de dados consiste na seleção de arquivos dos municípios que apresentam mais de um tipo de arquivo climático, selecionando-se prioritariamente os arquivos TMY mais atualizados (os mais atualizados são identificados como “\_TMYx.2003-2017”). O critério foi estabelecido com base em García (2019).

### 5.1.2. Filtro 2: Geoprocessamento

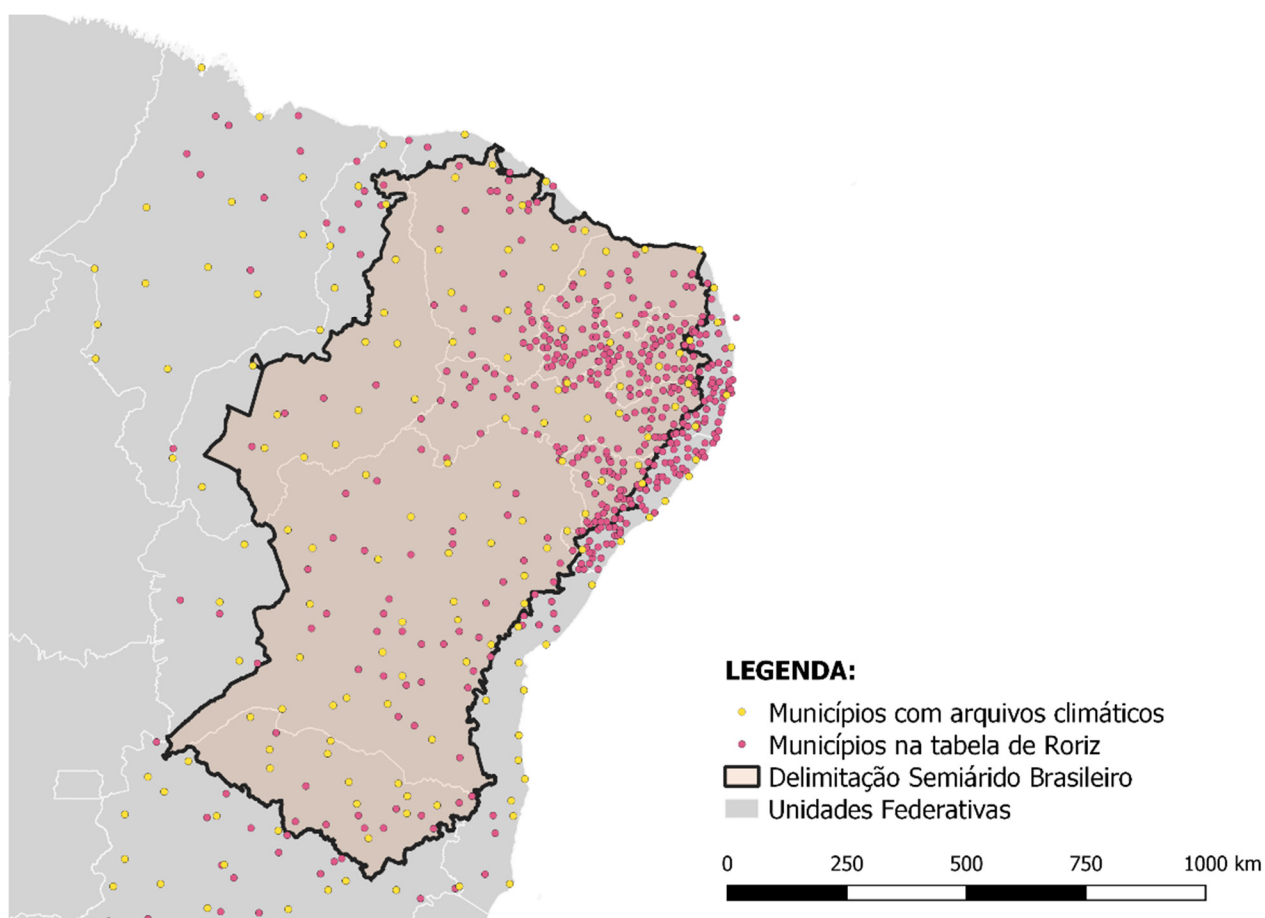
A segunda filtragem de dados visa selecionar apenas os dados climáticos correspondentes aos municípios geograficamente contidos na delimitação poligonal do Semiárido Brasileiro, estabelecida pelo INSA (2017).

Ambos arquivos climáticos e dados de Roriz possuem as coordenadas geográficas das suas estações. Estas foram utilizadas

Figura 36 - Mapa com delimitação do Semiárido Brasileiro e localizações de estações meteorológicas.  
Fonte: Imagem editada pelo autor a partir de INSA (2017), LABEEE (2018a) e Roriz (2013).

para definir pontos georreferenciados, que foram cruzados com o *shapefile*<sup>6</sup> da delimitação do semiárido disponibilizado pelo INSA, utilizando-se o software *QGIS 3.6.1* (Figura 36).

Após a filtragem restaram 86 arquivos climáticos, sendo 59 do tipo INMET e 27 do tipo TMY. A lista de município de Roriz após a filtragem contém 391 municípios. As listas de ambas as fontes de dados filtradas de encontra no *Apêndice B*.



<sup>6</sup>Shapefiles: formato de arquivo contendo dados geoespaciais em forma de vetor.

## 5.2. Processamento de dados

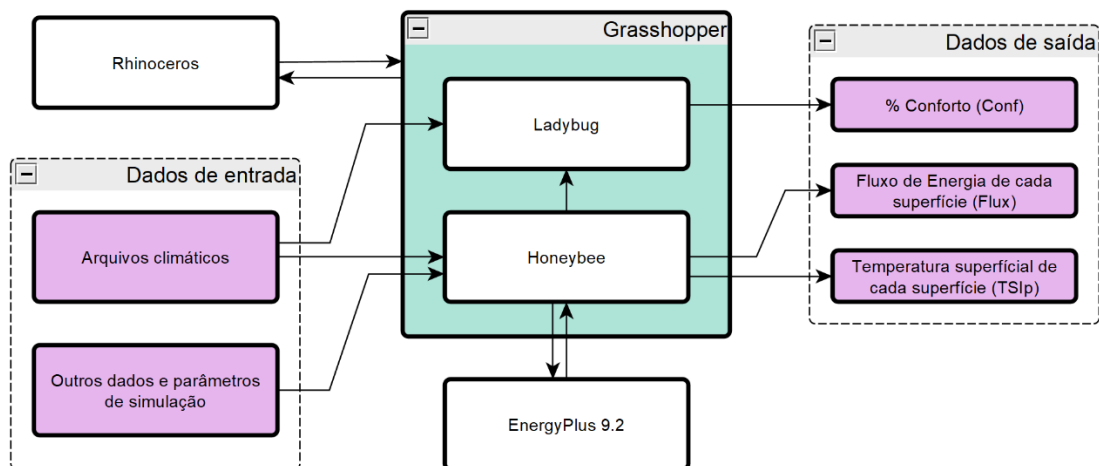
Como foi dito anteriormente, o processamento dos dados é realizado nesta pesquisa a partir da integração de uma série de softwares, cada qual com funções específicas e se relacionando entre si a partir do intercâmbio de determinados dados (Figura 37).

O *Rhinoceros 5.14* é uma ferramenta de modelagem tridimensional, que constitui a base para a definição de informações geométricas. Mais especificamente, com o fim de realizar as simulações energéticas, este programa é a base para a definição das superfícies que delimitam geometricamente as Zonas Térmicas (ver *Item 4.3.2*). A versão 9.2 do *EnergyPlus* foi utilizada como base para as análises energéticas.

Já o *Grasshopper* é um plug-in para o *Rhinoceros* que funciona como interface de programação visual para construção de algoritmos, permitindo o estabelecimento de parâmetros e automatizando comandos para geração dinâmica das superfícies no *Rhinoceros*. Ao mesmo tempo, este integra ferramentas de simulação computacionais, comportando-se como um ambiente digital para intercambiar dados entre diferentes softwares e manipula-los de forma automatizada. Nesta pesquisa, todos os dados climáticos e demais informações necessárias à realização de simulações energéticas no *EnergyPlus* passam necessariamente pelo *Grasshopper*.

*Ladybug* e *Honeybee* são dois plug-ins para o *Grasshopper* necessários à leitura de dados de arquivos climáticos e cálculo de conforto; e ao intercâmbio com o *EnergyPlus*, respectivamente, conforme explicado no *Item 4.3.2*.

Figura 37 - Integração entre programas utilizados no processamento dos dados. Fonte: Produzida pelo autor



A Zona Térmica é a entrada que carrega a maior parte das informações necessárias à simulação energética, definindo não apenas os limites geométricos de um ambiente, mas comportando informações sobre materialidade e propriedades térmicas das envoltórias, parâmetros de ventilação (padrão de abertura de janelas) e cargas térmicas internas. É na definição da composição das vedações externas dessas zonas que se expressam os fatores de implementação do PCM do primeiro Objetivo Específico de pesquisa (*Capítulo 3*), mais tarde identificadas como variáveis categóricas nas análises estatísticas (*Item 5.3*).

Os fatores variáveis para construção das Zonas Térmicas para simulação energética são quatro:

- Presença ou ausência de PCM nas paredes externas da zona;
- Disposição externa ou interna da camada PCM nas paredes externas da zona (denominado aqui como “Orientação do PCM”);
- Espessura da camada PCM na composição das paredes externas da zona;
- Variação da temperatura de fusão do PCM utilizado.

A camada PCM na composição das superfícies que representam as paredes externas da Zona Térmica representa uma placa teórica uniforme de um determinado material de mudança de fase. Normalmente, conforme explicado no referencial teórico, o PCM precisa ser encapsulado por um segundo material para evitar que este vaze durante a mudança de fase para o estado líquido. Entretanto, o algoritmo de condução térmica do *EnergyPlus* não comporta a simulação de materiais muito finos e de alta condutividade, recomendando-se que suas resistências térmicas sejam desconsideradas, mas que se mantenham seus valores de absorvância e emissividade caso sejam a primeira ou última camada do componente construtivo (U.S.DOE, 2020b). O Octadecano, com temperatura de fusão de 27 °C, foi o material de referência utilizado para gerar outros PCMs hipotéticos, alterando-se apenas a sua temperatura de mudança de fase. Os critérios para seleção desse material são explicados no *Item 5.2.1.2.1*.

Com relação aos dados de saída do processamento de dados, observam-se dois tipos de valores: os que dizem respeito ao desempenho térmico das paredes externas e os que expressam as condições de conforto térmico. Após uma série de cálculos que comparam valores das zonas com e sem PCM, as variáveis resultantes do processamento de dados são seis:

- Incremento do Conforto;
- Decremento Percentual do Ganho de Calor;
- Decremento da Média Anual da Temperatura Superficial Interna;
- Decremento da Amplitude diária da Temperatura Superficial Interna;
- Decremento do Pico diário da Temperatura Superficial Interna;
- e Incremento do Atraso Térmico.

Em termos, gerais a introdução acima e seus diagramas sintetizam a ideia geral do Processamento dos Dados, em termos de inter-relação entre os diferentes softwares, onde se manifestam as variáveis de pesquisa e quais as saídas utilizadas na etapa metodológica seguinte. Os subitens subsequentes objetivam registrar os dados de entrada utilizados nas simulações, suas fontes e as equações utilizadas para transformação dos dados, de forma a possibilitar a replicação dos procedimentos para fins de revisão e adaptação em pesquisas futuras. No *Apêndice C* se encontra o algoritmo completo do *Grasshopper* utilizado para o processamento dos dados climáticos.

### **5.2.1. Simulação Energética**

#### **5.2.1.1. Zonas térmicas**

Conforme a breve descrição dada anteriormente de Zona Térmica, é na sua construção que se faz possível incorporar diversos parâmetros e propriedades que servem de base para a análise do comportamento térmico de um dado ambiente. Nesta pesquisa, algumas destas informações foram consideradas constantes, como a geometria de referência e as propriedades térmicas de alguns materiais; enquanto outras foram consideradas variáveis, como a presença ou não do

PCM, a orientação externa ou interna, espessura da camada, e a sua temperatura de fusão.

Como se pretende estudar as diferenças no desempenho entre diferentes arranjos de paredes externas, optou-se por criar uma Zona Térmica independente para cada possibilidade de arranjo de parede externa que, conforme será visto mais à frente (*Item 5.2.1.1.2*), totalizam 57 Zonas Térmicas por município. Se cada Zona Térmica fosse analisada individualmente, seriam necessárias pelo menos 3876 (57 x 68) simulações, o que demandaria bastante tempo de pesquisa em trabalho manual. Por este motivo, decidiu-se utilizar o poder de automatização dos algoritmos do *Grashopper* para gerar automaticamente as 57 Zonas Térmicas de cada município em um mesmo arquivo IDF de simulação.

Apesar de estarem em um mesmo ambiente geométrico, as zonas estão a uma distância de 100 metros uma das outras (Figura 42), evitando que os elementos de sombreamento de uma interfiram sobre as demais (*Item 5.2.1.1.3*).

Os subitens seguintes tratam dos dados de entrada e das fontes utilizadas na construção das Zonas Térmicas.

#### **5.2.1.1.1. A referência geométrica / o objeto arquitetônico**

Como referência para a definição geométrica das superfícies que compõem as Zonas Térmicas, foram utilizadas as dimensões de um dormitório de uma planta tipo de um projeto habitacional multifamiliar de interesse social. O intuito na escolha desse gênero de habitação se encontra no potencial de replicação do mesmo, permitindo que potenciais benefícios no condicionamento passivo alcançados com a implementação de PCMs às paredes possam contemplar uma parcela numerosa de pessoas. Em especial, seriam beneficiadas as pessoas de baixa renda, que são as que mais dependem de sistemas passivos para obtenção do conforto térmico em suas habitações.

O projeto foi cedido pela CEHAP – Companhia Estadual de Habitação Popular da Paraíba – intitulado Condomínio Residencial Calêndola. Apesar de projetado especificamente para João Pessoa, por se tratar de uma iniciativa do governo estadual, existe a possibilidade de replicação do projeto (com algumas adaptações)

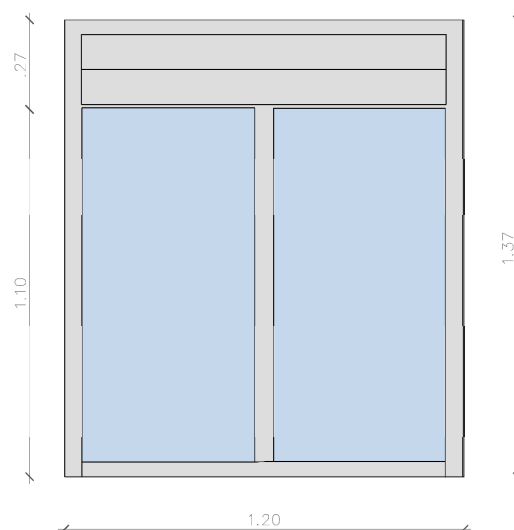
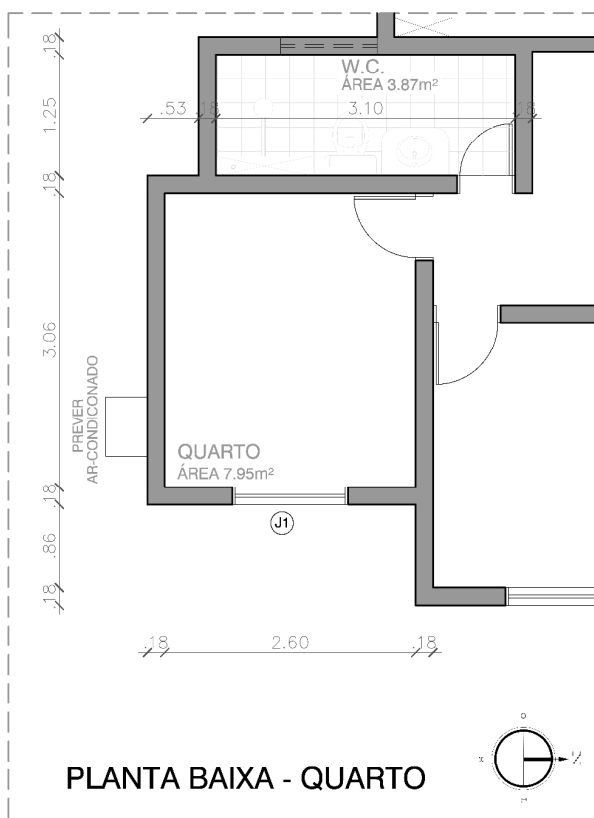
para outras regiões do estado. O fator preponderante em sua escolha se encontra no fato das edificações do condomínio possuírem múltiplos pavimento, possibilitando a seleção de um cômodo cuja superfícies externas sejam apenas paredes – ou seja, cujos piso, teto e demais superfícies verticais façam contato apenas com outros ambientes internos.

O quarto usado como referência possui uma planta retangular com espaço interno de 7,956 m<sup>2</sup> e pé direito de 2,60 m (Figura 38). Suas faces externas são compostas por paredes de bloco de concreto + acabamento, totalizando uma espessura de 0,18 m. A maior delas possui 3,06 m (fachada sul), a segunda 2,60 m (fachada leste) e uma terceira face, oposta à última, constitui uma pequena saliência além do banheiro com 0,53 m. Sua única janela se encontra originalmente voltada para a fachada leste, com peitoril de 0,70 m, largura de 1,20 m, folhas de correr em vidro com 1,10 m de altura e bandeira superior para ventilação com 0,27 m de altura (Figura 39).

Para a pesquisa, o principal aproveitamento do projeto se dá nos aspectos dimensionais de sua geometria, tendo-se realizado as seguintes alterações:

Figura 38 (esquerda) - Planta baixa do quarto utilizado como referência nas simulações computacionais (cotas em m). Fonte: Editado pelo autor a partir do acervo da CEHAP-PB

Figura 39 (direita) - Elevação da janela (J1) na fachada leste (cotas em m). Fonte: Editado pelo autor a partir do acervo da CEHAP-PB



- As alvenarias tiveram os blocos de concreto substituídos por blocos cerâmicos de 6 furos, com 9x14x24 cm e argamassa interna e externa, visando refletir um material utilizado mais popularmente também na construção informal;
- A janela teve sua bandeira superior removida, de forma a possibilitar a interrupção da ventilação pela esquadria em determinados momentos do dia (Figura 40);
- Duas orientações solares foram adotadas, rotacionando-se o quarto para as posições Sudoeste e Nordeste, de forma que as janelas ficassem voltadas para as fachadas Sul e Norte respectivamente e que a maior parede externa (a com 3,60m) estivesse voltada para as fachadas Oeste e Leste (Figura 41).

Por ser um cômodo de esquina, apenas as duas orientações solares acima foram utilizadas para as simulações. Cada uma possibilita a análise de uma situação mais crítica termicamente (poente com fachada Sul exposta à radiação direta do verão) e outra menos crítica (nascente com fachada Norte sombreada durante o verão). A informação relativa à orientação solar do ambiente analisado não é definida na construção das Zonas Térmicas, mas como um dos demais dados de entrada de simulação a serem tratados no *Item 5.2.1.2.*

Figura 40 - Visão frontal (esquerda) e posterior (direita) do croqui perspectivo do quarto analisado – em amarelo, as vedações externas; em cinza, as superfícies adiabáticas correspondentes às vedações internas; em azul, a esquadria; e em roxo, os elementos de sombreamento (contexto da simulação). Fonte: Produzida pelo autor

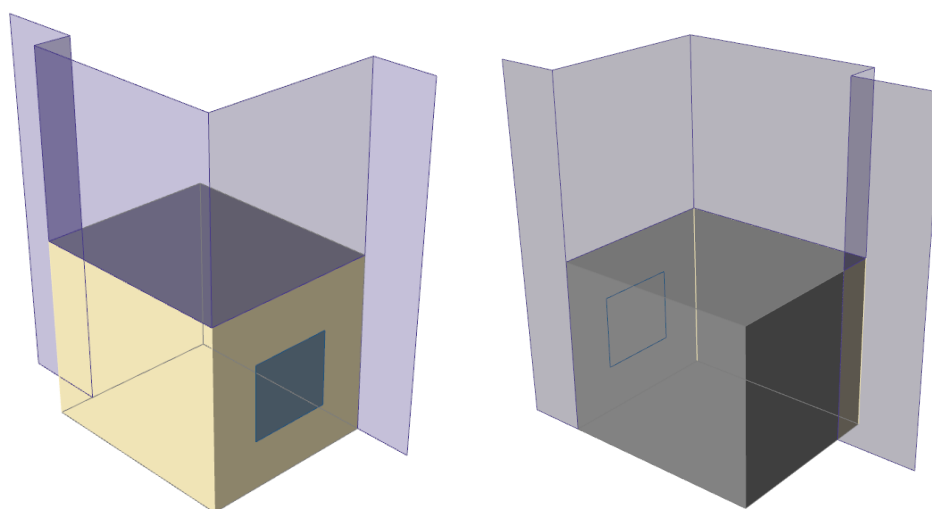
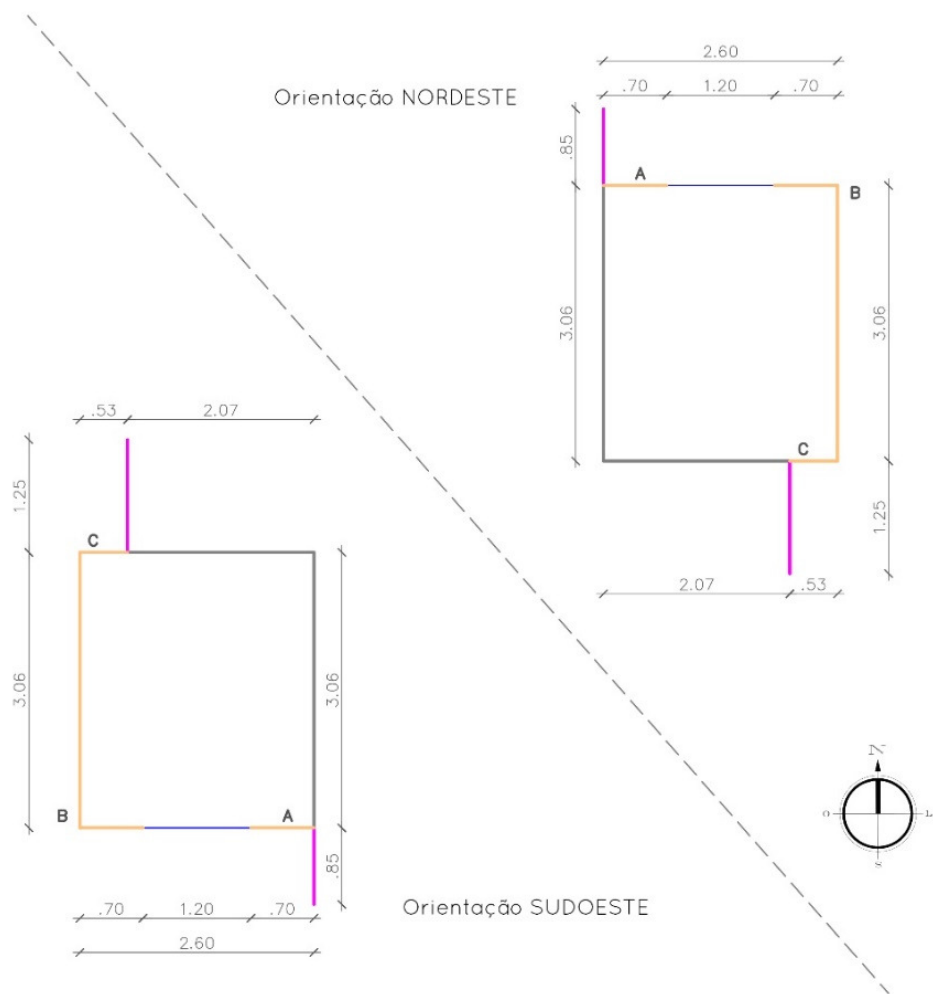


Figura 41 - Planta baixa das superfícies que delimitam a Zona Térmica do quarto nas orientações sudoeste e nordeste – destacadas em amarelo estão os três segmentos de paredes externas, marcados pelas letras A, B e C. Fonte: Produzida pelo autor



#### 5.2.1.1.2. As variáveis e a multiplicação das Zonas Térmicas

As variáveis relativas à construção da Zona Térmica são aplicadas na definição dos componentes construtivos correspondentes às paredes externas do quarto definido no *Item* anterior. Todas dizem respeito aos fatores de implementação dos PCMs citados na introdução do *Item* 5.2.

A ideia de se testar situações de paredes com e sem PCM visa permitir a comparação entre os diversos arranjos a partir de um único ponto de referência (a parede simples). Todos os dados de saída da simulação energética e do cálculo de conforto são posteriormente transformados para permitir análises comparativas (*Item* 5.2.3). O uso de uma parede simples como referência tem por fonte os métodos de pesquisa por simulação computacional utilizados por Brito et al. e Lei et al. (2017; 2016).

A exploração da possibilidade entre implementar o PCM na face interior ou exterior das paredes tem por referência Lei et al. (2016) e as pesquisas experimentais de Kosny e Yarbrough (2008).

Quanto à espessura da camada PCM, Brito et al. estudam a faixa de 5 a 20 mm intervalada de 5 em 5 mm, enquanto Lei et al. estudam a faixa de 3 a 20 mm intervalada de 1 em 1 mm. Como Lei et al. realizam os estudos com apenas um arquivo climático, optou-se por seguir Brito et al., com apenas 4 espessuras analisadas – 5, 10, 15 e 20 mm – reduzindo a quantidade de Zonas Térmicas por arquivo IDF.

Quanto à temperatura de fusão do PCM, ambos Brito et al. e Lei et al. partem de um material de referência, com uma determinada temperatura original, que é modificada numericamente para abranger outras faixas de temperatura. O PCM original de Brito et al. possui temperatura de fusão de 22 °C, enquanto o de Lei et al. é de 28 °C. Os primeiros estudam a faixa de 22 a 34 °C com intervalo de 4 °C, enquanto os segundos estudam a faixa de 22 a 32 °C com intervalo de 1 °C. Conforme será apresentado mais à frente (*Item 5.2.1.2.1*), o PCM de referência escolhido para a presente pesquisa se aproxima do de Lei et al.: o Octadecano com temperatura de fusão de 27 °C. Optou-se por um intervalo intermediário de 2 °C, de forma a aumentar a quantidade de situações analisadas com relação à Brito et al.

Optou-se inicialmente por uma faixa de análise de 23 °C a 31 °C de temperatura de fusão, tomada com base nos estudos preliminares do autor (SOUZA et al., 2019) e na relação equidistante dessas temperaturas com a temperatura de fusão do Octadecano. Entretanto, algumas simulações preliminares demonstraram que os maiores valores em termos de melhoria das condições de conforto tendiam a se concentrar em temperatura de fusão abaixo de 23 °C. Dessa forma, 7 temperaturas de fusão foram analisadas: 19, 21, 23, 25, 27, 29 e 31 °C.

A geometria de referência da Zona Térmica foi replicada em forma de malha, espaçada a uma distância de 100 m, com suas colunas correspondendo à espessura da camada PCM (em mm) – orientação externa (E) para a esquerda e interna (I) para a direita – e as linhas correspondendo às temperaturas de fusão (Figura 42). Na coluna central da malha se encontra uma única Zona Térmica com a parede simples sem PCM. Estas totalizam 57 zonas  $[1+(2 \times 4 \times 7)]$ .

As configurações correspondentes a cada orientação, espessura e temperatura de fusão da camada PCM foram assinaladas às suas Zonas Térmicas correspondentes. Já as demais informações, de caráter constante, foram assinaladas igualmente a todas as zonas.

### 5.2.1.1.3. As constantes

Nesta pesquisa, as constantes se referem às informações comuns a todas as 57 Zonas Térmicas definidas no Item anterior. Suas informações foram estabelecidas de forma a simular ao máximo as condições de um quarto na vida real, com a materialidade de seus elementos construtivos, controle de ventilação natural, cargas térmicas e cronograma de atividades. Vale ressaltar, entretanto, que se tratam de simplificações da realidade, muitas vezes tomadas de forma a viabilizar cálculos, generalizar situações recorrentes e possibilitar o isolamento da influência de certas variáveis na pesquisa.

Figura 42 - Malha da distribuição das Zonas Térmicas replicadas em função dos fatores de implementação do PCM às paredes. Fonte: produzida pelo autor

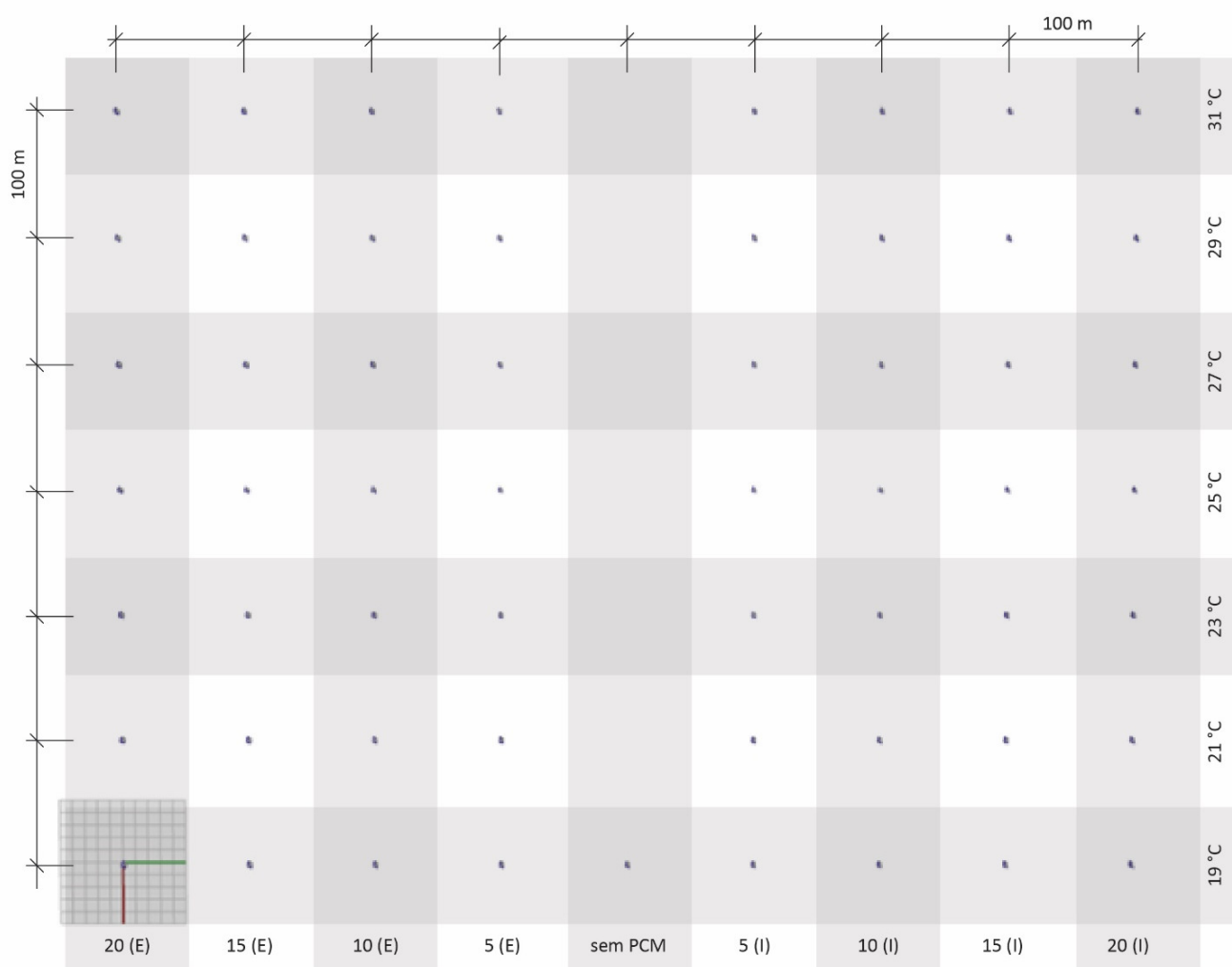


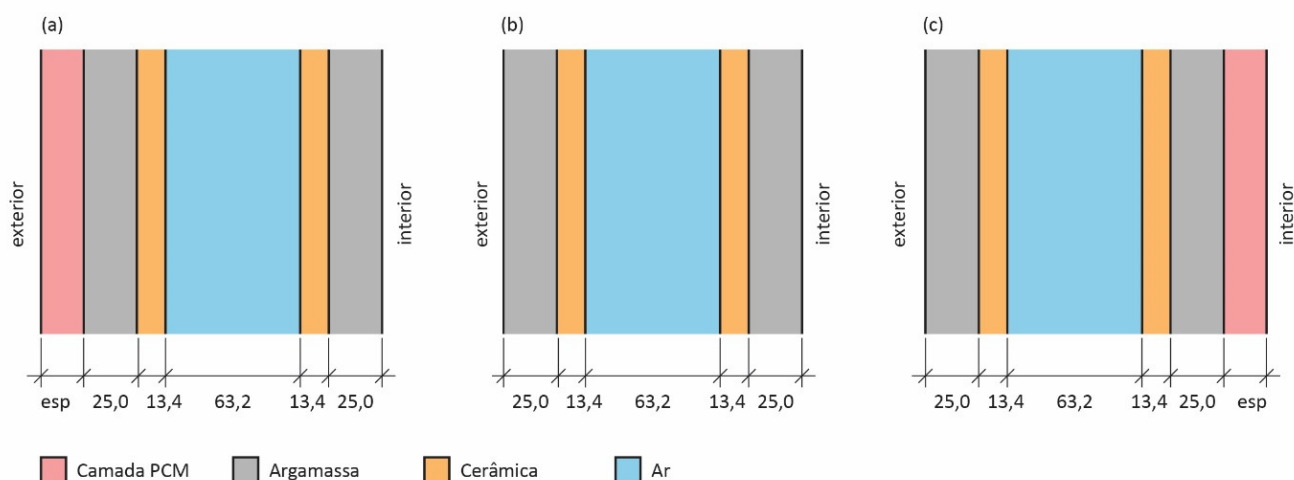
Tabela 3 (superior) - Composição das camadas e propriedades térmicas dos materiais do modelo simplificado da parede de alvenaria com bloco cerâmico de seis furos e argamassa interna e externa. Fonte: (LABEEE, 2018b)

Figura 43 (inferior) - Seções transversais das possibilidades de composição das paredes externas, com PCM no exterior (a), sem PCM (b) e com PCM no interior (c) – cotas em mm, e espessura do PCM variável (5, 10, 15 ou 20 mm). Fonte: Produzida pelo autor

O primeiro gênero de informações comuns a todas as zonas diz respeito às propriedades térmicas de todos os materiais que não sejam o PCM. Em todas as superfícies que representam paredes externas, se fazem presentes os materiais correspondentes ao comportamento térmico de uma alvenaria de 6 furos, com dimensões de 9x14x24 cm e argamassa interna e externa de 2,5 cm, totalizando 14 cm de largura. Para fins de simulação no *EnergyPlus*, foi utilizado o modelo simplificado da biblioteca de materiais do LABEEE (2018b), cujos valores são apresentados na Tabela 3. A Figura 43 ilustra as seções transversais das possibilidades de composição das paredes externas com ou sem PCM.

Igualmente comum a todas as superfícies que representam paredes externa são os valores de absorptância e emissividade, de forma a evitar diferenças na forma como a luz solar é absorvida pela parede com os diferentes arranjos. Nas últimas camadas da composição das paredes (tanto a camada mais interna, como a mais

| Composição        | Espessura (mm) | Condutividade térmica (W/m°C) | Densidade (kg/m <sup>3</sup> ) | Calor Específico (J/kg-K) | Resistência térmica (m <sup>2</sup> °C/W) | Transmitância térmica total (W/m <sup>2</sup> °C) | Capacidade térmica total (J/m <sup>2</sup> .°C) |
|-------------------|----------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Argamassa interna | 25,0           | 1,150                         | 2000                           | 1000                      | 0,022                                     | 2,39                                              | 150000                                          |
| Cerâmica          | 13,4           | 0,900                         | 1600                           | 920                       | 0,015                                     |                                                   |                                                 |
| Câmara de ar      | 63,2           | 0,361                         | -                              | -                         | 0,175                                     |                                                   |                                                 |
| Cerâmica          | 13,4           | 0,900                         | 1600                           | 920                       | 0,015                                     |                                                   |                                                 |
| Argamassa interna | 25,0           | 1,150                         | 2000                           | 1000                      | 0,022                                     |                                                   |                                                 |



externa) foram adotados os valores correspondentes à uma pintura branca, independentemente desta última camada ser uma argamassa ou um PCM. Estes valores tem por referência a ABNT (2005), e são:

- Absortância = 0,2
- Emissividade = 0,9

Uma única superfície representa a janela do quarto, sendo definida pelo material “Clear 3mm” da biblioteca de materiais do *EnergyPlus*, que corresponde a uma janela de vidro transparente simples com 3 mm de espessura. Todas as demais superfícies da Zona Térmica que representam paredes, piso ou teto internos, foram consideradas superfícies adiabáticas (Figuras 40 e 41), a partir das quais não são computadas as trocas térmicas (U.S.DOE, 2020c). Com isso, nesta pesquisa, as únicas trocas térmicas efetivamente computadas na simulação termo energética são as realizadas por meio das vedações externas, isolando o efeito térmico de outros ambientes do edifício hipotético sobre o quarto analisado.

O segundo gênero de informação diz respeito aos parâmetros de controle de ventilação natural do ambiente. Com base em Sorgato (2015), foi estabelecido um valor mínimo para a temperatura interna a partir do qual a janela seria fechada; e não foi estabelecido um limite superior para que se mantivesse aberta, mas a regra de que, para que a janela se feche, a temperatura externa ultrapassasse em pelo menos 1 °C a temperatura interna (Figura 44). O valor de 23,8 °C foi estabelecido como limite inferior a partir do gráfico de faixas de temperatura operativa aceitáveis para determinadas velocidades médias de ar da ASHRAE (2013), utilizando-se como referência o valor médio de 0,3 m/s (Figura 45). Já o parâmetro diferencial de

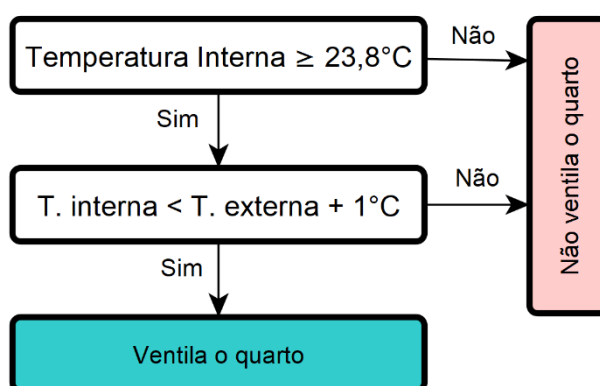


Figura 44 - Diagrama algorítmico dos critérios para habilitar ventilação natural nas simulações. Fonte: Produzida pelo autor

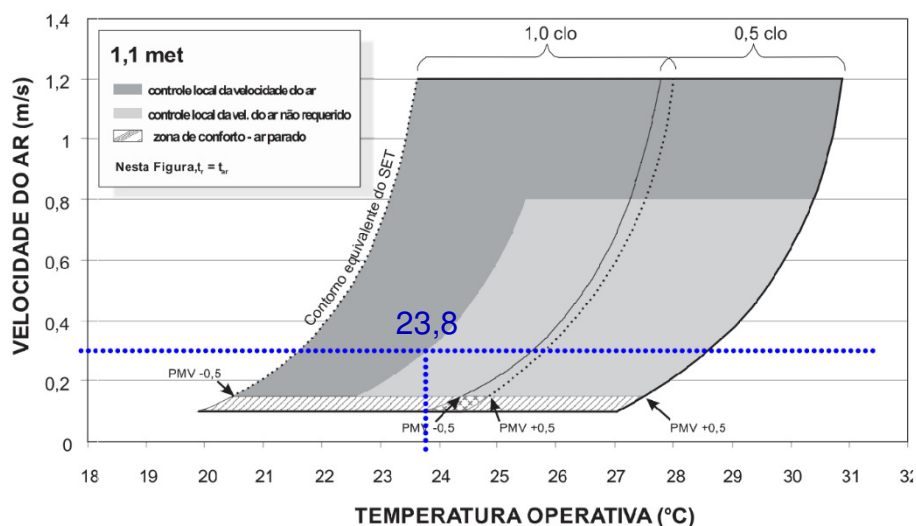
temperatura foi pensado para simular um usuário ligeiramente mais ativo que o definido por Sorgato (Figura 23), simulando uma pessoa que, ao sentir uma diferença perceptível de 1°C mais quente na temperatura exterior, fechasse a janela.

A fração da janela operável foi estabelecida como 50%, considerando que esta é composta por duas folhas de correr e que a área total da janela nunca poderia ser aberta completamente; e a ventilação cruzada foi desconsiderada da equação, supondo que a porta do quarto estaria fechada e que existe apenas uma única entrada/saída de ar. Essa decisão foi tomada para que se observasse mais nitidamente o efeito do PCM no controle da temperatura em um cômodo isolado, já que a ventilação cruzada possui um forte efeito na dissipação de calor.

O terceiro gênero de informação diz respeito às cargas térmicas internas, geradas por equipamentos elétricos, iluminação, atividade metabólica dos indivíduos ali presentes e a porção de infiltração de ar no interior não controlada pelo usuário, ou seja, aquela que permeia as fachadas externas nas conexões entre diferentes elementos construtivos – por exemplo, frestas de esquadrias. As cargas referentes a sistemas mecânicos de ventilação forçada condicionamento ativo não foram consideradas. O Quadro 2 expressa seus valores e referência correspondentes.

Finalmente, o último gênero de informação diz respeito aos cronogramas, que são referências horárias para o controle das cargas no interior do ambiente. Os cronogramas de Ocupação, Iluminação e Equipamentos são adaptações do RTQr (BRASIL, 2012), e representam a probabilidade do ambiente estar sendo ocupado ou

Figura 45 - Gráfico das faixas de aceitabilidade de temperatura operativa e velocidade dos ar, com linhas de referência marcando a temperatura operativa mínima (aprox. 23,8°C) para a velocidade 0,3 m/s, considerando a ausência de controle da velocidade do ar pelo usuário. Fonte: Editada pelo autor com base em ASHRAE (2013)



Quadro 2 - Cargas térmicas por área da Zona Térmica. Fonte: Editado pelo autor a partir de ASHRAE, BRASIL e SORGATO (2013; 2012; 2015)

| Cargas Térmicas por área               | Valor                                    | Observação                                | Referência                 |
|----------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------|
| Cargas de equipamentos                 | 7,541 W/m <sup>2</sup>                   | Corresponde a 60W para a área total       | (SORGATO, 2015, p. 217)    |
| Taxa de infiltração de ar nas fachadas | 0,000285m <sup>3</sup> /s-m <sup>2</sup> | Padrão utilizado pela ASHRAE              | ASHRAE 90.1-2013           |
| Carga luminosa                         | 5W/m <sup>2</sup>                        | -                                         | RTQr (BRASIL, 2012, p. 71) |
| Número de pessoas                      | 0,126 ppl/m <sup>2</sup>                 | Corresponde a 1 pessoas para a área total | -                          |

dos equipamentos eletrônicos e iluminação estarem sendo utilizados em um dado momento. Os valores do cronograma de atividades, que correspondem ao valor em Watts da atividade metabólica exercida durante uma determinada hora do dia, possuem por referência os valores da ASHRAE (2013). Os cronogramas de aquecimento e resfriamentos mecânicos são desprezados e o cronograma de infiltração é considerado constante (considerando que a infiltração de ar pelas brechas de uma esquadria fechada permanece sempre a mesma).

O cronograma de ocupação simula um quarto de um estudante que se encontra vazio a partir das 7h da manhã até as 13h. A probabilidade desse estudante estar no quarto aumenta gradualmente entre as 13h e 21h, e considera-se que a partir das 21h ele estará ocupando o quarto. Uma leve adaptação é feita para os finais de semana, considerando que ele estará no quarto até as 9h ou 10h.

Os cronogramas de iluminação e uso de equipamentos seguem o padrão do cronograma de ocupação, aumentando gradualmente até as 21h, mas sendo desligados às 23h. As luzes, entretanto, permanecem desligadas até as 18h, enquanto os equipamentos seguem o padrão da ocupação a partir das 13h.

Para o cronograma de atividades metabólicas dois valores foram estabelecidos: 65W para o ato de digitar (imaginando que o estudante esteja estudando ou realizando outras atividades no computador); e 45W para o ato de dormir ou descansar. Considerou-se que, caso o estudante esteja no quarto entre as 12h e 23h, ele estaria

realizando uma atividade metabólica de 65W, enquanto para as demais horas uma atividade de 45W.

As tabelas com os cronogramas completos se encontram no *Apêndice D*.

#### **5.2.1.2. Os demais dados de entrada**

Concluídas as definições para construção de cada Zona Térmica individual, as demais entradas determinam parâmetros específicos que afetam todas as zonas. Cada variação em um dos parâmetros abaixo implica na geração de um novo arquivo IDF para que se realize uma nova simulação.

As únicas informações que variam de um IDF para o outro dizem respeito aos diferentes arquivos climáticos utilizados e à orientação solar – que como se explicou anteriormente, simula a rotação do quarto para as posições Sudoeste e Nordeste (*Item 5.2.1.1.1*). A entrada para orientação solar é expressa em graus, indicando o quanto ela gira com relação à posição original – no caso, para cada arquivo climático, as rotações adotadas foram 90° e 270°. Os arquivos climáticos utilizados foram os 68 obtidos na primeira etapa da pesquisa, após as filtragens (*Item 5.1.2*). O número de arquivos IDF gerados totalizam 136 (68x2).

É importante mencionar que o uso de duas orientações objetiva mais encontrar um valor médio de desempenho de uma Zona Térmica do que comparar os valores entre estas duas orientações. Entretanto, será possível avaliar isoladamente o comportamento térmico de uma superfície específica de uma dada Zona Térmica, em uma orientação e município igualmente específicos no *Item 6.4*.

Os dados de entrada restantes são comuns a todos os arquivos IDF, sendo estes:

- Período de Análise:
  - Corresponde ao ano inteiro (365 dias, ou 8760 horas do ano)
- Contexto:
  - São os elementos de sombreamento que influenciam na forma como a radiação solar alcança as superfícies externas das Zonas Térmicas. No caso desta pesquisa, foram criadas

superfícies de sombreamento correspondentes ao próprio edifício (marcados em com roxo transparente, na Figura 40).

- Saídas da simulação:
  - Foram selecionados três gêneros de saída: Métricas de Conforto da Zona; Análise de temperatura superficial; e Análise energética superficial. O primeiro diz respeito a informações necessárias ao cálculo da Temperatura Operativa na zona, como Temperatura do Ar e Temperatura Radiante Média. Os outros dois dizem respeito às medidas de temperatura e fluxo energético de todas as superfícies que delimitam a Zona Térmica.
- Parâmetros de Simulação Energética:
  - Os parâmetros padrões de simulação utilizados pelo *Honeybee* para geração dos arquivos IDF foram todos mantidos, com exceção do *timestep*, que foi alterado de 6 para 20. Isso quer dizer que o número de interações processadas para cada hora do período de análise deixa de ser 6 por hora para 20 por hora, ou seja, a cada 3 minutos do período de análise. Esse valor tem por referência o trabalho de Tabares-Velasco (2012), já debatido no *Item 4.3.3* desta pesquisa.
- Linhas de códigos adicionais:
  - É onde se define, opcionalmente, algoritmos alternativos de transferência de calor para viabilizar a simulação de comportamentos característicos de certos materiais, bem como as propriedades adicionais desses materiais (U.S.DOE, 2020c). No caso desta pesquisa, o algoritmo *CondFD* e a propriedade adicional *PhaseChangeHysteresis*.

#### 5.2.1.2.1. Linhas de código adicionais

Conforme explicado no *Item 4.3.2*, o arquivo IDF consiste em um simples arquivo de texto com instruções de simulação no *EnergyPlus*. As linhas de código adicionais precisam, assim, serem digitadas no formato das linhas de código de um arquivo IDF, e suas informações se sobrepõem aos parâmetros correspondentes anteriormente estabelecidos (por exemplo, se uma informação de condutividade

térmica de um dado material é adicionada às linhas de código adicionais, essa se sobrepõe à condutividade anteriormente definida).

O *CondFD*, conforme explicado no *Item 4.3.3*, é o algoritmo utilizado para simulações avançadas, que permite simular o efeito de mudança de fase do material. A linha de código referente à definição desse algoritmo é:

*HeatBalanceAlgorithm, ConductionFiniteDifference;*

Com relação à mudança de fase dos materiais, é possível adicionar uma das duas propriedades adicionais: *PhaseChange* ou *PhaseChangeHysteresis*. A diferença entre as duas consiste no fato da primeira se utilizar de uma única curva de temperatura/entalpia para descrever ambos os processos de fusão e cristalização do material, enquanto na segunda é possível simular o efeito da histerese da mudança de fase, conforme explicado no *Item 4.3.3*.

A propriedade de material *PhaseChangeHysteresis* demanda o preenchimento de uma série de dados, correspondentes às propriedades específicas do material no estado líquido e sólido, bem como aos valores que descrevem o início, pico e final da curva de mudança de fase para o estado líquido e para o sólido (U.S.DOE, 2020a, c). Surge daí a demanda por se escolher um material de mudança de fase de referência para as simulações.

Primeiramente, com relação à natureza do PCM, optou-se pela adoção de um material orgânico, com base nos estudos de Jelle e Kalnæs (2017) apresentados no *Item 4.2.1*. Em seguida, a escolha do material seria tomada com base na temperatura de fusão desejada.

Um estudo preliminar publicado pelo próprio autor nos anais do XV ENCAC, como parte do desenvolvimento desta pesquisa, buscou identificar faixas de Temperatura de Fusão ideais para PCMs no Semiárido Brasileiro, usando como base a Carta Psicométrica (SOUSA et al., 2019), chegando-se a uma faixa de temperatura entre 25 e 27 °C. A parafina denominada Octadecano, consiste em um hidrocarboneto com 18 carbonos em sua cadeia ( $C_{18}H_{38}$ ), cuja temperatura de fusão é aproximadamente 27°C e temperatura de cristalização 25,5 °C. Os estudos de caracterização em DSC das propriedades térmicas do Octadecano de Faden et al. e Syntroleum (2019; 2013) foram usados como referência para o preenchimento dos dados da *PhaseChangeHysteresis* (Figura 46).

O primeiro campo de preenchimento solicita o nome do material ao qual essas propriedades serão atribuídas. Isso quer dizer que cada combinação de espessura e temperatura de fusão da camada PCM nas paredes externas de uma dada Zona Térmica demanda suas próprias propriedades adicionais correspondentes. Para facilitar o processo de identificação, foi criado um sistema de identificação para as camadas PCMs:

- “PCM\_OCTADECANO\_X\_Y”
  - Onde “X” corresponde à espessura da camada do PCM na parede em milímetros;
  - e “Y” corresponde à sua temperatura de fusão em graus Celsius.

Assim, uma camada PCM com 15 mm de espessura e com temperatura de fusão de 27 °C é identificada por “PCM\_OCTADECANO\_15\_27”. A Tabela 4 contém os demais valores e respectivas propriedades utilizados nesta pesquisa para a definição da histerese de cada camada PCM.

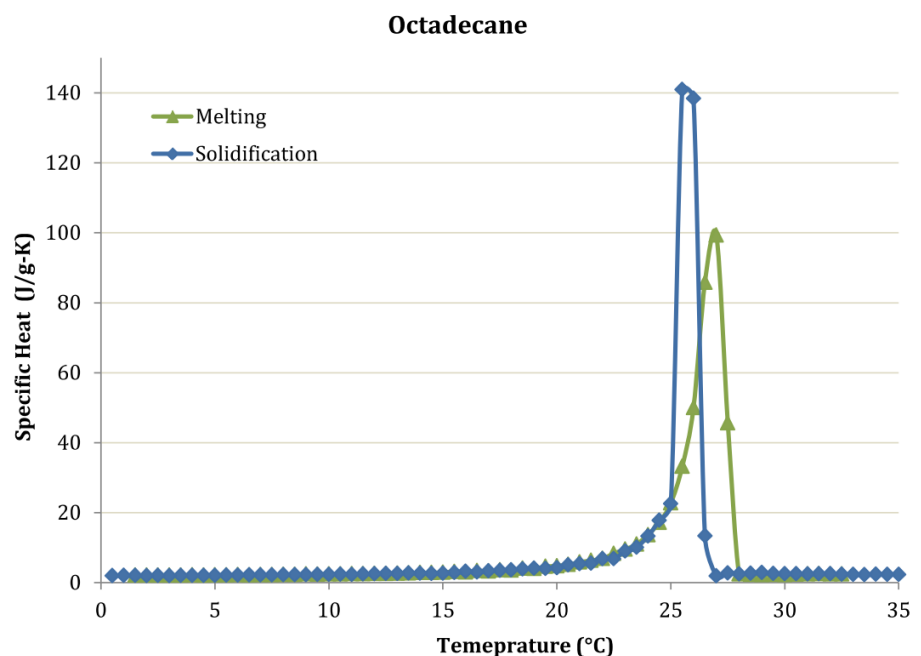


Figura 46 - Gráfico obtido por análise DSC do calor específico do Octadecano durante derretimento e solidificação. Fonte: (SYNTROLEUM, 2013)

| Valor                                                                                           | Propriedade                                   | Unidade           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------|
| <b>1000</b>                                                                                     | Latent Heat of Fusion                         | J/kg              |
| <b>0,246 – (3,121E – 04. <math>T_L</math>)</b>                                                  | Liquid State Thermal Conductivity             | W/m-K             |
| <b>979,826 – (0,674. <math>T_L</math>)</b>                                                      | Liquid State Density                          | kg/m <sup>3</sup> |
| <b>[3,247 – (8,861E – 03. <math>T_L</math>)<br/>+ (1,821E – 05. <math>T_L^2</math>)] . 1000</b> | Liquid State Specific Heat                    | J/kg-K            |
| <b>0,8</b>                                                                                      | High Temperature Difference of Melting Curve  | °C                |
| <b><math>T_{FUS}</math></b>                                                                     | Peak Melting Temperature                      | °C                |
| <b>0,8</b>                                                                                      | Low Temperature Difference of Melting Curve   | °C                |
| <b>0,334</b>                                                                                    | Solid State Thermal Conductivity              | W/m-K             |
| <b>867,914</b>                                                                                  | Solid State Density                           | kg/m <sup>3</sup> |
| <b>[–1,029 + (9,797E – 03. <math>T_L</math>)] . 1000</b>                                        | Solid State Specific Heat                     | J/kg-K            |
| <b>1</b>                                                                                        | High Temperature Difference of Freezing Curve | °C                |
| <b><math>T_{FUS} – 1,5</math></b>                                                               | Peak Freezing Temperature                     | °C                |
| <b>1,7</b>                                                                                      | Low Temperature Difference of Freezing Curve  | °C                |

Tabela 4 - Propriedades térmicas do Octadecano. Produzido pelo autor com base em Faden et al. e Syntroleum (2019; 2013)

A condutividade, densidade e calor específico do Octadecano variam em função da temperatura.  $T_L$  corresponde à temperatura no estado líquido e  $T_S$  no estado sólido, expressas em Kelvin. Para esta pesquisa foram conferidos a  $T_L$  e  $T_S$  os valores fixos médios de 302,15K e 295,15K respectivamente, que equivalem a 29 °C (a média entre 27 e 31 °C) e 22 °C (a média entre 19 e 27 °C).

O valor  $T_{FUS}$ , usado para determinar os picos de mudança de fase, equivale à temperatura de fusão do PCM correspondente. Adotou-se para a temperatura do pico da cristalização um valor sempre 1,5 °C menor que a temperatura de fusão, e por isso esse é igual a  $T_{FUS} – 1,5$

Como exemplo, seguem abaixo as linhas de código adicionais correspondentes à camada PCM com 15 mm e temperatura de fusão de 27 °C:

```
MaterialProperty:PhaseChangeHysteresis,
PCM_OCTADECANO_15_27, !- Name
1000, !- Latent Heat of Fusion {J/kg}
0.151699, !- Liquid State Thermal Conductivity
{W/m-K}
776.1769, !- Liquid State Density {kg/m3}
2232.123926, !- Liquid State Specific Heat {J/kg-K}
.8, !- High Temperature Difference of
Melting Curve {deltaC}
27, !- Peak Melting Temperature {C}
```

|             |                                                           |
|-------------|-----------------------------------------------------------|
| .8,         | !- Low Temperature Difference of Melting Curve {deltaC}   |
| 0.334,      | !- Solid State Thermal Conductivity {W/m-K}               |
| 867.914,    | !- Solid State Density {kg/m3}                            |
| 1862.58455, | !- Solid State Specific Heat {J/kg-K}                     |
| 1,          | !- High Temperature Difference of Freezing Curve {deltaC} |
| 25.5,       | !- Peak Freezing Temperature {C}                          |
| 1.7;        | !- Low Temperature Difference of Freezing Curve {deltaC}  |

### 5.2.2. Cálculo de Conforto

O cálculo de conforto realizado nesta pesquisa toma por base o modelo do Conforto Adaptativo (ASHRAE, 2013). O componente utilizado para a realização desse cálculo faz parte da biblioteca de componentes do *Ladybug*, e requer 6 entradas: Temperatura externa; Temperatura de bulbo seco (ambiente interno); Temperatura radiante média (ambiente interno); Velocidade do vento; Período de Análise; e Parâmetros de Conforto.

Os dados de temperatura são expressos na forma de dados horários, um para cada hora do período de análise. Como o período de análise corresponde ao ano inteiro, cada entrada de temperatura recebe 8760 dados horários para cada Zona Térmica computada.

A temperatura externa é obtida da Temperatura de bulbo Seco dos Arquivos Climáticos; já as temperaturas do ambiente interno são obtidas a partir da simulação energética, e correspondem às *Métricas de Conforto da Zona* requisitadas no *Item 5.2.1.2*. A velocidade do vento foi definida em 0,3 m/s, considerando um pequeno fluxo constante médio de movimentação do ar.

Nos parâmetros de conforto, é possível escolher se a base do cálculo é a norma americana (ASHRA 55 2013) ou a europeia (EN-15251). Para a presente pesquisa foram escolhidas as definições padrões do *Ladybug*, que utiliza a ASHRAE 55 como referência:

- Para cálculo da temperatura operativa, foi utilizada a equação apresentada no *Item 4.1.1*;
- Para o cálculo da temperatura média predominante do ar externo ( $T_{mpa(ext)}$ ), utilizou-se a média da temperatura externa de todos os dias do mês;

- A preferência de conforto foi estabelecida para 90% das pessoas;
- e o ambiente é condicionado apenas passivamente, sem qualquer mecanismo ativo.

A única alteração com relação à ASHRAE 55 foi a adoção de 90% de preferência. A equação utilizada no *Ladybug* restringe em 1°C os limites de aceitabilidade de temperaturas operativas com relação ao valor 80%. As equações dos limites passam então a ser:

Limite superior de 90% de aceitabilidade =  $0,31.T_{mpa(ext)} + 20,3$

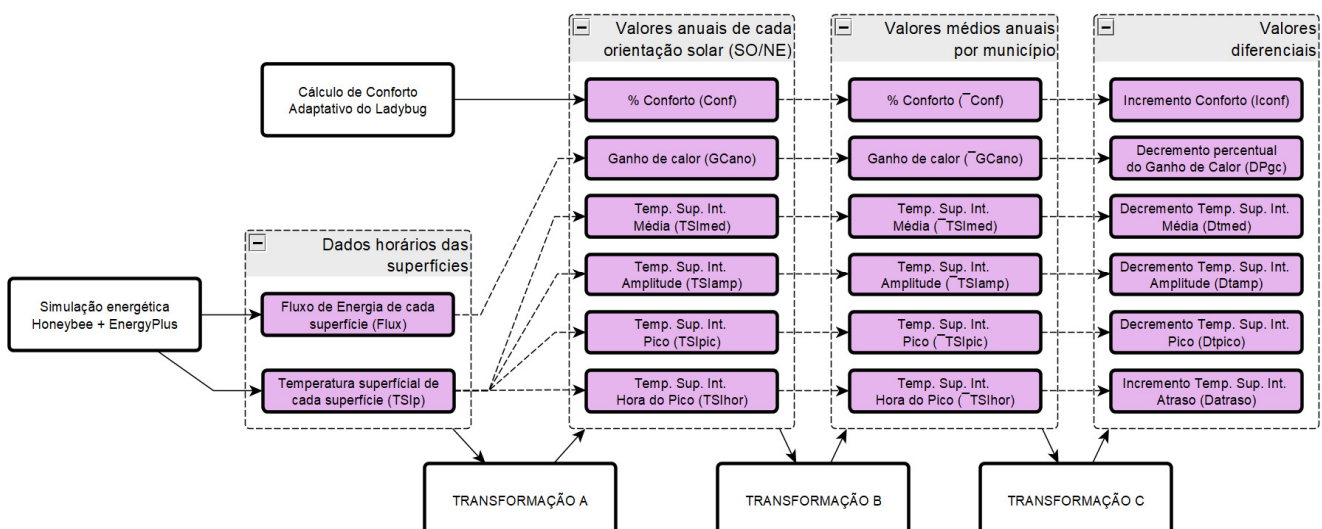
Limite inferior de 90% de aceitabilidade =  $0,31.T_{mpa(ext)} + 15,3$

Do Cálculo de Conforto, tem-se como saída o percentual de horas ao longo do ano nas quais uma Zona Térmica se encontra ou não em situação de conforto.

Figura 47 - Ampliação e detalhamento do Fluxograma Metodológico nos procedimentos de transformação dos dados. Produzida pelo autor

### 5.2.3. A transformação dos dados

Para facilitar o acompanhamento do processo de transformação dos dados, um recorte do Fluxograma Metodológico foi ampliado e detalhado para melhor visualização na Figura 47.



Conforme mencionado anteriormente, parte dos dados de saída da simulação energética foram o fluxo energético e a temperatura superficial (interna e externa) de todas as superfícies das Zonas Térmicas, expressos de forma horária (Figura 48). Apesar desse montante de dados ajudar a descrever bem os fenômenos ocorrentes em uma superfície específica (conforme será mostrado no *Item 6.4*), esse volume dificulta a comparação entre todas as opções de composição de paredes por zona, por orientação solar, por município analisado. Assim, a *TRANSFORMAÇÃO A* consiste na seleção dos dados correspondentes às paredes externas e na sua transformação de valores de horários em valores anuais.

Conforme visto anteriormente, há três superfícies representando as paredes externas (Figura 41). Do Fluxo de Energia calculou-se o Ganho de Calor anual total, que consiste no somatório de todos os fluxos positivos pelas paredes externas (do exterior para o interior). Já para as temperaturas superficiais, foram realizadas as médias das temperaturas superficiais internas das três paredes externas, obtendo-se a temperatura superficial interna média anual, a amplitude diária média anual, o pico diário médio anual e a hora média do pico diário médio anual.

O Quadro 3 apresenta as variáveis e equações envolvidas na *TRANSFORMAÇÃO A*. Como o Percentual de Conforto já é uma medida para o ano, este se manteve inalterado, sendo tratado apenas na segunda transformação.

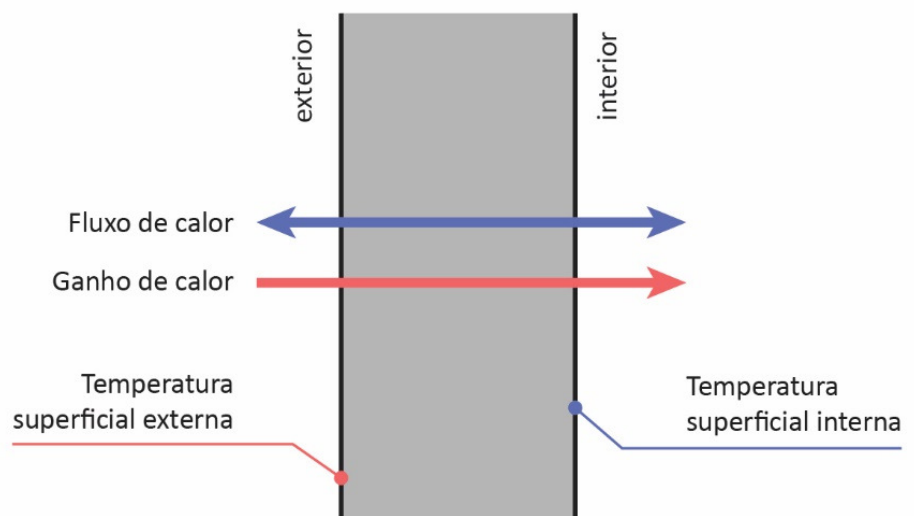


Figura 48 - Representação diagramática das medidas referentes ao fluxo energético e temperaturas superficiais das paredes externas. Fonte: Produzida pelo autor

Quadro 3 - Subscritos,  
variáveis e equações da  
TRANSFORMAÇÃO A.  
Fonte: Produzido pelo  
autor

|                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                  |              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>Subscritos</b>                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                  |              |
| <b><i>a</i></b> : hora no ano (8760 no total)                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                  |              |
| <b><i>h</i></b> : hora do dia (24 no total)                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                  |              |
| <b><i>d</i></b> : dia do mês (número total varia de acordo com o mês)                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                  |              |
| <b><i>nd</i></b> : número de dias em determinado mês                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                  |              |
| <b><i>m</i></b> : mês do ano (12 no total)                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                  |              |
| <b><i>p</i></b> : paredes externas das Zonas Térmicas (3 no total)                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                  |              |
| <b><i>max</i></b> : valor máximo de um conjunto de dados                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                  |              |
| <b><i>min</i></b> : valor mínimo de um conjunto de dados                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                  |              |
| <b>Variáveis</b>                                                                                                                                 | <b>Equação</b>                                                                                                                                                                                                                   | <b>Unid.</b> |
| <b><i>TSI<sub>p(a)</sub></i></b> : Temperatura Superficial Interna de cada parede externa, para uma dada hora do ano                             |                                                                                                                                                                                                                                  | °C           |
| <b><i>TSI<sub>(a)</sub></i></b> : Temperatura Superficial Interna média de todas as paredes externas, para cada hora do ano.                     | $TSI_{(a)} = \left( \sum_{p=1}^3 TSI_{p(a)} \right) / 3$                                                                                                                                                                         | °C           |
| <b><i>TSI<sub>(m,d,h)</sub></i></b> : Representação matricial de <b><i>TSI<sub>(a)</sub></i></b> para cada hora do dia, do mês do ano.           | $TSI_{(a)} \rightarrow TSI_{(m,d,h)}$                                                                                                                                                                                            | °C           |
| <b><math>\overline{TSI}_{(m,h)}</math></b> : Temperaturas Superficiais Internas de cada hora de um dia médio do mês                              | $\overline{TSI}_{(m,h)} = \left( \sum_{d=1}^{nd} TSI_{(m,d,h)} \right) / nd$                                                                                                                                                     | °C           |
| <b><math>\overline{TSI}_{max(m)}</math></b> : <b><math>\overline{TSI}</math></b> máxima do mês                                                   |                                                                                                                                                                                                                                  | °C           |
| <b><math>\overline{TSI}_{min(m)}</math></b> : <b><math>\overline{TSI}</math></b> mínima do mês                                                   |                                                                                                                                                                                                                                  | °C           |
| <b><math>\overline{TSI}h_{(m)}</math></b> : Hora da <b><math>\overline{TSI}</math></b> máxima do mês                                             |                                                                                                                                                                                                                                  | h            |
| <b><i>TSImed</i></b> : Média Anual da Temperatura Superficial Interna                                                                            | $TSImed = \left( \sum_{a=1}^{8760} TSI_{(a)} \right) / 8760$                                                                                                                                                                     | °C           |
| <b><i>TSIamp</i></b> : Média Anual da amplitude diária da Temperatura Superficial Interna                                                        | $TSIamp = \left[ \sum_{m=1}^{12} (\overline{TSI}_{max(m)} - \overline{TSI}_{min(m)}) \right] / 12$                                                                                                                               | °C           |
| <b><i>TSIpic</i></b> : Média Anual do pico diário da Temperatura Superficial Interna                                                             | $TSIpic = \left( \sum_{m=1}^{12} \overline{TSI}_{max(m)} \right) / 12$                                                                                                                                                           | °C           |
| <b><i>TSIhor</i></b> : Média Anual da hora do pico diário da Temperatura Superficial Interna                                                     | $TSIhor = \left( \sum_{m=1}^{12} \overline{TSI}h_{(m)} \right) / 12$                                                                                                                                                             | h            |
| <b><i>Flux<sub>(p,a)</sub></i></b> : Fluxos de calor de cada parede externa, para uma dada hora do ano (positivo se do exterior para o interior) |                                                                                                                                                                                                                                  | kWh          |
| <b><i>GC<sub>(p,a)</sub></i></b> : Ganho de calor de cada parede externa para cada hora do ano                                                   | <p><b>Se ...</b> <b><i>Flux<sub>(p,a)</sub></i> ≥ 0</b></p> <p><b>... então ...</b> <b><i>GC<sub>(p,a)</sub></i> = <i>Flux<sub>(p,a)</sub></i></b></p> <p><b>... caso contrário ...</b> <b><i>GC<sub>(p,a)</sub></i> = 0</b></p> | kWh          |

|                                                               |                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----|
| <b>GCano:</b> Ganho de Calor total de todas as paredes no ano | $GCano = \sum_{a=1}^{8760} \sum_{p=1}^3 GC_{(p,a)}$ | kWh |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----|

Conforme relatado no *Item 5.2.1.2*, para cada município foram gerados dois arquivos IDF de simulação, correspondentes às orientações solares Sudoeste e Nordeste do quarto. Os dados do Percentual de Conforto, e demais dados calculados na *TRANSFORMAÇÃO A*, se referem então a cada Zona Térmica, de cada município, de cada orientação solar. A *TRANSFORMAÇÃO B* consiste na simples obtenção da média dos valores anuais correspondentes de cada orientação, para que se obtenha valores médios anuais das Zonas Térmicas por município. O Quadro 4 apresenta as variáveis e equações envolvidas nessa transformação.

Quadro 4 - Subscritos, variáveis e equações da TRANSFORMAÇÃO B.  
Fonte: Produzido pelo autor

|                                                                                                                                       |                                                                                      |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Subscritos                                                                                                                            |                                                                                      |       |
| <b>z:</b> Zona Térmica por arquivo IDF (57 no total)                                                                                  |                                                                                      |       |
| <b>os:</b> orientação solar (2 no total)                                                                                              |                                                                                      |       |
| <b>mun:</b> município analisado (68 no total)                                                                                         |                                                                                      |       |
| Variáveis                                                                                                                             | Equação                                                                              | Unid. |
| <b>Conf</b> <sub>(z,os,mun)</sub> : Percentual de Conforto Anual de uma dada Zona Térmica, por orientação solar, por município        |                                                                                      | %     |
| <b>GCano</b> <sub>(z,os,mun)</sub> : Ganho de Calor Anual total de “ “ “ “ “ “ “ “                                                    |                                                                                      | kWh   |
| <b>TSImed</b> <sub>(z,os,mun)</sub> : Média Anual da Temperatura Superficial Interna de “ “ “ “ “ “ “ “                               |                                                                                      | °C    |
| <b>TSIamp</b> <sub>(z,os,mun)</sub> : Média Anual da amplitude diária da Temperatura Superficial Interna de “ “ “ “ “ “ “ “           |                                                                                      | °C    |
| <b>TSIpic</b> <sub>(z,os,mun)</sub> : Média Anual do pico diário da Temperatura Superficial Interna de “ “ “ “ “ “ “ “                |                                                                                      | °C    |
| <b>TSIhor</b> <sub>(z,os,mun)</sub> : Média Anual da hora do pico diário da Temperatura Superficial Interna de “ “ “ “ “ “ “ “        |                                                                                      | h     |
| <b>Conf</b> <sub>(z,mun)</sub> : Média dos valores de <b>Conf</b> de cada orientação, para uma dada Zona Térmica de um dado município | $\overline{Conf}_{(z,mun)} = \left( \sum_{os=1}^2 Conf_{(z,os,mun)} \right) / 2$     | %     |
| <b>GCano</b> <sub>(z,mun)</sub> : Média dos valores de <b>GCano</b> de “ “ “ “ “ “ “ “                                                | $\overline{GCano}_{(z,mun)} = \left( \sum_{os=1}^2 GCano_{(z,os,mun)} \right) / 2$   | kWh   |
| <b>TSImed</b> <sub>(z,mun)</sub> : Média dos valores de <b>TSImed</b> de “ “ “ “ “ “ “ “ “ “                                          | $\overline{TSImed}_{(z,mun)} = \left( \sum_{os=1}^2 TSImed_{(z,os,mun)} \right) / 2$ | °C    |

|                                                                                  |                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| $\overline{TSIamp}_{(z,mun)}$ : Média dos valores de $TSIamp$ de “ “ “ “ “ “ “ “ | $\overline{TSIamp}_{(z,mun)} = \left( \sum_{os=1}^2 TSIamp_{(z,os,mun)} \right) / 2$ | °C |
| $\overline{TSIpic}_{(z,mun)}$ : Média dos valores de $TSIpic$ de “ “ “ “ “ “ “ “ | $\overline{TSIpic}_{(z,mun)} = \left( \sum_{os=1}^2 TSIpic_{(z,os,mun)} \right) / 2$ | °C |
| $\overline{TSIhor}_{(z,mun)}$ : Média dos valores de $TSIhor$ de “ “ “ “ “ “ “ “ | $\overline{TSIhor}_{(z,mun)} = \left( \sum_{os=1}^2 TSIhor_{(z,os,mun)} \right) / 2$ | h  |

Por fim, a TRANSFORMAÇÃO C tem por objetivo a obtenção de valores diferenciais, que consistem na diferença dos valores médios anuais de cada Zona Térmica com relação à Zona Térmica com parede simples.

O Quadro 5 apresenta as equações para se alcançar cada um dos valores diferenciais. O termo “incremento” é usado quando se espera que o aumento de um dado valor em uma parede PCM, comparado à parede simples, represente uma melhoria. Já o termo “decremento” é usado quando se espera que a diminuição do valor represente uma melhoria. Todos os valores transformados são subtrações diretas entre os valores de cada Zona Térmica de cada município com relação à zona com parede simples, com exceção do Decremento Percentual do Ganho de Calor, onde se avaliou a diminuição percentual (%) e não a diminuição absoluta do ganho de calor anual em kWh. Os valores diferenciais correspondentes à própria Zona Térmica com parede simples são iguais a 0 (zero), já que não há diferença dos valores dela com ela mesma.

Quadro 5 - Subscritos, variáveis e equações da TRANSFORMAÇÃO C.  
Fonte: Produzido pelo autor

| Subscrito                                                                                                                     |                                                                                                                  |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| <b><i>simp</i></b> : se refere à única Zona Térmica "z" com parede simples                                                    |                                                                                                                  |       |
| Variáveis                                                                                                                     | Equação                                                                                                          | Unid. |
| <b><i>Iconf</i></b> <sub>(z,mun)</sub> : Incremento do Conforto de uma dada Zona Térmica de um dado município                 | $Iconf_{(z,mun)} = \overline{Conf}_{(z,mun)} - \overline{Conf}_{(simp,mun)}$                                     | %     |
| <b><i>DPgc</i></b> <sub>(z,mun)</sub> : Decremento Percentual do Ganho de Calor de “ “ “ “ “ “ “ “                            | $DPgc_{(z,mun)} = 1 - \left( \frac{\overline{GCano}_{(z,mun)}}{\overline{GCano}_{(simp,mun)}} \right) \cdot 100$ | %     |
| <b><i>Dtmed</i></b> <sub>(z,mun)</sub> : Decremento da Média Anual da Temperatura Superficial Interna de “ “ “ “ “ “ “ “      | $Dtmed_{(z,mun)} = \overline{TSImed}_{(simp,mun)} - \overline{TSImed}_{(z,mun)}$                                 | °C    |
| <b><i>Dtamp</i></b> <sub>(z,mun)</sub> : Decremento da Amplitude diária da Temperatura Superficial Interna de “ “ “ “ “ “ “ “ | $Dtamp_{(z,mun)} = \overline{TSIamp}_{(simp,mun)} - \overline{TSIamp}_{(z,mun)}$                                 | °C    |

|                                                                                                      |                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| $Dtpico_{(z,mun)}$ : Decremento do Pico diário da Temperatura Superficial Interna de “ “ “ “ “ “ “ “ | $Dtpico_{(z,mun)} = \overline{TSIpic}_{(simp,mun)} - \overline{TSIpic}_{(z,mun)}$  | °C |
| $Iatraso_{(z,mun)}$ : Incremento do Atraso Térmico de “ “ “ “ “ “ “ “                                | $Iatraso_{(z,mun)} = \overline{TSIhor}_{(z,mun)} - \overline{TSIhor}_{(simp,mun)}$ | h  |

Os dados finais do processamento de dados foram compilados na forma de matrizes de dados no *Excel*, com o eixo vertical correspondente ao fator “Temperatura de Fusão do PCM” e o eixo horizontal correspondente aos fatores espessura e orientação do PCM (externa E, ou interna I). Na coluna central tem-se o valor 0 (zero) replicado, que corresponde ao valor diferencial da zona sem PCM (Tabela 5).

Para cada município foi criada uma planilha de Excel, com 6 matrizes de dados representando cada um os seus valores diferenciais correspondentes (Figura 49). Para uma melhor visualização dos dados, aplicou-se uma regra de formatação condicional com gradação de cores e foram gerados gráficos de superfície.

Tabela 5 - Incremento do Conforto (%) em função da orientação, espessura e temperatura de fusão do PCM para o município de Arapiraca-AL. Fonte: Produzida pelo autor

| INCREMENTO CONFORTO (%) - AL_Arapiraca |    |                    |        |        |       |      |       |        |        |        |
|----------------------------------------|----|--------------------|--------|--------|-------|------|-------|--------|--------|--------|
| T. Fusão (°C)                          |    | Espessura PCM (mm) |        |        |       |      |       |        |        |        |
|                                        |    | 20 (E)             | 15 (E) | 10 (E) | 5 (E) | 0    | 5 (I) | 10 (I) | 15 (I) | 20 (I) |
| 19                                     | 19 | 4,43               | 3,72   | 2,73   | 1,51  | 0,00 | 0,78  | 1,55   | 2,11   | 2,64   |
| 21                                     | 21 | 4,38               | 3,70   | 2,68   | 1,43  | 0,00 | 0,78  | 1,55   | 2,11   | 2,64   |
| 23                                     | 23 | 3,92               | 3,12   | 2,24   | 1,10  | 0,00 | 0,78  | 1,49   | 2,07   | 2,60   |
| 25                                     | 25 | 2,97               | 2,41   | 1,76   | 0,92  | 0,00 | 0,70  | 1,54   | 2,13   | 2,70   |
| 27                                     | 27 | 3,04               | 2,49   | 1,82   | 1,00  | 0,00 | 0,84  | 1,72   | 2,50   | 3,12   |
| 29                                     | 29 | 2,83               | 2,20   | 1,53   | 0,78  | 0,00 | 0,82  | 1,63   | 2,31   | 2,96   |
| 31                                     | 31 | 2,86               | 2,29   | 1,56   | 0,83  | 0,00 | 0,71  | 1,46   | 2,15   | 2,75   |

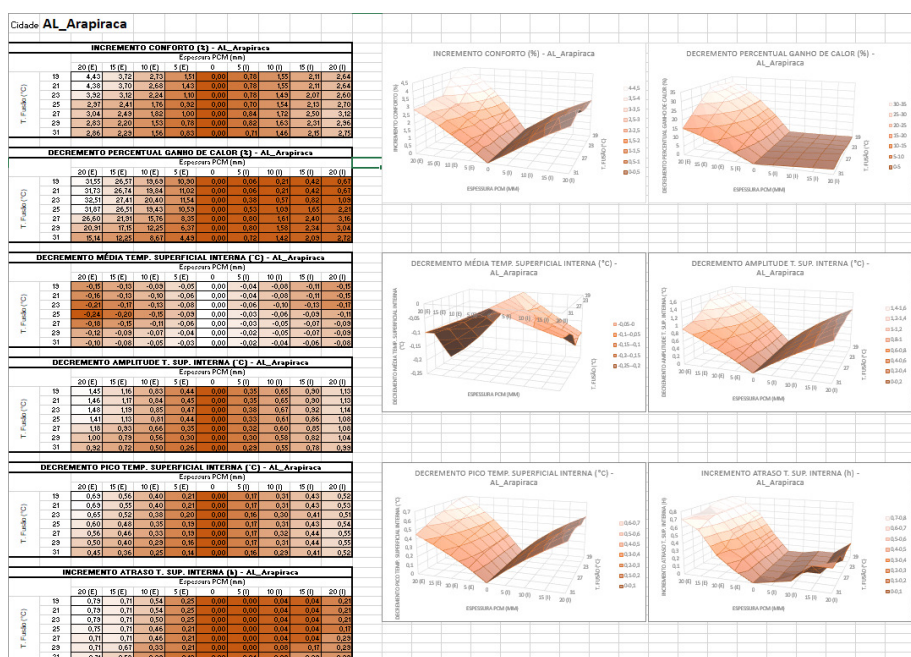


Figura 49 - Recorte da planilha do Excel com as tabelas e gráficos de superfícies referentes ao município de Arapiraca-AL. Produzida pelo autor

### 5.3. Análise de dados

Uma primeira observação aos gráficos de superfície gerados na etapa anterior (Figura 49) permite identificar padrões nos resultados de cada saída, para cada município. Um perfil em “V” indica resultados positivos à medida em que se adiciona camadas mais espessas de PCM na parede; um perfil em “A” indica valores negativos com a adição do PCM; e a assimetria do perfil indica diferenças entre o uso de PCMs na face externa ou interna da parede.

À medida em que os valores das variáveis nas paredes com PCM se distanciam dos valores da parede simples, fica mais evidente que o referido material está exercendo alguma influência sobre a parede, seja aumentando ou diminuindo o seu valor diferencial. Para esta pesquisa, o termo “*influência*” fica então reservado ao valor absoluto – distância numérica com relação a zero – de uma das seis variáveis de saída do processamento de dados, para uma determinada configuração de espessura, orientação e temperatura de fusão do PCM.

Apesar de conferir noção da eficiência do uso de PCMs para um dado município, a simples visualização dos gráficos não permite análises comparativas entre dados de diferentes municípios, do Semiárido Brasileiro como um todo. Para tal, a atual etapa metodológica dispõe de ferramentas estatísticas como a estatística descritiva e os testes de comparação, correlação e regressão.

Todos os procedimentos estatísticos descritos a seguir são realizados com base em Field (2009), por meio do programa *IBM SPSS Statistics 24*, com exceção da Regressão de Superfície Resposta que é realizada com base em Myers e al. (2009) no programa *STATISTICA 7*. Todas as significâncias “p” são calculadas bilateralmente.

Os resultados dos procedimentos aqui descritos serão apresentados e discutidos no *Capítulo 6*.

#### 5.3.1. Análise estatística das saídas do processamento de dados

##### 5.3.1.1. A formatação tabular dos dados

Para a realização dos testes estatísticos é necessário que os dados estejam representados de maneira tabular. Cada linha representa os

valores referentes a uma determinada Zona Térmica, enquanto cada coluna aos valores das suas respectivas variáveis, sejam elas variáveis dependentes ou independentes.

Neste ponto da pesquisa, cada Zona Térmica de cada município foi tratada como uma unidade independente, identificada pelas colunas das variáveis categóricas independentes ***mun*** (município), ***ori*** (orientação da disposição do PCM – interna ou externa), ***esp*** (espessura da camada PCM) e ***tfus*** (Temperatura de Fusão do PCM). As Zonas Térmicas sem PCM foram excluídas, uma vez que já cumpriram o seu papel na obtenção dos valores diferenciais no *Item 5.2.3*. Para diferenciar cada Zona Térmica enquanto unidade independente nas análises estatísticas, estas serão referenciadas daqui para a frente como Célula, identificadas por um número de referência na variável categórica ***cel***. O número total de Células analisadas é 4816, ou seja 56 Células "***cel***" por município "***mun***".

Outra variável categórica foi criada para que as Células fossem organizadas alfabeticamente por estado, que é a variável categórica ***est*** (estado do município). A ordem de identificação das Células segue: ***est*** (ordem alfabética) > ***mun*** (ordem alfabética) > ***ori*** (primeiro as externas identificadas por "0", seguido das internas identificadas por "1") > ***esp*** (ordem numérica) > ***tfus*** (ordem numérica).

Finalmente, as seis variáveis correspondentes aos valores diferenciais obtidos ao final do processamento de dados (***Iconf***, ***DPgc***, ***Dtmed***, ***Dtamp***, ***Dtpico*** e ***Iatraso***), recebem cada uma sua própria coluna da tabela, sendo tratadas como Variáveis Dependentes.

A Tabela 6 apresenta um recorte dos dados para as primeiras 5 células. A tabela completa com os valores das 4816 Células se encontra no *Apêndice E*.

Tabela 6 - Recorte das 5 primeiras células da tabela de variáveis para análises estatísticas das saídas do processamento de dados.  
Fonte: Produzido pelo autor

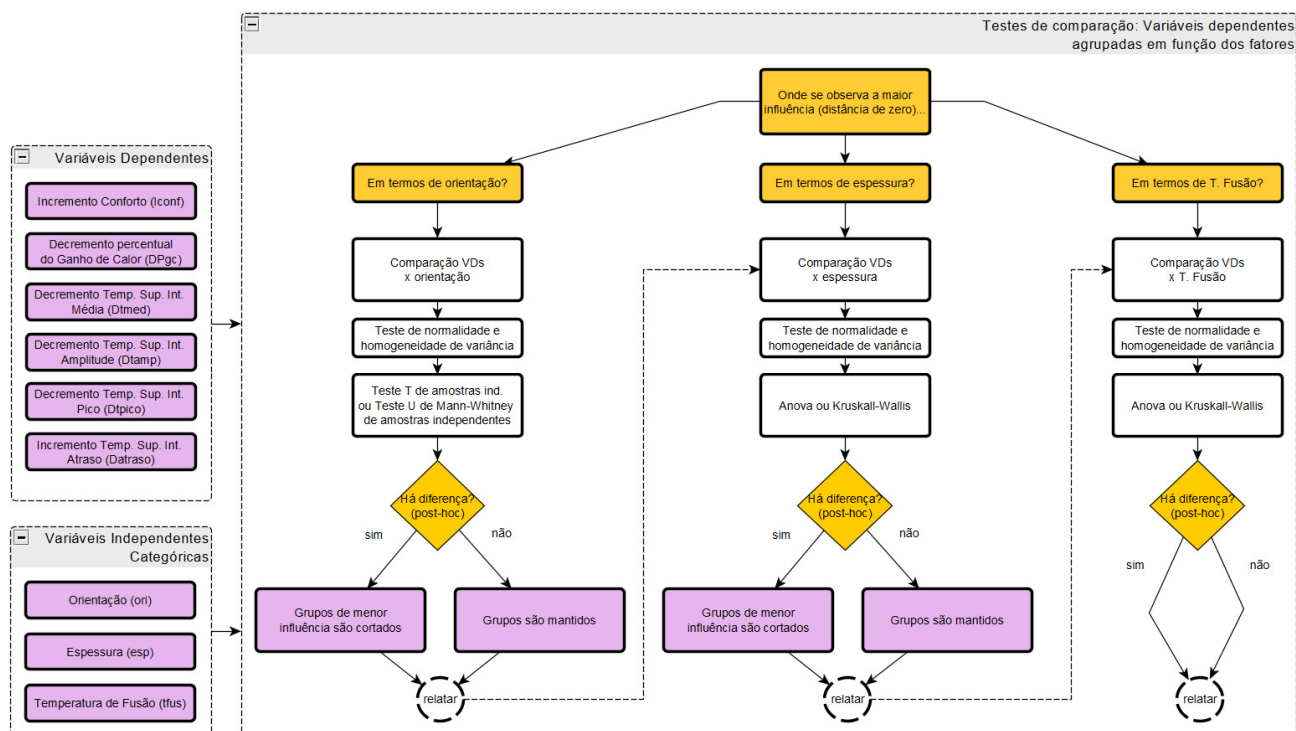
| cel | est | mun       | ori | esp | tfus | Iconf    | DPgc      | Dtmed     | Dtamp    | Dtpico   | Iatraso  |
|-----|-----|-----------|-----|-----|------|----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|
| 1   | AL  | Arapiraca | 0   | 5   | 19   | 1,50685  | 10,901473 | -0,053548 | 0,443864 | 0,214747 | 0,25     |
| 2   | AL  | Arapiraca | 0   | 5   | 21   | 1,426941 | 11,020705 | -0,057471 | 0,448841 | 0,211303 | 0,25     |
| 3   | AL  | Arapiraca | 0   | 5   | 23   | 1,09589  | 11,539837 | -0,078807 | 0,467518 | 0,19804  | 0,25     |
| 4   | AL  | Arapiraca | 0   | 5   | 25   | 0,924657 | 10,594686 | -0,089889 | 0,438123 | 0,189642 | 0,208333 |
| 5   | AL  | Arapiraca | 0   | 5   | 27   | 1,004566 | 8,346661  | -0,060211 | 0,352881 | 0,185035 | 0,208333 |
| ... |     |           |     |     |      |          |           |           |          |          |          |

### 5.3.1.2. Os procedimentos estatísticos

A primeira sequência de testes estatísticos consiste na comparação dos valores de cada uma das seis Variáveis Dependentes, objetivando identificar em quais grupos de dados das variáveis categóricas **ori**, **esp** e **tfus** se encontra a maior influência do uso de PCMs na parede. O fluxograma na Figura 50 sintetiza a sequência dos testes de comparação e procedimentos realizados.

Primeiramente, cada Variável Dependente possui seus dados comparados entre si a partir do agrupamento em categorias por **ori**. Os testes de normalidade e homogeneidade das variâncias são realizados entre os grupos para que se defina a realização de um teste paramétrico ou não-paramétrico: Teste T de amostras independentes ou Teste U de Mann-Whitney de amostras independentes. O primeiro testa hipótese nula de que *as médias das Variáveis Dependentes são iguais nas categorias de ori*, enquanto a segunda testa a *igualdade da distribuição nas categorias de ori*. Se a hipótese é aceita, não há diferença entre os grupos todos os dados são mantidos e passam para o próximo teste; enquanto se a hipótese é rejeitada, há diferença e descarta-se o grupo com maior quantidade de dados próximo de zero. A proximidade dos dados com relação a zero é avaliada por meio do diagrama de barra de erros no caso dos dados paramétricos; ou por

Figura 50 - Fluxograma dos testes de comparação entre os valores das variáveis dependentes agrupadas em função dos fatores de implementação do PCM. Fonte: produzida pelo autor



meio do diagrama de caixa e bigodes, no caso dos dados não-paramétricos. As comparações são relatadas no *Capítulo 6*.

Semelhante ao primeiro teste, cada Variável Dependente possui agora seus dados comparados entre si a partir da categorização por **esp**. Os testes de normalidade e homogeneidade das variâncias são realizados e se realiza consequentemente um dos dois testes: ANOVA ou Kruskal-Wallis. O primeiro testa hipótese nula de que *as médias das Variáveis Dependentes são iguais nas categorias de esp*, enquanto a segunda testa a *igualdade da distribuição nas categorias de esp*. Se não há diferença, todos os dados são mantidos e passam para o próximo teste; enquanto se não há diferença, descartam-se os grupos com maior quantidade de dados próximo de zero por teste *post-hoc*. Os resultados do teste de comparação e *post-hoc* são relatados.

O terceiro teste repete todos os procedimentos do segundo, com exceção de que as Variáveis Dependentes terão os dados categorizados em função de **tfus**. Nenhum grupo é descartado, apenas sendo relatados os resultados do teste de comparação e *post-hoc*.

O outro teste realizado com as saídas do processamento foi o Teste de Correlação entre as Variáveis Dependentes (Figura 51). Esta testa a hipótese nula de que *não existe correlação entre duas variáveis*. Mediante teste de normalidade, utiliza-se o teste paramétrico de Pearson ou o teste não-paramétrico de Spearman e os resultados são relatados.

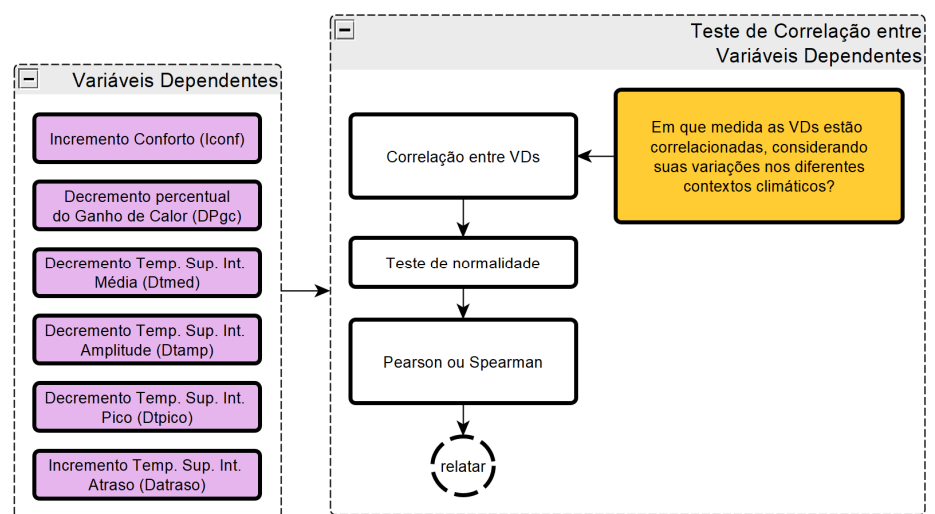


Figura 51 - Fluxograma dos testes de correlação entre as variáveis dependentes. Fonte: produzida pelo autor

### 5.3.2. Análise dos casos de maior influência no Incremento do Conforto

#### 5.3.2.1. As variáveis

O objetivo de, até esse ponto, analisar todas as opções de orientação, espessura e temperatura de fusão do PCM, consistiu em identificar quais fatores eram mais influentes sobre as Variáveis Dependentes e entender as relações entre as mesmas – ou seja, entender se o Incremento do Conforto, que está associado à percepção do usuário, guarda relação com as demais variáveis que estão, por sua vez, associadas ao desempenho térmico dos materiais. Agora, serão analisadas apenas as Células com maior influência no Incremento de Conforto por município, buscando compreender em que medida a variação de temperatura no município é capaz de prever se o uso de PCMs em paredes é ou não benéfico.

A Tabela 6 do *Item 5.3.1* foi filtrada de forma a apresentar apenas os maiores valores ***Iconf*** para cada ***mun.*** Manteve-se os valores da coluna ***Iconf***, mas as demais Variáveis Dependentes foram descartadas (***DPgc***, ***Dtmed***, ***Dtamp***, ***Dtpico*** e ***Iatraso***).

Para descrever a variação de temperatura média ao longo do ano em um município, foram incluídas duas Variáveis Independentes utilizadas por Roriz (2013): ***TMA*** (temperatura média anual) e ***AMA*** (amplitude média anual). Estas foram calculadas a partir dos dados de temperatura de bulbo seco dos arquivos climáticos, seguindo o mesmo cálculo utilizado pelo referido autor (médias anuais calculadas a partir dos valores de um dia médio mensal - *Anexo A*).

Além de investigar a capacidade de predição de ***TMA*** e ***AMA*** com relação a ***Iconf***, também se investigou se essa Variável Dependente guarda correlação com o conforto alcançado com as paredes sem PCM. Em outras palavras, se os valores de Incremento do Conforto obtidos com paredes com PCM tendem a ser mais ou menos altos quando já se obtinham valores mais ou menos altos de conforto com paredes simples. Para esses últimos valores, foi criada a Variável Dependente ***ConfSIMP***.

A Tabela 7 apresenta um recorte dos dados para as primeiras 5 Células. A tabela completa com os valores das 68 Células se encontra no *Apêndice E*.

Tabela 7 - Recorte das 5 primeiras células da tabela de variáveis para análises estatísticas dos casos de maior influência no Incremento do Conforto. Fonte: Produzido pelo autor

| cel | est | mun                  | TMA   | AMA  | Iconf | ConfSIMP | ori | esp | tfus |
|-----|-----|----------------------|-------|------|-------|----------|-----|-----|------|
| 22  | AL  | Arapiraca            | 24,85 | 8,10 | 4,43  | 83,58    | 0   | 20  | 19   |
| 78  | AL  | Palmeira. dos.Indios | 25,28 | 8,19 | 4,01  | 81,91    | 0   | 20  | 19   |
| 138 | AL  | Pao.de. Acucar       | 27,29 | 9,76 | -2,17 | 65,13    | 0   | 20  | 27   |
| 190 | BA  | Amargosa             | 23,19 | 6,89 | 7,60  | 85,13    | 0   | 20  | 19   |
| 251 | BA  | Barra                | 28,19 | 6,78 | -5,13 | 40,89    | 0   | 20  | 29   |
| ... |     |                      |       |      |       |          |     |     |      |

### 5.3.2.2. A correlação entre as Variáveis Dependentes

O teste de correlação realizado com base nesses dados testa a hipótese nula de que *não existe correlação entre **Iconf** e **ConfSIMP***. Mediante teste de normalidade, utiliza-se o teste paramétrico de Pearson ou o teste não-paramétrico de Spearman e os resultados são relatados (Figura 52).

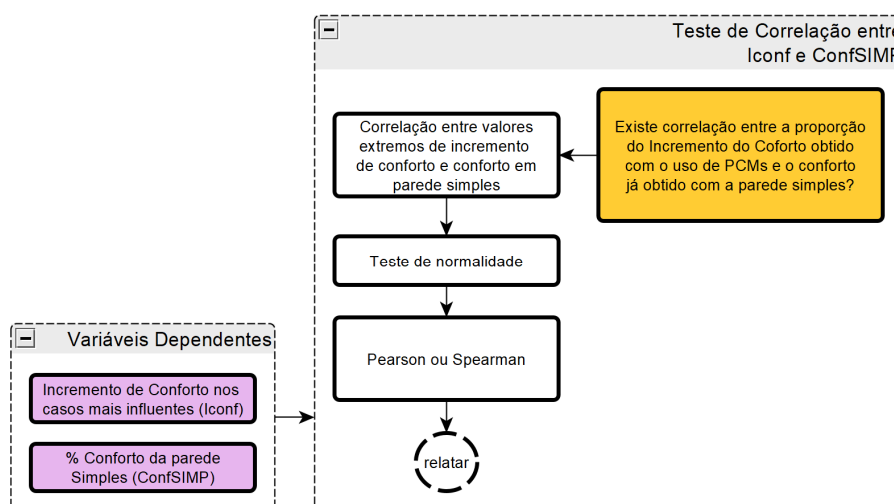


Figura 52 - Fluxograma do teste de correlação entre **Iconf** e **ConfSIMP**. Fonte: produzida pelo autor

### 5.3.2.3. Regressão Linear Múltipla

Para investigar a capacidade de predição de **TMA** e **AMA** com relação à **Iconf**, é executada uma Regressão Linear Múltipla (Figura 53).

A Regressão Linear Múltipla, caso atenda às hipóteses de generalização (FIELD, 2009, p. 178–179), permite a geração de uma equação que pode ser aplicada a casos não estudados nas análises estatísticas, contanto que tenham valores de Temperatura Média e Amplitude Média anuais dentro do intervalo analisado. A equação que descreve a relação entre as variáveis utilizadas segue a estrutura:

$$Iconf = b_0 + b_1.TMA + b_2.AMA$$

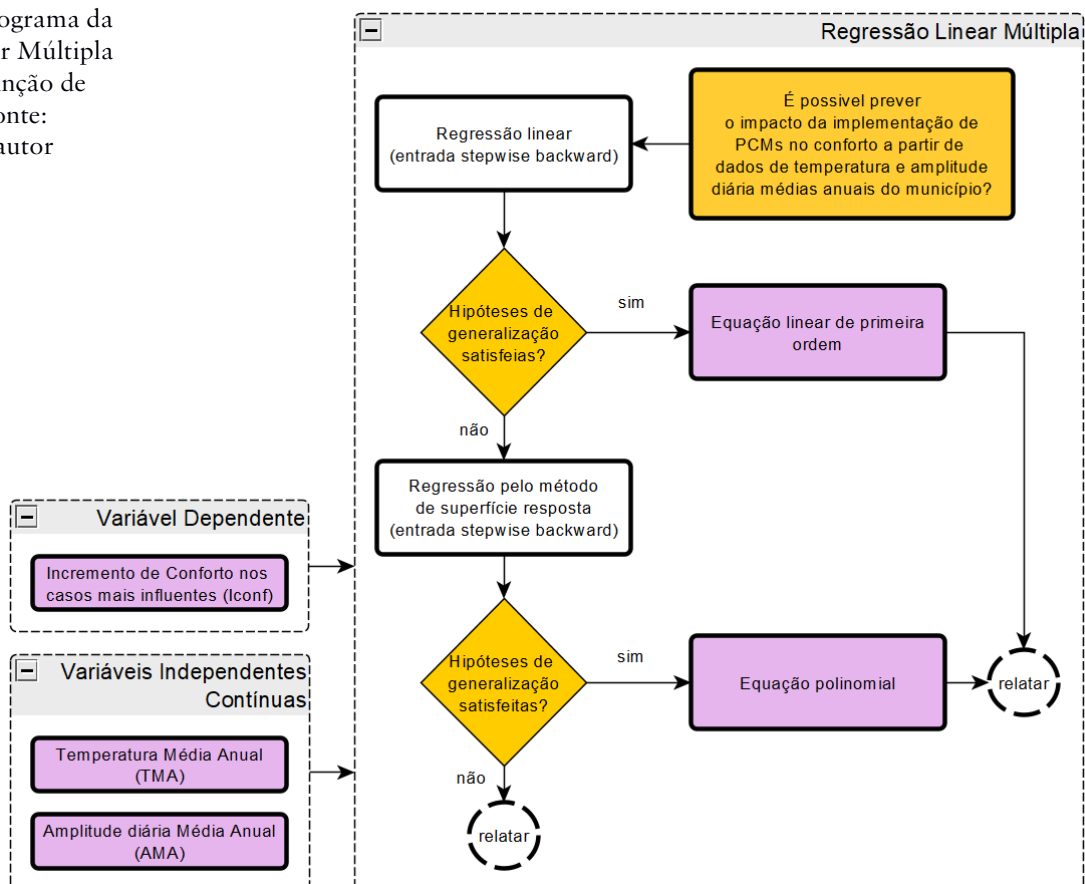
Onde  $b_0$ ,  $b_1$  e  $b_2$  são os coeficientes de regressão, obtidos pelo Método dos Mínimos quadrados.

O Método de Regressão utilizado é o *Stepwise Backward*, que inclui no modelo todos os coeficientes e testa a significância de cada um, excluindo a cada passo os que não são pertinentes para a significância do modelo. O critério de remoção utilizado é a probabilidade da estatística F:  $p \geq 0,05$ .

Os testes das hipóteses de generalização estarão no *Apêndice F*, sendo relatado no *Capítulo 6* se todas as hipóteses foram atendidas ou se alguma falhou. Algumas hipóteses são pré-requisitos da significância da aderência do Modelo de Regressão e de seus coeficientes, enquanto as hipóteses que necessitam de análises independentes são:

- Não haver multicolinearidade perfeita entre dois ou mais previsores;
- Homocedasticidade;

Figura 53 - Fluxograma da Regressão Linear Múltipla de ***Iconf*** em função de ***TMA*** e ***AMA***. Fonte: produzida pelo autor



- Linearidade;
- Erros independentes;
- E erros normalmente distribuídos.

Caso alguma das hipóteses de generalização não seja atendida, realiza-se a Regressão de Superfície Resposta, utilizando-se o software *STATISTICA 7*, que adiciona curvaturas à superfície de resposta do modelo. Essa regressão é realizada com base em Myers e al. (2009, p. 14), que diz que, apesar de representar modelos matemáticos curvos, a Regressão de Superfície Resposta ainda se trata de uma Regressão Linear, permitindo os mesmos testes das hipóteses de generalização de Field (2009). A equação de segunda ordem que descreve a relação entre as variáveis utilizadas, resultante da Regressão de Superfície Resposta, segue a estrutura:

$$Iconf = b_0 + b_1.TMA + b_2.AMA + b_3.TMA^2 + b_4.AMA^2 + b_5.TMA.AMA$$

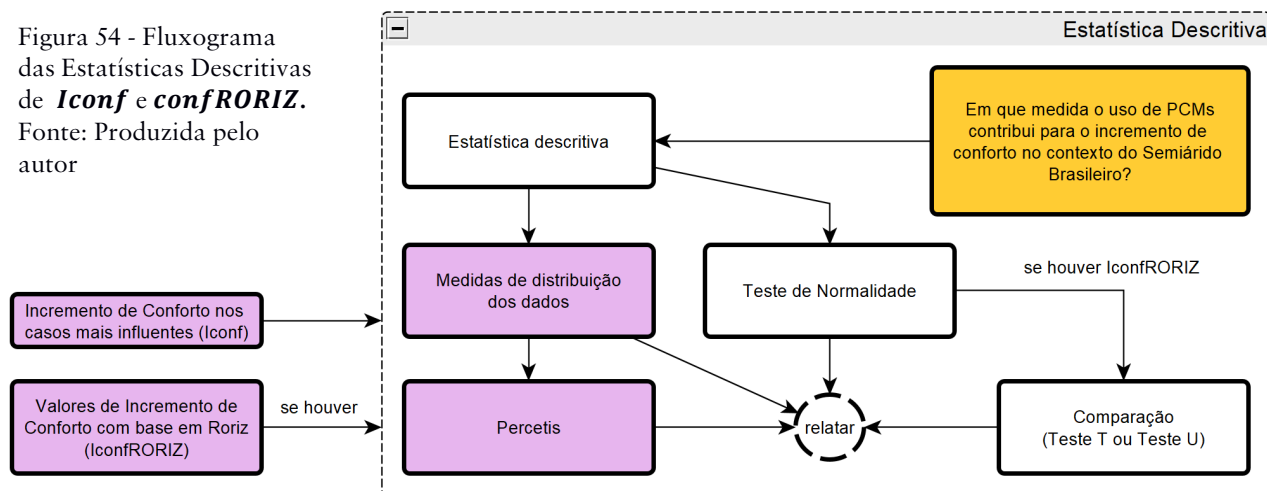
O Método de Regressão utilizado também é o *Stepwise Backward*, que pode resultar na exclusão de alguns dos coeficientes e previsores da estrutura acima. O critério de remoção utilizado é também a probabilidade da estatística F:  $p \geq 0,05$ .

### 5.3.3. A medida da influência do PCMs no Incremento de Conforto no Semiárido

Tendo sido realizados todos os testes e regressões, que ajudam a compreender a relação entre as diferentes variáveis, são agora realizadas análises exploratória com ferramentas de estatística descritiva sobre os dados de ***Iconf***. Estas dizem respeito às medidas de distribuição dos dados e percentis.

Caso se tenha obtido uma equação de regressão generalizável, como fruto do *Item 5.3.2.2*, o Incremento de Conforto também é calculado para os dados de temperaturas médias de Roriz (*Item 5.1.2*), criando-se a variável ***IconfRORIZ***. Nesse caso, a mesma exploração de dados de ***Iconf*** é realizada sobre os resultados do cálculo dos dados de Roriz, e os dados de ***Iconf*** e ***IconfRORIZ*** são comparados pelo teste adequado (Figura 54).

Figura 54 - Fluxograma das Estatísticas Descritivas de **Iconf** e **confRORIZ**.  
Fonte: Produzida pelo autor

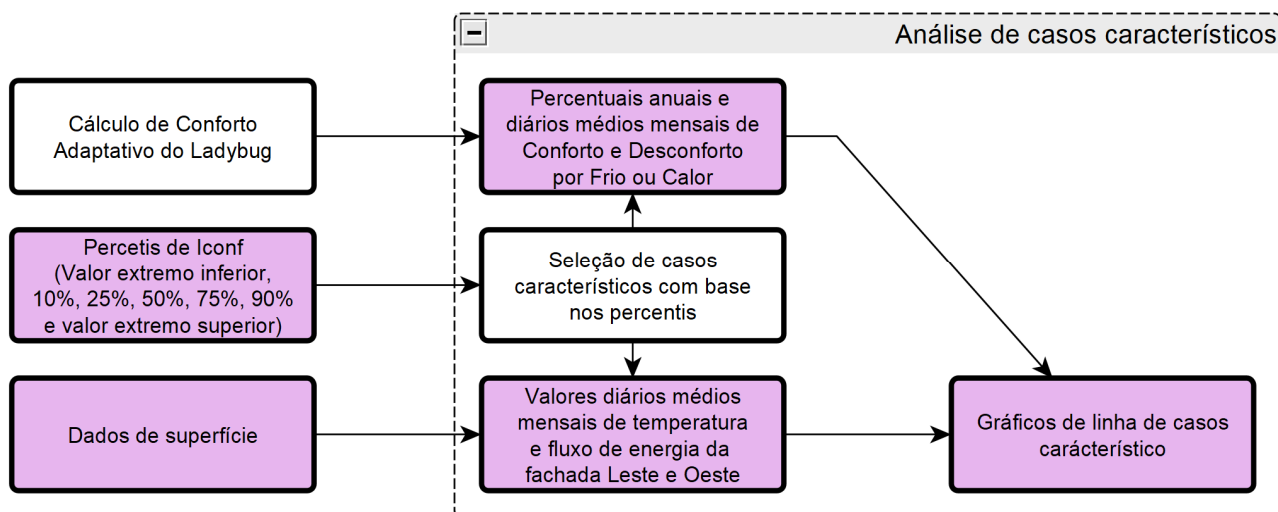


#### 5.3.4. Análise de casos característicos

Tendo-se concluído as análises descritivas do item anterior, ao verificar a distribuição dos dados, é possível selecionar municípios que representem um determinado comportamento característico com relação ao Incremento do Conforto. Dos 68 municípios analisados no processamento de dados, são selecionadas 7, com base na proximidade de seus valores com relação às médias ponderadas dos percentis de **Iconf**: o valor extremo inferior, 10%, 25%, 50%, 75%, 90% e o valor extremo superior. Em outras palavras, estão sendo selecionados: o pior caso, dois casos abaixo da mediana, a mediana, dois casos acima da mediana e o melhor caso (Figura 55).

Figura 55 - Fluxograma da análise do comportamento das paredes de casos característicos. Fonte: produzida pelo autor

Esses sete municípios terão analisados mais detalhadamente os seus dados de temperatura superficial e fluxo energético, resultantes da simulação térmica. Mais especificamente, serão



analisadas as paredes oeste da orientação solar SO; e as paredes leste da orientação solar NE. São comparados os valores horários de um dia médio mensal da parede simples, da parede com PCM externo mais influente e da parede com PCM interno mais influente.

Os dados de fluxo de calor, temperatura superficial externa e temperatura superficial interna das paredes são representados na forma de gráfico de linhas, juntamente com os dados de temperatura de bulbo seco do arquivo climático do município (ver Gráficos do *Item 6.4*). Estes gráficos correspondem ao valor de um dia médio para cada mês do ano (a média dos valores de cada hora do dia em um mês).

Adicionalmente, são analisados os valores horários das condições de conforto ou desconforto nas zonas sudoeste e nordeste, sendo o conforto categorizado pelo número inteiro 0 (zero), desconforto por frio -1 (um negativo) e desconforto por calor +1 (um positivo). A partir dos percentuais anuais de horas do ano das zonas térmicas com e sem PCM, o objetivo é identificar se o PCM auxilia mais no conforto, proporcionalmente falando, amenizando o desconforto por frio ou amenizando o desconforto por calor. Similar aos dados de temperatura superficial e fluxo de calor, a partir do valor médio das horas do dia de cada mês, são gerados gráficos de linha para analisar comparativamente essas variações ao longo dos meses.

## **6. Resultados**

## 6.1. Das saídas do processamento de dados

### 6.1.1. Comparação dos valores das Variáveis Dependentes baseados em *ori*

Os testes de normalidade de Shapiro-Wilk indicaram distribuição significativamente não-normal, com  $p < 0,001$  para todas as categorias de todas as variáveis analisadas. Bem como os testes de homogeneidade de variância de Levene indicaram distribuições significativamente não-homogêneas, com  $p < 0,001$  para todas as variáveis (*Apêndice F*).

O teste de comparação utilizado foi o Teste U de Mann-Whitney de amostras independentes. Os testes demonstraram que o grupo 0 (PCM externo) difere significativamente do grupo 1 (PCM interno) em todas as variáveis, com:

U = 2732621,00;  $p = 0,001$ , para ***Iconf***;

U = 3839,00;  $p < 0,001$ , para ***DPgc***;

U = 3830184,50;  $p < 0,001$ , para ***Dtmed***;

U = 2377037,50;  $p < 0,001$ , para ***Dtamp***;

U = 2523374,50;  $p < 0,001$ , para ***Dtpico***;

U = 1157145,00;  $p < 0,001$ , para ***Iatraso***.

Os diagramas de caixa e bigodes (Gráficos 1) ajudam a identificar as diferenças na distribuição dados entre as duas categorias ***ori*** para cada Variável Dependente, demonstrando que:

***Iconf*** é a única das Variável Dependentes que apresenta valores positivos e negativos em ambos os grupos. Entretanto, o grupo PCM externo (mediana = 1,77, amplitude = 22,08) possui maior amplitude e concentração dos valores distantes de 0 do que o grupo PCM interno (mediana = 1,47, amplitude = 16,72).

Em ***DPgc***, o grupo PCM externo (mediana = 19,38, amplitude = 38,02) possui valores consideravelmente mais distantes de zero que o grupo PCM interno (mediana = 1,28, amplitude = 7,06). Apenas o grupo PCM interno apresenta valores negativos.

***Dtmed*** é a única das Variáveis Dependentes que apresenta apenas valores negativos. Entretanto, seus valores não se encontram tão distantes de zero com relação às demais, tendo seu valor mais extremo igual a -0,56 °C. O grupo PCM externo (mediana = -0,13,

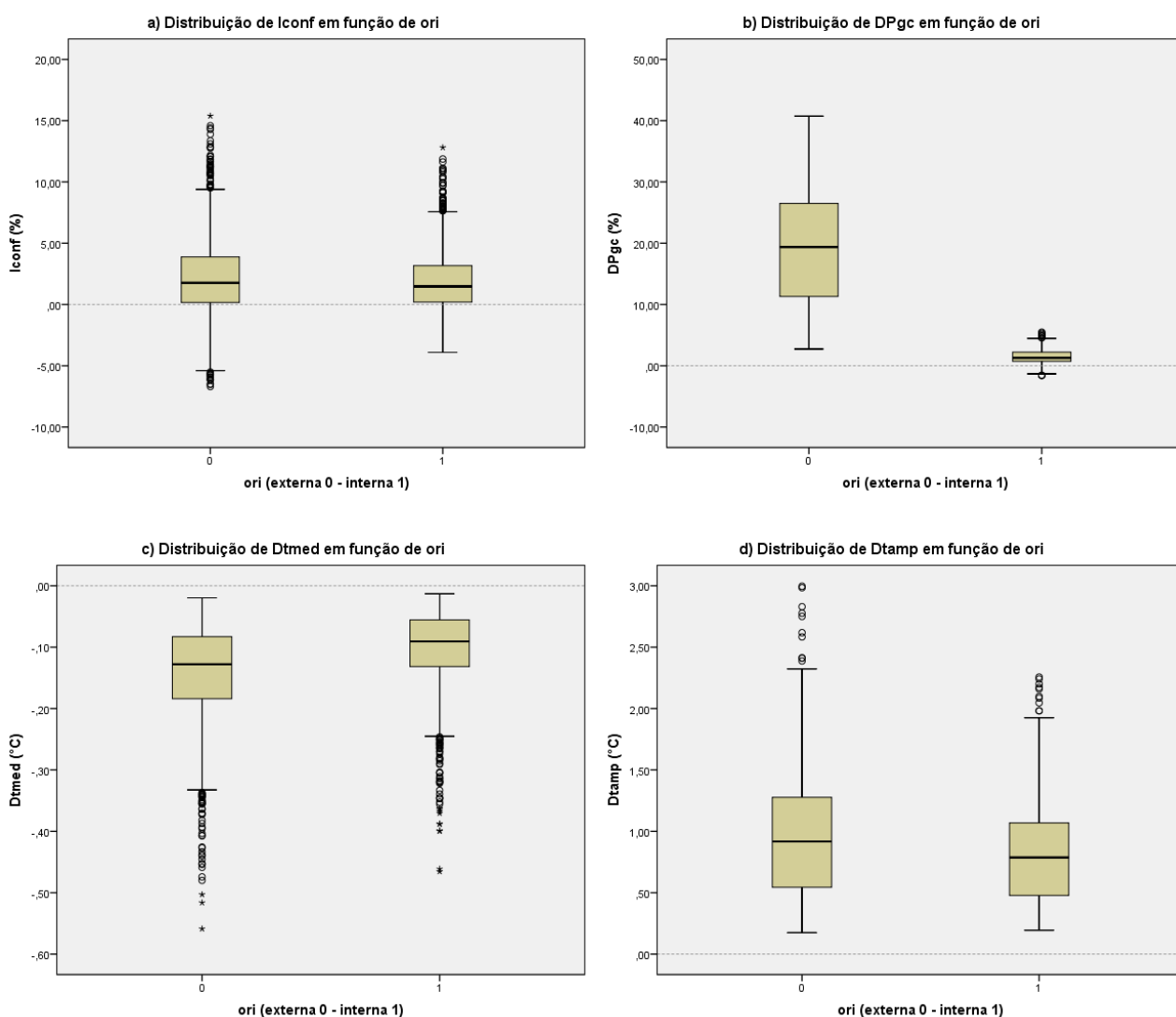
Gráficos 1 - Diagramas de Caixa e Bigodes da distribuição dos valores de Inc. do Conforto (**Iconf**) (a), Dec. Percentual do Ganho de Calor (**DPgc**) (b), Dec. da Média Anual da Temp. Superficial Interna (**Dtmed**) (c), Dec. da Amplitude diária da Temp. Superficial Interna (**Dtamp**) (d), Dec. do Pico diário da Temp. Superficial Interna (**Dtpico**) (e) e Inc. do Atraso Térmico (**Iatraso**) (f), categorizados em função da Orientação da disposição do PCM (**ori**).  
Fonte: Produzido pelo autor

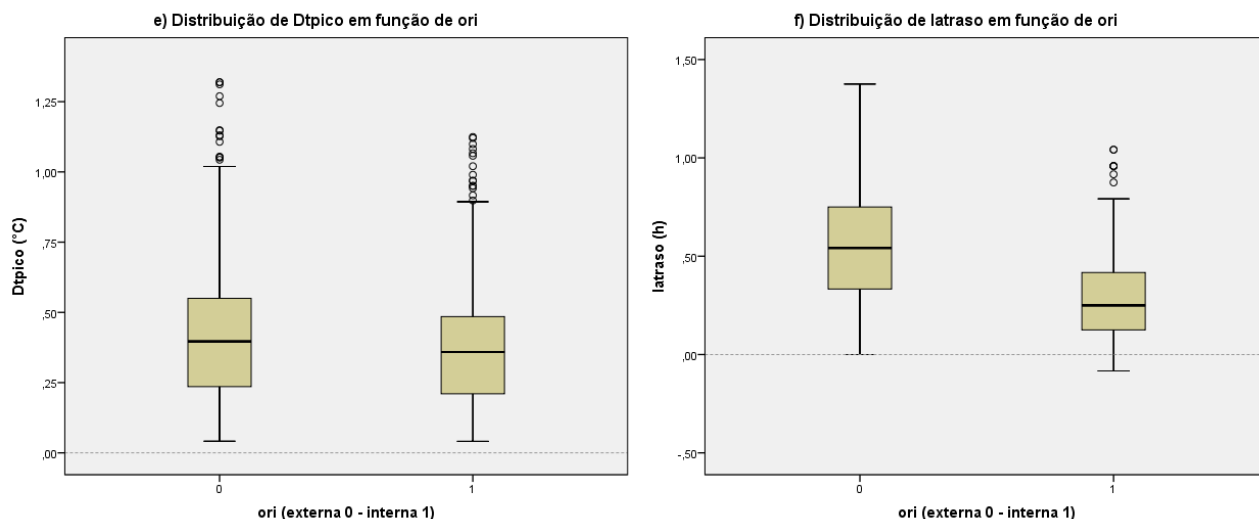
amplitude = 0,54) possui valores mais distantes de zero que o grupo PCM interno (mediana = -0,09, amplitude = 0,45).

Em **Dtamp**, todos os valores são positivos. O grupo PCM externo (mediana = 0,92, amplitude = 2,82) possui valores mais distantes de zero que o grupo PCM interno (mediana = 0,79, amplitude = 2,06).

Semelhante ao anterior, **Dtpico**, também apresenta apenas valores positivos. O grupo PCM externo (mediana = 0,40, amplitude = 1,28) também possui valores mais distantes de zero que o grupo PCM interno (mediana = 0,36, amplitude = 1,08).

Finalmente, em **Iatraso**, o grupo PCM externo (mediana = 0,54, amplitude = 1,38) possui valores mais distantes de zero que o grupo PCM interno (mediana = 0,25, amplitude = 1,13).





Considerando que, para todas as variáveis, os valores da orientação interna eram os mais próximos de zero, esse grupo foi cortado e foram analisados apenas os valores da orientação externa nas comparações baseadas em **esp**.

### 6.1.2. Comparação dos valores das Variáveis Dependentes baseados em **esp**

Os testes de normalidade de Shapiro-Wilk indicaram distribuição significativamente não-normal, com  $p < 0,05$  para todas as categorias de todas as variáveis analisadas. Bem como os testes de homogeneidade de variância de Levene indicaram distribuições significativamente não-homogêneas, com  $p < 0,001$  para todas as variáveis (Apêndice F).

O teste de comparação utilizado foi o Kruskal-Wallis de Amostras Independentes. Os testes demonstram que as categorias **esp** apresentam diferenças significativas em todas as variáveis, com:

$H(3) = 155,18$ ;  $p < 0,001$ , para **Iconf**;

$H(3) = 1647,52$ ;  $p < 0,001$ , para **DPgc**;

$H(3) = 1314,39$ ;  $p < 0,001$ , para **Dtmed**;

$H(3) = 1786,00$ ;  $p < 0,001$ , para **Dtamp**;

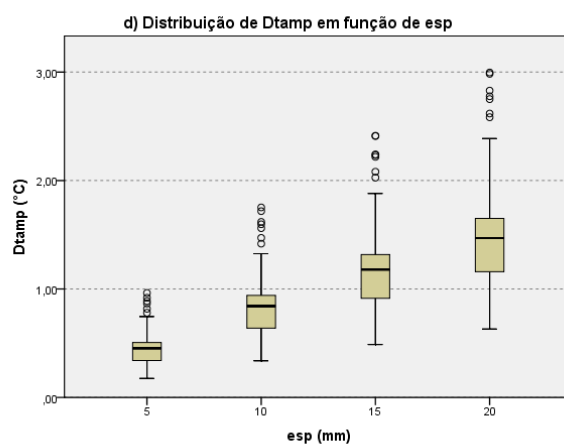
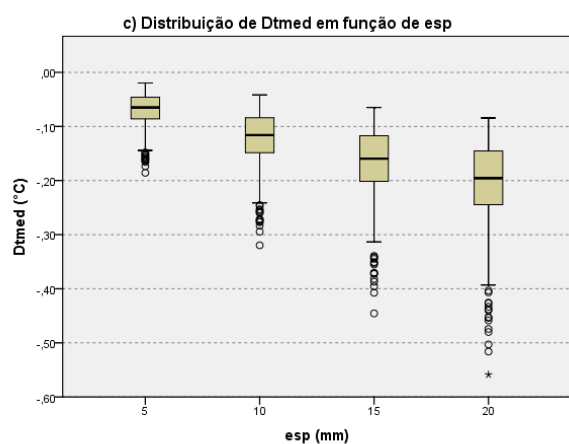
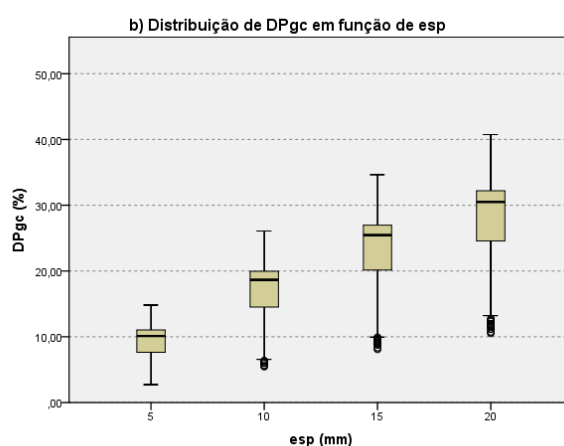
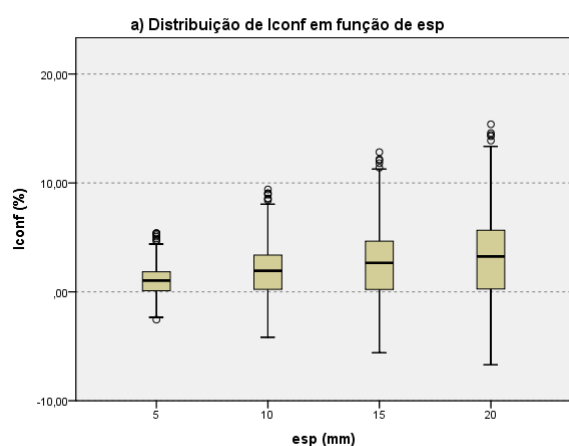
$H(3) = 1631,97$ ;  $p < 0,001$ , para **Dtpico**;

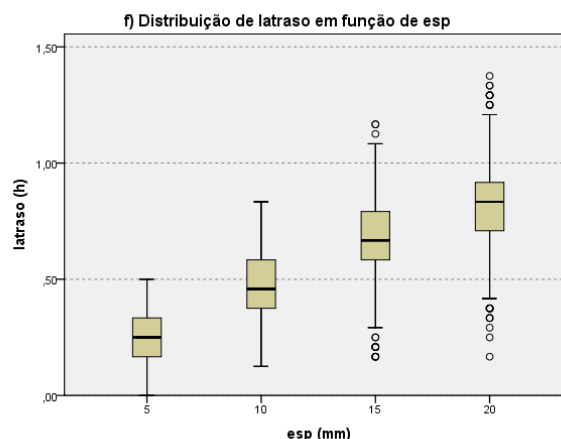
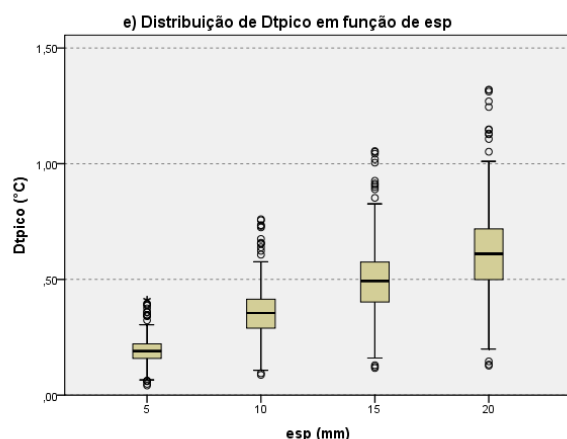
$H(3) = 1676,84$ ;  $p < 0,001$ , para **Iatraso**.

Gráficos 2 - Diagramas de Caixa e Bigodes da distribuição dos valores de Inc. do Conforto (**Iconf**) (a), Dec. Percentual do Ganho de Calor (**DPgc**) (b), Dec. da Média Anual da Temp. Superficial Interna (**Dtmed**) (c), Dec. da Amplitude diária da Temp. Superficial Interna (**Dtamp**) (d), Dec. do Pico diário da Temp. Superficial Interna (**Dtpico**) (e) e Inc. do Atraso Térmico (**Iatraso**) (f), categorizados em função da Espessura da camada PCM (**esp**).  
Fonte: Produzido pelo autor

O teste *post-hoc* utilizado para identificar as diferenças foi Teste de Subconjuntos Homogêneos (*Apêndice F*). Em todas as Variáveis Dependentes, todas as categorias **esp** apresentaram diferença entre si, apresentando maiores amplitudes e medianas mais distantes de zero à medida em que a espessura da placa PCM foi aumentada. (Gráficos 2).

Apenas o grupo **esp** 20mm foi mantido para os testes de comparação baseados em **tfus**.





### 6.1.3. Comparação dos valores das Variáveis Dependentes baseados em *tfus*

Os testes de normalidade de Kolmogorov-Smirnov indicaram distribuição normal com  $p > 0,05$  para todas as categorias *tfus* de *Iconf*, entretanto indicou uma distribuição significativamente não-homogênea com o teste de Levene, com  $p < 0,01$ . As demais Variáveis Dependentes apresentaram pelo menos uma categoria sem distribuição normal e, por isso, considera-se que nenhuma delas apresenta dados paramétricos (Apêndice F).

O teste de comparação utilizado foi o Kruskal-Wallis de Amostras Independentes. Os testes demonstram que as categorias *tfus* apresentam diferenças significativas em todas as variáveis, com:

$H(6) = 29,25$ ;  $p < 0,001$ , para *Iconf*;

$H(6) = 385,94$ ;  $p < 0,001$ , para *DPgc*;

$H(6) = 208,42$ ;  $p < 0,001$ , para *Dtmed*;

$H(6) = 234,64$ ;  $p < 0,001$ , para *Dtamp*;

$H(6) = 123,15$ ;  $p < 0,001$ , para *Dtpico*;

$H(6) = 106,77$ ;  $p < 0,001$ , para *latraso*.

O teste *post-hoc* utilizado para identificar as diferenças foi Teste de Subconjuntos Homogêneos (Apêndice F e Gráficos 3).

O *post-hoc* para a variável *Iconf* indicou que os valores mais distantes de zero estão no subconjunto das categorias *tfus* 19, 21, e 23 °C, entre as quais não há diferença estatisticamente significativa.

O *post-hoc* para a variável *DPgc* indicou que os valores mais distantes de zero estão no subconjunto também composto pelas

categorias **tfus** 19, 21, e 23 °C. Apesar de possuírem menor amplitude que as demais categorias, os valores mais extremos se apresentam nas mesmas.

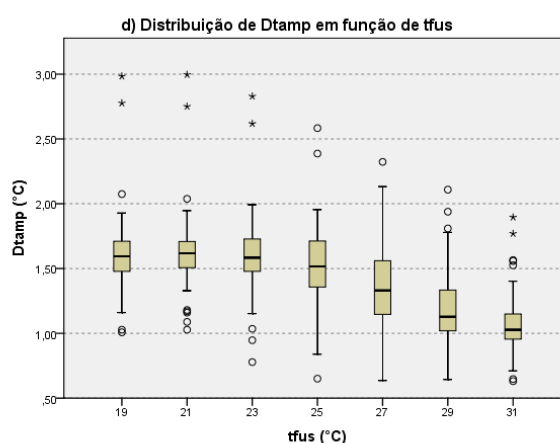
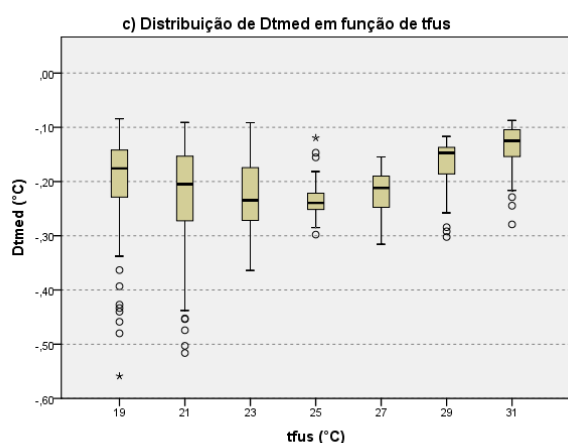
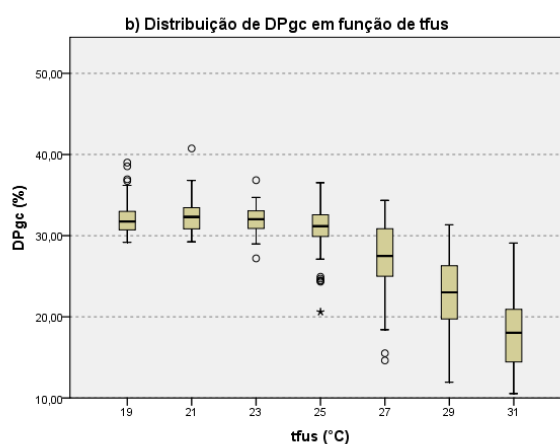
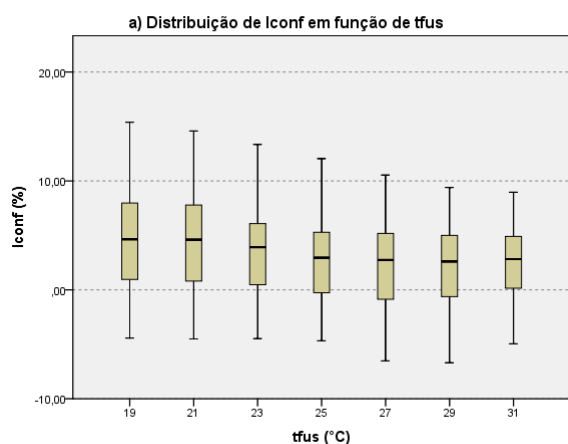
O *post-hoc* para a variável **Dtmed** indicou que os valores mais distantes de zero estão concentrados em maior quantidade no subconjunto das categorias **tfus** 23 e 25 °C. Entretanto, os valores mais extremos se apresentam no subconjunto das categorias **tfus** 19, 21 e 23 °C.

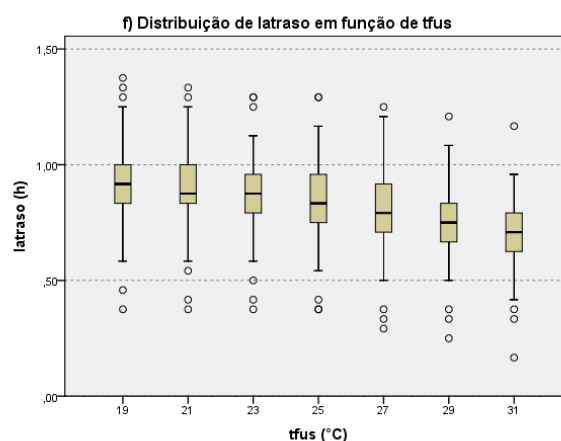
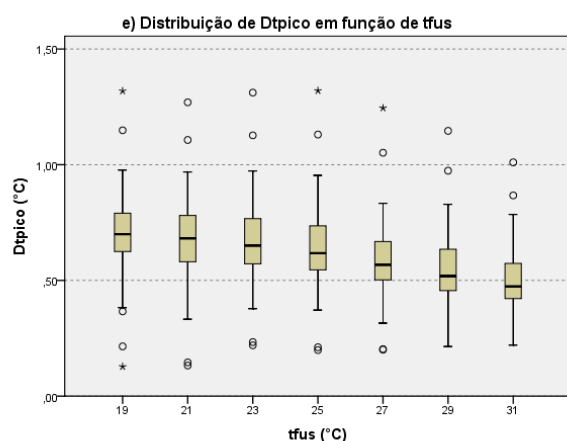
O *post-hoc* para a variável **Dtamp** indicou que os valores mais distantes de zero estão concentrados no subconjunto das categorias **tfus** 19, 21, 23, e 25 °C.

O *post-hoc* para a variável **Dtpico** indicou que os valores mais distantes de zero estão concentrados no subconjunto das categorias **tfus** 19, 21 e 23°C.

E finalmente, o *post-hoc* para a variável **Iatraso** indicou que os valores mais distantes de zero estão concentrados no subconjunto das categorias **tfus** 19, 21, 23 e 25 °C.

Gráficos 3 - Diagramas de Caixa e Bigodes da distribuição dos valores de Inc. do Conforto (**Iconf**) (a), Dec. Percentual do Ganho de Calor (**DPgc**) (b), Dec. da Média Anual da Temp. Superficial Interna (**Dtmed**) (c), Dec. da Amplitude diária da Temp. Superficial Interna (**Dtamp**) (d), Dec. do Pico diário da Temp. Superficial Interna (**Dtpico**) (e) e Inc. do Atraso Térmico (**Iatraso**) (f), categorizados em função da Temperatura de Fusão do PCM (**tfus**).  
Fonte: Produzido pelo autor





#### 6.1.4. Correlações bilaterais entre as Variáveis Dependentes

Os testes de normalidade de Shapiro-Wilk indicaram distribuição significativamente não-normal, com  $p < 0,001$ , para todas as Variáveis (*Apêndice F*). O teste de correlação utilizado foi o de Spearman, que se encontra sumarizado na Tabela 8.

Tabela 8 - Correlações bilaterais entre as variáveis Inc. do Conforto (**Iconf**), Dec. Percentual do Ganho de Calor (**DPgc**), Dec. da Média Anual da Temp. Superficial Interna (**Dtmed**), Dec. da Amplitude diária da Temp. Superficial Interna (**Dtamp**), Dec. do Pico diário da Temp. Superficial Interna (**Dtpico**) e Inc. do Atraso Térmico (**Iatraso**) – em branco as correlações com efeito de tamanho franco, em amarela claro as com efeito médio e em amarelo escuro as com efeito forte. Fonte: Produzido pelo autor

|                |        |                           | Correlações |         |         |         |         |         |
|----------------|--------|---------------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ró de Spearman | Iconf  | Coeficiente de Correlação | 1,000       | ,171**  | -,343** | ,177**  | ,065**  | ,229**  |
|                |        | Sig. (bilateral)          | .           | ,000    | ,000    | ,000    | ,000    | ,000    |
|                |        | N                         | 4816        | 4816    | 4816    | 4816    | 4816    | 4816    |
|                | DPgc   | Coeficiente de Correlação | ,171**      | 1,000   | -,518** | ,500**  | ,446**  | ,723**  |
|                |        | Sig. (bilateral)          | ,000        | .       | ,000    | ,000    | ,000    | ,000    |
|                |        | N                         | 4816        | 4816    | 4816    | 4816    | 4816    | 4816    |
|                | Dtmed  | Coeficiente de Correlação | -,343**     | -,518** | 1,000   | -,766** | -,600** | -,611** |
|                |        | Sig. (bilateral)          | ,000        | ,000    | .       | ,000    | ,000    | ,000    |
|                |        | N                         | 4816        | 4816    | 4816    | 4816    | 4816    | 4816    |
|                | Dtamp  | Coeficiente de Correlação | ,177**      | ,500**  | -,766** | 1,000   | ,958**  | ,708**  |
|                |        | Sig. (bilateral)          | ,000        | ,000    | ,000    | .       | ,000    | ,000    |
|                |        | N                         | 4816        | 4816    | 4816    | 4816    | 4816    | 4816    |
|                | Dtpico | Coeficiente de Correlação | ,065**      | ,446**  | -,600** | ,958**  | 1,000   | ,641**  |
|                |        | Sig. (bilateral)          | ,000        | ,000    | ,000    | ,000    | .       | ,000    |
|                |        | N                         | 4816        | 4816    | 4816    | 4816    | 4816    | 4816    |

|  |         |                           |        |        |         |        |        |       |
|--|---------|---------------------------|--------|--------|---------|--------|--------|-------|
|  | latraso | Coeficiente de Correlação | ,229** | ,723** | -,611** | ,708** | ,641** | 1,000 |
|  |         | Sig. (bilateral)          | ,000   | ,000   | ,000    | ,000   | ,000   | .     |
|  |         | N                         | 4816   | 4816   | 4816    | 4816   | 4816   | 4816  |

\*\* . A correlação é significativa no nível 0,01 (bilateral).

Todas as correlações se mostraram significativas com  $p < 0,001$ . Entretanto, apresentaram efeitos de tamanho diferentes. Segundo Cohen (1998, 1992, apud FIELD, 2013, pg. 57) o tamanho do efeito  $\rho$  (rô) é considerado:

- Pequeno, se  $0,1 \leq \rho < 0,3$
- Médio, se  $0,3 \leq \rho < 0,5$
- Grande, se  $\rho \geq 0,5$

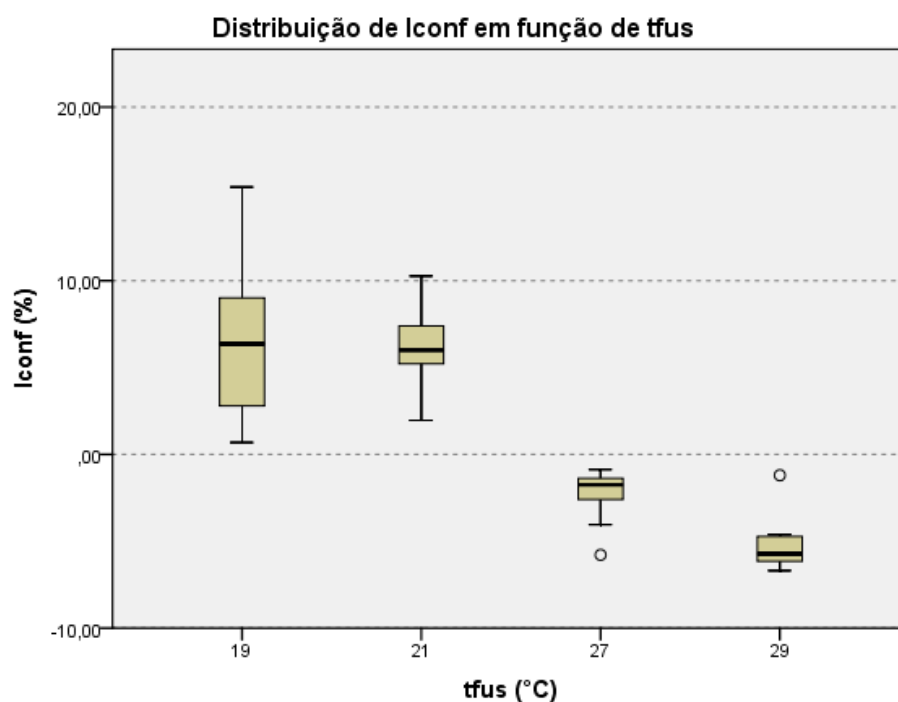
A tabela de correlações mostra que **Iconf** guarda correlações fracas ou até desprezíveis com as demais variáveis, à exceção **Dtmed** que é uma correlação de tamanho médio. Enquanto que as correlações entre todas as demais variáveis são quase todas fortes, com apenas um  $\rho < 0,5$ . Isso demonstra que a variação dos valores relativos ao Incremento de Conforto não guarda relação com a variação dos valores relativos ao desempenho térmico do material, nos diferentes municípios.

## 6.2. Dos casos de maior influência no Incremento do Conforto

Antes de apresentar os principais resultados dos casos de maior influência no Incremento do Conforto, vale ressaltar alguns pontos referentes à distribuição dos valores nas categorias **ori**, **esp** e **tfus**:

- Todos os casos mais influentes de **Iconf** por município pertenciam ao grupo PCM aplicado no exterior;
- Todos os casos mais influentes de **Iconf** por município pertenciam ao grupo da espessura 20mm;
- Apenas 4 temperaturas de fusão apresentaram resultados mais influentes por município, com os grupos 19 e 21 °C apresentando valores positivos de **Iconf** e os grupos 27 e 29 °C apresentando valores negativos, conforme o diagrama de caixa e bigodes a seguir (Gráfico 4).

Gráfico 4 - Diagramas de Caixa e Bigodes da distribuição dos valores mais influentes de Incremento do Conforto (**Iconf**) categorizados em função da Temperatura de Fusão do PCM (**tfus**).  
Fonte: Produzido pelo autor

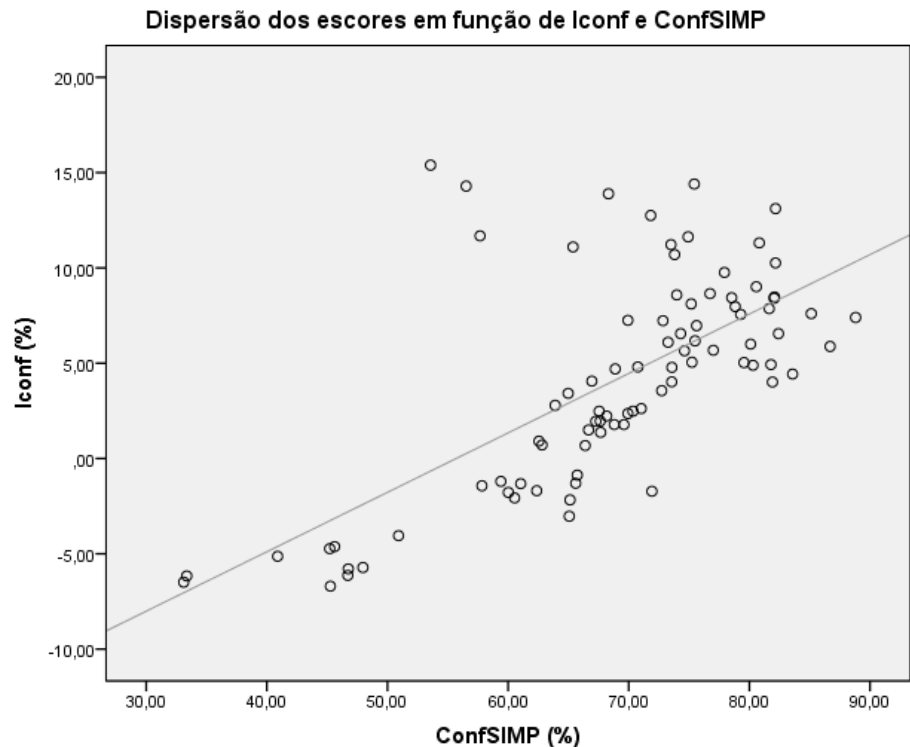


### 6.2.1. Correlação entre **Iconf** e **ConfSIMP**

Os testes de normalidade de Kolmogorov-Smirnov indicaram distribuição normal para a variável **Iconf** [ $D(86) = 0,061$ ;  $p > 0,05$ ]; e significativamente não-normal para a variável **ConfSIMP** [ $D(86) = 0,120$ ;  $p < 0,01$ ].

O teste de correlação utilizado foi o de Spearman, que demonstrou uma correlação significativamente forte entre as variáveis, com  $\rho = 0,656$ ,  $p < 0,001$ . Ou seja, o Incremento de Conforto com incorporação do PCM tende a ser maior em municípios nos quais paredes sem PCM já obtinham valores altos de Percentual de Horas de Conforto no ano (Gráfico 5), o que indica um uso mais restritivo do material.

Gráfico 5 - Dispersão dos escores em função do Incremento do Conforto (**Iconf**) e do Percentual de conforto anual alcançado na Zona Térmica com parede simples (**ConfSIMP**). Fonte: Produzido pelo autor



### 6.2.2. Regressão Linear

A Regressão Linear Múltipla executada no SPSS resultou em um modelo estatisticamente significativo [ $F(2, 83) = 797,837$ ;  $p < 0,001$ ;  $R^2 = 0,951$ ]. Entretanto, os resíduos não apresentaram distribuição normal (*Apêndice F*).

A Regressão de Superfície Resposta também resultou em um modelo estatisticamente significativo [ $F(2, 83) = 885,246$ ;  $p < 0,001$ ;  $R^2 = 0,955$ ], dessa vez com distribuição normal dos resíduos. Os valores dos coeficientes de regressão se encontram na Tabela 9, e demonstram por meio dos coeficientes padronizados ( $\beta$ ) que **TMA<sup>2</sup>** é o preditor mais determinante no modelo.

Tabela 9 - Coeficientes de regressão. Fonte: Produzido pelo autor

|                  |  | Coeficientes                  |             |                           |
|------------------|--|-------------------------------|-------------|---------------------------|
|                  |  | Coeficientes não padronizados |             | Coeficientes padronizados |
|                  |  | b                             | Erro Padrão | β                         |
| (Constante)      |  | 30,523                        | 0,886       |                           |
| TMA <sup>2</sup> |  | -0,053                        | 0,001       | -1,000*                   |
| TMA.AMA          |  | 0,038                         | 0,003       | ,365*                     |

Nota: \*p < 0,001

A equação que descreve a relação entre as variáveis é:

$$Iconf = 30,52 - 0,05.TMA^2 + 0,04.TMA.AMA$$

Onde:

**Iconf** = Incremento do Conforto

**TMA** = Temperatura Média Anual

**AMA** = Amplitude Média Anual

### 6.3. Da medida da influência do PCM no Incremento de Conforto no Semiárido

Tabela 10 (superior) - Estatísticas descritivas do Incremento do Conforto (**Iconf**) e Incremento do Conforto calculado para os municípios da tabela de Roriz (**IconfRORIZ**).  
Fonte: Produzido pelo autor

Tabela 11 (inferior) - Percentis da distribuição de dados do Incremento do Conforto (**Iconf**) e Incremento do Conforto calculado para os municípios da tabela de Roriz (**IconfRORIZ**).  
Fonte: Produzido pelo autor

Como se obteve da Regressão uma equação generalizável, capaz de prever **Iconf** em função de **TMA** e **AMA**, e os valores de **TMA** e **AMA** de Roriz se encontram dentro na faixa estudada, os valores de **IconfRORIZ** foram calculados, estando registrados na última coluna da tabela correspondente no *Apêndice B*.

Os dados de **Iconf** apresentam distribuição normal [ $D(86) = 0,061$ ;  $p > 0,05$ ], enquanto os dos dados de **IconfRORIZ** apresentam distribuição significativamente não-normal [ $W(391) = 0,083$ ;  $p < 0,001$ ].

A distribuição dos dados de **Iconf** e **IconfRORIZ** são descritos numericamente nas Tabelas 10 e 11; e visualmente pelos histogramas dos Gráficos 6 e 7.

|                                       |                 | Descritivas |             |             |             |
|---------------------------------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                                       |                 | Iconf       |             | IconfRORIZ  |             |
|                                       |                 | Estatística | Erro Padrão | Estatística | Erro Padrão |
| Média                                 |                 | 4,0786      | ,59974      | 9,9997      | ,19509      |
| 95% Intervalo de Confiança para Média | Limite inferior | 2,8862      |             | 9,6161      |             |
|                                       | Limite superior | 5,2711      |             | 10,3833     |             |
| 5% da média aparada                   |                 | 4,0836      |             | 10,0245     |             |
| Mediana                               |                 | 4,7400      |             | 10,6859     |             |
| Variância                             |                 | 30,934      |             | 14,881      |             |
| Desvio Padrão                         |                 | 5,56181     |             | 3,85763     |             |
| Mínimo                                |                 | -6,70       |             | -1,02       |             |
| Máximo                                |                 | 15,39       |             | 19,89       |             |
| Amplitude                             |                 | 22,09       |             | 20,91       |             |
| Amplitude interquartil                |                 | 7,71        |             | 5,45        |             |
| Assimetria                            |                 | -,132       | ,260        | -,223       | ,123        |
| Curtose                               |                 | -,650       | ,514        | -,269       | ,246        |

|                 |            | Percentis |         |        |         |         |         |         |
|-----------------|------------|-----------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|
|                 |            | 5         | 10      | 25     | 50      | 75      | 90      | 95      |
| Média Ponderada | Iconf      | -6,0110   | -4,6530 | ,2925  | 4,7400  | 8,0050  | 11,4060 | 13,6170 |
|                 | IconfRORIZ | 3,4035    | 4,5334  | 7,1200 | 10,6859 | 12,5671 | 14,6851 | 15,9562 |

Executando-se um Teste U de Mann-Whitney de amostras independentes, verificou-se uma diferença significativa entre os dois grupos de dados [ $U = 26980,50$ ;  $p < 0,001$ ]. ***IconfRORIZ*** (Mediana = 10,69) possui valores significativamente maiores que ***Iconf*** (Mediana = 4,74), conforme se pode verificar no Gráfico 8.

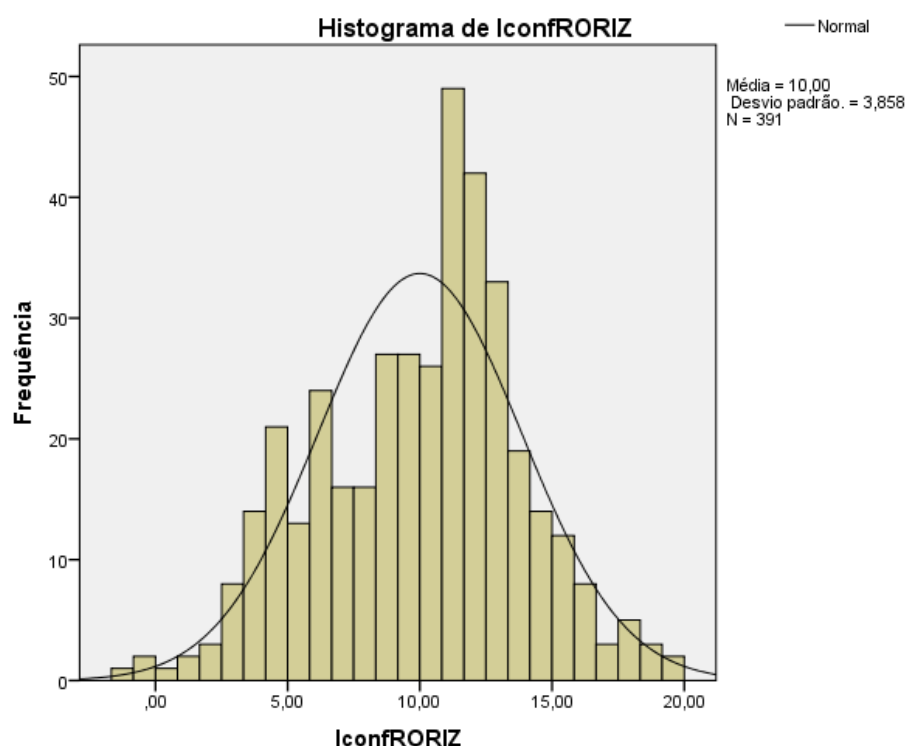
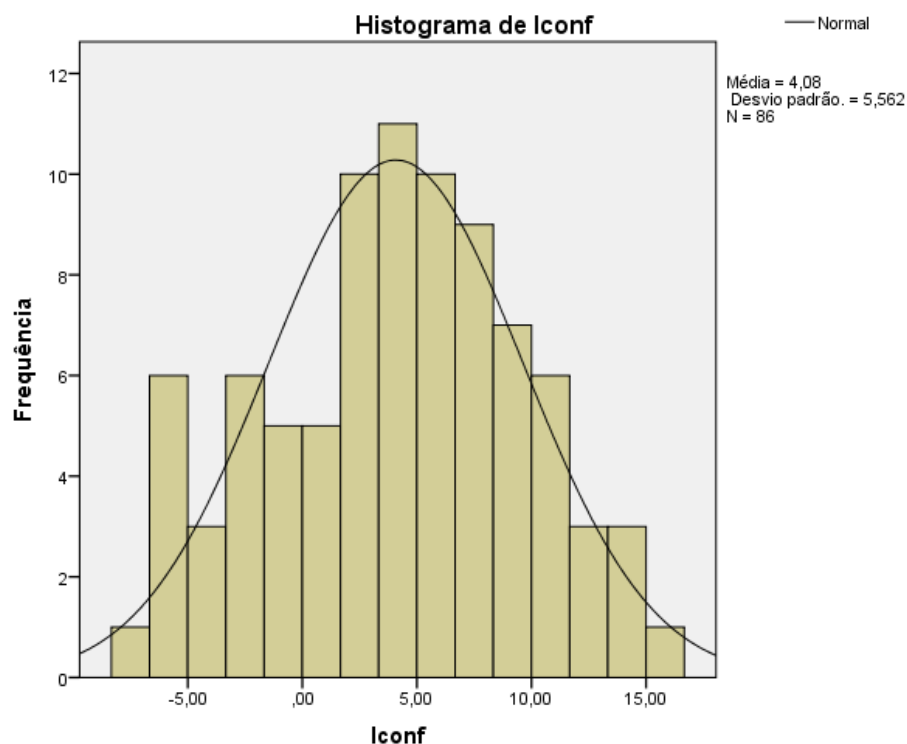
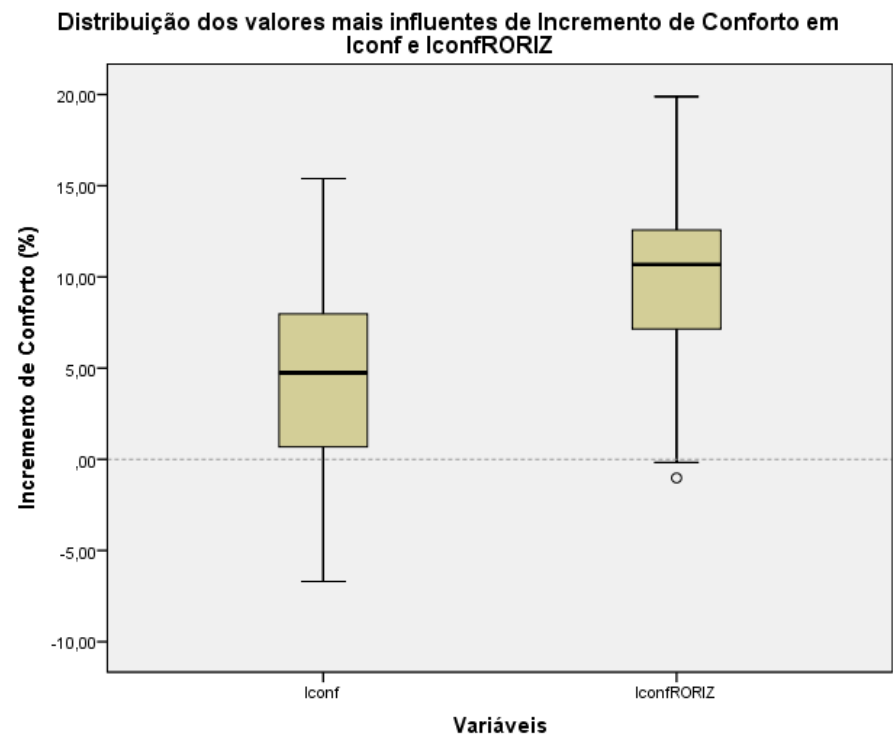


Gráfico 8 - Diagramas de Caixa e Bigodes da distribuição dos valores mais influentes de Incremento do Conforto nas categorias ***Iconf*** e ***IconfRORIZ***. Fonte: Produzido pelo autor



## 6.4. Dos casos característicos

De acordo com as médias ponderadas para os percentis 10%, 25%, 50%, 75% e 90% de ***Iconf***, da Tabela 11, bem como seus valores extremos inferior e superior, foram selecionados os seguintes municípios como casos característicos:

- < extremo: Jaguaruana-CE; ***Iconf*** = -6,70
- 10%: Remanso-BA; ***Iconf*** = -4,62
- 25%: Macau-RN; ***Iconf*** = 0,68
- 50%: Oeiras-PI; ***Iconf*** = 4,70
- 75%: Campina Grande-PB; ***Iconf*** = 7,97
- 90%: Arcoverde-PE; ***Iconf*** = 11,31
- > extremo: Mossoró-RN; ***Iconf*** = 15,39

A Figura X ilustra as posições dos sete casos selecionados relativas ao histograma de distribuição dos dados de ***Iconf***.

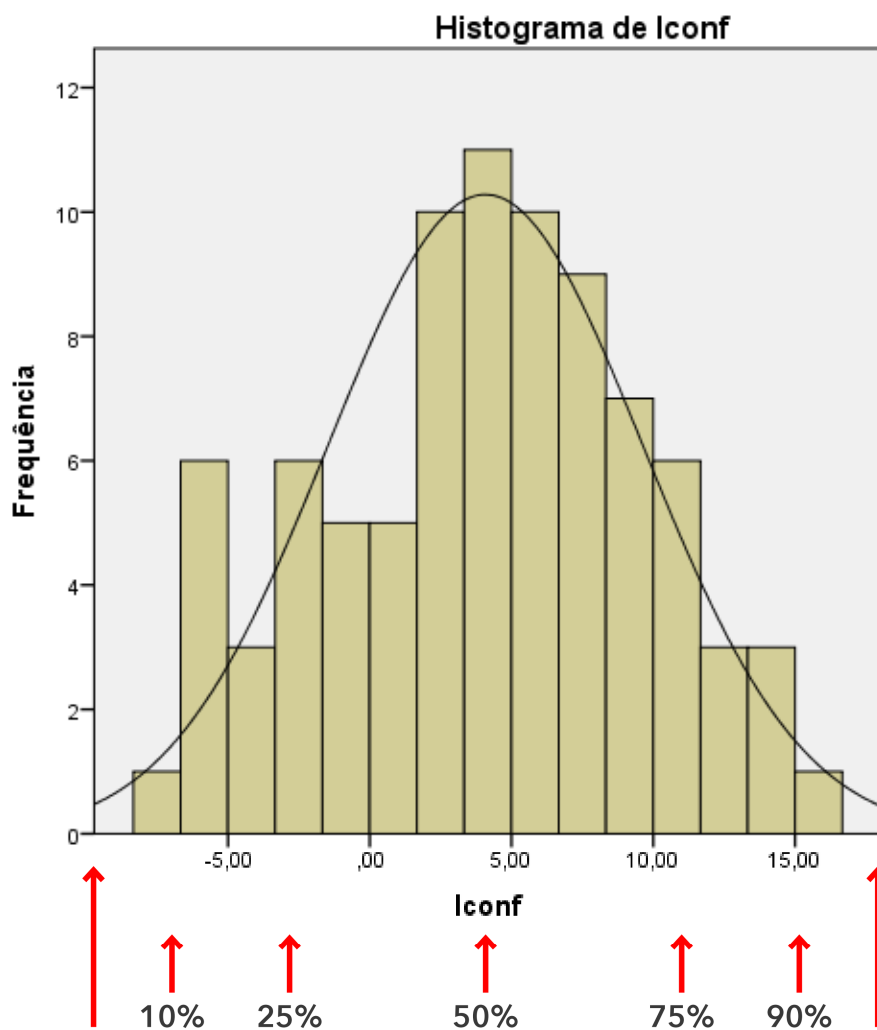


Figura 56 - Indicação das posições dos sete casos característicos (setas vermelhas), relativas à distribuição dos dados de Incremento do Conforto (***Iconf***). Fonte: Produzido pelo autor

Gráfico 9 (superior) -  
Temperatura do ar externa  
e Temperaturas  
superficiais da parede  
OESTE com e sem PCM,  
de um dia médio do mês de  
dezembro, para a cidade  
de Mossoró-RN.  
Produzido pelo autor

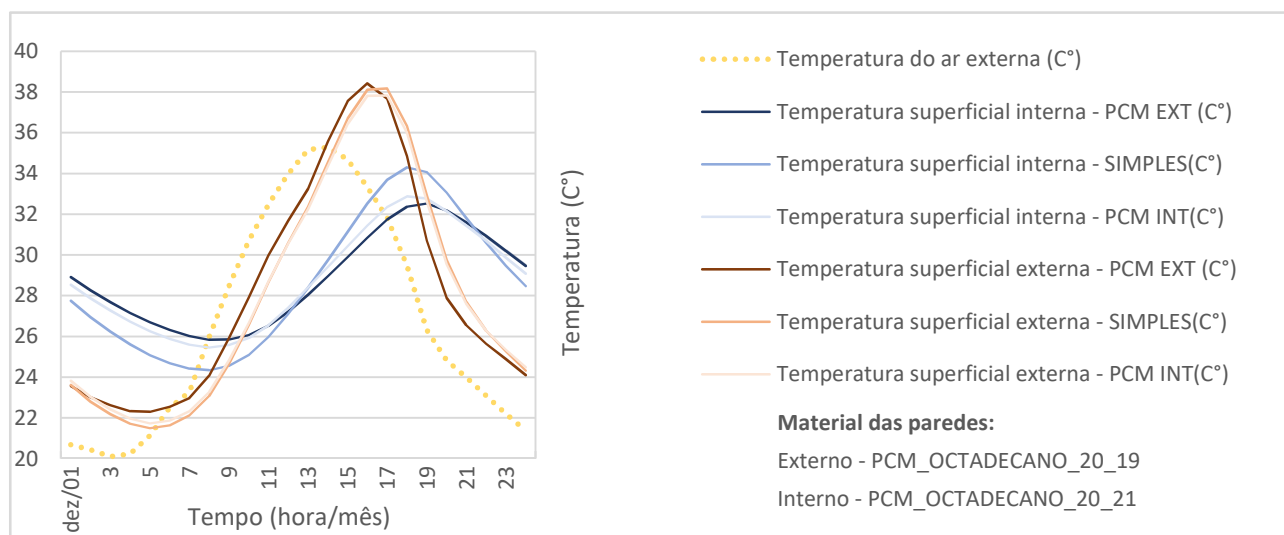
Gráfico 10 (inferior) -  
Temperatura do ar externa  
e Temperaturas  
superficiais da parede  
LESTE com e sem PCM,  
de um dia médio do mês de  
dezembro, para a cidade  
de Campina Grande-PB.  
Produzido pelo autor

Os gráficos de temperatura superficial, fluxo de calor e condições de conforto se encontram no *Apêndice G*, sendo apresentados a seguir apenas alguns recortes com base nas principais observações. Para informações mais detalhadas, as planilhas completas dos casos característicos se encontram no *Apêndice H*.

Em geral, a curva da temperatura superficial externa com PCM externo é ligeiramente mais alta que as curvas da temperatura superficial externa da parede simples e da com PCM interno (Gráficos 9 e 11), salvo exceções, como a apresentada no Gráfico 10.

As curvas da temperatura superficial interna das paredes com PCM tendem a demonstrar uma amplitude menor que a da parede simples, reduzindo o pico da curva e elevando o vale (Gráficos 9 e 11). A amplitude do PCM externo é sempre ligeiramente menor que a do

#### TEMPERATURAS DIÁRIAS MÉDIAS MENSAIS – FACHADA OESTE – MOSSORÓ-RN



#### TEMPERATURAS DIÁRIAS MÉDIAS MENSAIS – FACHADA LESTE – CAMPINA GRANDE-PB

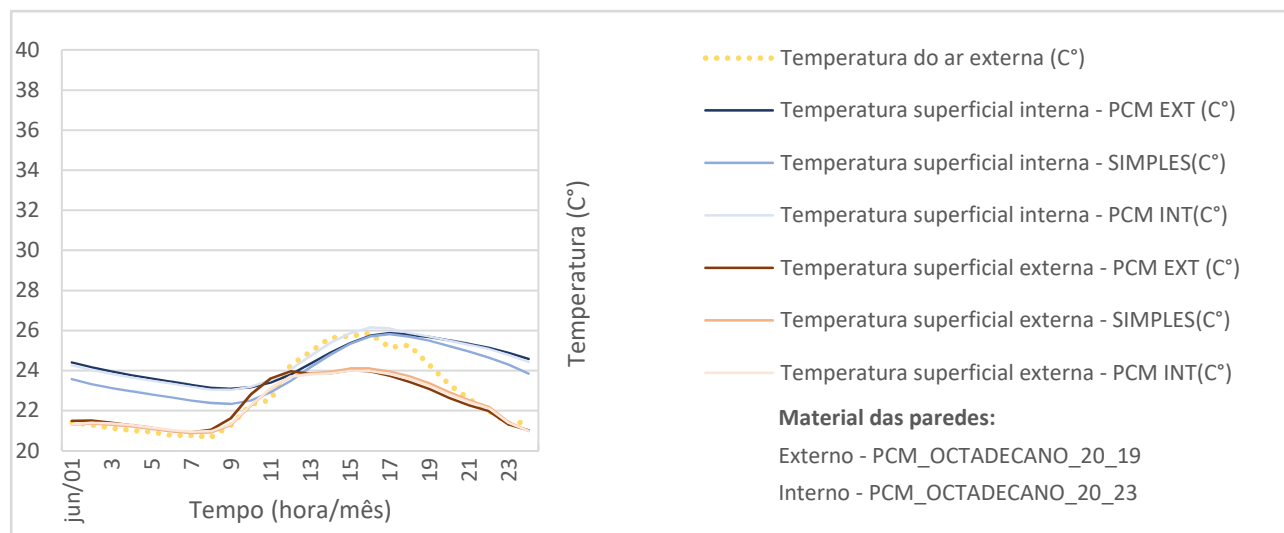


Gráfico 11 (superior) - Temperatura do ar externa e Temperaturas superficiais da parede OESTE com e sem PCM, de um dia médio do mês de dezembro, para a cidade de Jaguaruana-CE. Produzido pelo autor

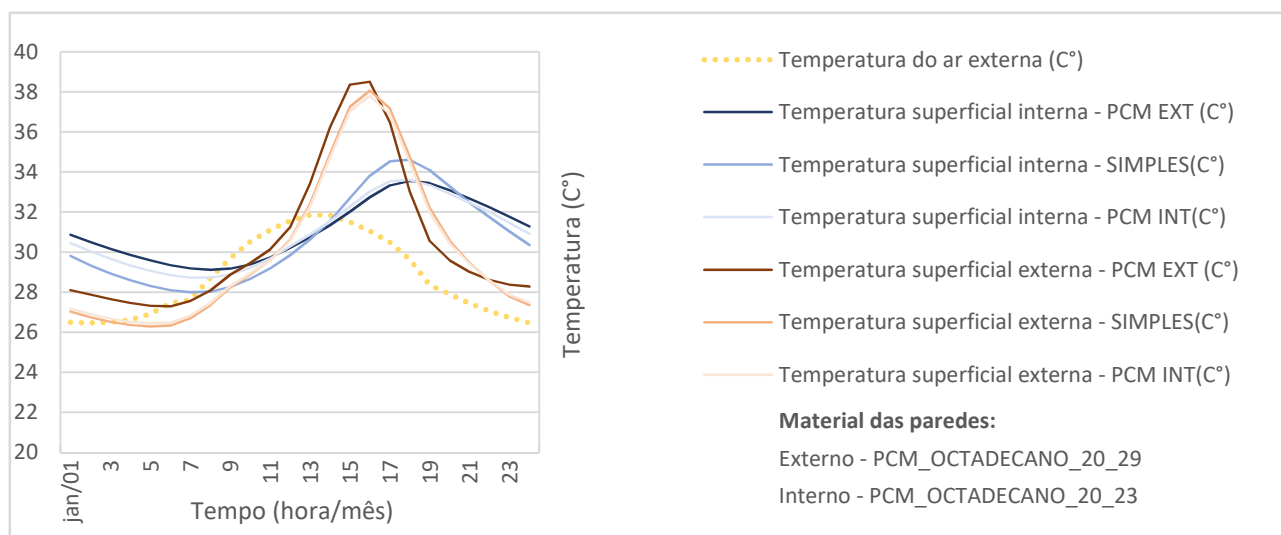
Gráfico 12 (inferior) - Fluxos de calor pela parede OESTE com e sem PCM, de um dia médio de todos os meses do ano, para a cidade de Jaguaruana-CE. Produzido pelo autor

PCM interno. Não há muita diferença no atraso da hora do pico das paredes com e sem PCM, e quando este ocorre, geralmente é de no máximo uma hora (Gráficos 9, 10 e 11).

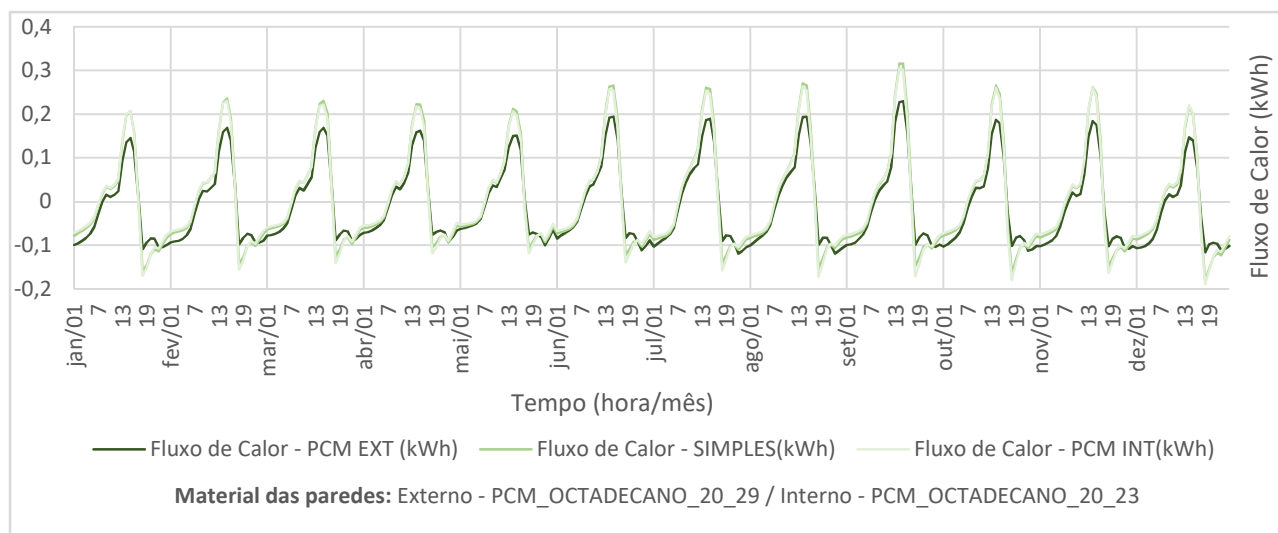
Independentemente da presença ou não do PCM nas paredes, as curvas das temperaturas superficiais internas sempre estão compreendidas dentro da faixa das superficiais externas, exceto na orientação leste dos municípios com inverno mais rigoroso (como é o caso de Campina Grande, apresentado no Gráfico 10).

Com relação à curva da temperatura externa do ar, quando as amplitudes diárias são maiores, as temperaturas superficiais internas tendem a se estabilizar dentro de sua faixa (Gráfico 9). À medida em que a amplitude diminui, a curva das temperaturas superficiais internas tende a se equilibrar próxima do pico da temperatura do ar

#### TEMPERATURAS DIÁRIAS MÉDIAS MENSAIS – FACHADA OESTE – JAGUARUANA-CE



#### FLUXOS DE CALOR DIÁRIOS MÉDIOS MENSAIS – FACHADA OESTE – JAGUARUANA-CE



externa (Gráfico 10), muitas vezes, elevando-se ligeiramente acima desse pico (Gráfico 11). Assim, se as temperaturas externas estão em média acima da temperatura de conforto e possuem pouca amplitude, o PCM tenderá a estabilizar as temperaturas superficiais internas acima da zona de conforto.

Independentemente do município e do mês analisado, as curvas do fluxo de calor demonstram sempre a redução dos ganhos (fluxos positivos) nas paredes com o PCM com orientação externa (Gráfico 12). Não se percebe diferença expressiva do fluxo de calor entre a parede simples e a com PCM na orientação interna.

Com relação às condições de conforto, através da observação das médias de desconforto por frio e por calor dos casos característicos, observa-se de forma geral reduções mais significativas no desconforto por frio do que no desconforto por calor (Tabela 12).

Tabela 12 - Valores absolutos e diferenciais de desconforto por calor ou frio nos sete casos característicos selecionados - em vermelho, há aumento do desconforto com relação ao quarto com parede simples; em verde, há diminuição do desconforto com relação ao quarto com parede simples. Fonte: Produzido pelo autor

| Desconforto por Frio ou Calor nos Casos Característicos |               |       |                      |      |                           |                      |                          |                     |
|---------------------------------------------------------|---------------|-------|----------------------|------|---------------------------|----------------------|--------------------------|---------------------|
|                                                         | Município     | Iconf | Orientação do quarto | PCM  | Desc. Calor (% horas/ano) | (SIMP – Desc. Calor) | Desc. Frio (% horas/ano) | (SIMP – Desc. Frio) |
| <                                                       | Jaguaruana-CE | -6,70 | SO                   | SIMP | 51,38                     | 0,00                 | 0,07                     | 0,00                |
|                                                         |               |       |                      | EXT  | 58,46                     | -7,08                | 0,03                     | 0,03                |
|                                                         |               |       |                      | INT  | 55,55                     | -4,17                | 0,05                     | 0,02                |
|                                                         |               |       | NE                   | SIMP | 57,96                     | 0,00                 | 0,06                     | 0,00                |
|                                                         |               |       |                      | EXT  | 64,35                     | -6,39                | 0,01                     | 0,05                |
|                                                         |               |       |                      | INT  | 61,20                     | -3,24                | 0,03                     | 0,02                |
| 10%                                                     | Remanso-BA    | -4,62 | SO                   | SIMP | 48,34                     | 0,00                 | 0,05                     | 0,00                |
|                                                         |               |       |                      | EXT  | 51,77                     | -3,42                | 0,00                     | 0,05                |
|                                                         |               |       |                      | INT  | 50,02                     | -1,68                | 0,00                     | 0,05                |
|                                                         |               |       | NE                   | SIMP | 60,33                     | 0,00                 | 0,05                     | 0,00                |
|                                                         |               |       |                      | EXT  | 66,31                     | -5,98                | 0,03                     | 0,01                |
|                                                         |               |       |                      | INT  | 63,74                     | -3,41                | 0,03                     | 0,01                |
| 25%                                                     | Macau-RN      | 0,68  | SO                   | SIMP | 30,19                     | 0,00                 | 0,00                     | 0,00                |
|                                                         |               |       |                      | EXT  | 29,14                     | 1,05                 | 0,00                     | 0,00                |
|                                                         |               |       |                      | INT  | 29,51                     | 0,68                 | 0,00                     | 0,00                |
|                                                         |               |       | NE                   | SIMP | 37,03                     | 0,00                 | 0,00                     | 0,00                |
|                                                         |               |       |                      | EXT  | 38,24                     | -1,21                | 0,00                     | 0,00                |
|                                                         |               |       |                      | INT  | 37,81                     | -0,78                | 0,00                     | 0,00                |
| 50%                                                     | Oeiras-PI     | 4,70  | SO                   | SIMP | 25,43                     | 0,00                 | 2,53                     | 0,00                |
|                                                         |               |       |                      | EXT  | 21,71                     | 3,72                 | 0,16                     | 2,37                |
|                                                         |               |       |                      | INT  | 22,56                     | 2,88                 | 0,83                     | 1,70                |
|                                                         |               |       | NE                   | SIMP | 33,09                     | 0,00                 | 1,18                     | 0,00                |
|                                                         |               |       |                      | EXT  | 30,88                     | 2,21                 | 0,08                     | 1,10                |
|                                                         |               |       |                      | INT  | 31,63                     | 1,46                 | 0,29                     | 0,88                |

|     |                   |       |    |      |       |      |       |       |
|-----|-------------------|-------|----|------|-------|------|-------|-------|
| 75% | Campina Grande-PB | 7,97  | SO | SIMP | 13,65 | 0,00 | 8,29  | 0,00  |
|     |                   |       |    | EXT  | 10,34 | 3,31 | 3,55  | 4,75  |
|     |                   |       |    | INT  | 11,74 | 1,92 | 3,93  | 4,37  |
|     |                   |       | NE | SIMP | 15,14 | 0,00 | 5,26  | 0,00  |
|     |                   |       |    | EXT  | 10,72 | 4,42 | 1,79  | 3,47  |
|     |                   |       |    | INT  | 12,93 | 2,20 | 2,11  | 3,15  |
|     |                   |       | SO | SIMP | 8,76  | 0,00 | 12,18 | 0,00  |
|     |                   |       |    | EXT  | 5,63  | 3,13 | 3,72  | 8,46  |
|     |                   |       |    | INT  | 6,86  | 1,89 | 4,76  | 7,42  |
| 90% | Arcoverde-PE      | 11,31 | NE | SIMP | 10,11 | 0,00 | 7,32  | 0,00  |
|     |                   |       |    | EXT  | 4,97  | 5,15 | 1,44  | 5,88  |
|     |                   |       |    | INT  | 7,25  | 2,87 | 2,04  | 5,27  |
|     |                   |       | SO | SIMP | 26,96 | 0,00 | 16,95 | 0,00  |
|     |                   |       |    | EXT  | 23,28 | 3,69 | 4,26  | 12,69 |
|     |                   |       |    | INT  | 24,11 | 2,85 | 8,30  | 8,65  |
|     |                   |       | NE | SIMP | 10,11 | 0,00 | 7,32  | 0,00  |
|     |                   |       |    | EXT  | 4,97  | 5,15 | 1,44  | 5,88  |
|     |                   |       |    | INT  | 7,25  | 2,87 | 2,04  | 5,27  |
| >   | Mossoró-RN        | 15,39 | SO | SIMP | 26,96 | 0,00 | 16,95 | 0,00  |
|     |                   |       |    | EXT  | 23,28 | 3,69 | 4,26  | 12,69 |
|     |                   |       |    | INT  | 24,11 | 2,85 | 8,30  | 8,65  |
|     |                   |       | NE | SIMP | 10,11 | 0,00 | 7,32  | 0,00  |
|     |                   |       |    | EXT  | 4,97  | 5,15 | 1,44  | 5,88  |
|     |                   |       |    | INT  | 7,25  | 2,87 | 2,04  | 5,27  |
|     |                   |       | SO | SIMP | 26,96 | 0,00 | 16,95 | 0,00  |
|     |                   |       |    | EXT  | 23,28 | 3,69 | 4,26  | 12,69 |
|     |                   |       |    | INT  | 24,11 | 2,85 | 8,30  | 8,65  |

Com base na tabela Jaguaruana-CE e Remanso-BA, que tendem a apresentar apenas desconforto por calor ao longo do ano inteiro, possuem suas condições de conforto pioradas com o acréscimo do PCM. O aumento do desconforto por calor é maior quando o PCM é posto nas paredes externas. Macau-RN igualmente não apresenta valores de desconforto por frio. Porém, a adição do PCM não impacta significativamente no conforto, que melhora levemente no quarto Sudoeste e piora levemente no quarto Nordeste.

Oeiras-PI é o único caso em que se observa que, em todas as situações, as condições de desconforto por calor diminuíram mais do que o desconforto por frio. Vale ressaltar, todavia, que o desconforto por frio em Oeiras-PI no quarto com parede simples não é tão grande quanto o mesmo desconforto atingido em Campina Grande-PB, Arcoverde-PE e Mossoró-RN.

Nos últimos três municípios citados, com exceção do quarto Nordeste de Campina Grande-PB, a redução do desconforto por frio é maior do que a redução do desconforto por calor. A maior redução de desconforto por frio observada se dá no quarto Sudoeste de Mossoró-RN, quando o PCM é posto no exterior (12,69%).

O Gráfico 13, referente ao quarto Sudoeste do município de Jaguaruana-CE, demonstra a predominância das horas de desconforto por calor no município. Com a adição do PCM, observa-

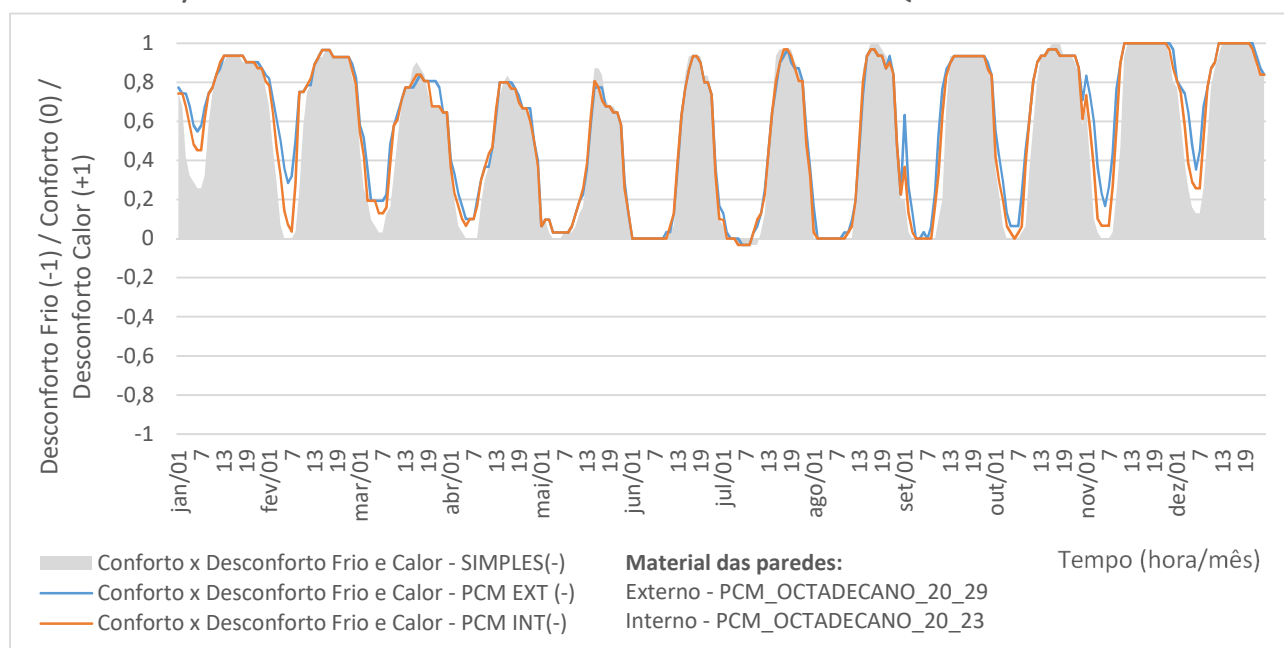
Gráfico 13 (superior) - Conforto e Desconforto por frio ou calor diário médio mensal do quarto Sudoeste, para a cidade de Jaguaruana-CE. Produzido pelo autor

Gráfico 14 (inferior) - Conforto e Desconforto por frio ou calor diário médio mensal do quarto Sudoeste, para a cidade de Arcoverde-PE. Produzido pelo autor

se uma tendência de elevação das linhas acima de 0 (zero), evidenciando um aumento da quantidade de horas de desconforto por calor, no início da manhã, entre os meses de outubro e maio.

Enquanto isso o Gráfico 14 demonstra como a adição do PCM, seja interno ou externo, tende a aproximar as linhas de 0 (zero) no município de Arcoverde-PE, seja diminuindo o desconforto por frio, seja por calor. O gráfico também demonstra as diferenças da efetividade do material entre diferentes estações, com uma maior redução do desconforto por frio durante o inverno.

**CONFORTO/DESCONFORTO POR FRIO OU CALOR DIÁRIO MÉDIO MENSAL – QUARTO SO – JAGUARUANA-CE**



**CONFORTO/DESCONFORTO POR FRIO OU CALOR DIÁRIO MÉDIO MENSAL – QUARTO SO – ARCOVERDE-PE**

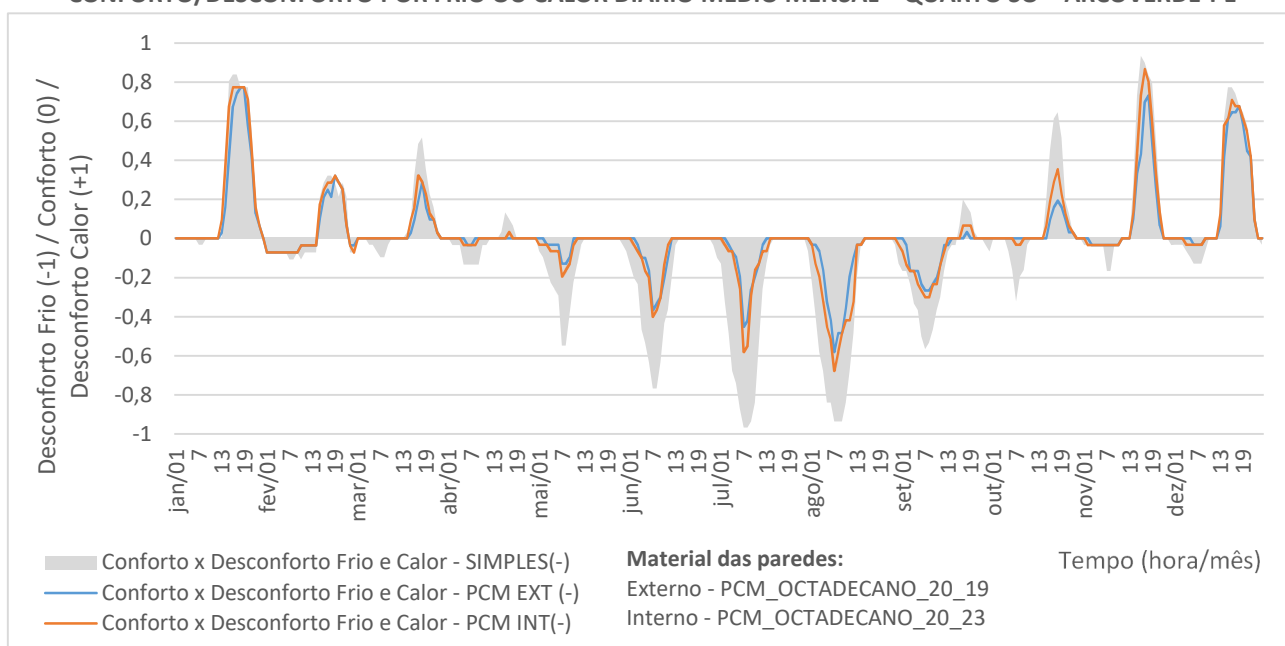
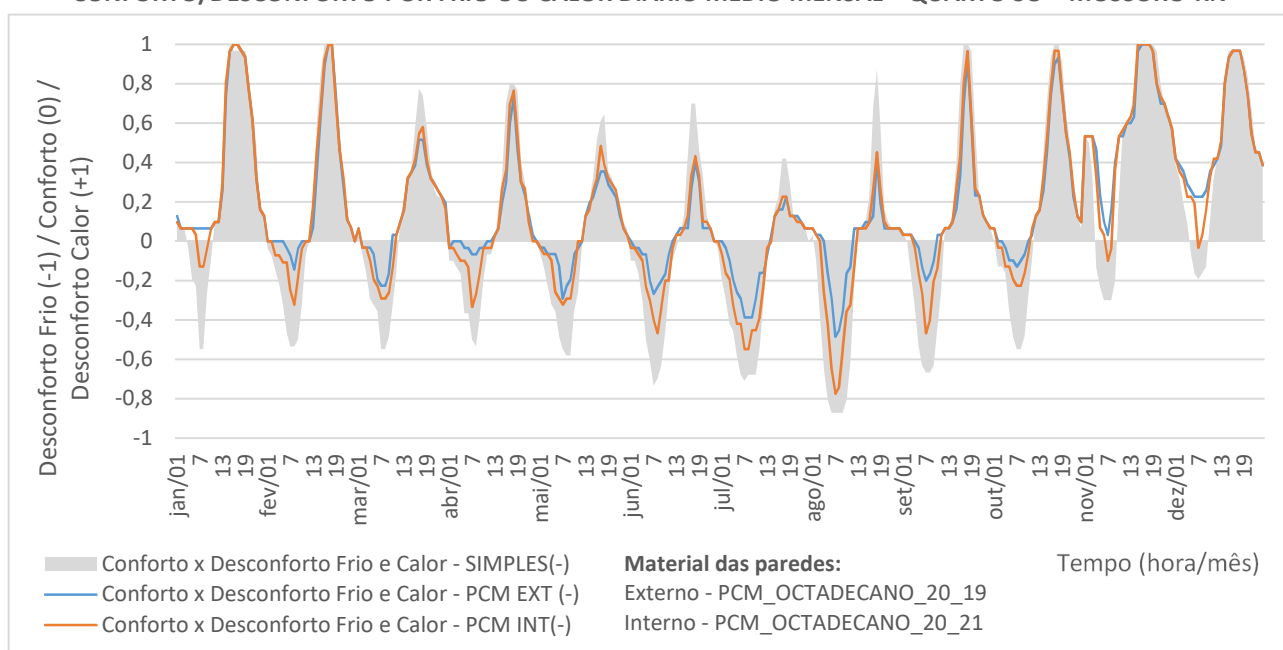


Gráfico 15 (superior) - Conforto e Desconforto por frio ou calor diário médio mensal do quarto Sudoeste, para a cidade de Mossoró-RN. Produzido pelo autor

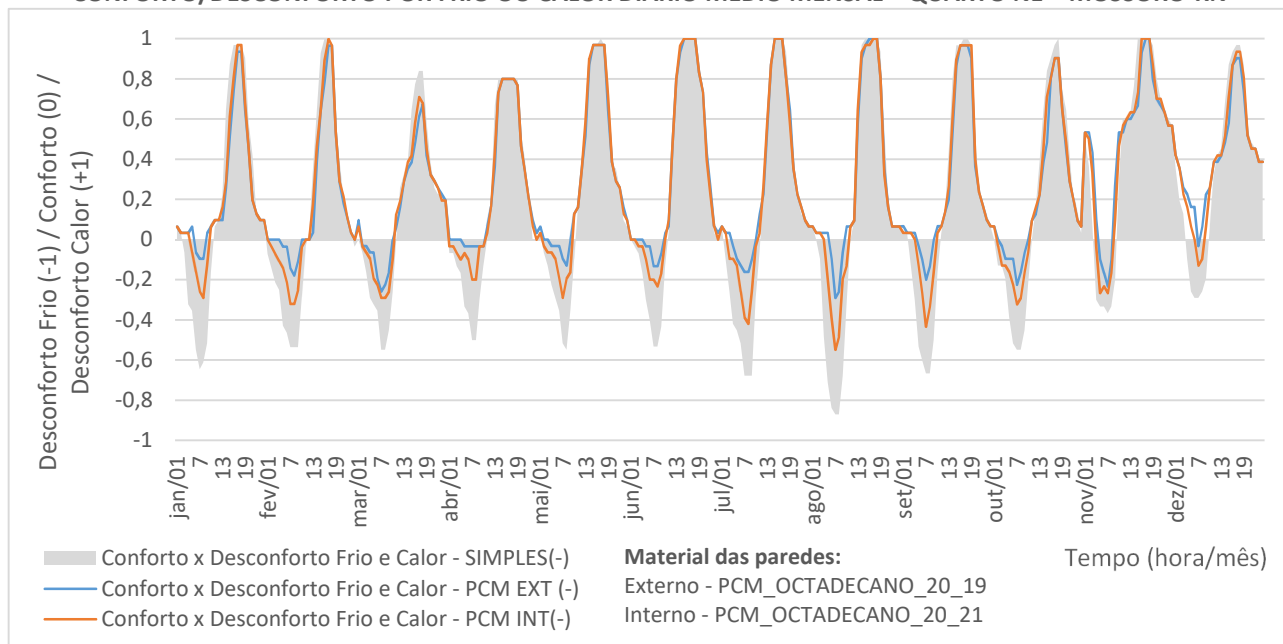
Gráfico 16 (inferior) - Conforto e Desconforto por frio ou calor diário médio mensal do quarto Nordeste, para a cidade de Mossoró-RN. Produzido pelo autor

Mossoró-RN, por outro lado, demonstra picos de desconforto por calor e por frio em ambas as estações do ano (Gráficos 15 e 16). O PCM atua bem durante o inverno, reduzindo ambos desconfortos por calor e por frio no quarto Sudoeste, aumentando, entretanto, o desconforto por calor no início da manhã de alguns dias dos meses de dezembro e janeiro. Percebe-se que a orientação do cômodo exerce influência sobre o impacto do PCM nas condições de conforto ambientais, uma vez que o quarto Nordeste não apresenta redução do desconforto por calor no período de inverno com a sua implementação, enquanto o quarto Sudoeste sim.

**CONFORTO/DESCONFORTO POR FRIO OU CALOR DIÁRIO MÉDIO MENSAL – QUARTO SO – MOSSORÓ-RN**



**CONFORTO/DESCONFORTO POR FRIO OU CALOR DIÁRIO MÉDIO MENSAL – QUARTO NE – MOSSORÓ-RN**



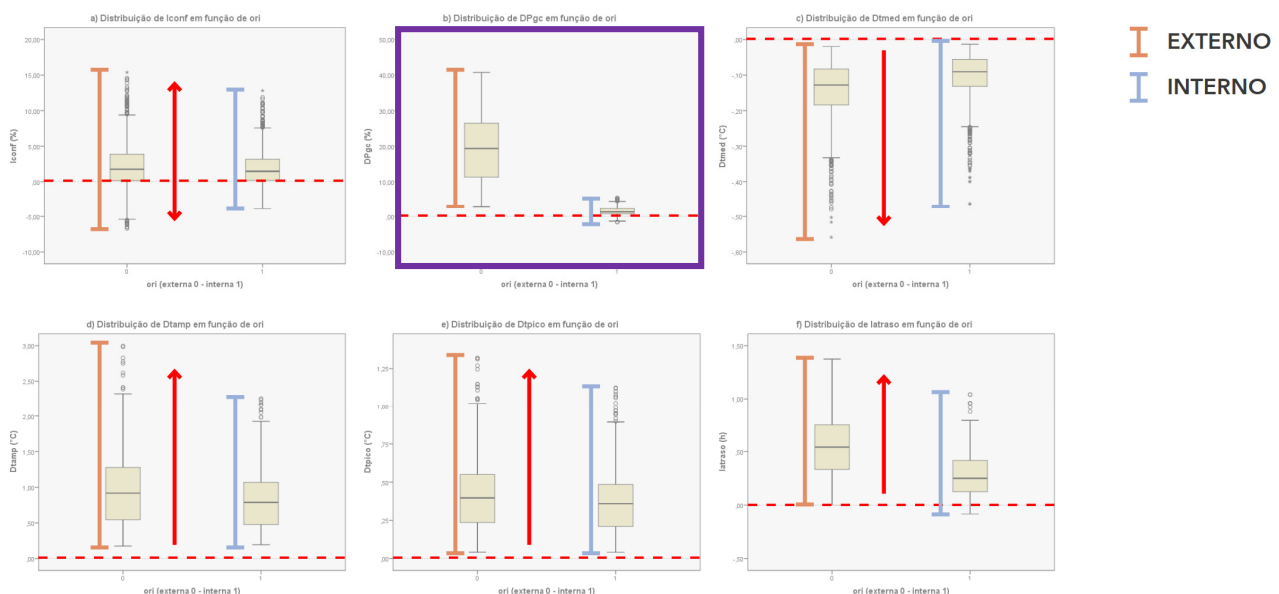
## **7. Discussões**

Levando em consideração os objetivos específicos de pesquisa, a partir dos resultados das análises de dados, são levantadas as seguintes constatações:

#### A. Com relação à influência dos fatores de implementação do PCM sobre as medidas de conforto e desempenho térmico das paredes:

- Ao contrário do que se encontra escrito em parte da literatura, o uso de PCMs na superfície exterior das paredes externas potencializa o efeito da Inércia Térmica, quando comparado à aplicação nas superfícies internas. Isso se evidencia na observação da distribuição dos dados apresentados no *Item 6.1.1*, que se conservam mais distantes de zero (são mais diferentes da parede sem PCM) na orientação externa (Figura 57); além dos Gráficos 9 a 11 (*Item 6.4*), que demonstram que a curva de variação das temperaturas superficiais internas se mantém sempre ligeiramente mais achatadas com o PCM externo do que com o PCM interno.
- O fato de haver uma diferença expressiva nas curvas do fluxo de calor entre as paredes com PCM externo e interno do Gráfico 12 (*Item 6.4*), mesmo apresentando temperaturas superficiais internas relativamente semelhantes, reforça a ideia de que o PCM externo efetivamente eleva a Inércia Térmica da parede, reduzindo os ganhos de calor através das

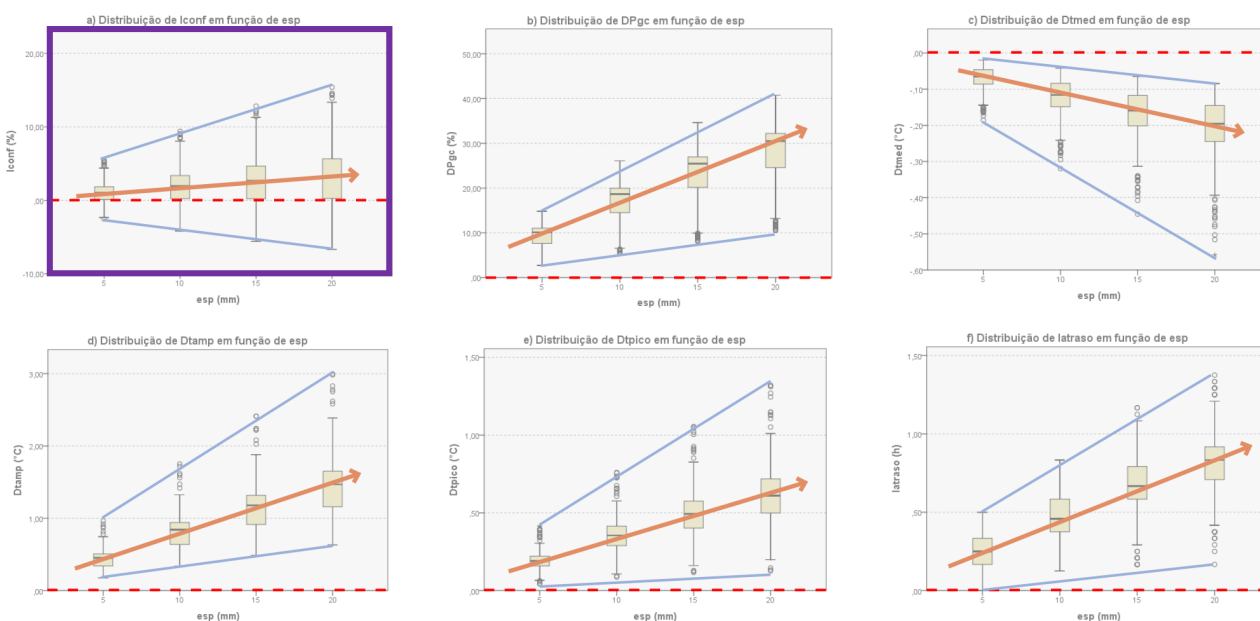
Figura 57 - Diagramas ilustrando a tendência de dispersão dos dados das variáveis dependentes (setas vermelhas) com relação a zero (linha tracejada), considerando sua categorização em função da Orientação da disposição do PCM (*ori*). Amplitudes da dispersão dos dados ilustradas pelas barras em laranja (PCM externo) e azul (PCM interno). Destaque em roxo para o Dec. Percentual do Ganho de Calor (*DPgc*), que apresenta diferença brusca na distribuição dos dados entre as duas orientações. Fonte: Produzido pelo autor



paredes; enquanto o PCM interno ajudaria a estabilizar a temperatura do ar que já se encontra no interior – o que também se evidencia pela distribuição dos dados do Decremento Percentual do Ganho de Calor entre as duas orientações (Figura 57). É possível que o maior impacto da redução do Ganho de Calor por meio das paredes com PCM externo se demonstre mais nitidamente, em contraposição ao PCM interno, em ambientes condicionados artificialmente, como se observa no estudo de Lei et al. (2016).

- Com relação à variação da espessura, a distribuição dos dados no *Item 6.1.2* demonstra que o PCM exerce maior influência sobre as medidas de conforto e desempenho térmico na espessura 20mm, aumentando à medida em que uma maior quantidade do material é acrescentada – ou seja, aumentando-se a capacidade de armazenamento de calor latente da parede (Figura 58). Essa influência, entretanto, pode representar uma tendência positiva, negativa, ou ser apenas caracterizada por uma maior dispersão dos valores. Todas as medidas que indicam um aumento da Inércia térmica – referente ao Decremento do Ganho de Calor, Amplitude, Pico e Incremento do Atraso – apresentaram uma tendência positiva com o aumento da espessura; entretanto observa-se no aumento da espessura uma elevação da temperatura superficial interna média de até 0,56°C (Gráficos 2).

Figura 58 - Diagramas ilustrando a tendência de dispersão dos dados das variáveis dependentes (seta laranja) com relação a zero (linha tracejada), considerando sua categorização em função da Espessura da camada PCM (**esp**). Em todos os casos, existe uma tendência de aumento da amplitude da dispersão dos dados à medida em que a espessura da camada aumenta (linhas azuis). Destaque em roxo para o Inc. do Conforto (**Iconf**), que é a única das variáveis dependentes que apresenta tanto resultados positivos, quanto negativos. Fonte: Produzido pelo autor



Por outro lado, apesar de apresentar uma leve tendência positiva, o Incremento de Conforto se caracterizou principalmente por um aumento progressivo do espalhamento de seus valores com o aumento da espessura, sendo a única média a apresentar ambos valores positivos e negativos (Figura 58).

- Com relação às temperaturas de fusão, não foi possível precisar uma temperatura específica na qual o PCM exerça maior influência sobre as paredes para todos os municípios, apesar de que essa influência é maior na faixa entre 19 e 25 °C (*Item 6.1.3*). A própria seleção dos casos mais influentes no Incremento de Conforto de cada município demonstra isso (*Item 6.2*), uma vez que 100% dos casos mais influentes eram de paredes com PCM externo e espessura 20mm, enquanto não se apresentou uma única opção no fator temperatura de fusão (Gráfico 4).

#### **B. Com relação à forma como as medidas de conforto e de desempenho térmico se relacionam:**

- Apesar de significativamente correlacionados, a variação dos valores da medida de conforto não apresentou correlação forte com a variação dos valores das demais medidas (*Item 6.1.4*). Isso acontece porque, conforme já foi discutido sobre dispersão dos valores com relação ao fator espessura, a Inércia Térmica tende a aumentar com o aumento da espessura da camada PCM independentemente do município, mas nem sempre essa inércia é desejável como estratégia passiva de condicionamento para um determinado município. Como exemplo, observando-se as tabelas dos dados processados do município de Jaguaruana-CE individualmente, os menores valores de Incremento de Conforto se apresentam na situação com camada PCM de 20mm de espessura externa; porém, é também nesta situação que se apresenta um maior atraso térmico e maiores reduções no ganho de calor e na amplitude da temperatura superficial interna (Tabela 13; *Apêndice H*). Isso atesta a heterogeneidade das condições climáticas do

Semiárido Brasileiro e a demanda por diferentes estratégias de condicionamento.

| INCREMENTO CONFORTO (%) - CE_Jaguaruana |                    |        |        |       |       |       |        |        |        |       |
|-----------------------------------------|--------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|
| T. Fusão (°C)                           | Espessura PCM (mm) |        |        |       |       |       |        |        |        |       |
|                                         | 20 (E)             | 15 (E) | 10 (E) | 5 (E) | 0     | 5 (I) | 10 (I) | 15 (I) | 20 (I) |       |
|                                         | 19                 | -4,26  | -3,46  | -2,36 | -1,19 | 0,00  | -1,02  | -1,95  | -2,77  | -3,66 |
|                                         | 21                 | -4,34  | -3,46  | -2,35 | -1,20 | 0,00  | -1,02  | -1,95  | -2,77  | -3,66 |
|                                         | 23                 | -4,32  | -3,48  | -2,36 | -1,20 | 0,00  | -1,03  | -1,95  | -2,77  | -3,66 |
|                                         | 25                 | -4,67  | -3,75  | -2,66 | -1,48 | 0,00  | -1,03  | -1,95  | -2,79  | -3,68 |
|                                         | 27                 | -6,52  | -5,25  | -3,84 | -2,15 | 0,00  | -1,06  | -1,99  | -2,81  | -3,65 |
|                                         | 29                 | -6,70  | -5,59  | -4,09 | -2,21 | 0,00  | -0,83  | -1,64  | -2,35  | -3,09 |
|                                         | 31                 | -4,65  | -3,77  | -2,54 | -1,36 | 0,00  | -0,89  | -1,73  | -2,55  | -3,34 |

| DECREMENTO PERCENTUAL GANHO DE CALOR (%) - CE_Jaguaruana |                    |        |        |       |       |       |        |        |        |      |
|----------------------------------------------------------|--------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|------|
| T. Fusão (°C)                                            | Espessura PCM (mm) |        |        |       |       |       |        |        |        |      |
|                                                          | 20 (E)             | 15 (E) | 10 (E) | 5 (E) | 0     | 5 (I) | 10 (I) | 15 (I) | 20 (I) |      |
|                                                          | 19                 | 30,40  | 25,43  | 18,63 | 10,11 | 0,00  | 0,37   | 0,73   | 1,05   | 1,36 |
|                                                          | 21                 | 30,47  | 25,44  | 18,64 | 10,10 | 0,00  | 0,37   | 0,73   | 1,05   | 1,36 |
|                                                          | 23                 | 30,55  | 25,45  | 18,65 | 10,12 | 0,00  | 0,37   | 0,73   | 1,05   | 1,36 |
|                                                          | 25                 | 31,08  | 25,95  | 19,20 | 10,67 | 0,00  | 0,39   | 0,75   | 1,08   | 1,39 |
|                                                          | 27                 | 32,51  | 27,31  | 20,29 | 11,28 | 0,00  | 0,57   | 1,03   | 1,43   | 1,80 |
|                                                          | 29                 | 30,04  | 24,94  | 18,08 | 9,65  | 0,00  | 0,91   | 1,73   | 2,45   | 3,11 |
|                                                          | 31                 | 26,12  | 21,60  | 15,55 | 8,19  | 0,00  | 1,02   | 1,95   | 2,82   | 3,60 |

| DECREMENTO AMPLITUDE T. SUP. INTERNA (°C) - CE_Jaguaruana |                    |        |        |       |      |       |        |        |        |      |
|-----------------------------------------------------------|--------------------|--------|--------|-------|------|-------|--------|--------|--------|------|
| T. Fusão (°C)                                             | Espessura PCM (mm) |        |        |       |      |       |        |        |        |      |
|                                                           | 20 (E)             | 15 (E) | 10 (E) | 5 (E) | 0    | 5 (I) | 10 (I) | 15 (I) | 20 (I) |      |
|                                                           | 19                 | 1,65   | 1,31   | 0,93  | 0,50 | 0,00  | 0,41   | 0,75   | 1,04   | 1,29 |
|                                                           | 21                 | 1,65   | 1,31   | 0,93  | 0,50 | 0,00  | 0,41   | 0,75   | 1,04   | 1,29 |
|                                                           | 23                 | 1,65   | 1,31   | 0,93  | 0,50 | 0,00  | 0,41   | 0,75   | 1,04   | 1,29 |
|                                                           | 25                 | 1,68   | 1,33   | 0,96  | 0,52 | 0,00  | 0,41   | 0,75   | 1,04   | 1,29 |
|                                                           | 27                 | 1,73   | 1,40   | 1,02  | 0,57 | 0,00  | 0,40   | 0,74   | 1,03   | 1,28 |
|                                                           | 29                 | 1,58   | 1,24   | 0,87  | 0,46 | 0,00  | 0,38   | 0,70   | 0,99   | 1,24 |
|                                                           | 31                 | 1,28   | 1,01   | 0,71  | 0,38 | 0,00  | 0,36   | 0,68   | 0,95   | 1,20 |

| INCREMENTO ATRASO T. SUP. INTERNA (h) - CE_Jaguaruana |                    |        |        |       |      |       |        |        |        |      |
|-------------------------------------------------------|--------------------|--------|--------|-------|------|-------|--------|--------|--------|------|
| T. Fusão (°C)                                         | Espessura PCM (mm) |        |        |       |      |       |        |        |        |      |
|                                                       | 20 (E)             | 15 (E) | 10 (E) | 5 (E) | 0    | 5 (I) | 10 (I) | 15 (I) | 20 (I) |      |
|                                                       | 19                 | 0,75   | 0,63   | 0,54  | 0,29 | 0,00  | -0,04  | 0,13   | 0,17   | 0,33 |
|                                                       | 21                 | 0,75   | 0,63   | 0,54  | 0,29 | 0,00  | -0,04  | 0,13   | 0,17   | 0,33 |
|                                                       | 23                 | 0,75   | 0,63   | 0,54  | 0,29 | 0,00  | -0,04  | 0,13   | 0,17   | 0,33 |
|                                                       | 25                 | 0,71   | 0,58   | 0,46  | 0,29 | 0,00  | -0,04  | 0,13   | 0,17   | 0,33 |
|                                                       | 27                 | 0,67   | 0,58   | 0,38  | 0,29 | 0,00  | -0,04  | 0,13   | 0,17   | 0,33 |
|                                                       | 29                 | 0,71   | 0,58   | 0,38  | 0,29 | 0,00  | -0,04  | 0,13   | 0,17   | 0,29 |
|                                                       | 31                 | 0,63   | 0,58   | 0,42  | 0,25 | 0,00  | -0,04  | 0,17   | 0,25   | 0,38 |

Tabela 13 - Valores de Inc. do Conforto, Dec. Percentual do Ganho de Calor, Dec. da Amplitude diária da Temp. Superficial Interna e Inc. do Atraso Térmico, resultantes do processamento de dados do município de Jaguaruana-CE. Destaque (em roxo) para a coluna dos valores da situação com camada PCM 20mm externa, onde se observam os valores mais distantes de zero. Fonte: Produzido pelo autor

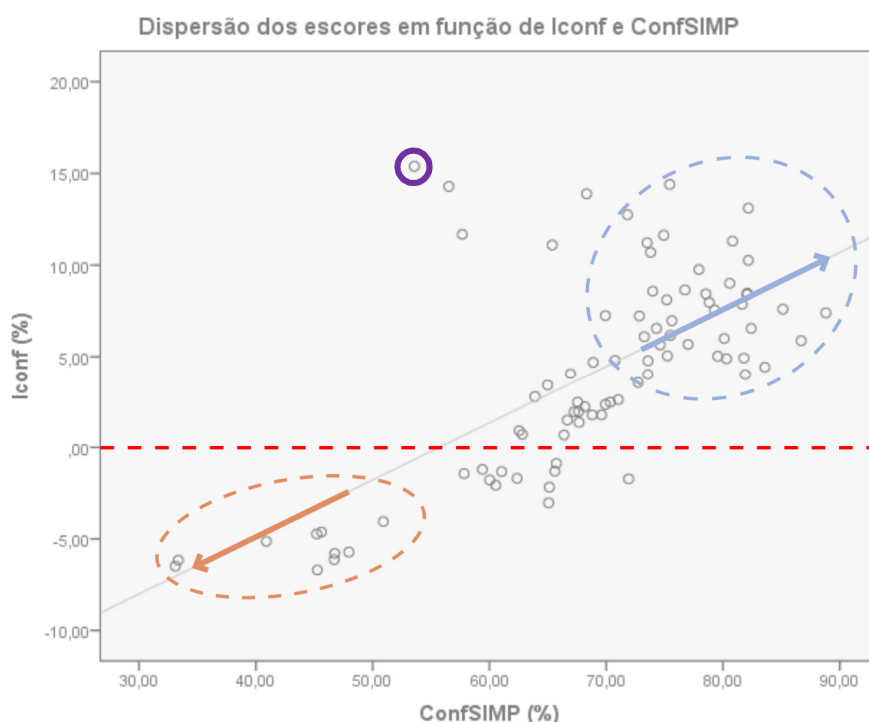
### C. Com relação à contribuição da Inércia Térmica com implementação de PCMs nas condições de conforto no Semiárido Brasileiro:

- Selecionando-se apenas os casos mais influentes com relação aos fatores de implementação do PCM para cada município, foi possível desenvolver uma equação de regressão estatisticamente significativa e generalizável (  **$I_{conf} = 30,52 - 0,05.TMA^2 + 0,04.TMA.AMA$**  ), permitindo prever em 95,5% dos casos ( $R^2 = 0,955$ ) a contribuição que a implementação de PCMs exerce sobre as condições de conforto de um dado município, com base na temperatura do ar externa (*Item 6.2.2*).
- Os coeficientes padronizados de regressão demonstraram que a Temperatura Média Anual do município é a variável mais determinante no modelo de regressão, ao ponto do seu quadrado ( **$TMA^2$** ), contribuir em média com 100% nos resultados do Incremento do Conforto ( $\beta = -1,000$ ). Essa tendência é negativa, o que quer dizer que a contribuição da implementação de PCMs é maior à medida em que a Temperatura Média Anual é menor (*Item 6.2.2*). Isso explica porque o Gráfico 4 apresentou valores positivos de Incremento do Conforto em temperaturas de fusão mais baixas e valores negativos nas temperaturas de fusão mais altas.
- A análise das condições de desconforto por Frio ou Calor nos sete casos característicos (Tabela 12 e Gráficos 13 a 16) também ajuda a compreender porque o PCM atua tão melhor em municípios com temperaturas médias mais baixas. Essa análise evidencia que, não apenas o PCM atua melhor ao diminuir o desconforto por frio com relação ao calor, como também acentua o desconforto por calor em municípios com médias de temperatura mais elevadas ou situações específicas de verão.
- O fato da Temperatura Média Anual ser a variável mais influente na predição do Incremento de Conforto não anula o papel da Amplitude Diária Média Anual, uma vez que o caso

que mais se beneficiou com a incorporação do PCM às paredes (Mossoró-RN) não é o caso com menor Temperatura Média Anual, mas é o caso com maior Amplitude Diária Média (*Item 6.4*).

- Essa relação entre o Incremento de Conforto e a Amplitude Diária também pode ser observada nas curvas das temperaturas superficiais internas das paredes com PCM apresentadas nos Gráficos 9 a 11, que tendem a se manter mais ou menos próximas do pico da curva da temperatura externa do ar a depender da amplitude desta curva. Conforme já mencionado nos resultados da pesquisa, se as temperaturas externas estão em média acima da temperatura de conforto e possuem pouca amplitude, o efeito da Inercia Térmica do PCM tende a estabilizar as temperaturas superficiais internas fora da Zona de Conforto (como fica evidente nos casos de Jaguaruana-CE e Remanso-BA); enquanto grandes amplitudes tendem a estabilizar essas temperaturas mais próximas da Zona de Conforto (como no exemplo de Mossoró-RN).
- Dentro do escopo estudado, os municípios que já apresentavam valores elevados de Percentual de Conforto Anual com paredes simples tendem a se beneficiar mais do uso de PCMs, enquanto os casos com valores baixos tendem a ser prejudicados, constatação evidenciada pelo teste de correlação do *Item 6.2.1*. Apesar do caso com maior de Incremento de Conforto (Mossoró-RN) alcançar apenas 53,57% de horas de conforto no ano com a parede sem PCM, ao observar o gráfico de dispersão dos dados entre ***Iconf*** e ***ConfSIMP*** (Figura 59), percebe-se que o melhor caso não pode ser assumido como regra. Nenhum dos casos com menos de 50% de conforto com parede sem PCM foram beneficiados com a incorporação do PCM, e por isso a aplicação de PCMs no Semiárido Brasileiro não pode ser assumido como regra geral para todos os municípios.

Figura 59 - Diagrama ilustrando, em azul, a tendência de concentração de valores altos do Incremento do Conforto (**Iconf**) em municípios com alto Percentual de conforto anual alcançado com parede simples (**ConfSIMP**); e em laranja a tendência da concentração dos valores negativos. Em destaque (círculo roxo) Mossoró-RN apresenta o maior valor de **Iconf**, apesar de alcançar apenas 53,57% de **ConfSIMP**. Fonte: Produzido pelo autor



- A partir da média (4,08%) e desvio padrão (5,56%) dos valores de **Iconf** apresentados na Tabela 10, é seguro estimar que: cerca de 23% dos municípios do Semiárido Brasileiro apresentariam valores de Incremento de Conforto abaixo de zero  $[score\ z = (0 - 4,08)/5,56 = -0,733 \therefore menor\ porção(0,73) = 0,2327]$ , ou seja, seriam prejudicados com o uso do PCM nas paredes; enquanto aproximadamente 27% dos municípios apresentariam relativa baixa melhoria, com valores entre 0 e 4,08%; e aproximadamente metade dos municípios seria beneficiada com valores a partir de 4,08% de Incremento de Conforto (Figura 60).
- A obtenção de uma equação de regressão generalizável (Item 6.2.2) permitiu comparar os valores do Incremento de Conforto de dados climáticos de diferentes fontes. Dessa forma, os valores obtidos por meio das simulações computacionais foram comparados aos valores obtidos por meio da aplicação da equação de regressão aos dados de Roriz (Item 6.3). Os dados de Roriz apresentaram resultados bem mais otimista, com uma Mediana de 10,69% contra 4,74%, destacando-se ainda o valor mínimo de -1,02% e máximo de 20,91%, em contraposição aos valores das simulações com

mínima de -6,70% e máxima de 15,39% (Tabela 10 e Gráfico 8). Com a computação dos dados de Roriz, entretanto, não se pretende assumir uma constatação mais otimista dos benefícios da incorporação de PCMs no condicionamento térmico, mas averiguar como fontes de dados diferentes podem resultar em conclusões mais ou menos contrastantes.

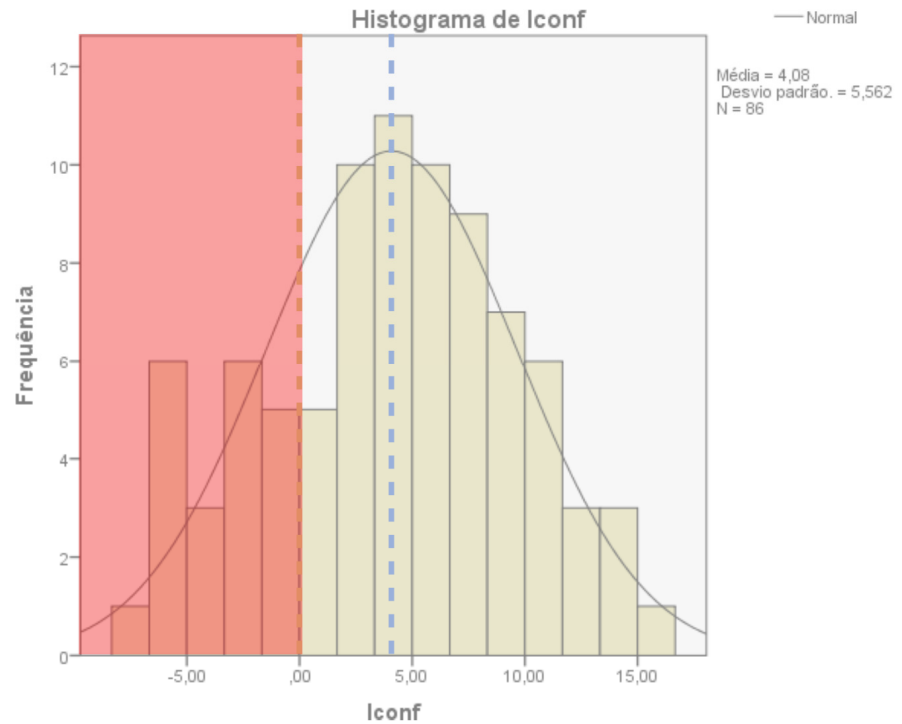


Figura 60 - Histograma da distribuição dos dados de Incremento do Conforto (**Iconf**), com destaque (em vermelho) para a faixa dos 23% dos municípios que obtiveram resultados negativos e, com linha tracejada azul, a marca da média dos resultados (**Iconf** = 4,08%). Fonte: Produzido pelo autor

## **8. Conclusões**

Conforme os procedimentos metodológicos descritos nesse trabalho, a investigação do uso de PCMs para o incremento da Inércia Térmica em paredes externas de habitações condicionadas naturalmente foi conduzida considerando o modelo de um quarto em um edifício multifamiliar de interesse social, simulando propriedades de materiais, cargas internas e rotina de abertura de janelas específicas, mas que representassem uma situação real. A partir deste modelo e de arquivos climáticos de municípios do Semiárido Brasileiro, simulações energéticas e cálculo da estimativa do Percentual de Conforto anual (modelo adaptativo) foram realizados. As propriedades térmicas do Octadecano foram utilizadas como referência para o PCM das simulações, considerando a histerese da mudança de fase do referido material.

Apesar de simular circunstâncias específicas, os variados fatores envolvidos na implementação do PCM às paredes – orientação externa ou interna, espessura/quantidade de material e temperatura de fusão – permitiram a realização de análises comparativas e estimar como cada fator impacta nas medidas referentes ao conforto e ao desempenho térmico das paredes. Essas variáveis – Incremento do Conforto, Decremento Percentual do Ganho de Calor, Decremento da Média Anual da Temperatura Superficial Interna, Decremento da Amplitude diária da Temperatura Superficial Interna, Decremento do Pico diário da Temperatura Superficial Interna e Incremento do Atraso Térmico – tiveram seus valores calculados mediante a diferença absoluta ou proporcional (caso do Ganho de Calor) dos valores de um quarto com paredes externas sem PCM, para cada município analisado.

Apesar de não apresentar resultados otimistas quanto à ampla incorporação de PCMs no contexto do Semiárido Brasileiro sob as circunstâncias estudadas, reconhece-se que o presente trabalho contribui com a ampliação do escopo de estudos sobre PCMs ao estudar um contexto climático tropical – em contraposição à já consolidada literatura dos benefícios dos PCMs para zonas temperadas – e ao levar em conta um ambiente condicionado por meio da ventilação natural, abarcando a realidade das habitações de interesse social brasileiras.

O estudo também constitui uma adição ao até então reduzido número de pesquisas que simulam o efeito da histerese de PCMs

sobre o desempenho térmico do edifício com o programa *EnergyPlus*, cuja implementação do recurso ainda é recente (GOIA et al., 2018).

Também como contribuição cita-se a promoção das discussões sobre a influência dos fatores de implementação do PCM às paredes, confrontando afirmações como a de que a aplicação destes materiais às faces internas das paredes é sempre mais benéfica – o que se provou contrário com as circunstâncias estudadas nesta pesquisa, que demonstraram um maior efeito do material com a sua incorporação nas faces externas.

Expostas as conclusões deste trabalho e tomando-as como ponto de partida para o desenvolvimento de futuras pesquisas, ficam registradas as seguintes sugestões para futuros trabalhos:

- Aplicação dos métodos de processamento e análise de dados aqui descritos a outras regiões do Brasil, mediante as devidas adaptações dos parâmetros de entrada para as simulações computacionais e utilizando os demais arquivos climáticos brasileiros disponíveis;
- Considerar o estudo de uma habitação inteira ao invés de apenas um cômodo isolado;
- Estudar outras tipologias arquitetônicas além da habitacional;
- Estudar o impacto da combinação de PCMs com outros materiais, como materiais com alta refletância e isolantes térmicos;
- Aprofundar o estudo sobre o encapsulamento de PCMs por meio da prototipagem, associando resultados experimentais às simulações energéticas como parâmetros de entrada;
- E estudar a influência da ventilação natural como variável de pesquisa sobre a performance dos PCMs.

## 9. Referências

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220 - Desempenho térmico de edificações.** Rio de Janeiro: 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 15575-4 - Desempenho de edificações habitacionais - Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas.** Rio de Janeiro: 2013.

ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. **STANDARD 55-2010. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.** Atlanta, Georgia, Estados Unidos: 2013.

ASTM, American Society for Testing and Materials. **E793 – 06 Standard Test Method for Enthalpies of Fusion and Crystallization by Differential Scanning Calorimetry.** West Conshohocken, PA, Estados Unidos: 2012a.

\_\_\_\_\_. **E794 – 06 Standard Test Method for Melting And Crystallization Temperatures By Thermal Analysis.** West Conshohocken, PA, Estados Unidos: 2012b.

AULICIEMS, A. Towards a Psycho-Physiological Model. **International Journal of Biometeorology**, v. 25, p. 109–122, 1981.

BRASIL. Portaria n. 18, 16 de janeiro de 2012. **Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais.** MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, I. E. C. E. I. N. D. M., NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL – INMETRO. Rio de Janeiro: 2012.

BRITO, Adriana Camarg; AKUTSU, Maria; SALLES, Elisa Morande; CASTRO, Guilherme Molnar. Características térmicas de materiais de mudança de fase adequados para edificações brasileiras. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 125–145, 2017.

CABEZA, Luisa F; CASTELLÓN, Cecilia; NOGUÉS, Miquel; MEDRANO, Marc; LEPPERS, Ron; ZUBILLAGA, Oihana. Use of

microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 2, p. 113–119, 2007.

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

FADEN, Moritz; HÖHLEIN, Stephan; WANNER, Joschka; KÖNIG-HAAGEN, Andreas; BRÜGGEMANN, Dieter. Review of thermophysical property data of octadecane for phase-change studies. **Materials**, v. 12, n. 18, p. 1–23, 2019.

FANGER, P. O. **Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering**. Michigan: McGraw-Hill, 1970.

FERNANDES, Leandro C. **ESBOÇO DE UM NOVO DIAGRAMA DE ANÁLISE CLIMÁTICA PARA MODELOS DE CONFORTO ADAPTATIVOS**. 2019, Anais [do] XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e XI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído: Mudanças climáticas, concentração urbana e novas tecnologias. Porto Alegre: ANTAC, 2019.

FIELD, Andy. **Descobrendo a ESTATÍSTICA usando o SPSS**. Tradução de Lorí Viali. 2 ed. Porto Alegre: Artmed, 2009.

GARCÍA, Angélica S. W. Palestra: **Zoneamento bioclimático baseado no desempenho**. 2019, Anais [do] XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e XI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído: Mudanças climáticas, concentração urbana e novas tecnologias. Porto Alegre: ANTAC, 2019.

GIVONI, Baruch. **Man, Climate, Architecture**. New York: Elsevier Science Ltd, 1976.

GOIA, Francesco; CHAUDHARY, Gaurav; FANTUCCI, Stefano. Modelling and experimental validation of an algorithm for simulation of hysteresis effects in phase change materials for building

components. **Energy and Buildings**, v. 174, p. 54–67, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.001>>.

GROAT, Linda N.; WANG, David. **Architectural Research Methods**. 2 ed. Nova York, NY: John Wiley & Sons, 2013.

HASAN, Mushtaq I.; BASHER, Hadi O.; SHDHAN, Ahmed O. Experimental investigation of phase change materials for insulation of residential buildings. **Sustainable Cities and Society**, v. 36, p. 42–58, jan. 2018.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Semiárido Brasileiro**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/mapas-regionais/15974-semiarido-brasileiro.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 1 abr. 2019.

INSA, Instituto Nacional do Semiárido. **SIGSAB – Sistema de Gestão da Informação e do Conhecimento do Semiárido Brasileiro**. Disponível em: <<http://sigsab.insa.gov.br/acervoDigital>>. Acesso em: 1 abr. 2019.

IONASHIRO, M; GIOLITO, I. **Fundamentos da termogravimetria, análise térmica diferencial, calorimetria exploratória diferencial**. São Paulo: Giz Editorial, 2005.

JELLE, B. P.; KALNÆS, S. E. Chapter 3: Phase Change Materials for Application in Energy-Efficient Buildings. *In*: PACHECO-TORGAL, Fernando; GRANQVIST Claes; JELLE Bjørn; VANOLI, Giuseppe; BIANCO, Nicola; KURNITSKI, Jarek. **Cost-Effective Energy-Efficient Building Retrofitting: Materials, Technologies, Optimization and Case Studies**. 1 ed. Elsevier Ltd, 2017. p. 57-118. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-101128-7.00003-4>>.

KOSNY, Jan; YARBROUGH, David W. Use of PCM-Enhanced Insulations in the Building Envelope. **Journal of Building Enclosure Design**, v. 5, p. 55-59, 2008.

KUZNIK, Frédéric; VIRGONE, Joseph; ROUX, Jean Jacques. Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 2, p. 148–156, 2008.

LABEEE, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **ANÁLISE DE ARQUIVOS CLIMÁTICOS PARA A SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES**. Florianópolis: 2015. Disponível em: <[http://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios\\_pesquisa/Relatorio\\_AnaliseArquivosClimaticos\\_Labeee.pdf](http://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/Relatorio_AnaliseArquivosClimaticos_Labeee.pdf)>. Acesso em: 21 set. 2020.

\_\_\_\_\_. **Arquivos climáticos INMET 2018**. 2018a. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2018>>. Acesso em: 1 abr. 2019.

\_\_\_\_\_. **Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus**. Florianópolis: 2018b. Disponível em: <[http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios\\_pesquisa/Biblioteca\\_ComponentesConstrutivos\\_0.pdf](http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/Biblioteca_ComponentesConstrutivos_0.pdf)>. Acesso em: 21 set. 2020.

LAMBERTS, R. et al. **Towards a Brazilian Standard for Thermal Comfort**. Florianópolis: LabEEE, 2013. Disponível em: <[http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios\\_pesquisa/RP\\_Towards\\_a\\_Brazilian\\_Standard\\_Complete\\_Version2013.pdf](http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/RP_Towards_a_Brazilian_Standard_Complete_Version2013.pdf)>.

LAMBERTS, Roberto. Mesa-redonda: **Mudanças climáticas, concentração urbana e novas tecnologias – Qualidade ambiental, desempenho da edificação e normativa**. 2019, Anais [do] XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e XI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído: Mudanças climáticas, concentração urbana e novas tecnologias. Porto Alegre: ANTAC, 2019.

LAMBERTS, Roberto et al. Uma Proposta de Norma Técnica Brasileira sobre Desempenho Térmico de Habitações Populares. *Scientia Agricola*, v. 51, n. 1, p. 1–7, 1994.

LECHNER, Norbert. **Heating, cooling, lighting: sustainable design methods for architects**. 4 ed. Estados Unidos: 2014.

LEI, Jiawei; YANG, Jinglei; YANG, En Hua. Energy performance of building envelopes integrated with phase change materials for cooling load reduction in tropical Singapore. *Applied Energy*, v. 162, n. January, p. 207–217, 2016.

LIMA, Raoni Venâncio dos Santos. **Modos projetuais de simulação: Uso de ferramentas de simulação térmica no processo projetual de arquitetura**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

MARTINS, Bruno Filipe Moura. **Materiais de Mudança de Fase (PCM) para Melhoria do Desempenho Térmico de Edifícios**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Eficiência Energética**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/>>. Acesso em: 1 set. 2018.

MYERS, Raymond H.; MONTGOMERY, Douglas C.; ANDERSON-COOK, Christine M. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments**. 3 ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009.

NICOL, J. F.; HUMPHREYS, M. A. Thermal Comfort as Part of a Self-Regulating System. *Building Research and Practice*, v. 1, n. 3, p. 174–179, 1973.

OLGYAY, Victor. **Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas**. Barcelona: Gustavo Gili, 1998.

OLIVIERI, F. et al. An experimental method to quantitatively analyse the effect of thermal insulation thickness on the summer performance of a vertical green wall. **Energy and Buildings**, v. 150, p. 132–148, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.068>>.

PIELICHOWSKA, Kinga; PIELICHOWSKI, Krzysztof. Phase change materials for thermal energy storage. **Progress in Materials Science**, v. 65, p. 67–123, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.03.005>>.

REGIN, A. Felix; SOLANKI, S. C.; SAINI, J. S. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 9, p. 2438–2458, 2008.

RORIZ, Maurício. **CLASSIFICAÇÃO DE CLIMAS DO BRASIL – VERSÃO 2**. São Carlos, SP: [s.n.], 2013. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/projetos/proposta-de-revisao-do-zoneamento-bioclimatico-brasileiro>>. Acesso em: 1 abr. 2019.

\_\_\_\_\_. **CLASSIFICAÇÃO DE CLIMAS DO BRASIL – VERSÃO 3.0**. São Carlos, SP: [s.n.], 2014. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/projetos/proposta-de-revisao-do-zoneamento-bioclimatico-brasileiro>>. Acesso em: 1 abr. 2019.

ROUDSARI, Mostapha Sadeghipour; PAK, Michelle. Ladybug: A parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design. 2013, Proceedings of 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association, Chambéry, França: IBPSA, p. 3128–3135, 2013. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/287778694\\_Ladybug\\_A\\_parametric\\_environmental\\_plugin\\_for\\_grasshopper\\_to\\_help\\_designers\\_create\\_an\\_environmentally-conscious\\_design](https://www.researchgate.net/publication/287778694_Ladybug_A_parametric_environmental_plugin_for_grasshopper_to_help_designers_create_an_environmentally-conscious_design)>. Acesso em: 21 set. 2020.

RUPP, Ricardo Forgiarini; VÁSQUEZ, Natalia Giraldo; LAMBERTS, Roberto. A review of human thermal comfort in the

built environment. **Energy and Buildings**, v. 105, p. 178–205, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.047>>.

SERRANO, Susana et al. Stabilized rammed earth incorporating PCM: Optimization and improvement of thermal properties and Life Cycle Assessment. **Energy Procedia**, v. 30, p. 461–470, 2012.

SHARMA, Atul; BARRENECHE, Camila; RINCÓN, Lidia; BOER, Dieter; CABEZA, Luisa F. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 2, p. 318–345, 2009.

SORGATO, Marcio José. **A influência do comportamento do usuário no desempenho térmico e energético de edificações residenciais**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SOUSA, Diego Aristófanés D; MELO, Aluísio Braz De; SILVA, Carlos Alejandro Nome. **PROCESSO ALGORÍTMICO NA ESTIMATIVA DE CONDICIONAMENTO PASSIVO COM USO DE PCM**. 2019, Anais [do] XV Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e XI Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído: Mudanças climáticas, concentração urbana e novas tecnologias. Porto Alegre: ANTAC, 2019.

SYNTROLEUM. **Low-Cost Phase Change Material for Building Envelopes**. Final Report. United States: U.S. Department of Energy, 2013.

TABARES-VELASCO, Paulo Cesar; CHRISTENSEN, Craig; BIANCHI, Marcus. Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies. **Building and Environment**, v. 54, p. 186–196, 2012.

TEDESCHI, Arturo. **AAD Algorithms-aided Design: Parametric Strategies Using Grasshopper**. [S.l.]: Le Penseur, 2014.

U.S.DOE, U.S. Department of Energy. **Documentation: Engineering Reference - EnergyPlus Version 9.3.0.** Washington, DC, Estados Unidos: U.S. Department of Energy, 2020a.

\_\_\_\_\_. **Documentation: Getting Started - EnergyPlus Version 9.3.0.** Washington, DC, Estados Unidos: U.S. Department of Energy, 2020b.

\_\_\_\_\_. **Documentation: Input Output Reference - EnergyPlus Version 9.3.0.** Washington, DC, Estados Unidos: U.S. Department of Energy, 2020c.

VERBEKE, Stijn; AUDENAERT, Amaryllis. Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. November 2016, p. 2300–2318, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.083>>.

ZASTAWNA-RUMIN, Anna; KISILEWICZ, Tomasz; BERARDI, Umberto. Novel simulation algorithm for modeling the hysteresis of phase change materials. **Energies**, v. 13, n. 5, p. 1–15, 2020.

## **ANEXOS**

## ANEXO A - Base de cálculo da Temperatura Média Anual (TMA) e Amplitude Média Anual (AMA) usada por Roriz (2013)

| Variável Climática                                  | Cálculo                                                                                  |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tmax: Média mensal das Temperaturas Máximas diárias |                                                                                          |
| Tmin: Média mensal das Temperaturas Mínimas diárias |                                                                                          |
| Tmed: Média mensal das Temperaturas Médias diárias  | $T_{med} = (T_{max} + T_{min})/2$                                                        |
| TMA: Temperatura Média Anual                        | $TMA = \left[ \sum_{n=1}^{12} T_{med(n)} \right] / 12$                                   |
| Amp: Amplitude Média mensal                         | $Amp = T_{max} - T_{min}$                                                                |
| AMA: Amplitude Média Anual                          | $AMA = \left[ \sum_{n=1}^{12} Amp_{(n)} \right] / 12$                                    |
| dpT = Desvio Padrão de Tmed                         | $dpT = \left\{ \left[ \sum_{n=1}^{12} T(T_{med(n)} - TMA)^2 \right] / 11 \right\}^{0.5}$ |
| dpA = Desvio Padrão de Amp                          | $dpA = \left\{ \left[ \sum_{n=1}^{12} T(Amp_{(n)} - AMA)^2 \right] / 11 \right\}^{0.5}$  |

## APÊNDICES

## APÊNDICE A - Fluxograma Metodológico da Dissertação (arquivo PDF)

## APÊNDICE B - Listas das fontes de dados climáticos filtradas

| LISTA DOS ARQUIVOS CLIMÁTICOS DO SEMIÁRIDO |                         |                 |    |                                     |                 |    |                      |                 |
|--------------------------------------------|-------------------------|-----------------|----|-------------------------------------|-----------------|----|----------------------|-----------------|
| UF                                         | Cidade                  | Tipo de arquivo | UF | Cidade                              | Tipo de arquivo | UF | Cidade               | Tipo de arquivo |
| AL                                         | Arapiraca               | INMET           | BA | Vitoria.da.<br>Conquista.Figueiredo | TMY             | PB | São.Goncalo          | INMET           |
| AL                                         | Palmeira.<br>dos.Indios | INMET           | CE | Barbalha                            | TMY             | PE | Arcoverde            | INMET           |
| AL                                         | Pao.de.Acucar           | INMET           | CE | Campos.Sales                        | INMET           | PE | Cabrobo              | INMET           |
| BA                                         | Amargosa                | INMET           | CE | Crateus                             | TMY             | PE | Caruaru              | INMET           |
| BA                                         | Barra                   | TMY             | CE | Guaramiranga                        | INMET           | PE | Floresta             | INMET           |
| BA                                         | Bom.Jesus.<br>da.Lapa   | TMY             | CE | Iguatu                              | INMET           | PE | Caruaru              | INMET           |
| BA                                         | Brumado                 | INMET           | CE | Itapipoca                           | INMET           | PE | Ibimirim             | INMET           |
| BA                                         | Buritirama              | INMET           | CE | Jaguaribe                           | INMET           | PE | Petrolina            | INMET           |
| BA                                         | Caetite                 | TMY             | CE | Jaguaruana                          | TMY             | PE | Serra.Talhada        | INMET           |
| BA                                         | Carinhanha              | TMY             | CE | Morada.Nova                         | INMET           | PE | Surubim              | INMET           |
| BA                                         | Cipo                    | TMY             | CE | Quixeramobim                        | TMY             | PE | Triunfo              | TMY             |
| BA                                         | Delfino                 | INMET           | CE | Sobral                              | TMY             | PI | Alvorada.do.Gurgueia | INMET           |
| BA                                         | Euclides.da.<br>Cunha   | INMET           | CE | Taua                                | TMY             | PI | Bom.Jesus.do.Piaui   | INMET           |
| BA                                         | Feira.de.<br>Santana    | INMET           | MG | Aguas.<br>Vermelhas                 | INMET           | PI | Caracol              | INMET           |
| BA                                         | Guanambi                | INMET           | MG | Almenara                            | INMET           | PI | Castelo.do.Piaui     | INMET           |
| BA                                         | Ibotirama               | INMET           | MG | Aracuai                             | TMY             | PI | Oeiras               | INMET           |
| BA                                         | Irece                   | TMY             | MG | Espinosa                            | INMET           | PI | Paulistana           | INMET           |
| BA                                         | Itaberaba               | TMY             | MG | Itaobim                             | INMET           | PI | Picos                | TMY             |
| BA                                         | Itirucu                 | INMET           | MG | Januaria                            | TMY             | PI | Sao.Joao.do.Piaui    | TMY             |
| BA                                         | Jacobina                | TMY             | MG | Mocambinho                          | INMET           | PI | Sao.Raimundo.Nonato  | INMET           |
| BA                                         | Lencois                 | TMY             | MG | Montalvania                         | INMET           | PI | Valenca.do.Piaui     | INMET           |
| BA                                         | Macajuba                | INMET           | MG | Monte.Azul                          | TMY             | RN | Apodi                | INMET           |
| BA                                         | Paulo.Afonso            | TMY             | MG | Pedra.Azul                          | TMY             | RN | Caico                | INMET           |
| BA                                         | Piata                   | INMET           | MG | Rio.Pardo.<br>de.Minas              | INMET           | RN | Macau                | INMET           |
| BA                                         | Queimadas               | INMET           | MG | Salinas                             | INMET           | RN | Mossoro              | TMY             |
| BA                                         | Remanso                 | TMY             | PB | Cabaceiras                          | INMET           | RN | Touros               | INMET           |
| BA                                         | Senhor.do.<br>Bonfim    | INMET           | PB | Campina.<br>Grande                  | TMY             | SE | Carira               | INMET           |
| BA                                         | Serrinha                | INMET           | PB | Monteiro                            | INMET           | SE | Poco.Verde           | INMET           |
| BA                                         | Uaua                    | INMET           | PB | Patos                               | INMET           |    |                      |                 |

**LISTA DE MUNICÍPIOS DO SEMIÁRIDO (FILTRADA A PARTIR DE RORIZ, 2013) + Valores da variável IconfRORIZ (Item 6.3)**

| UF | Município              | Lat   | Lon   | TMA | AMA | IconfRORIZ | UF | Município               | Lat   | Lon   | TMA | AMA | IconfRORIZ |
|----|------------------------|-------|-------|-----|-----|------------|----|-------------------------|-------|-------|-----|-----|------------|
| AL | AguaBranca             | -9,28 | -37,9 | 24  | 9,4 | 10,9459    | PB | LagoadosM<br>arcos      | -7,53 | -35,8 | 24  | 9,5 | 11,8375    |
| AL | Arapiraca              | -9,8  | -36,6 | 24  | 11  | 11,5856    | PB | MaedAgua                | -7,25 | -37,4 | 24  | 9   | 9,536      |
| AL | Batalha                | -9,67 | -37,1 | 26  | 11  | 9,2208     | PB | Malta                   | -6,9  | -37,5 | 26  | 9,4 | 7,5955     |
| AL | Cacimbinha<br>s        | -9,39 | -37   | 25  | 11  | 11,1844    | PB | Manaira                 | -7,75 | -38,1 | 23  | 10  | 13,27      |
| AL | Canapi                 | -9,11 | -37,6 | 24  | 11  | 12,376     | PB | MataVirge<br>m          | -7,73 | -35,8 | 22  | 9,1 | 14,6932    |
| AL | DelmiroGou<br>veia     | -9,39 | -38   | 25  | 11  | 11,4796    | PB | Monteiro                | -7,88 | -37,1 | 25  | 12  | 10,864     |
| AL | Igaci                  | -9,56 | -36,6 | 25  | 11  | 10,6747    | PB | Nazarezh<br>o           | -6,91 | -38,2 | 27  | 11  | 6,8288     |
| AL | Inhapi                 | -9,22 | -37,8 | 25  | 11  | 11,2828    | PB | NovaOlinda              | -7,46 | -38,1 | 26  | 11  | 7,9356     |
| AL | LagoadaCan<br>oa       | -9,83 | -36,7 | 25  | 11  | 10,6747    | PB | OlhoDAgua               | -7,21 | -37,8 | 26  | 11  | 7,4992     |
| AL | MajorIsidor<br>o       | -9,56 | -37   | 25  | 11  | 10,5751    | PB | Olivedos                | -6,98 | -36,3 | 23  | 9,7 | 12,994     |
| AL | Maravilha              | -9,22 | -37,3 | 24  | 11  | 12,8635    | PB | Passagem                | -7,13 | -37,1 | 25  | 11  | 9,1332     |
| AL | MataGrand<br>e         | -9,12 | -37,7 | 24  | 12  | 13,8112    | PB | Patos                   | -7,01 | -37,3 | 28  | 12  | 4,3991     |
| AL | Monteiropo<br>lis      | -9,61 | -37,2 | 25  | 11  | 9,8499     | PB | PedraLavra<br>da        | -6,75 | -36,5 | 23  | 9,9 | 12,4084    |
| AL | OlhodAgua<br>dasFlores | -9,56 | -37,3 | 24  | 11  | 11,5856    | PB | Pianco                  | -7,25 | -37,9 | 26  | 10  | 7,12       |
| AL | OuroBranco             | -9,17 | -37,3 | 24  | 11  | 12,0796    | PB | Picui                   | -6,51 | -36,4 | 24  | 9,8 | 11,5276    |
| AL | Palmeirado<br>sIndios  | -9,44 | -36,7 | 26  | 10  | 8,4115     | PB | Piloes                  | -6,66 | -38,5 | 27  | 12  | 6,7135     |
| AL | PaodeAcuca<br>r        | -9,75 | -37,4 | 28  | 11  | 3,3916     | PB | Pocinhos                | -7,07 | -36,1 | 22  | 9,5 | 14,1295    |
| AL | Piranhas               | -9,63 | -37,8 | 25  | 11  | 11,1844    | PB | Pombal                  | -6,75 | -37,8 | 27  | 11  | 6,0487     |
| AL | PocodasTrin<br>cheiras | -9,33 | -37,3 | 24  | 11  | 13,0531    | PB | Porcos                  | -7,13 | -37,3 | 26  | 11  | 7,9435     |
| AL | Quebrangul<br>o        | -9,38 | -36,5 | 24  | 11  | 12,9583    | PB | RiachoSant<br>oAntonio  | -7,7  | -36,2 | 24  | 9,8 | 11,9232    |
| AL | Santanadel<br>panema   | -9,38 | -37,3 | 24  | 12  | 12,5655    | PB | Salgadinho              | -7,1  | -38,9 | 25  | 10  | 10,4956    |
| AL | SaoJosedaT<br>apera    | -9,56 | -37,4 | 25  | 11  | 10,0576    | PB | Salgado                 | -6,78 | -35,9 | 24  | 9,5 | 11,4415    |
| AL | SenadorRui<br>Palmeira | -9,33 | -37,5 | 25  | 11  | 10,57      | PB | SantaLuzia              | -6,86 | -36,9 | 26  | 11  | 8,6064     |
| AL | Traipu                 | -9,94 | -37   | 26  | 11  | 9,4256     | PB | SantaMaria<br>daParaiba | -8,03 | -36,7 | 21  | 9,7 | 15,9252    |
| BA | Amargosa               | -13   | -39,6 | 24  | 8,6 | 10,3852    | PB | SantaTereza             | -7,11 | -36,4 | 24  | 10  | 12,112     |
| BA | Anage                  | -14,6 | -41,1 | 25  | 13  | 13,0608    | PB | SantaTerezi<br>nha      | -7,08 | -37,5 | 25  | 11  | 9,4451     |
| BA | Andarai                | -12,8 | -41,4 | 24  | 12  | 12,4651    | PB | SantoAndre              | -7,21 | -36,6 | 24  | 10  | 11,512     |

|    |                    |       |       |    |     |         |    |                         |       |       |    |     |         |
|----|--------------------|-------|-------|----|-----|---------|----|-------------------------|-------|-------|----|-----|---------|
| BA | Aracatu            | -14,4 | -41,5 | 21 | 11  | 17,038  | PB | SaoBoaventura           | -7,4  | -38,2 | 26 | 11  | 7,6048  |
| BA | Araci              | -11,3 | -39   | 24 | 10  | 11,8063 | PB | SaoFrancisco            | -6,61 | -38,8 | 28 | 12  | 5,4675  |
| BA | Barra              | -11,1 | -43,2 | 27 | 13  | 8,5427  | PB | SaoGoncalo              | -6,75 | -38,2 | 27 | 12  | 6,0244  |
| BA | BarradaEstiva      | -13,6 | -41,4 | 20 | 12  | 19,8871 | PB | SaoJoaoDoCariri         | -7,38 | -36,5 | 24 | 9   | 11,3675 |
| BA | BomJesusdaLapa     | -13,3 | -43,4 | 27 | 13  | 8,5484  | PB | SaoJoaoDoTigre          | -8,07 | -36,9 | 23 | 10  | 13,27   |
| BA | Boninal            | -12,8 | -41,9 | 21 | 12  | 18,3936 | PB | SaoJosedaLagoaTapada    | -6,93 | -38,2 | 27 | 11  | 7,0507  |
| BA | Brumado            | -14,2 | -41,7 | 25 | 13  | 12,8572 | PB | SaoJosedePiranhas       | -7,11 | -38,5 | 27 | 12  | 7,378   |
| BA | Buritirama         | -10,7 | -43,7 | 27 | 13  | 7,7895  | PB | SaoJosedosCordeiros     | -7,38 | -36,8 | 23 | 10  | 13,2643 |
| BA | Caetite            | -14,1 | -42,5 | 23 | 10  | 13,8355 | PB | SaoJosedosEspiniais     | -6,85 | -37,3 | 27 | 11  | 6,4     |
| BA | Canudos            | -10   | -39,1 | 23 | 8,5 | 12,8575 | PB | SaoMamede               | -6,91 | -36,1 | 26 | 11  | 7,9611  |
| BA | Carinhanha         | -14,3 | -43,8 | 26 | 13  | 10,032  | PB | SaoSebastiaoDoUmbuzeiro | -8,15 | -37,2 | 23 | 10  | 12,9808 |
| BA | CasaNova           | -9,13 | -41   | 26 | 14  | 11,072  | PB | Serido                  | -6,93 | -36,4 | 29 | 12  | 2,622   |
| BA | Central            | -11,1 | -42,1 | 28 | 12  | 5,5775  | PB | SerraBranca             | -7,48 | -36,7 | 24 | 10  | 11,1116 |
| BA | Cipo               | -11,1 | -38,5 | 27 | 11  | 7,1652  | PB | SerraGrande             | -7,25 | -38,3 | 24 | 9,3 | 10,648  |
| BA | ContendasdoSincora | -13,8 | -41   | 25 | 11  | 10,7975 | PB | Soledade                | -7,06 | -36,4 | 24 | 9,9 | 10,6183 |
| BA | Delfino            | -10,5 | -41,2 | 25 | 11  | 10,1584 | PB | Sossego                 | -6,76 | -36,3 | 23 | 9,5 | 13,57   |
| BA | EuclidesdaCunha    | -10,5 | -39   | 25 | 11  | 10,17   | PB | Sousa                   | -6,76 | -38,2 | 27 | 12  | 7,0243  |
| BA | FeiradeSantana     | -12,2 | -39   | 25 | 9,9 | 8,9591  | PB | Sume                    | -7,63 | -36,9 | 23 | 9,2 | 12,1456 |
| BA | Gloria             | -9,34 | -38,3 | 25 | 10  | 9,2512  | PB | Taperoa                 | -7,25 | -36,9 | 23 | 9   | 11,566  |
| BA | Guanambi           | -14,2 | -42,8 | 26 | 10  | 7,7539  | PB | Teixeira                | -7,21 | -37,3 | 22 | 10  | 15,2047 |
| BA | Iacu               | -12,8 | -40,3 | 23 | 8,2 | 10,8172 | PB | Timbauba                | -7,02 | -38,3 | 25 | 11  | 10,8835 |
| BA | Ibotirama          | -12,2 | -43,2 | 28 | 13  | 6,6775  | PB | Umbuzeiro               | -7,7  | -35,7 | 25 | 12  | 11,4715 |
| BA | Inhambupe          | -11,8 | -38,4 | 23 | 8,5 | 11,2975 | PE | AfogadosdaIngazeira     | -7,75 | -37,6 | 23 | 11  | 13,9071 |
| BA | Ipira              | -12,2 | -39,7 | 26 | 11  | 9,3232  | PE | Afranio                 | -8,52 | -41   | 24 | 11  | 11,9791 |
| BA | Irece              | -11,3 | -41,9 | 24 | 13  | 14,008  | PE | AguasBelas              | -9,11 | -37,1 | 24 | 11  | 12,8604 |
| BA | Itaberaba          | -12,5 | -40,3 | 25 | 13  | 11,368  | PE | Angelim                 | -8,89 | -36,3 | 23 | 9,9 | 12,9871 |
| BA | Itaete             | -13   | -41   | 24 | 12  | 12,7583 | PE | Araripina               | -7,58 | -40,5 | 22 | 12  | 16,3564 |
| BA | Itapetinga         | -15,2 | -40,2 | 25 | 9,4 | 8,8819  | PE | Arcoverde               | -8,41 | -37,1 | 24 | 11  | 11,9828 |
| BA | Itapicuru          | -11,4 | -38,3 | 24 | 9,7 | 10,6276 | PE | BelemdeSaoFrancisco     | -8,76 | -39   | 25 | 12  | 11,578  |
| BA | Itirucu            | -13,4 | -40,1 | 24 | 13  | 14,9548 | PE | BeloJardim              | -8,34 | -36,4 | 23 | 11  | 15,1068 |
| BA | Ituacu             | -13,8 | -41,3 | 25 | 11  | 10,9823 | PE | Bodoco                  | -7,78 | -39,9 | 23 | 11  | 14,7419 |

|    |                      |       |       |    |     |         |    |                    |       |       |    |     |         |
|----|----------------------|-------|-------|----|-----|---------|----|--------------------|-------|-------|----|-----|---------|
| BA | Jacobina             | -11,2 | -40,5 | 25 | 9,7 | 8,7583  | PE | BomConselho        | -9,17 | -36,7 | 22 | 11  | 16,3499 |
| BA | Jaguaquara           | -13,5 | -40   | 21 | 9,2 | 15,6739 | PE | BomJardim          | -7,8  | -35,6 | 23 | 11  | 14,282  |
| BA | Jequie               | -13,9 | -40,1 | 24 | 12  | 12,6604 | PE | Brejao             | -9,03 | -36,6 | 23 | 11  | 14,7435 |
| BA | Juazeiro             | -9,3  | -40,5 | 25 | 13  | 11,6699 | PE | Brejinho           | -7,35 | -37,3 | 25 | 13  | 12,9556 |
| BA | Lencois              | -12,6 | -41,4 | 25 | 9,1 | 9,4255  | PE | BrejodaMadedeDeus  | -8,15 | -36,4 | 22 | 11  | 15,9124 |
| BA | Macajuba             | -12,1 | -40,4 | 25 | 11  | 9,2427  | PE | Cabrobo            | -8,51 | -39,3 | 27 | 10  | 5,5299  |
| BA | Marcionilio Souza    | -13   | -40,6 | 26 | 14  | 10,8667 | PE | Cachoeirinha       | -8,49 | -36,2 | 23 | 10  | 13,1664 |
| BA | Milagres             | -12,9 | -39,9 | 25 | 11  | 11,2875 | PE | Calumbi            | -7,94 | -38,2 | 25 | 12  | 11,7727 |
| BA | MonteSanto           | -10,4 | -39,3 | 25 | 11  | 10,67   | PE | CamocimdeSaoFelix  | -8,33 | -35,8 | 24 | 10  | 12,112  |
| BA | Morpara              | -11,5 | -43,3 | 26 | 14  | 11,4835 | PE | Canhotinho         | -8,88 | -36,2 | 23 | 11  | 14,4688 |
| BA | MorrodoChapeu        | -11,2 | -41,2 | 22 | 9,2 | 15,1408 | PE | Capoeiras          | -8,74 | -36,6 | 21 | 11  | 18,2035 |
| BA | OliveiradosBrejinhos | -12,4 | -42,9 | 25 | 13  | 13,2547 | PE | CarnaubeiradaPenha | -8,32 | -38,7 | 25 | 12  | 11,7748 |
| BA | Paramirim            | -13,5 | -42,3 | 24 | 12  | 14,1888 | PE | Caruaru            | -8,28 | -36   | 24 | 9,1 | 11,2624 |
| BA | Paratinga            | -12,7 | -43,2 | 27 | 14  | 9,7175  | PE | Cedro              | -7,72 | -39,2 | 26 | 12  | 9,528   |
| BA | Paripiranga          | -10,8 | -37,9 | 22 | 8,6 | 13,5148 | PE | Correntes          | -9,13 | -36,3 | 24 | 11  | 12,3799 |
| BA | PauloAfonso          | -9,36 | -38,2 | 27 | 11  | 5,1815  | PE | Exu                | -7,51 | -39,7 | 26 | 12  | 8,4655  |
| BA | Piata                | -13,2 | -41,8 | 21 | 11  | 17,5483 | PE | Flores             | -7,87 | -38   | 24 | 11  | 13,0508 |
| BA | PilaoArcado          | -10   | -42,5 | 27 | 15  | 10,2592 | PE | Floresta           | -8,6  | -38,6 | 27 | 12  | 7,6864  |
| BA | Pindobacu            | -10,8 | -40,4 | 23 | 11  | 14,6527 | PE | FreiMiguelinho     | -7,94 | -35,9 | 24 | 11  | 12,5711 |
| BA | Queimadas            | -11   | -39,6 | 26 | 12  | 8,5699  | PE | Garanhuns          | -8,88 | -36,5 | 22 | 8,5 | 13,426  |
| BA | Remanso              | -9,63 | -42,1 | 27 | 9,7 | 4,3143  | PE | Ibimirim           | -8,51 | -37,7 | 25 | 13  | 12,47   |
| BA | RiachaodoJacuibe     | -11,8 | -39,4 | 24 | 9,8 | 11,7259 | PE | Iguaraci           | -7,84 | -37,5 | 23 | 12  | 14,8335 |
| BA | RibeiradoPombal      | -10,9 | -38,5 | 24 | 11  | 11,3959 | PE | Inaja              | -8,9  | -37,8 | 24 | 12  | 12,0736 |
| BA | RiodeContas          | -13,6 | -41,8 | 21 | 12  | 18,6279 | PE | Ingazeira          | -7,63 | -37,5 | 23 | 9,3 | 12,4327 |
| BA | Saude                | -11   | -40,4 | 23 | 11  | 13,1615 | PE | Ipubi              | -7,65 | -40,2 | 23 | 11  | 14,3731 |
| BA | Seabra               | -12,4 | -41,8 | 22 | 12  | 17,6464 | PE | Itacuruba          | -8,83 | -38,7 | 25 | 11  | 11,1844 |
| BA | SenhordoBonfim       | -10,5 | -40,2 | 25 | 9,7 | 9,3904  | PE | Itaiba             | -8,94 | -37,4 | 26 | 12  | 9,622   |
| BA | SentoSe              | -9,75 | -41,9 | 26 | 14  | 10,7687 | PE | Itapetim           | -7,38 | -37,2 | 22 | 12  | 16,0027 |
| BA | Serrinha             | -11,6 | -39   | 25 | 10  | 8,8379  | PE | Jatoba             | -8    | -36,5 | 25 | 11  | 11,1799 |
| BA | SoutoSoares          | -12,1 | -41,6 | 22 | 12  | 16,2703 | PE | Jatoba             | -9,18 | -38,3 | 27 | 11  | 5,3668  |
| BA | Uaua                 | -9,83 | -39,5 | 26 | 11  | 9,2147  | PE | JoaoAlfredo        | -7,86 | -35,6 | 24 | 10  | 11,1043 |
| BA | Ubaira               | -13,3 | -39,6 | 22 | 6,4 | 11,5612 | PE | Jucati             | -8,71 | -36,5 | 21 | 11  | 17,5435 |
| BA | Vitoria daConquista  | -14,9 | -40,8 | 21 | 9,7 | 16,4463 | PE | Moreilandia        | -7,63 | -39,6 | 24 | 11  | 13,3415 |

|    |                    |       |       |    |     |         |    |                       |       |       |    |     |         |
|----|--------------------|-------|-------|----|-----|---------|----|-----------------------|-------|-------|----|-----|---------|
| BA | XiqueXique         | -10,9 | -42,8 | 26 | 14  | 11,1799 | PE | Ouricuri              | -7,9  | -40   | 27 | 11  | 6,1963  |
| CE | Acarape            | -4,22 | -38,7 | 27 | 8,5 | 4,4175  | PE | Panelas               | -8,63 | -36   | 21 | 8,9 | 15,7711 |
| CE | Antoninado Norte   | -6,78 | -40   | 27 | 10  | 5,7568  | PE | Parnamirim            | -8,09 | -39,6 | 24 | 11  | 12,2763 |
| CE | Aracoiaba          | -4,38 | -38,9 | 27 | 8,6 | 4,2924  | PE | Passira               | -8    | -35,6 | 25 | 11  | 9,856   |
| CE | Araripe            | -7,25 | -40   | 24 | 10  | 11,0071 | PE | Pedra                 | -8,5  | -36,9 | 23 | 11  | 14,6512 |
| CE | Arneiroz           | -6,32 | -40,2 | 26 | 10  | 6,6659  | PE | Pesqueira             | -8,4  | -36,8 | 24 | 11  | 11,9975 |
| CE | Barbalha           | -7,31 | -39,3 | 27 | 11  | 5,9403  | PE | Petrolandia           | -9,07 | -38,3 | 26 | 14  | 10,8667 |
| CE | CamposSales        | -7    | -40,4 | 26 | 11  | 9,0091  | PE | Petrolina             | -9,4  | -40,5 | 27 | 10  | 4,5168  |
| CE | Caninde            | -4,38 | -39,3 | 27 | 9   | 4,718   | PE | Quixaba               | -7,72 | -37,9 | 26 | 13  | 9,7167  |
| CE | Carius             | -6,54 | -39,5 | 28 | 11  | 4,4775  | PE | RiachodasAlmas        | -8,13 | -35,9 | 24 | 11  | 13,056  |
| CE | Crateus            | -5,16 | -40,7 | 26 | 11  | 7,6127  | PE | Salgadinho            | -7,88 | -35,6 | 24 | 8,8 | 9,7564  |
| CE | GeneralSampaio     | -4    | -39,5 | 27 | 8,9 | 3,9159  | PE | Salgueiro             | -8,07 | -39,1 | 24 | 11  | 13,0508 |
| CE | Guaramiranga       | -4,28 | -39   | 22 | 7,1 | 12,1828 | PE | Sanharo               | -8,36 | -36,6 | 23 | 11  | 15,1975 |
| CE | Ico                | -6,38 | -38,9 | 28 | 11  | 3,3175  | PE | SantaCruz             | -8,24 | -40,3 | 23 | 11  | 13,5316 |
| CE | Iguatu             | -6,36 | -39,3 | 28 | 11  | 3,4035  | PE | SantaCruzdaBaixaVerde | -7,82 | -38,2 | 24 | 11  | 12,3844 |
| CE | Itapipoca          | -3,48 | -39,6 | 29 | 8,4 | -1,0213 | PE | SantaCruzdoCapibaribe | -7,96 | -36,2 | 24 | 11  | 13,3415 |
| CE | Jaguaribe          | -5,91 | -38,6 | 30 | 12  | -0,174  | PE | SantaFilomena         | -8,16 | -40,6 | 26 | 11  | 8,6863  |
| CE | Jaguaruana         | -4,78 | -37,8 | 29 | 10  | 1,7635  | PE | SantaMariadaBoaVista  | -8,81 | -39,8 | 24 | 11  | 12,4691 |
| CE | Jucas              | -6,52 | -39,5 | 27 | 11  | 4,5996  | PE | SantaTerezinha        | -7,38 | -37,5 | 22 | 12  | 17,128  |
| CE | LavrasdaMangabeira | -6,75 | -39   | 27 | 11  | 4,952   | PE | SaoBentodoUna         | -8,52 | -36,4 | 22 | 11  | 15,6464 |
| CE | MoradaNova         | -5,11 | -38,4 | 29 | 12  | 2,8924  | PE | SaoCaetano            | -8,3  | -36,2 | 24 | 11  | 13,0531 |
| CE | NovaRussas         | -4,75 | -40,6 | 26 | 11  | 7,2971  | PE | SaoJoao               | -8,88 | -36,4 | 22 | 9,2 | 14,0476 |
| CE | Oros               | -6,25 | -38,9 | 28 | 11  | 3,7895  | PE | SaoJosedoBelmonte     | -7,86 | -38,8 | 26 | 12  | 8,68    |
| CE | Pacoti             | -4,25 | -38,9 | 26 | 7,4 | 4,6459  | PE | SaoJosedoEngito       | -7,48 | -37,3 | 23 | 11  | 15,4675 |
| CE | Palhano            | -4,75 | -38   | 28 | 9,3 | 2,9375  | PE | SerraTalhad           | -7,95 | -38,3 | 25 | 12  | 12,0691 |
| CE | Parambu            | -6,25 | -40,8 | 25 | 10  | 9,4795  | PE | Serrita               | -7,93 | -39,3 | 24 | 11  | 12,376  |
| CE | Paramoti           | -4,13 | -39,3 | 26 | 8,7 | 5,768   | PE | Sertania              | -8,06 | -37,3 | 23 | 11  | 14,7424 |
| CE | Pentecoste         | -3,79 | -39,3 | 27 | 11  | 6,166   | PE | Solidao               | -7,6  | -37,7 | 26 | 13  | 10,8592 |
| CE | Quixada            | -4,97 | -39   | 28 | 12  | 5,3332  | PE | Surubim               | -7,83 | -35,7 | 25 | 9,6 | 9,0811  |
| CE | Quixerambim        | -5,16 | -39,3 | 28 | 10  | 2,1508  | PE | Tacaratu              | -9,11 | -38,2 | 23 | 11  | 13,7207 |
| CE | SantanadoAcarau    | -3,5  | -40,3 | 28 | 12  | 3,5968  | PE | TaquaritingadoNorte   | -7,9  | -36   | 22 | 11  | 15,4672 |

|        |                  |       |       |    |     |         |    |                    |       |       |    |     |         |
|--------|------------------|-------|-------|----|-----|---------|----|--------------------|-------|-------|----|-----|---------|
| CE     | SantaQuiteria    | -4,38 | -40,1 | 27 | 11  | 5,864   | PE | Toritama           | -8    | -36,1 | 27 | 10  | 4,3939  |
| CE     | SenadorPompeu    | -5,63 | -39,4 | 28 | 8,8 | 1,6636  | PE | Triunfo            | -7,81 | -38,1 | 23 | 11  | 13,7207 |
| CE     | Sobral           | -3,73 | -40,3 | 29 | 12  | 3,1315  | PE | Tuparetama         | -7,6  | -37,3 | 25 | 14  | 12,3799 |
| CE     | Taua             | -6    | -40,4 | 27 | 11  | 4,9399  | PE | VertentedoLerio    | -7,77 | -35,9 | 27 | 11  | 6,058   |
| CE     | Tejucuoca        | -4    | -39,6 | 26 | 9,1 | 5,7348  | PE | Vertentes          | -7,9  | -36   | 24 | 11  | 12,7623 |
| M<br>G | AguasVermelhas   | -15,8 | -41,5 | 21 | 11  | 17,794  | PI | AlvoradadoGurgueia | -8,44 | -43,9 | 25 | 11  | 10,9823 |
| M<br>G | Almenara         | -16,2 | -40,7 | 25 | 12  | 11,3775 | PI | BomJesus           | -9,07 | -44,4 | 27 | 14  | 8,65    |
| M<br>G | Aracuai          | -16,8 | -42,1 | 26 | 12  | 9,7223  | PI | BomJesusdoPiaui    | -9,1  | -44,1 | 27 | 14  | 8,8688  |
| M<br>G | CoronelMurtata   | -16,6 | -42,1 | 24 | 14  | 15,6992 | PI | CantodoBuriti      | -8,11 | -42,9 | 27 | 13  | 6,9012  |
| M<br>G | Espinosa         | -14,9 | -42,8 | 25 | 11  | 9,7428  | PI | Caracol            | -9,28 | -43,3 | 26 | 13  | 10,7568 |
| M<br>G | Felisburgo       | -16,6 | -40,8 | 22 | 9,7 | 14,1232 | PI | CastelodoPiaui     | -5,35 | -41,5 | 28 | 11  | 3,4035  |
| M<br>G | FranciscoSantana | -16,5 | -43,5 | 22 | 13  | 17,3407 | PI | MorrodosCavalos    | -7,85 | -41,9 | 28 | 12  | 5,2299  |
| M<br>G | GraoMogol        | -16,6 | -42,9 | 21 | 13  | 19,7575 | PI | Oeiras             | -7    | -42,1 | 29 | 13  | 4,1392  |
| M<br>G | Itaobim          | -16,3 | -41,3 | 25 | 12  | 11,7775 | PI | Paulistana         | -8,13 | -41,1 | 28 | 11  | 3,7764  |
| M<br>G | Itinga           | -16,6 | -41,8 | 24 | 14  | 14,4996 | PI | Picos              | -7,03 | -41,5 | 28 | 12  | 4,1727  |
| M<br>G | Jacinto          | -16,1 | -40,3 | 25 | 11  | 10,27   | PI | Piracuruca         | -3,88 | -41,8 | 28 | 12  | 4,8884  |
| M<br>G | Janauba          | -15,8 | -43,3 | 26 | 13  | 10,8595 | PI | SaoJoao do Piaui   | -8,35 | -42,3 | 28 | 12  | 3,4935  |
| M<br>G | Januaria         | -15,5 | -44   | 25 | 13  | 12,3727 | PI | SaoRaimundoNonato  | -9,03 | -42,7 | 27 | 11  | 6,2831  |
| M<br>G | Jequitinonha     | -16,4 | -41   | 25 | 11  | 11,0768 | PI | ValedoGurgueia     | -8,41 | -43,7 | 27 | 14  | 7,9972  |
| M<br>G | Manga            | -14,8 | -43,9 | 25 | 13  | 12,5671 | PI | ValencadoPiaui     | -6,4  | -41,7 | 28 | 13  | 5,544   |
| M<br>G | Medina           | -16,3 | -41,5 | 22 | 11  | 16,1771 | RN | Acari              | -6,44 | -36,6 | 27 | 9,4 | 4,9147  |
| M<br>G | Mocambinho       | -15,1 | -44   | 26 | 14  | 11,9815 | RN | Acu                | -5,58 | -36,9 | 28 | 9,5 | 1,474   |
| M<br>G | Montalvânia      | -14,4 | -44,4 | 23 | 12  | 15,202  | RN | Apodi              | -5,61 | -37,8 | 29 | 10  | 0,0523  |
| M<br>G | MonteAzul        | -15,2 | -42,9 | 26 | 11  | 8,6064  | RN | AugustoSevero      | -5,86 | -37,3 | 28 | 10  | 3,9136  |

|                |                        |       |       |    |     |         |           |                           |       |       |    |     |         |
|----------------|------------------------|-------|-------|----|-----|---------|-----------|---------------------------|-------|-------|----|-----|---------|
| <b>M<br/>G</b> | PedraAzul              | -16   | -41,3 | 23 | 11  | 13,6304 | <b>RN</b> | Caico                     | -6,46 | -37,1 | 25 | 11  | 10,2592 |
| <b>M<br/>G</b> | RioPardode<br>Minas    | -15,7 | -42,4 | 21 | 12  | 18,4607 | <b>RN</b> | CearaMirim                | -5,65 | -35,7 | 26 | 8,6 | 4,7536  |
| <b>M<br/>G</b> | Rubelita               | -16,4 | -42,3 | 24 | 13  | 15,0384 | <b>RN</b> | Cruzeta                   | -6,43 | -36,6 | 28 | 11  | 3,2671  |
| <b>M<br/>G</b> | Salinas                | -16,2 | -42,3 | 24 | 12  | 13,4331 | <b>RN</b> | CurraisNovo<br>s          | -6,25 | -36,5 | 26 | 9,4 | 6,2731  |
| <b>M<br/>G</b> | SaltodaDivis<br>a      | -16   | -40   | 25 | 9,2 | 8,6827  | <b>RN</b> | Floriania                 | -6,11 | -36,8 | 28 | 11  | 4,7968  |
| <b>PB</b>      | Aguiar                 | -7,09 | -38,2 | 26 | 10  | 6,5488  | <b>RN</b> | Itau                      | -5,84 | -38   | 28 | 10  | 3,9275  |
| <b>PB</b>      | Algodoao               | -6,88 | -36   | 23 | 9,6 | 12,1276 | <b>RN</b> | JardimdeAn<br>gicos       | -5,63 | -36   | 25 | 8,9 | 7,5223  |
| <b>PB</b>      | AntenorNav<br>arro     | -6,73 | -38,5 | 27 | 12  | 6,49    | <b>RN</b> | JardimdoSe<br>rido        | -6,63 | -36,8 | 27 | 9,4 | 3,9891  |
| <b>PB</b>      | Arapua                 | -7,11 | -38,6 | 25 | 11  | 10,37   | <b>RN</b> | Lucrecia                  | -6,13 | -37,9 | 27 | 10  | 5,9948  |
| <b>PB</b>      | Aroeiras               | -7,52 | -35,7 | 24 | 9,4 | 10,744  | <b>RN</b> | Macau                     | -5,15 | -36,6 | 28 | 8,4 | -0,0157 |
| <b>PB</b>      | Balancas               | -6,98 | -38,7 | 26 | 11  | 8,6863  | <b>RN</b> | MarcelinoVi<br>eira       | -6,25 | -38,1 | 27 | 10  | 4,6256  |
| <b>PB</b>      | Bananeiras             | -6,75 | -35,6 | 24 | 7,6 | 9,6403  | <b>RN</b> | Mossoro                   | -5,19 | -37,3 | 28 | 11  | 3,6283  |
| <b>PB</b>      | BarradeSan<br>taRosa   | -6,71 | -36,1 | 24 | 9,5 | 11,64   | <b>RN</b> | NovaCruz                  | -6,48 | -35,4 | 26 | 12  | 9,2092  |
| <b>PB</b>      | BarradeSao<br>Miguel   | -7,75 | -36,3 | 23 | 9,9 | 12,6023 | <b>RN</b> | PaudosFerr<br>os          | -6,13 | -38,3 | 27 | 10  | 4,6256  |
| <b>PB</b>      | BarradoBrej<br>odoCruz | -6,18 | -37,6 | 27 | 11  | 6,5167  | <b>RN</b> | Pendencias                | -5,25 | -36,8 | 27 | 8,6 | 2,8848  |
| <b>PB</b>      | BarradoJua             | -6,53 | -38,6 | 25 | 11  | 10,4755 | <b>RN</b> | SantaCruz                 | -6,23 | -36   | 27 | 10  | 5,5555  |
| <b>PB</b>      | BoaVista               | -7,26 | -36,2 | 24 | 9,9 | 12,2135 | <b>RN</b> | SaoPaulodo<br>Potengi     | -5,88 | -35,8 | 26 | 9,1 | 7,2895  |
| <b>PB</b>      | Bodocongo              | -7,53 | -36   | 24 | 9,1 | 11,0623 | <b>RN</b> | SaoPedro                  | -5,9  | -35,6 | 26 | 11  | 8,6932  |
| <b>PB</b>      | BomJesus               | -7,35 | -38,4 | 25 | 11  | 9,856   | <b>RN</b> | SaoRafael                 | -5,75 | -36,9 | 27 | 8,7 | 2,7559  |
| <b>PB</b>      | BonitodeSa<br>ntaFe    | -7,31 | -38,5 | 24 | 11  | 11,3904 | <b>RN</b> | Serido                    | -6,46 | -37,1 | 29 | 12  | 2,1475  |
| <b>PB</b>      | Boqueirao              | -7,5  | -36,1 | 25 | 15  | 13,7783 | <b>RN</b> | SerraNegra<br>doNorte     | -6,63 | -37,4 | 27 | 9,5 | 4,792   |
| <b>PB</b>      | BrejodoCruz            | -6,35 | -37,5 | 27 | 11  | 6,4     | <b>RN</b> | TaboleiroGr<br>ande       | -5,88 | -38   | 27 | 10  | 4,8563  |
| <b>PB</b>      | Cabaceiras             | -7,48 | -36,3 | 26 | 11  | 9,0091  | <b>RN</b> | Taipu                     | -5,63 | -35,6 | 26 | 8,9 | 6,6447  |
| <b>PB</b>      | Cacimbade<br>Dentro    | -6,63 | -35,8 | 23 | 9,2 | 12,1456 | <b>RN</b> | Touros                    | -5,16 | -35,5 | 26 | 9,7 | 6,5863  |
| <b>PB</b>      | Caicara                | -6,61 | -35,5 | 25 | 9,1 | 8,7952  | <b>RN</b> | Upanema                   | -5,63 | -37,3 | 28 | 11  | 3,7895  |
| <b>PB</b>      | Cajazeiras             | -6,88 | -38,6 | 27 | 11  | 7,0507  | <b>SE</b> | Aquidaba                  | -10,3 | -37   | 25 | 11  | 9,5536  |
| <b>PB</b>      | Camalau                | -7,92 | -36,9 | 23 | 10  | 12,5956 | <b>SE</b> | Canhoba                   | -10,1 | -37   | 26 | 11  | 7,2971  |
| <b>PB</b>      | CampinaGr<br>ande      | -7,22 | -35,9 | 25 | 8,6 | 8,5123  | <b>SE</b> | CanindedeS<br>aoFrancisco | -9,65 | -37,8 | 26 | 12  | 9,528   |
| <b>PB</b>      | Caraubas               | -7,72 | -36,5 | 24 | 10  | 11,6151 | <b>SE</b> | Carira                    | -10,4 | -37,8 | 24 | 11  | 12,7687 |
| <b>PB</b>      | Catingueira            | -7,13 | -37,6 | 26 | 11  | 7,8308  | <b>SE</b> | Cumbe                     | -10,3 | -37,2 | 25 | 11  | 11,1844 |

|           |                          |       |       |    |     |         |           |                         |       |       |    |     |         |
|-----------|--------------------------|-------|-------|----|-----|---------|-----------|-------------------------|-------|-------|----|-----|---------|
| <b>PB</b> | CatoledoRocha            | -6,35 | -37,6 | 27 | 11  | 7,0675  | <b>SE</b> | FeiraNova               | -10,3 | -37,3 | 25 | 11  | 11,1799 |
| <b>PB</b> | Conceicao                | -7,5  | -38,5 | 25 | 9,8 | 8,4331  | <b>SE</b> | FreiPaulo               | -10,6 | -37,6 | 24 | 11  | 11,6924 |
| <b>PB</b> | Condado                  | -6,9  | -37,6 | 26 | 11  | 7,3936  | <b>SE</b> | Gararu                  | -9,94 | -37,1 | 26 | 11  | 9,0235  |
| <b>PB</b> | Congo                    | -7,8  | -36,7 | 24 | 10  | 12,0103 | <b>SE</b> | Itabi                   | -10,1 | -37,1 | 25 | 11  | 9,2348  |
| <b>PB</b> | Coxixola                 | -7,61 | -36,6 | 24 | 10  | 11,416  | <b>SE</b> | MonteAlegredeSergipe    | -10   | -37,6 | 24 | 11  | 11,7892 |
| <b>PB</b> | Cuite                    | -6,48 | -36,2 | 22 | 9,4 | 14,0403 | <b>SE</b> | NossaSenhoraAparecida   | -10,4 | -37,5 | 25 | 11  | 11,1895 |
| <b>PB</b> | Curemas                  | -7,02 | -39   | 27 | 11  | 6,6059  | <b>SE</b> | NossaSenhora daGloria   | -10,2 | -37,4 | 25 | 11  | 10,6859 |
| <b>PB</b> | Desterro                 | -7,28 | -37,1 | 23 | 10  | 12,7828 | <b>SE</b> | NossaSenhoras dasDores  | -10,5 | -37,2 | 25 | 11  | 11,3855 |
| <b>PB</b> | Desterro de Malta        | -6,68 | -37,6 | 27 | 11  | 6,5072  | <b>SE</b> | NossaSenhora de Lourdes | -10,1 | -37,1 | 25 | 11  | 10,9876 |
| <b>PB</b> | Engenheiro Avidos        | -6,96 | -38,5 | 27 | 12  | 6,598   | <b>SE</b> | PedraMole               | -10,6 | -37,7 | 26 | 11  | 9,0235  |
| <b>PB</b> | Fagundes                 | -7,35 | -35,8 | 23 | 9,4 | 13,1008 | <b>SE</b> | Pinhao                  | -10,6 | -37,7 | 25 | 12  | 11,8755 |
| <b>PB</b> | Garrotes                 | -7,38 | -38   | 26 | 11  | 7,7179  | <b>SE</b> | PocoRedondo             | -9,81 | -37,7 | 24 | 11  | 11,7892 |
| <b>PB</b> | Gurjao                   | -7,26 | -36,5 | 24 | 10  | 11,8132 | <b>SE</b> | PocoVerde               | -10,7 | -38,1 | 24 | 11  | 12,3799 |
| <b>PB</b> | Ibiara                   | -7,48 | -38,4 | 26 | 11  | 7,8231  | <b>SE</b> | Porto daFolha           | -9,88 | -37,3 | 26 | 11  | 7,5164  |
| <b>PB</b> | Imaculada                | -7,38 | -37,5 | 23 | 10  | 14,4775 | <b>SE</b> | Propria                 | -10,2 | -36,8 | 27 | 9,4 | 5,3715  |
| <b>PB</b> | Inga                     | -7,28 | -35,6 | 25 | 9,8 | 8,2188  | <b>SE</b> | Ribeiropolis            | -10,6 | -37,4 | 24 | 11  | 11,2928 |
| <b>PB</b> | Itaporanga               | -7,3  | -38,2 | 27 | 11  | 6,382   | <b>SE</b> | SaoMiguel doAleixo      | -10,4 | -37,4 | 25 | 11  | 9,4451  |
| <b>PB</b> | Jenipapeiro dosCarreiros | -6,46 | -37,6 | 27 | 11  | 6,5072  | <b>SE</b> | SimaoDias               | -10,7 | -37,8 | 24 | 11  | 12,376  |
| <b>PB</b> | Jerico                   | -6,55 | -38,8 | 27 | 11  | 6,6144  | <b>SE</b> | TobiasBarreto           | -11,1 | -38   | 25 | 11  | 10,5808 |
| <b>PB</b> | Juazeirinho              | -7,06 | -36,6 | 23 | 10  | 12,9808 |           |                         |       |       |    |     |         |

APÊNDICE C - Algoritmo do processamento dos dados climáticos no  
***Grasshopper*** (arquivo PNG)

## APÊNDICE D - Tabela dos cronogramas para simulação termo energética

| Hora<br>(h) | OCUPAÇÃO (fração) |                | ILUMINAÇÃO<br>(fração) | EQUIPAMENTOS<br>(fração) | ATIVIDADES<br>(W) | INFILTRAÇÃO<br>DE AR (fração) |
|-------------|-------------------|----------------|------------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------------|
|             | semana            | Sábado/domingo |                        |                          |                   |                               |
| 1           | 1                 | 1              | 0                      | 0                        | 45                | 1                             |
| 2           | 1                 | 1              | 0                      | 0                        | 45                | 1                             |
| 3           | 1                 | 1              | 0                      | 0                        | 45                | 1                             |
| 4           | 1                 | 1              | 0                      | 0                        | 45                | 1                             |
| 5           | 1                 | 1              | 0                      | 0                        | 45                | 1                             |
| 6           | 1                 | 1              | 0                      | 0                        | 45                | 1                             |
| 7           | 0                 | 1              | 0                      | 0                        | 45                | 1                             |
| 8           | 0                 | 1              | 0                      | 0                        | 45                | 1                             |
| 9           | 0                 | 1              | 0                      | 0                        | 45                | 1                             |
| 10          | 0                 | 0,5            | 0                      | 0                        | 45                | 1                             |
| 11          | 0                 | 0              | 0                      | 0                        | 45                | 1                             |
| 12          | 0                 | 0              | 0                      | 0                        | 65                | 1                             |
| 13          | 0,1               | 0,1            | 0                      | 0,1                      | 65                | 1                             |
| 14          | 0,1               | 0,1            | 0                      | 0,1                      | 65                | 1                             |
| 15          | 0,1               | 0,1            | 0                      | 0,1                      | 65                | 1                             |
| 16          | 0,1               | 0,1            | 0                      | 0,1                      | 65                | 1                             |
| 17          | 0,25              | 0,25           | 0                      | 0,25                     | 65                | 1                             |
| 18          | 0,25              | 0,25           | 0,25                   | 0,25                     | 65                | 1                             |
| 19          | 0,5               | 0,5            | 0,5                    | 0,5                      | 65                | 1                             |
| 20          | 0,5               | 0,5            | 0,5                    | 0,5                      | 65                | 1                             |
| 21          | 1                 | 1              | 1                      | 1                        | 65                | 1                             |
| 22          | 1                 | 1              | 1                      | 1                        | 65                | 1                             |
| 23          | 1                 | 1              | 0                      | 0                        | 45                | 1                             |
| 24          | 1                 | 1              | 0                      | 0                        | 45                | 1                             |

**APÊNDICE E - Tabelas das variáveis para análises estatísticas das saídas do processamento de dados e dos casos de maior influência no Incremento do Conforto (Planilha do Excel)**

## Apêndice F - Tabelas dos testes estatísticos

### 6.1.1. Comparação dos valores das Variáveis Dependentes baseados em ori

Testes de Normalidade (Variáveis Dependentes em função de ori)

|         | ori  | Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup> |      |      | Shapiro-Wilk |      |      |
|---------|------|---------------------------------|------|------|--------------|------|------|
|         |      | Estatística                     | gl   | Sig. | Estatística  | gl   | Sig. |
| Iconf   | ,00  | ,047                            | 2408 | ,000 | ,985         | 2408 | ,000 |
|         | 1,00 | ,057                            | 2408 | ,000 | ,977         | 2408 | ,000 |
| DPgc    | ,00  | ,106                            | 2408 | ,000 | ,960         | 2408 | ,000 |
|         | 1,00 | ,090                            | 2408 | ,000 | ,972         | 2408 | ,000 |
| Dtmed   | ,00  | ,067                            | 2408 | ,000 | ,939         | 2408 | ,000 |
|         | 1,00 | ,081                            | 2408 | ,000 | ,908         | 2408 | ,000 |
| Dtamp   | ,00  | ,080                            | 2408 | ,000 | ,965         | 2408 | ,000 |
|         | 1,00 | ,091                            | 2408 | ,000 | ,962         | 2408 | ,000 |
| Dtpico  | ,00  | ,069                            | 2408 | ,000 | ,963         | 2408 | ,000 |
|         | 1,00 | ,079                            | 2408 | ,000 | ,962         | 2408 | ,000 |
| Iatraso | ,00  | ,082                            | 2408 | ,000 | ,978         | 2408 | ,000 |
|         | 1,00 | ,126                            | 2408 | ,000 | ,956         | 2408 | ,000 |

a. Correlação de Significância de Lilliefors

Teste de Homogeneidade de Variância  
(Variáveis Dependentes em função de ori)

|        |                                       | Estatística de |     |          |      |
|--------|---------------------------------------|----------------|-----|----------|------|
|        |                                       | Levene         | gl1 | gl2      | Sig. |
| Iconf  | Com base em média                     | 93,365         | 1   | 4814     | ,000 |
|        | Com base em mediana                   | 90,069         | 1   | 4814     | ,000 |
|        | Com base em mediana e com gl ajustado | 90,069         | 1   | 4541,467 | ,000 |
|        | Com base em média aparada             | 93,022         | 1   | 4814     | ,000 |
| DPgc   | Com base em média                     | 4973,637       | 1   | 4814     | ,000 |
|        | Com base em mediana                   | 4974,218       | 1   | 4814     | ,000 |
|        | Com base em mediana e com gl ajustado | 4974,218       | 1   | 2512,820 | ,000 |
|        | Com base em média aparada             | 4977,396       | 1   | 4814     | ,000 |
| Dtmed  | Com base em média                     | 126,697        | 1   | 4814     | ,000 |
|        | Com base em mediana                   | 113,655        | 1   | 4814     | ,000 |
|        | Com base em mediana e com gl ajustado | 113,655        | 1   | 4656,121 | ,000 |
|        | Com base em média aparada             | 122,231        | 1   | 4814     | ,000 |
| Dtamp  | Com base em média                     | 153,323        | 1   | 4814     | ,000 |
|        | Com base em mediana                   | 147,226        | 1   | 4814     | ,000 |
|        | Com base em mediana e com gl ajustado | 147,226        | 1   | 4436,744 | ,000 |
|        | Com base em média aparada             | 149,757        | 1   | 4814     | ,000 |
| Dtpico | Com base em média                     | 99,605         | 1   | 4814     | ,000 |
|        | Com base em mediana                   | 94,614         | 1   | 4814     | ,000 |

|         |                                       |         |   |          |      |
|---------|---------------------------------------|---------|---|----------|------|
| Iatraso | Com base em mediana e com gl ajustado | 94,614  | 1 | 4563,569 | ,000 |
|         | Com base em média aparada             | 95,904  | 1 | 4814     | ,000 |
|         | Com base em média                     | 380,256 | 1 | 4814     | ,000 |
|         | Com base em mediana                   | 381,628 | 1 | 4814     | ,000 |
|         | Com base em mediana e com gl ajustado | 381,628 | 1 | 4491,485 | ,000 |
|         | Com base em média aparada             | 381,964 | 1 | 4814     | ,000 |

**Sumarização de Teste U de Mann-Whitney de Amostras Independentes (Iconf entre ori)**

|                                        |             |
|----------------------------------------|-------------|
| N total                                | 4816        |
| U de Mann-Whitney                      | 2732621,000 |
| Wilcoxon W                             | 5633057,000 |
| Estatística do teste                   | 2732621,000 |
| Erro padrão                            | 48245,195   |
| Estatística de Teste Padronizado       | -3,453      |
| Sig. Assintótica (teste de dois lados) | ,001        |

**Sumarização de Teste U de Mann-Whitney de Amostras Independentes (DPgc entre ori)**

|                                        |             |
|----------------------------------------|-------------|
| N total                                | 4816        |
| U de Mann-Whitney                      | 3839,000    |
| Wilcoxon W                             | 2904275,000 |
| Estatística do teste                   | 3839,000    |
| Erro padrão                            | 48245,208   |
| Estatística de Teste Padronizado       | -60,014     |
| Sig. Assintótica (teste de dois lados) | ,000        |

**Sumarização de Teste U de Mann-Whitney de Amostras Independentes (Dtmed entre ori)**

|                                        |             |
|----------------------------------------|-------------|
| N total                                | 4816        |
| U de Mann-Whitney                      | 3830184,500 |
| Wilcoxon W                             | 6730620,500 |
| Estatística do teste                   | 3830184,500 |
| Erro padrão                            | 48245,208   |
| Estatística de Teste Padronizado       | 19,296      |
| Sig. Assintótica (teste de dois lados) | ,000        |

**Sumarização de Teste U de Mann-Whitney de Amostras Independentes (Dtamp entre ori)**

|                                        |             |
|----------------------------------------|-------------|
| N total                                | 4816        |
| U de Mann-Whitney                      | 2377037,500 |
| Wilcoxon W                             | 5277473,500 |
| Estatística do teste                   | 2377037,500 |
| Erro padrão                            | 48245,208   |
| Estatística de Teste Padronizado       | -10,824     |
| Sig. Assintótica (teste de dois lados) | ,000        |

**Sumarização de Teste U de Mann-Whitney de Amostras Independentes (Dtpico entre ori)**

|                                        |             |
|----------------------------------------|-------------|
| N total                                | 4816        |
| U de Mann-Whitney                      | 2523374,500 |
| Wilcoxon W                             | 5423810,500 |
| Estatística do teste                   | 2523374,500 |
| Erro padrão                            | 48245,208   |
| Estatística de Teste Padronizado       | -7,791      |
| Sig. Assintótica (teste de dois lados) | ,000        |

**Sumarização de Teste U de Mann-Whitney de Amostras Independentes (Iatraso entre ori)**

|                                        |             |
|----------------------------------------|-------------|
| N total                                | 4816        |
| U de Mann-Whitney                      | 1157145,000 |
| Wilcoxon W                             | 4057581,000 |
| Estatística do teste                   | 1157145,000 |
| Erro padrão                            | 48224,996   |
| Estatística de Teste Padronizado       | -36,124     |
| Sig. Assintótica (teste de dois lados) | ,000        |

## 6.1.2.Comparação dos valores das Variáveis Dependentes baseados em esp

### Testes de Normalidade (Variáveis Dependentes em função de esp)

|         | esp   | Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup> |     |       | Shapiro-Wilk |     |      |
|---------|-------|---------------------------------|-----|-------|--------------|-----|------|
|         |       | Estatística                     | gl  | Sig.  | Estatística  | gl  | Sig. |
| Iconf   | 5,00  | ,039                            | 602 | ,027  | ,992         | 602 | ,004 |
|         | 10,00 | ,030                            | 602 | ,200* | ,993         | 602 | ,010 |
|         | 15,00 | ,030                            | 602 | ,200* | ,993         | 602 | ,008 |
|         | 20,00 | ,034                            | 602 | ,098  | ,993         | 602 | ,010 |
| DPgc    | 5,00  | ,164                            | 602 | ,000  | ,918         | 602 | ,000 |
|         | 10,00 | ,181                            | 602 | ,000  | ,897         | 602 | ,000 |
|         | 15,00 | ,195                            | 602 | ,000  | ,883         | 602 | ,000 |
|         | 20,00 | ,204                            | 602 | ,000  | ,873         | 602 | ,000 |
| Dtmed   | 5,00  | ,060                            | 602 | ,000  | ,955         | 602 | ,000 |
|         | 10,00 | ,057                            | 602 | ,000  | ,950         | 602 | ,000 |
|         | 15,00 | ,060                            | 602 | ,000  | ,941         | 602 | ,000 |
|         | 20,00 | ,060                            | 602 | ,000  | ,926         | 602 | ,000 |
| Dtamp   | 5,00  | ,078                            | 602 | ,000  | ,962         | 602 | ,000 |
|         | 10,00 | ,077                            | 602 | ,000  | ,958         | 602 | ,000 |
|         | 15,00 | ,071                            | 602 | ,000  | ,954         | 602 | ,000 |
|         | 20,00 | ,066                            | 602 | ,000  | ,952         | 602 | ,000 |
| Dtpico  | 5,00  | ,049                            | 602 | ,001  | ,970         | 602 | ,000 |
|         | 10,00 | ,038                            | 602 | ,043  | ,976         | 602 | ,000 |
|         | 15,00 | ,036                            | 602 | ,066  | ,976         | 602 | ,000 |
|         | 20,00 | ,032                            | 602 | ,200* | ,976         | 602 | ,000 |
| Iatraso | 5,00  | ,090                            | 602 | ,000  | ,980         | 602 | ,000 |
|         | 10,00 | ,068                            | 602 | ,000  | ,986         | 602 | ,000 |
|         | 15,00 | ,082                            | 602 | ,000  | ,983         | 602 | ,000 |
|         | 20,00 | ,077                            | 602 | ,000  | ,985         | 602 | ,000 |

\*. Este é um limite inferior da significância verdadeira.

a. Correlação de Significância de Lilliefors

### Teste de Homogeneidade de Variância (Variáveis Dependentes em função de esp)

|       |                                       | Estatística de |  | gl1 | gl2      | Sig. |
|-------|---------------------------------------|----------------|--|-----|----------|------|
|       |                                       | Levene         |  |     |          |      |
| Iconf | Com base em média                     | 168,818        |  | 3   | 2404     | ,000 |
|       | Com base em mediana                   | 165,428        |  | 3   | 2404     | ,000 |
|       | Com base em mediana e com gl ajustado | 165,428        |  | 3   | 1772,511 | ,000 |
|       | Com base em média aparada             | 169,222        |  | 3   | 2404     | ,000 |
| DPgc  | Com base em média                     | 137,358        |  | 3   | 2404     | ,000 |
|       | Com base em mediana                   | 54,943         |  | 3   | 2404     | ,000 |
|       | Com base em mediana e com gl ajustado | 54,943         |  | 3   | 1815,458 | ,000 |
|       | Com base em média aparada             | 117,756        |  | 3   | 2404     | ,000 |
| Dtmed | Com base em média                     | 106,577        |  | 3   | 2404     | ,000 |

|         |                                       |         |   |          |      |
|---------|---------------------------------------|---------|---|----------|------|
|         | Com base em mediana                   | 102,524 | 3 | 2404     | ,000 |
|         | Com base em mediana e com gl ajustado | 102,524 | 3 | 1784,091 | ,000 |
|         | Com base em média aparada             | 103,962 | 3 | 2404     | ,000 |
| Dtamp   | Com base em média                     | 156,709 | 3 | 2404     | ,000 |
|         | Com base em mediana                   | 138,000 | 3 | 2404     | ,000 |
|         | Com base em mediana e com gl ajustado | 138,000 | 3 | 1731,593 | ,000 |
|         | Com base em média aparada             | 159,078 | 3 | 2404     | ,000 |
| Dtpico  | Com base em média                     | 146,021 | 3 | 2404     | ,000 |
|         | Com base em mediana                   | 145,861 | 3 | 2404     | ,000 |
|         | Com base em mediana e com gl ajustado | 145,861 | 3 | 1691,224 | ,000 |
|         | Com base em média aparada             | 145,814 | 3 | 2404     | ,000 |
| Iatraso | Com base em média                     | 50,769  | 3 | 2404     | ,000 |
|         | Com base em mediana                   | 49,822  | 3 | 2404     | ,000 |
|         | Com base em mediana e com gl ajustado | 49,822  | 3 | 1999,317 | ,000 |
|         | Com base em média aparada             | 50,534  | 3 | 2404     | ,000 |

#### Sumarização do Teste Kruskal-Wallis de Amostras Independentes (Iconf entre esp)

|                                        |                      |
|----------------------------------------|----------------------|
| N total                                | 2408                 |
| Estatística do teste                   | 155,177 <sup>a</sup> |
| Grau de Liberdade                      | 3                    |
| Sig. Assintótica (teste de dois lados) | ,000                 |

a. A estatística do teste está ajustada para empates.

#### Subconjuntos Homogêneos de Iconf baseados em esp

|                                 |       | Subconjunto    |                |                |                |
|---------------------------------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                 |       | 1              | 2              | 3              | 4              |
| Amostra <sup>a</sup>            | 5,00  | 931,763        |                |                |                |
|                                 | 10,00 |                | 1174,521       |                |                |
|                                 | 15,00 |                |                | 1313,997       |                |
|                                 | 20,00 |                |                |                | 1397,719       |
| Estatística do teste            |       | . <sup>b</sup> | . <sup>b</sup> | . <sup>b</sup> | . <sup>b</sup> |
| Sig. (teste bilateral)          |       | .              | .              | .              | .              |
| Sig. Ajustada (teste bilateral) |       | .              | .              | .              | .              |

Subconjuntos homogêneos são baseados em significâncias assintóticas. O nível de significância é ,05.

a. Cada célula mostra o posto médio da amostra de esp.

b. Não é possível calcular, pois o subconjunto contém somente uma amostra.

### Sumarização do Teste Kruskal-Wallis de Amostras

#### Independentes (DPgc entre esp)

|                                        |                       |
|----------------------------------------|-----------------------|
| N total                                | 2408                  |
| Estatística do teste                   | 1647,515 <sup>a</sup> |
| Grau de Liberdade                      | 3                     |
| Sig. Assintótica (teste de dois lados) | ,000                  |

a. A estatística do teste está ajustada para empates.

#### Subconjuntos Homogêneos de DPgc baseados em esp

|                                 |       | Subconjunto    |                |                |                |
|---------------------------------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                 |       | 1              | 2              | 3              | 4              |
| Amostra <sup>a</sup>            | 5,00  | 368,402        |                |                |                |
|                                 | 10,00 |                | 1018,892       |                |                |
|                                 | 15,00 |                |                | 1531,638       |                |
|                                 | 20,00 |                |                |                | 1899,068       |
| Estatística do teste            |       | . <sup>b</sup> | . <sup>b</sup> | . <sup>b</sup> | . <sup>b</sup> |
| Sig. (teste bilateral)          |       | .              | .              | .              | .              |
| Sig. Ajustada (teste bilateral) |       | .              | .              | .              | .              |

Subconjuntos homogêneos são baseados em significâncias assintóticas. O nível de significância é ,05.

a. Cada célula mostra o posto médio da amostra de esp.

b. Não é possível calcular, pois o subconjunto contém somente uma amostra.

### Sumarização do Teste Kruskal-Wallis de Amostras

#### Independentes (Dtmed entre esp)

|                                        |                       |
|----------------------------------------|-----------------------|
| N total                                | 2408                  |
| Estatística do teste                   | 1314,389 <sup>a</sup> |
| Grau de Liberdade                      | 3                     |
| Sig. Assintótica (teste de dois lados) | ,000                  |

a. A estatística do teste está ajustada para empates.

#### Subconjuntos Homogêneos de Dtmed baseados em esp

|                                 |       | Subconjunto    |                |                |                |
|---------------------------------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                 |       | 1              | 2              | 3              | 4              |
| Amostra <sup>a</sup>            | 20,00 | 608,927        |                |                |                |
|                                 | 15,00 |                | 893,861        |                |                |
|                                 | 10,00 |                |                | 1346,446       |                |
|                                 | 5,00  |                |                |                | 1968,766       |
| Estatística do teste            |       | . <sup>b</sup> | . <sup>b</sup> | . <sup>b</sup> | . <sup>b</sup> |
| Sig. (teste bilateral)          |       | .              | .              | .              | .              |
| Sig. Ajustada (teste bilateral) |       | .              | .              | .              | .              |

Subconjuntos homogêneos são baseados em significâncias assintóticas. O nível de significância é ,05.

a. Cada célula mostra o posto médio da amostra de esp.

b. Não é possível calcular, pois o subconjunto contém somente uma amostra.

### Sumarização do Teste Kruskal-Wallis de Amostras

#### Independentes (Dtamp entre esp)

|                                        |                       |
|----------------------------------------|-----------------------|
| N total                                | 2408                  |
| Estatística do teste                   | 1786,002 <sup>a</sup> |
| Grau de Liberdade                      | 3                     |
| Sig. Assintótica (teste de dois lados) | ,000                  |

a. A estatística do teste está ajustada para empates.

#### Subconjuntos Homogêneos de Dtamp baseados em esp

|                                 |       | Subconjunto    |                |                |                |
|---------------------------------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                 |       | 1              | 2              | 3              | 4              |
| Amostra <sup>a</sup>            | 5,00  | 334,897        |                |                |                |
|                                 | 10,00 |                | 1009,933       |                |                |
|                                 | 15,00 |                |                | 1544,407       |                |
|                                 | 20,00 |                |                |                | 1928,763       |
| Estatística do teste            |       | . <sup>b</sup> | . <sup>b</sup> | . <sup>b</sup> | . <sup>b</sup> |
| Sig. (teste bilateral)          |       | .              | .              | .              | .              |
| Sig. Ajustada (teste bilateral) |       | .              | .              | .              | .              |

Subconjuntos homogêneos são baseados em significâncias assintóticas. O nível de significância é ,05.

a. Cada célula mostra o posto médio da amostra de esp.

b. Não é possível calcular, pois o subconjunto contém somente uma amostra.

### Sumarização do Teste Kruskal-Wallis de Amostras

#### Independentes (Dtpico entre esp)

|                                        |                       |
|----------------------------------------|-----------------------|
| N total                                | 2408                  |
| Estatística do teste                   | 1631,961 <sup>a</sup> |
| Grau de Liberdade                      | 3                     |
| Sig. Assintótica (teste de dois lados) | ,000                  |

a. A estatística do teste está ajustada para empates.

#### Subconjuntos Homogêneos de Dtpico baseados em esp

|                                 |       | Subconjunto    |                |                |                |
|---------------------------------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                 |       | 1              | 2              | 3              | 4              |
| Amostra <sup>a</sup>            | 5,00  | 361,537        |                |                |                |
|                                 | 10,00 |                | 1033,227       |                |                |
|                                 | 15,00 |                |                | 1543,981       |                |
|                                 | 20,00 |                |                |                | 1879,256       |
| Estatística do teste            |       | . <sup>b</sup> | . <sup>b</sup> | . <sup>b</sup> | . <sup>b</sup> |
| Sig. (teste bilateral)          |       | .              | .              | .              | .              |
| Sig. Ajustada (teste bilateral) |       | .              | .              | .              | .              |

Subconjuntos homogêneos são baseados em significâncias assintóticas. O nível de significância é ,05.

a. Cada célula mostra o posto médio da amostra de esp.

b. Não é possível calcular, pois o subconjunto contém somente uma amostra.

### Sumarização do Teste Kruskal-Wallis de Amostras

#### Independentes (Iatraso entre esp)

|                                        |                       |
|----------------------------------------|-----------------------|
| N total                                | 2408                  |
| Estatística do teste                   | 1676,836 <sup>a</sup> |
| Grau de Liberdade                      | 3                     |
| Sig. Assintótica (teste de dois lados) | ,000                  |

a. A estatística do teste está ajustada para empates.

#### Subconjuntos Homogêneos de Iatraso baseados em esp

|                                 |       | Subconjunto    |                |                |                |
|---------------------------------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                 |       | 1              | 2              | 3              | 4              |
| Amostra <sup>a</sup>            | 5,00  | 380,862        |                |                |                |
|                                 | 10,00 |                | 985,502        |                |                |
|                                 | 15,00 |                |                | 1531,331       |                |
|                                 | 20,00 |                |                |                | 1920,305       |
| Estatística do teste            |       | . <sup>b</sup> | . <sup>b</sup> | . <sup>b</sup> | . <sup>b</sup> |
| Sig. (teste bilateral)          |       | .              | .              | .              | .              |
| Sig. Ajustada (teste bilateral) |       | .              | .              | .              | .              |

Subconjuntos homogêneos são baseados em significâncias assintóticas. O nível de significância é ,05.

a. Cada célula mostra o posto médio da amostra de esp.

b. Não é possível calcular, pois o subconjunto contém somente uma amostra.

## 6.1.3. Comparação dos valores das Variáveis Dependentes baseados em tfus

#### Testes de Normalidade (Variáveis Dependentes em função de tfus)

|       |       | Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup> |    |                   | Shapiro-Wilk |    |      |
|-------|-------|---------------------------------|----|-------------------|--------------|----|------|
| tfus  |       | Estatística                     | gl | Sig.              | Estatística  | gl | Sig. |
| Iconf | 19,00 | ,063                            | 86 | ,200 <sup>*</sup> | ,982         | 86 | ,287 |
|       | 21,00 | ,058                            | 86 | ,200 <sup>*</sup> | ,982         | 86 | ,275 |
|       | 23,00 | ,080                            | 86 | ,200 <sup>*</sup> | ,980         | 86 | ,191 |
|       | 25,00 | ,062                            | 86 | ,200 <sup>*</sup> | ,982         | 86 | ,263 |
|       | 27,00 | ,093                            | 86 | ,061              | ,969         | 86 | ,035 |
|       | 29,00 | ,094                            | 86 | ,056              | ,960         | 86 | ,010 |
|       | 31,00 | ,077                            | 86 | ,200 <sup>*</sup> | ,970         | 86 | ,040 |
| DPgc  | 19,00 | ,114                            | 86 | ,007              | ,899         | 86 | ,000 |
|       | 21,00 | ,090                            | 86 | ,085              | ,920         | 86 | ,000 |
|       | 23,00 | ,062                            | 86 | ,200 <sup>*</sup> | ,982         | 86 | ,276 |
|       | 25,00 | ,155                            | 86 | ,000              | ,891         | 86 | ,000 |
|       | 27,00 | ,113                            | 86 | ,009              | ,944         | 86 | ,001 |
|       | 29,00 | ,072                            | 86 | ,200 <sup>*</sup> | ,978         | 86 | ,155 |
|       | 31,00 | ,087                            | 86 | ,120              | ,962         | 86 | ,012 |
| Dtmed | 19,00 | ,163                            | 86 | ,000              | ,831         | 86 | ,000 |
|       | 21,00 | ,148                            | 86 | ,000              | ,892         | 86 | ,000 |
|       | 23,00 | ,079                            | 86 | ,200 <sup>*</sup> | ,965         | 86 | ,020 |

|         |       |      |    |       |      |    |      |
|---------|-------|------|----|-------|------|----|------|
|         | 25,00 | ,133 | 86 | ,001  | ,917 | 86 | ,000 |
|         | 27,00 | ,095 | 86 | ,052  | ,962 | 86 | ,013 |
|         | 29,00 | ,189 | 86 | ,000  | ,858 | 86 | ,000 |
|         | 31,00 | ,178 | 86 | ,000  | ,869 | 86 | ,000 |
| Dtamp   | 19,00 | ,165 | 86 | ,000  | ,785 | 86 | ,000 |
|         | 21,00 | ,159 | 86 | ,000  | ,786 | 86 | ,000 |
|         | 23,00 | ,129 | 86 | ,001  | ,869 | 86 | ,000 |
|         | 25,00 | ,087 | 86 | ,151  | ,956 | 86 | ,005 |
|         | 27,00 | ,069 | 86 | ,200* | ,985 | 86 | ,402 |
|         | 29,00 | ,108 | 86 | ,015  | ,951 | 86 | ,003 |
|         | 31,00 | ,119 | 86 | ,004  | ,921 | 86 | ,000 |
|         |       |      |    |       |      |    |      |
| Dtpico  | 19,00 | ,104 | 86 | ,023  | ,951 | 86 | ,003 |
|         | 21,00 | ,088 | 86 | ,095  | ,961 | 86 | ,010 |
|         | 23,00 | ,069 | 86 | ,200* | ,957 | 86 | ,006 |
|         | 25,00 | ,077 | 86 | ,200* | ,941 | 86 | ,001 |
|         | 27,00 | ,082 | 86 | ,200* | ,932 | 86 | ,000 |
|         | 29,00 | ,080 | 86 | ,200* | ,952 | 86 | ,003 |
|         | 31,00 | ,094 | 86 | ,057  | ,947 | 86 | ,002 |
|         |       |      |    |       |      |    |      |
| Iatraso | 19,00 | ,126 | 86 | ,002  | ,971 | 86 | ,052 |
|         | 21,00 | ,124 | 86 | ,002  | ,971 | 86 | ,047 |
|         | 23,00 | ,117 | 86 | ,005  | ,967 | 86 | ,028 |
|         | 25,00 | ,108 | 86 | ,016  | ,976 | 86 | ,104 |
|         | 27,00 | ,093 | 86 | ,061  | ,971 | 86 | ,052 |
|         | 29,00 | ,108 | 86 | ,015  | ,975 | 86 | ,090 |
|         | 31,00 | ,102 | 86 | ,027  | ,964 | 86 | ,017 |
|         |       |      |    |       |      |    |      |

\*. Este é um limite inferior da significância verdadeira.

a. Correlação de Significância de Lilliefors

**Teste de Homogeneidade de Variância**  
(Variáveis Dependentes em função de tfus)

|       |                                       | Estatística de |     |         |      |
|-------|---------------------------------------|----------------|-----|---------|------|
|       |                                       | Levene         | gl1 | gl2     | Sig. |
| Iconf | Com base em média                     | 3,540          | 6   | 595     | ,002 |
|       | Com base em mediana                   | 3,410          | 6   | 595     | ,003 |
|       | Com base em mediana e com gl ajustado | 3,410          | 6   | 567,550 | ,003 |
|       | Com base em média aparada             | 3,563          | 6   | 595     | ,002 |
| DPgc  | Com base em média                     | 33,042         | 6   | 595     | ,000 |
|       | Com base em mediana                   | 32,440         | 6   | 595     | ,000 |
|       | Com base em mediana e com gl ajustado | 32,440         | 6   | 437,136 | ,000 |
|       | Com base em média aparada             | 32,888         | 6   | 595     | ,000 |
| Dtmed | Com base em média                     | 26,952         | 6   | 595     | ,000 |
|       | Com base em mediana                   | 19,052         | 6   | 595     | ,000 |
|       | Com base em mediana e com gl ajustado | 19,052         | 6   | 311,748 | ,000 |
|       | Com base em média aparada             | 24,485         | 6   | 595     | ,000 |
| Dtamp | Com base em média                     | 2,801          | 6   | 595     | ,011 |

|         |                                       |       |   |         |      |
|---------|---------------------------------------|-------|---|---------|------|
| Dtpico  | Com base em mediana                   | 2,629 | 6 | 595     | ,016 |
|         | Com base em mediana e com gl ajustado | 2,629 | 6 | 576,838 | ,016 |
|         | Com base em média aparada             | 2,773 | 6 | 595     | ,011 |
|         | Com base em média                     | 1,005 | 6 | 595     | ,421 |
| Iatraso | Com base em mediana                   | 1,077 | 6 | 595     | ,375 |
|         | Com base em mediana e com gl ajustado | 1,077 | 6 | 576,430 | ,375 |
|         | Com base em média aparada             | 1,038 | 6 | 595     | ,400 |
|         | Com base em média                     | ,195  | 6 | 595     | ,978 |
|         | Com base em mediana                   | ,193  | 6 | 595     | ,979 |
|         | Com base em mediana e com gl ajustado | ,193  | 6 | 588,216 | ,979 |
|         | Com base em média aparada             | ,192  | 6 | 595     | ,979 |
|         |                                       |       |   |         |      |

#### Sumarização do Teste Kruskal-Wallis de Amostras Independentes (Iconf entre tfus)

|                                        |                     |
|----------------------------------------|---------------------|
| N total                                | 602                 |
| Estatística do teste                   | 29,246 <sup>a</sup> |
| Grau de Liberdade                      | 6                   |
| Sig. Assintótica (teste de dois lados) | ,000                |

a. A estatística do teste está ajustada para empates.

#### Sumarização do Teste Kruskal-Wallis de Amostras Independentes (DPgc entre tfus)

|                                        |                      |
|----------------------------------------|----------------------|
| N total                                | 602                  |
| Estatística do teste                   | 385,940 <sup>a</sup> |
| Grau de Liberdade                      | 6                    |
| Sig. Assintótica (teste de dois lados) | ,000                 |

a. A estatística do teste está ajustada para empates.

#### Subconjuntos Homogêneos de Iconf baseados em tfus

|                                 |       | Subconjunto |         |
|---------------------------------|-------|-------------|---------|
|                                 |       | 1           | 2       |
| Amostra <sup>a</sup>            | 29,00 | 261,541     |         |
|                                 | 27,00 | 263,866     |         |
|                                 | 31,00 | 276,180     |         |
|                                 | 25,00 | 279,151     |         |
|                                 | 23,00 | 318,855     | 318,855 |
|                                 | 21,00 |             | 353,157 |
|                                 | 19,00 |             | 357,750 |
| Estatística do teste            |       | 6,910       | 3,586   |
| Sig. (teste bilateral)          |       | ,141        | ,166    |
| Sig. Ajustada (teste bilateral) |       | ,191        | ,346    |

Subconjuntos homogêneos são baseados em significâncias assintóticas. O nível de significância é ,05.

a. Cada célula mostra o posto médio da amostra de tfus.

### Subconjuntos Homogêneos de DPgc baseados em tfus

|                                 |       | Subconjunto    |                |                |                |         |
|---------------------------------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------|
|                                 |       | 1              | 2              | 3              | 4              | 5       |
| Amostra <sup>a</sup>            | 31,00 | 71,988         |                |                |                |         |
|                                 | 29,00 |                | 137,302        |                |                |         |
|                                 | 27,00 |                |                | 249,558        |                |         |
|                                 | 25,00 |                |                |                | 361,674        |         |
|                                 | 19,00 |                |                |                |                | 421,407 |
|                                 | 23,00 |                |                |                |                | 425,407 |
|                                 | 21,00 |                |                |                |                | 443,163 |
| Estatística do teste            |       | . <sup>b</sup> | . <sup>b</sup> | . <sup>b</sup> | . <sup>b</sup> | 2,118   |
| Sig. (teste bilateral)          |       | .              | .              | .              | .              | ,347    |
| Sig. Ajustada (teste bilateral) |       | .              | .              | .              | .              | ,630    |

Subconjuntos homogêneos são baseados em significâncias assintóticas. O nível de significância é ,05.

a. Cada célula mostra o posto médio da amostra de tfus.

b. Não é possível calcular, pois o subconjunto contém somente uma amostra.

### Sumarização do Teste Kruskal-Wallis de Amostras

#### Independentes (Dtmed entre tfus)

|                                        |                      |
|----------------------------------------|----------------------|
| N total                                | 602                  |
| Estatística do teste                   | 208,417 <sup>a</sup> |
| Grau de Liberdade                      | 6                    |
| Sig. Assintótica (teste de dois lados) | ,000                 |

a. A estatística do teste está ajustada para empates.

### Subconjuntos Homogêneos de Dtmed baseados em tfus

|                                 |       | Subconjunto |         |         |                |                |
|---------------------------------|-------|-------------|---------|---------|----------------|----------------|
|                                 |       | 1           | 2       | 3       | 4              | 5              |
| Amostra <sup>a</sup>            | 25,00 | 181,634     |         |         |                |                |
|                                 | 23,00 | 216,395     | 216,395 |         |                |                |
|                                 | 27,00 |             | 236,547 |         |                |                |
|                                 | 21,00 |             | 263,936 | 263,936 |                |                |
|                                 | 19,00 |             |         | 322,872 |                |                |
|                                 | 29,00 |             |         |         | 396,174        |                |
|                                 | 31,00 |             |         |         |                | 492,942        |
| Estatística do teste            |       | ,545        | 3,227   | 3,699   | . <sup>b</sup> | . <sup>b</sup> |
| Sig. (teste bilateral)          |       | ,460        | ,199    | ,054    | .              | .              |
| Sig. Ajustada (teste bilateral) |       | ,885        | ,405    | ,178    | .              | .              |

Subconjuntos homogêneos são baseados em significâncias assintóticas. O nível de significância é ,05.

a. Cada célula mostra o posto médio da amostra de tfus.

b. Não é possível calcular, pois o subconjunto contém somente uma amostra.

**Sumarização do Teste Kruskal-Wallis de Amostras  
Independentes (Dtamp entre tfus)**

|                                        |                      |
|----------------------------------------|----------------------|
| N total                                | 602                  |
| Estatística do teste                   | 234,642 <sup>a</sup> |
| Grau de Liberdade                      | 6                    |
| Sig. Assintótica (teste de dois lados) | ,000                 |

a. A estatística do teste está ajustada para empates.

**Subconjuntos Homogêneos de Dtamp baseados em tfus**

|                                 |       | Subconjunto    |                |                |         |
|---------------------------------|-------|----------------|----------------|----------------|---------|
|                                 |       | 1              | 2              | 3              | 4       |
| Amostra <sup>a</sup>            | 31,00 | 115,384        |                |                |         |
|                                 | 29,00 |                | 176,977        |                |         |
|                                 | 27,00 |                |                | 268,302        |         |
|                                 | 25,00 |                |                |                | 352,070 |
|                                 | 23,00 |                |                |                | 393,517 |
|                                 | 19,00 |                |                |                | 399,622 |
|                                 | 21,00 |                |                |                | 404,628 |
| Estatística do teste            |       | . <sup>b</sup> | . <sup>b</sup> | . <sup>b</sup> | 6,226   |
| Sig. (teste bilateral)          |       | .              | .              | .              | ,101    |
| Sig. Ajustada (teste bilateral) |       | .              | .              | .              | ,170    |

Subconjuntos homogêneos são baseados em significâncias assintóticas. O nível de significância é ,05.

a. Cada célula mostra o posto médio da amostra de tfus.

b. Não é possível calcular, pois o subconjunto contém somente uma amostra.

**Sumarização do Teste Kruskal-Wallis de Amostras  
Independentes (Dtpico entre tfus)**

|                                        |                      |
|----------------------------------------|----------------------|
| N total                                | 602                  |
| Estatística do teste                   | 123,148 <sup>a</sup> |
| Grau de Liberdade                      | 6                    |
| Sig. Assintótica (teste de dois lados) | ,000                 |

a. A estatística do teste está ajustada para empates.

### Subconjuntos Homogêneos de Dtpico baseados em tfus

|                                 |       | Subconjunto    |                |                |         |         |
|---------------------------------|-------|----------------|----------------|----------------|---------|---------|
|                                 |       | 1              | 2              | 3              | 4       | 5       |
| Amostra <sup>a</sup>            | 31,00 | 168,465        |                |                |         |         |
|                                 | 29,00 |                | 222,407        |                |         |         |
|                                 | 27,00 |                |                | 266,977        |         |         |
|                                 | 25,00 |                |                |                | 323,070 |         |
|                                 | 23,00 |                |                |                | 358,012 | 358,012 |
|                                 | 21,00 |                |                |                | 373,442 | 373,442 |
|                                 | 19,00 |                |                |                |         | 398,128 |
| Estatística do teste            |       | . <sup>b</sup> | . <sup>b</sup> | . <sup>b</sup> | 5,154   | 3,335   |
| Sig. (teste bilateral)          |       | .              | .              | .              | ,076    | ,189    |
| Sig. Ajustada (teste bilateral) |       | .              | .              | .              | ,168    | ,386    |

Subconjuntos homogêneos são baseados em significâncias assintóticas. O nível de significância é ,05.

a. Cada célula mostra o posto médio da amostra de tfus.

b. Não é possível calcular, pois o subconjunto contém somente uma amostra.

### Sumarização do Teste Kruskal-Wallis de Amostras

#### Independentes (Iatraso entre tfus)

|                                        |                      |
|----------------------------------------|----------------------|
| N total                                | 602                  |
| Estatística do teste                   | 106,767 <sup>a</sup> |
| Grau de Liberdade                      | 6                    |
| Sig. Assintótica (teste de dois lados) | ,000                 |

a. A estatística do teste está ajustada para empates.

### Subconjuntos Homogêneos de Iatraso baseados em tfus

|                                 |       | Subconjunto |         |         |
|---------------------------------|-------|-------------|---------|---------|
|                                 |       | 1           | 2       | 3       |
| Amostra <sup>a</sup>            | 31,00 | 180,169     |         |         |
|                                 | 29,00 | 223,622     | 223,622 |         |
|                                 | 27,00 |             | 268,698 |         |
|                                 | 25,00 |             |         | 323,599 |
|                                 | 23,00 |             |         | 359,477 |
|                                 | 21,00 |             |         | 367,070 |
|                                 | 19,00 |             |         | 387,866 |
| Estatística do teste            |       | 2,956       | 3,170   | 6,836   |
| Sig. (teste bilateral)          |       | ,086        | ,075    | ,077    |
| Sig. Ajustada (teste bilateral) |       | ,269        | ,239    | ,131    |

Subconjuntos homogêneos são baseados em significâncias assintóticas. O nível de significância é ,05.

a. Cada célula mostra o posto médio da amostra de tfus.

#### 6.1.4. Correlações bilaterais entre as Variáveis Dependentes

Testes de Normalidade das Variáveis Dependentes

|         | Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup> |      |      | Shapiro-Wilk |      |      |
|---------|---------------------------------|------|------|--------------|------|------|
|         | Estatística                     | gl   | Sig. | Estatística  | gl   | Sig. |
| Iconf   | ,054                            | 4816 | ,000 | ,980         | 4816 | ,000 |
| DPgc    | ,226                            | 4816 | ,000 | ,837         | 4816 | ,000 |
| Dtmed   | ,079                            | 4816 | ,000 | ,921         | 4816 | ,000 |
| Dtamp   | ,055                            | 4816 | ,000 | ,966         | 4816 | ,000 |
| Dtpico  | ,061                            | 4816 | ,000 | ,962         | 4816 | ,000 |
| Iatraso | ,098                            | 4816 | ,000 | ,959         | 4816 | ,000 |

a. Correlação de Significância de Lilliefors

#### 6.2.2. Regressão Linear Múltipla (simples)

Estatística Descritiva

|       | Média   | Desvio Padrão | N  |
|-------|---------|---------------|----|
| Iconf | 4,0786  | 5,56181       | 86 |
| TMA   | 25,4763 | 2,09635       | 86 |
| AMA   | 8,5915  | 2,03993       | 86 |

Correlações

|                       |       | Iconf | TMA   | AMA   |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
| Correlação de Pearson | Iconf | 1,000 | -,904 | ,404  |
|                       | TMA   | -,904 | 1,000 | -,044 |
|                       | AMA   | ,404  | -,044 | 1,000 |
| Sig. (unilateral)     | Iconf | .     | ,000  | ,000  |
|                       | TMA   | ,000  | .     | ,344  |
|                       | AMA   | ,000  | ,344  | .     |
| N                     | Iconf | 86    | 86    | 86    |
|                       | TMA   | 86    | 86    | 86    |
|                       | AMA   | 86    | 86    | 86    |

Variáveis Inseridas/Removidas<sup>a</sup>

| Modelo | Variáveis inseridas   | Variáveis removidas | Método  |
|--------|-----------------------|---------------------|---------|
| 1      | AMA, TMA <sup>b</sup> | .                   | Inserir |

a. Variável Dependente: Iconf

b. Todas as variáveis solicitadas inseridas.

### Sumarização do modelo<sup>b</sup>

| Modelo | R                 | Estatísticas de mudança |                     |                           |                       |           |     |     | Sig. Mudança F | Durbin-Watson |
|--------|-------------------|-------------------------|---------------------|---------------------------|-----------------------|-----------|-----|-----|----------------|---------------|
|        |                   | R quadrado              | R quadrado ajustado | Erro padrão da estimativa | Mudança de R quadrado | Mudança F | gl1 | gl2 |                |               |
| 1      | ,975 <sup>a</sup> | ,951                    | ,949                | 1,25153                   | ,951                  | 797,837   | 2   | 83  | ,000           | 1,602         |

a. Preditores: (Constante), AMA, TMA

b. Variável Dependente: Iconf

### ANOVA<sup>a</sup>

| Modelo |           | Soma dos Quadrados | gl | Quadrado Médio | F       | Sig.              |
|--------|-----------|--------------------|----|----------------|---------|-------------------|
| 1      | Regressão | 2499,358           | 2  | 1249,679       | 797,837 | ,000 <sup>b</sup> |
|        | Resíduo   | 130,006            | 83 | 1,566          |         |                   |
|        | Total     | 2629,363           | 85 |                |         |                   |

a. Variável Dependente: Iconf

b. Preditores: (Constante), AMA, TMA

### Coefficientes<sup>a</sup>

| Modelo        | Coefficientes não padronizados |             | Coefficientes padronizados |         | Sig. | 95,0% Intervalo de Confiança para B |                 | Correlações |         |       | Estatísticas de colinearidade |       |
|---------------|--------------------------------|-------------|----------------------------|---------|------|-------------------------------------|-----------------|-------------|---------|-------|-------------------------------|-------|
|               | B                              | Erro Padrão | Beta                       | t       |      | Limite inferior                     | Limite superior | Ordem zero  | Parcial | Parte | Toler.                        | VIF   |
| 1 (Constante) | 55,588                         | 1,776       |                            | 31,293  | ,000 | 52,055                              | 59,121          |             |         |       |                               |       |
| TMA           | -2,357                         | ,065        | -,888                      | -36,364 | ,000 | -2,486                              | -2,228          | -,904       | -,970   | -,888 | ,998                          | 1,002 |
| AMA           | ,994                           | ,067        | ,365                       | 14,920  | ,000 | ,861                                | 1,126           | ,404        | ,853    | ,364  | ,998                          | 1,002 |

a. Variável Dependente: Iconf

### Diagnóstico de colinearidade<sup>a</sup>

| Modelo | Dimensão | Autovalor | Índice de condição | Proporções de variância |     |     |
|--------|----------|-----------|--------------------|-------------------------|-----|-----|
|        |          |           |                    | (Constante)             | TMA | AMA |
| 1      | 1        | 2,959     | 1,000              | ,00                     | ,00 | ,01 |
|        | 2        | ,037      | 8,898              | ,02                     | ,04 | ,94 |
|        | 3        | ,003      | 30,574             | ,98                     | ,96 | ,05 |

a. Variável Dependente: Iconf

### Estatísticas de resíduos<sup>a</sup>

|                              | Mínimo   | Máximo  | Média   | Desvio Padrão | N  |
|------------------------------|----------|---------|---------|---------------|----|
| Valor predito                | -8,2251  | 16,0809 | 4,0786  | 5,42256       | 86 |
| Valor Predito Padrão         | -2,269   | 2,213   | ,000    | 1,000         | 86 |
| Erro padrão do valor predito | ,136     | ,563    | ,220    | ,079          | 86 |
| Valor predito ajustado       | -8,3864  | 16,2907 | 4,0795  | 5,43171       | 86 |
| Resíduo                      | -3,13495 | 2,62577 | ,00000  | 1,23672       | 86 |
| Resíduo Padrão               | -2,505   | 2,098   | ,000    | ,988          | 86 |
| Resíduo studentizado         | -2,537   | 2,137   | ,000    | 1,014         | 86 |
| Resíduo Excluído             | -3,21478 | 2,72463 | -,00086 | 1,30334       | 86 |

|                                   |        |        |       |       |    |
|-----------------------------------|--------|--------|-------|-------|----|
| Resíduo Studentizado Excluído     | -2,625 | 2,185  | -,004 | 1,025 | 86 |
| Mahal. Distância                  | ,022   | 16,239 | 1,977 | 2,571 | 86 |
| Distância de Cook                 | ,000   | ,228   | ,019  | ,037  | 86 |
| Valor Centralizado de Alavancagem | ,000   | ,191   | ,023  | ,030  | 86 |

a. Variável Dependente: Iconf

#### Diagnóstico entre casos<sup>a</sup>

| Número do caso | Resíduo Padrão | Iconf | Valor predito | Resíduo  |
|----------------|----------------|-------|---------------|----------|
| 3              | -2,505         | -2,17 | ,9650         | -3,13495 |
| 19             | -2,019         | 11,22 | 13,7471       | -2,52714 |
| 30             | -2,304         | 11,10 | 13,9837       | -2,88371 |
| 41             | -2,003         | -5,72 | -3,2128       | -2,50722 |
| 82             | 2,098          | ,68   | -1,9458       | 2,62577  |

a. Variável Dependente: Iconf

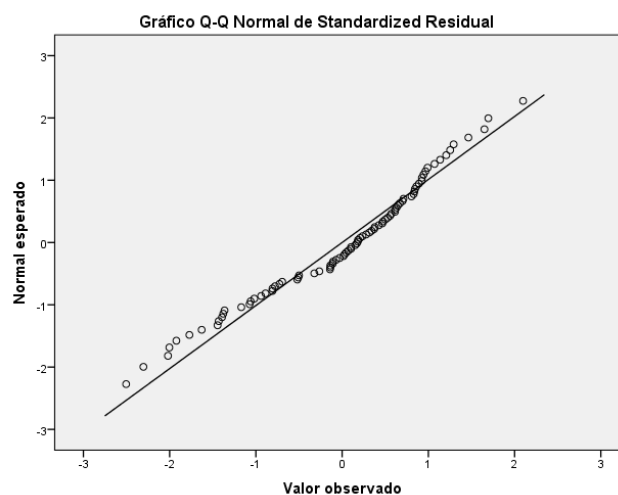
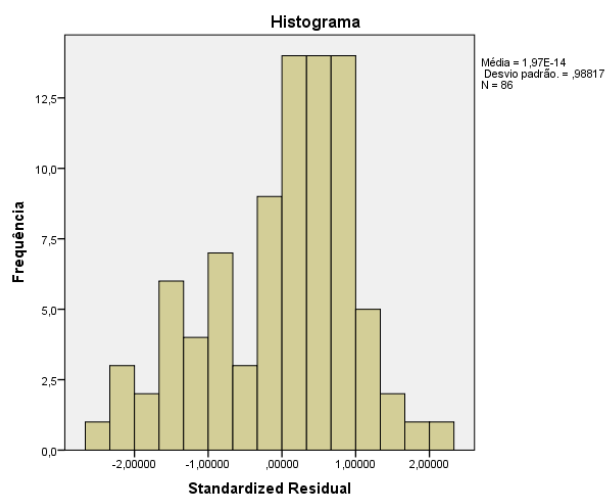
#### Resumos de caso

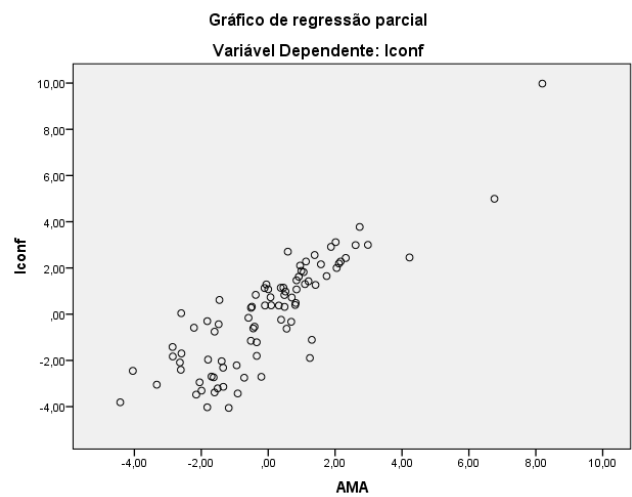
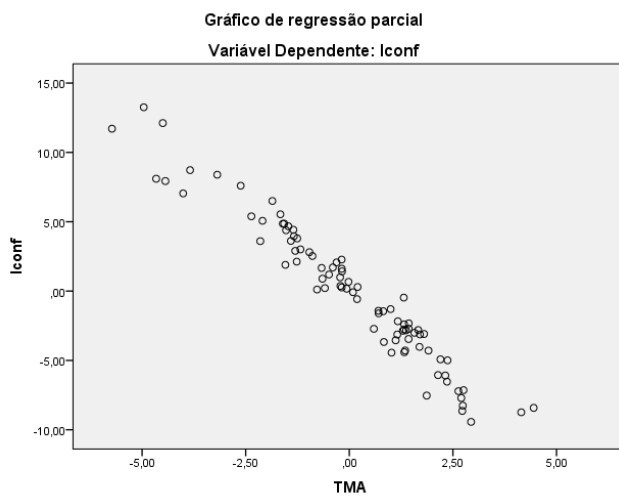
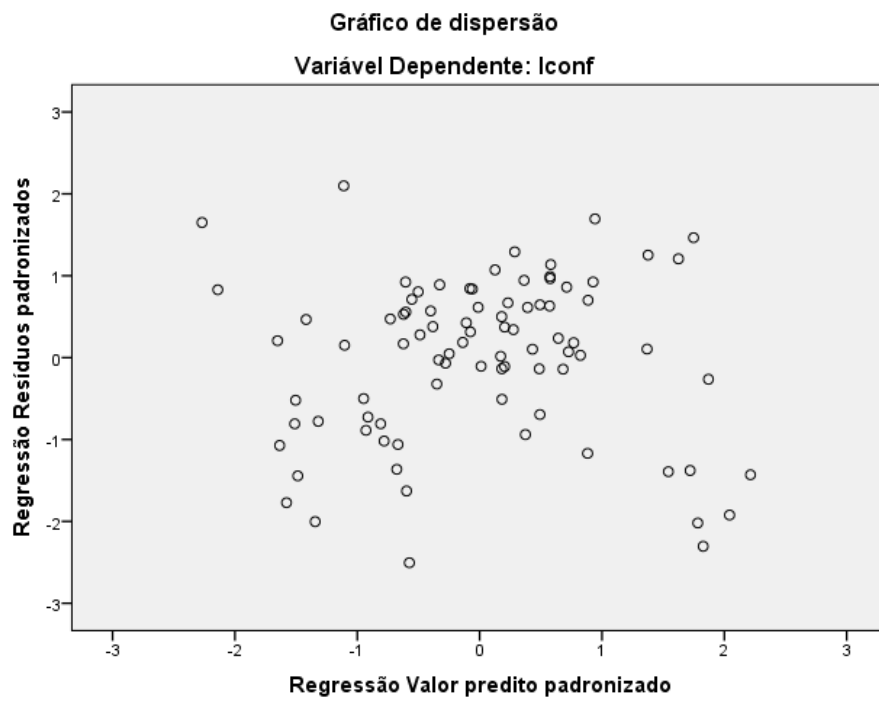
| Número do caso |    | Standardized DFFIT | Standardized DFBETA Intercept | Standardized DFBETA TMA | Standardized DFBETA AMA | COVRATIO |
|----------------|----|--------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| 1              | 3  | -,41889            | ,27388                        | -,25696                 | -,17628                 | ,83480   |
| 2              | 19 | -,56691            | -,52428                       | ,50749                  | ,10689                  | ,94413   |
| 3              | 30 | -,68966            | -,64696                       | ,61776                  | ,16057                  | ,90244   |
| 4              | 41 | -,39671            | ,27477                        | -,32226                 | ,02314                  | ,92115   |
| 5              | 82 | ,42401             | -,02330                       | ,15144                  | -,30806                 | ,90802   |
| Total          | N  | 5                  | 5                             | 5                       | 5                       | 5        |

#### Testes de Normalidade dos resíduos estandardizados

| Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup> |             |    |      | Shapiro-Wilk |    |      |
|---------------------------------|-------------|----|------|--------------|----|------|
|                                 | Estatística | gl | Sig. | Estatística  | gl | Sig. |
| Standardized Residual           | ,118        | 86 | ,005 | ,967         | 86 | ,026 |

a. Correlação de Significância de Lilliefors





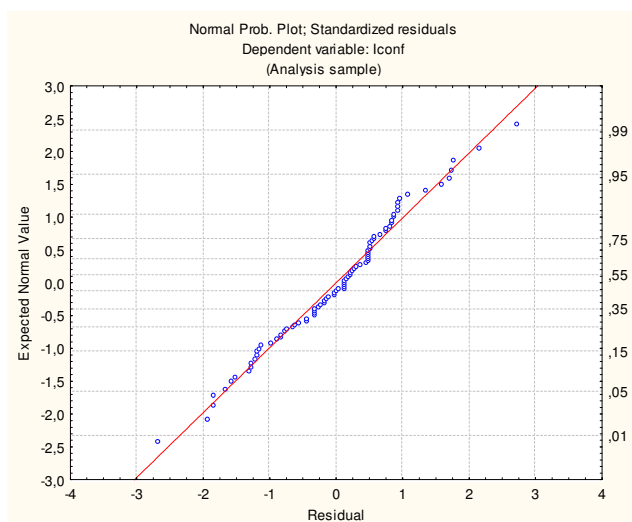
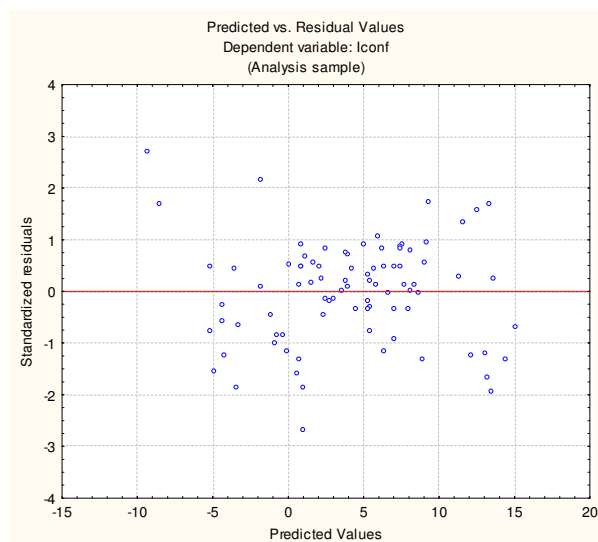
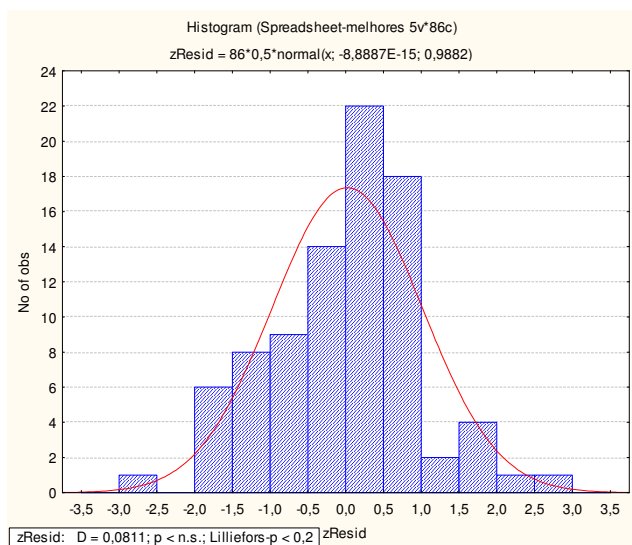
## 6.2.2. Regressão Linear Múltipla (superfície resposta)

| Summary of stepwise regression; variable: lconf (Spreadsheet-melhores)<br>Backward stepwise<br>P to enter: ,05, P to remove: ,05 |               |                  |             |             |            |            |               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|------------------|-------------|-------------|------------|------------|---------------|
| Effect                                                                                                                           | Steps         | Degr. of Freedom | F to remove | P to remove | F to enter | P to enter | Effect status |
| TMA                                                                                                                              | Step Number 1 | 1                | 0,016       | 0,899225    |            |            | Removed       |
| TMA^2                                                                                                                            |               | 1                | 6,274       | 0,014285    |            |            | In            |
| AMA                                                                                                                              |               | 1                | 3,245       | 0,075389    |            |            | In            |
| AMA^2                                                                                                                            |               | 1                | 2,823       | 0,096829    |            |            | In            |
| TMA*AMA                                                                                                                          |               | 1                | 6,028       | 0,016250    |            |            | In            |
| TMA*AMA                                                                                                                          | Step Number 2 | 1                | 6,245       | 0,014473    |            |            | In            |
| TMA^2                                                                                                                            |               | 1                | 110,232     | 0,000000    |            |            | In            |
| AMA                                                                                                                              |               | 1                | 3,294       | 0,073245    |            |            | In            |
| AMA^2                                                                                                                            |               | 1                | 2,879       | 0,093562    |            |            | Removed       |
| TMA                                                                                                                              |               | 1                |             |             | 0,016140   | 0,899225   | Out           |
| TMA*AMA                                                                                                                          | Step Number 3 | 1                | 4,534       | 0,036223    |            |            | In            |
| TMA^2                                                                                                                            |               | 1                | 105,435     | 0,000000    |            |            | In            |
| AMA                                                                                                                              |               | 1                | 1,212       | 0,274207    |            |            | Removed       |
| AMA^2                                                                                                                            |               | 1                |             |             | 2,879354   | 0,093562   | Out           |
| TMA                                                                                                                              |               | 1                |             |             | 0,036777   | 0,848401   | Out           |
| TMA*AMA                                                                                                                          | Step Number 4 | 1                | 226,749     | 0,000000    |            |            | In            |
| TMA^2                                                                                                                            |               | 1                | 1745,089    | 0,000000    |            |            | In            |
| AMA                                                                                                                              |               | 1                |             |             | 1,211746   | 0,274207   | Out           |
| AMA^2                                                                                                                            |               | 1                |             |             | 0,802654   | 0,372924   | Out           |

| Univariate Tests of Significance for lconf (Spreadsheet-melhores)<br>Backward stepwise solution<br>Effective hypothesis decomposition |          |                  |          |          |      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|------------------|----------|----------|------|
| Effect                                                                                                                                | SS       | Degr. of Freedom | MS       | F        | p    |
| Intercept                                                                                                                             | 1685,320 | 1                | 1685,320 | 1188,128 | 0,00 |
| TMA                                                                                                                                   |          | 0                |          |          |      |
| TMA^2                                                                                                                                 | 2475,352 | 1                | 2475,352 | 1745,089 | 0,00 |
| AMA                                                                                                                                   |          | 0                |          |          |      |
| AMA^2                                                                                                                                 |          | 0                |          |          |      |
| TMA*AMA                                                                                                                               | 321,636  | 1                | 321,636  | 226,749  | 0,00 |
| Error                                                                                                                                 | 117,733  | 83               | 1,418    |          |      |

| Parameter Estimates (Spreadsheet-melhores)<br>Sigma-restricted parameterization |                 |              |               |         |         |              |              |                |                |              |              |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------|---------------|---------|---------|--------------|--------------|----------------|----------------|--------------|--------------|
| Effect                                                                          | Comment (B/Z/P) | lconf Param. | lconf Std.Err | lconf t | lconf p | -95% Cnf.Lmt | +95% Cnf.Lmt | lconf Beta (β) | lconf St.Err.β | -95% Cnf.Lmt | +95% Cnf.Lmt |
| Intercept                                                                       |                 | 30,523       | 0,8855        | 34,469  | 0,00    | 28,761       | 32,284       |                |                |              |              |
| TMA                                                                             | Pooled          |              |               |         |         |              |              |                |                |              |              |
| TMA^2                                                                           |                 | -0,053       | 0,0013        | -41,774 | 0,00    | -0,056       | -0,051       | -1,000         | 0,0239         | -1,048       | -0,953       |
| AMA                                                                             | Pooled          |              |               |         |         |              |              |                |                |              |              |
| AMA^2                                                                           | Pooled          |              |               |         |         |              |              |                |                |              |              |
| TMA*AMA                                                                         |                 | 0,038        | 0,0025        | 15,058  | 0,00    | 0,033        | 0,043        | 0,361          | 0,0239         | 0,313        | 0,408        |

| Dependent Variable | Test of SS Whole Model vs. SS Residual (Spreadsheet-melhores) |                         |                         |          |          |          |             |             |             |         |      |
|--------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|----------|----------|-------------|-------------|-------------|---------|------|
|                    | Multiple R                                                    | Multiple R <sup>2</sup> | Adjusted R <sup>2</sup> | SS Model | df Model | MS Model | SS Residual | df Residual | MS Residual | F       | p    |
| Iconf              | 0,977                                                         | 0,955                   | 0,954                   | 2511,386 | 2        | 1255,693 | 117,733     | 83          | 1,418       | 885,246 | 0,00 |



### Testes de Normalidade dos Resíduos Padronizados

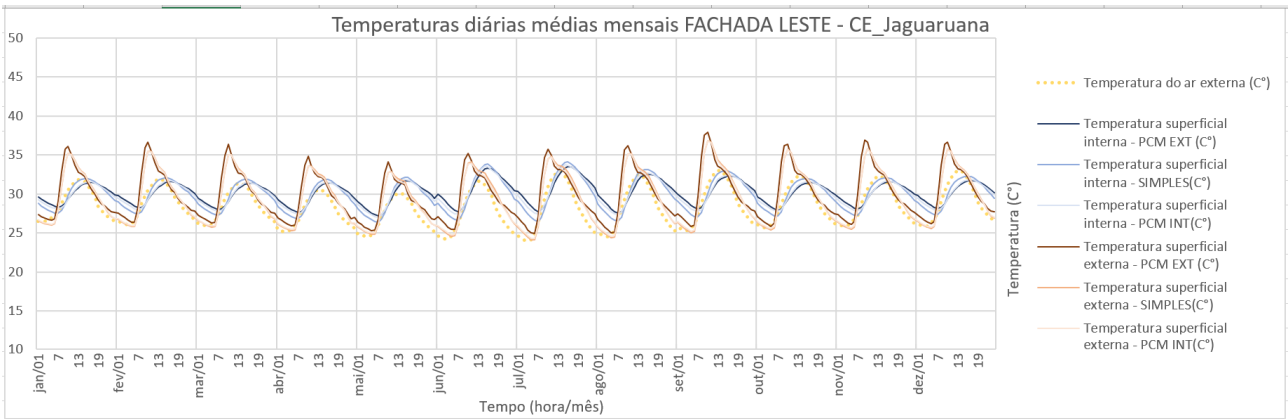
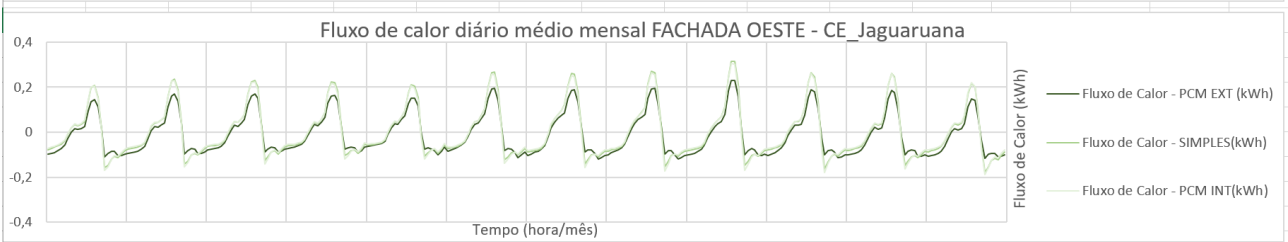
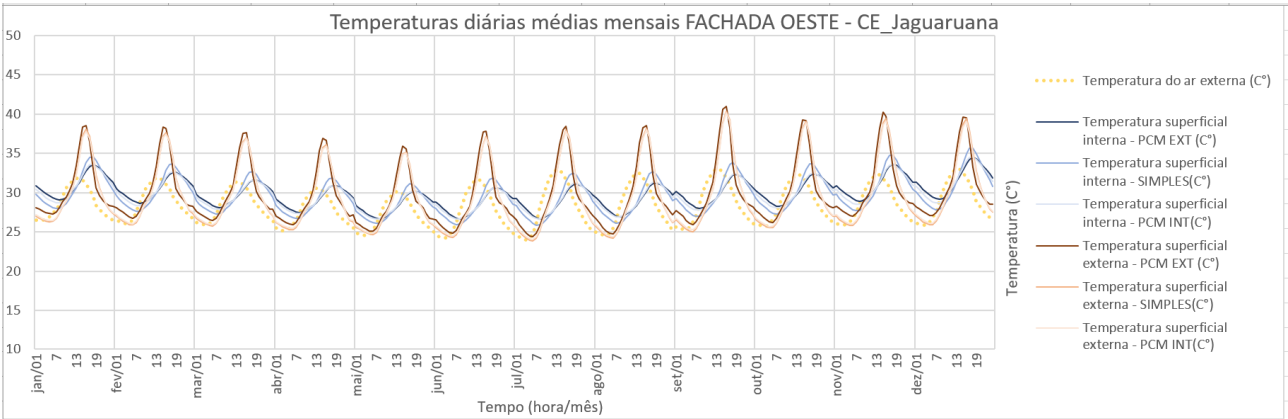
|      | Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup> |    |                   | Shapiro-Wilk |    |      |
|------|---------------------------------|----|-------------------|--------------|----|------|
|      | Estatística                     | gl | Sig.              | Estatística  | gl | Sig. |
| zRes | ,081                            | 86 | ,200 <sup>*</sup> | ,987         | 86 | ,536 |

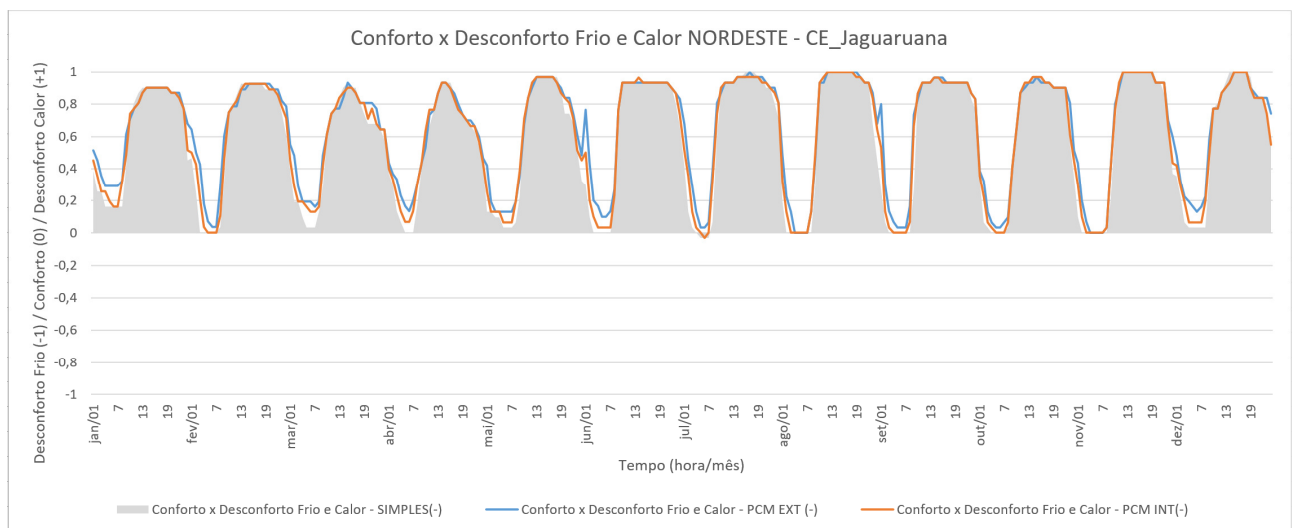
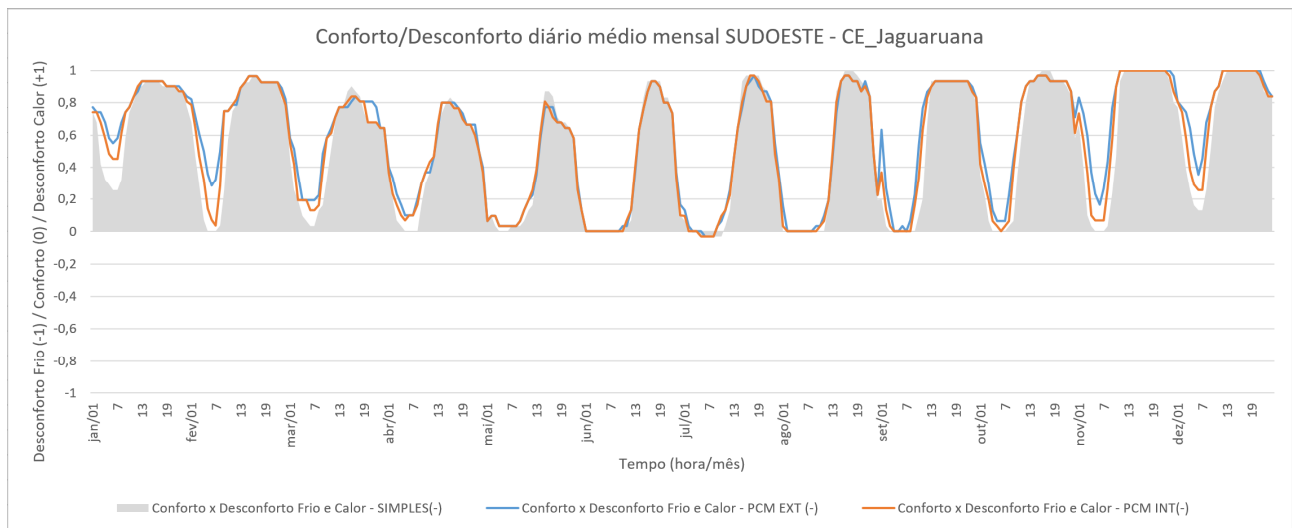
\*. Este é um limite inferior da significância verdadeira.

a. Correlação de Significância de Lilliefors

# Apêndice G - Gráficos das análises dos casos característicos

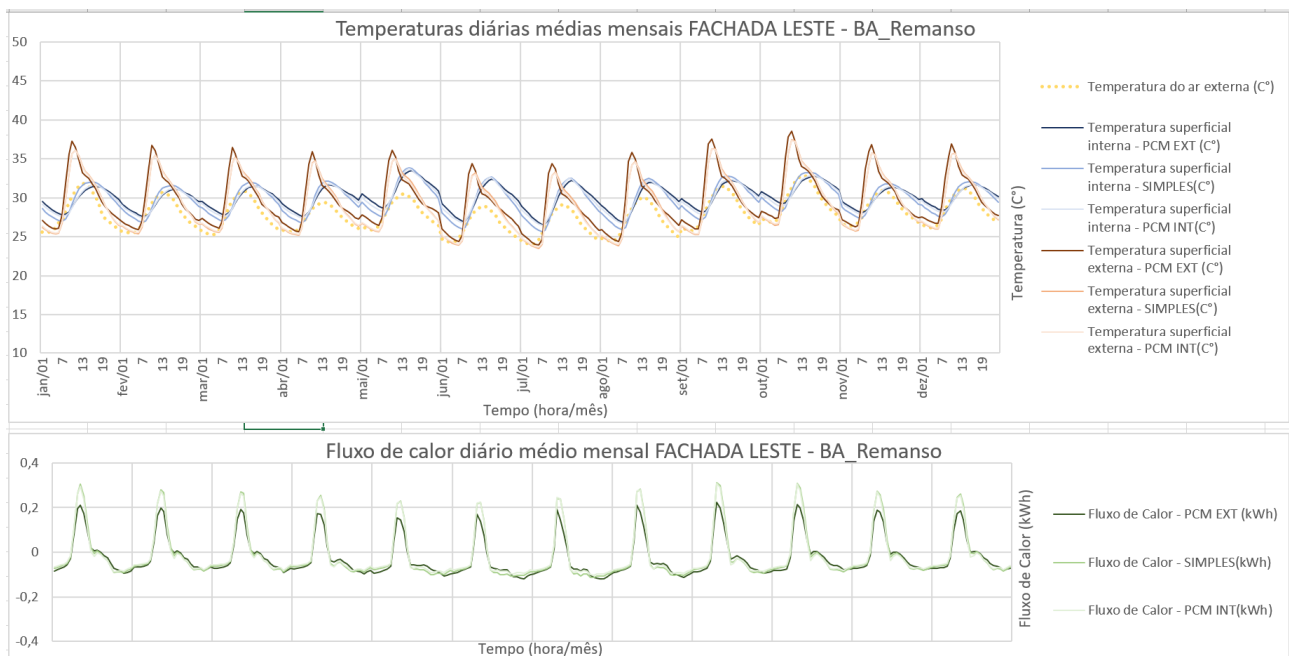
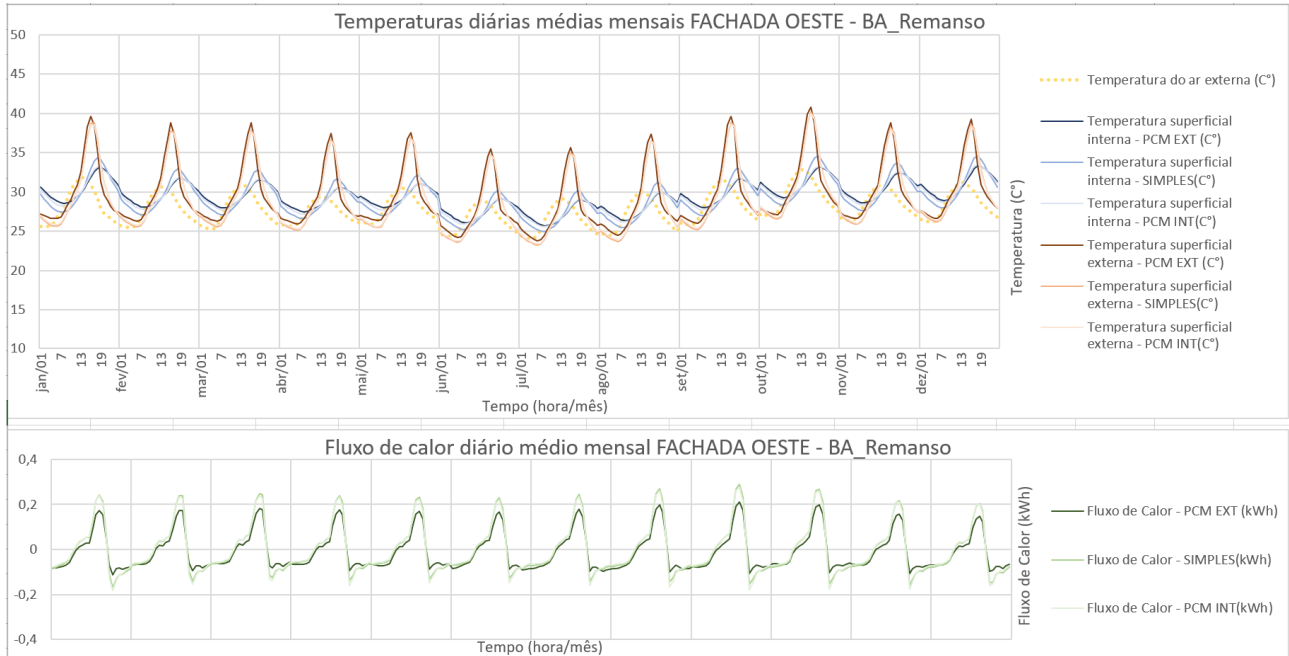
| Configurações PCM Externo/Interno de maior influência – Jaguaruana-CE |                      |                      |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|
|                                                                       | Parede Oeste         | Parede Leste         |
| Externa                                                               | PAREDE_PCM_EXT_20_29 | PAREDE_PCM_EXT_20_29 |
| Interna                                                               | PAREDE_PCM_INT_20_23 | PAREDE_PCM_INT_20_27 |

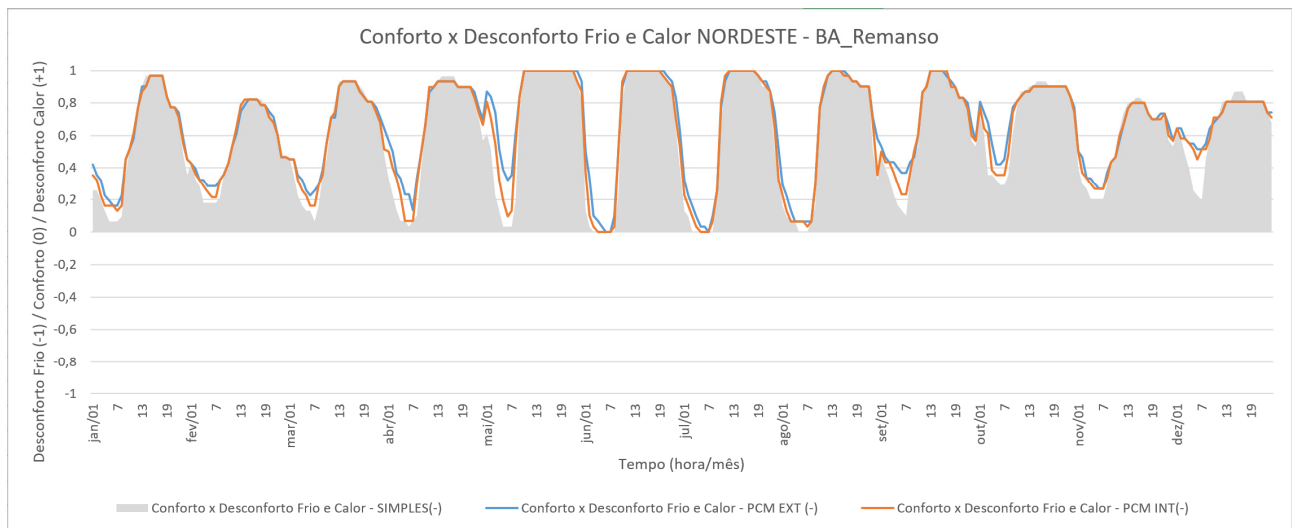
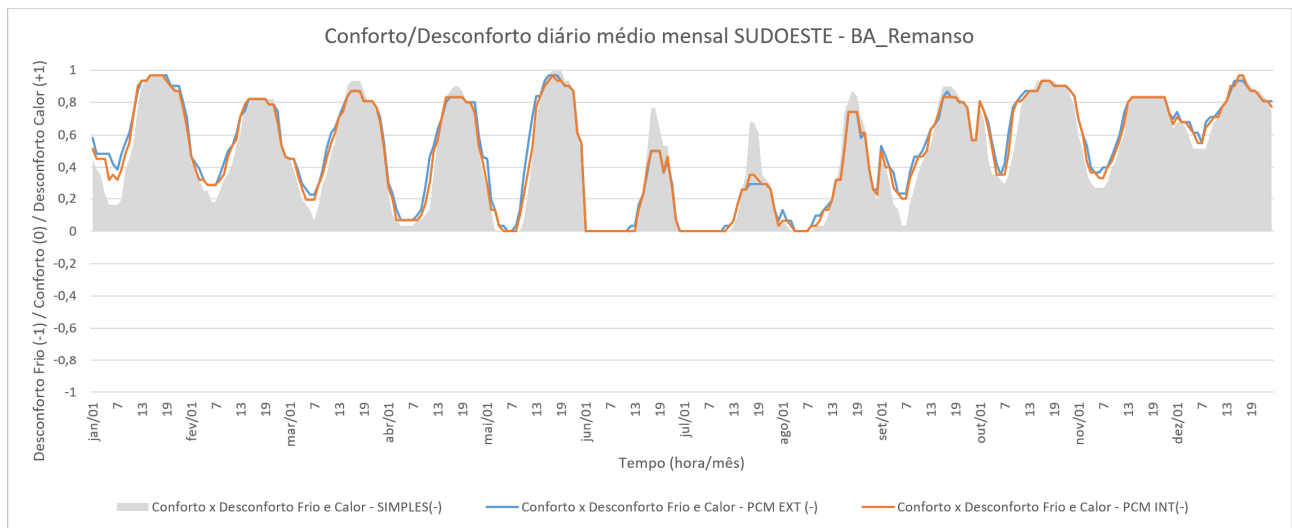




### Configurações PCM Externo/Interno de maior influência – Remanso-BA

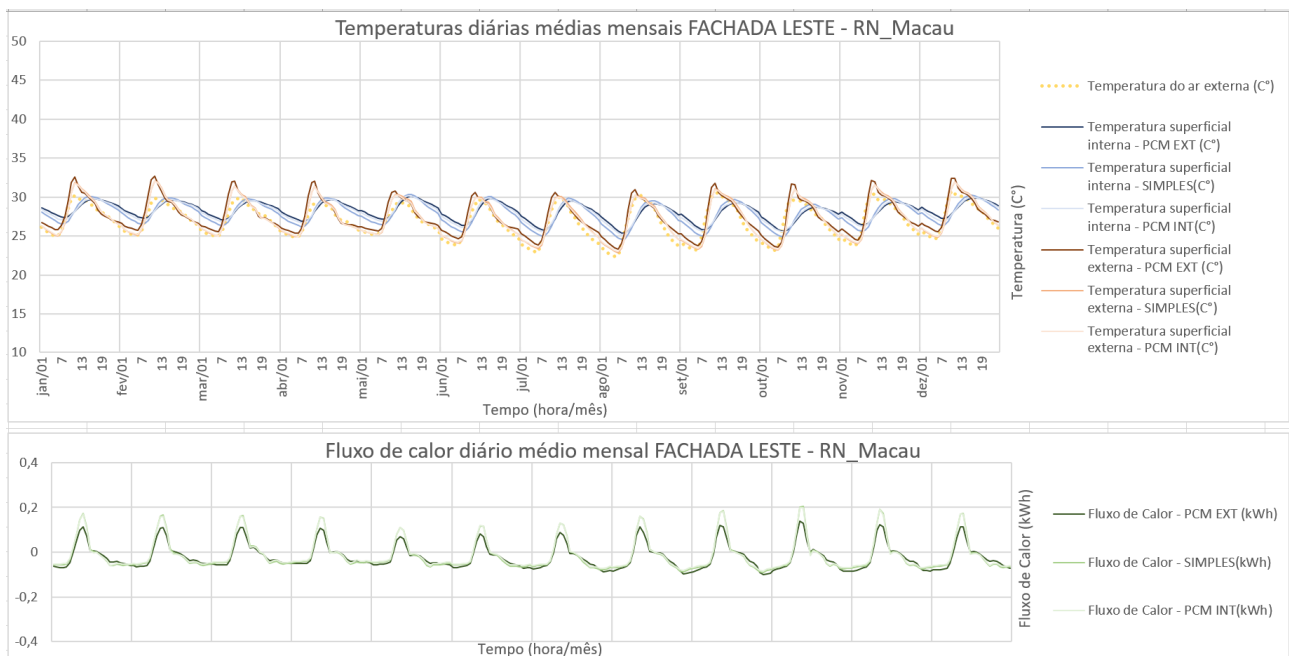
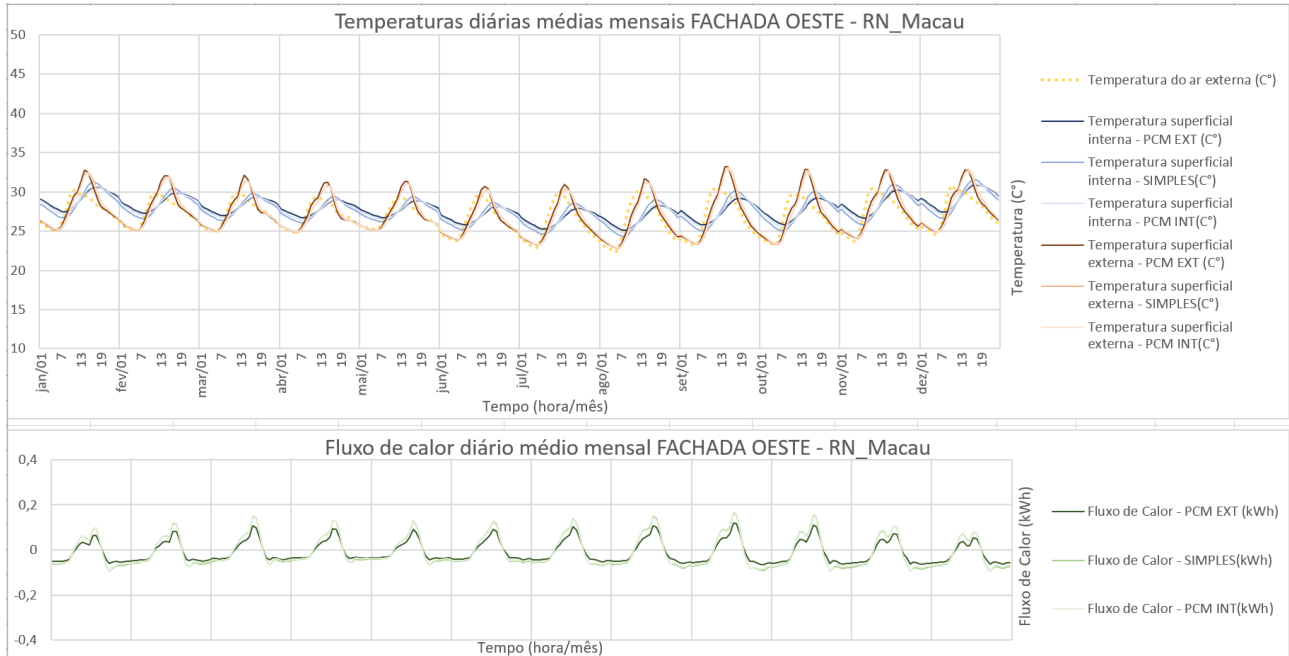
|                | Parede Oeste         | Parede Leste         |
|----------------|----------------------|----------------------|
| <b>Externa</b> | PAREDE_PCM_EXT_20_27 | PAREDE_PCM_EXT_20_29 |
| <b>Interna</b> | PAREDE_PCM_INT_20_19 | PAREDE_PCM_INT_20_25 |

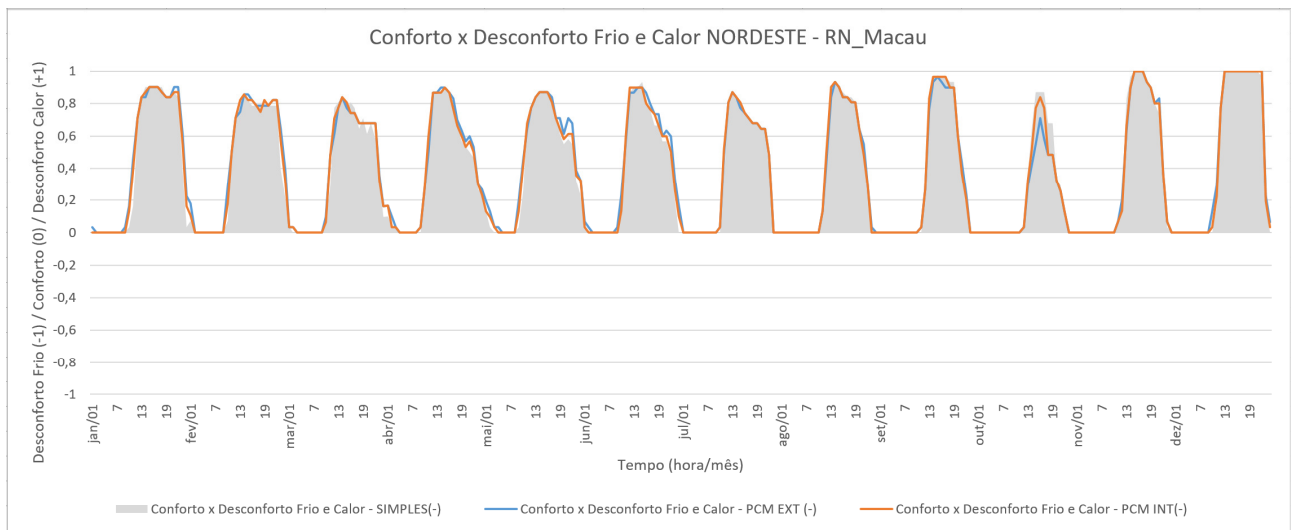
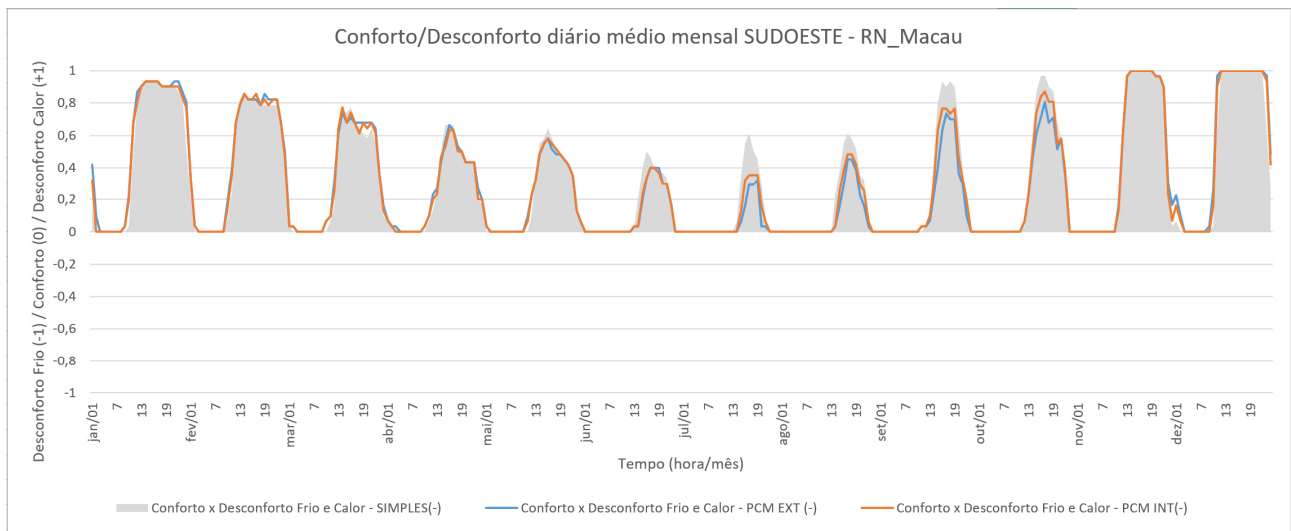




### Configurações PCM Externo/Interno de maior influência – Macau-RN

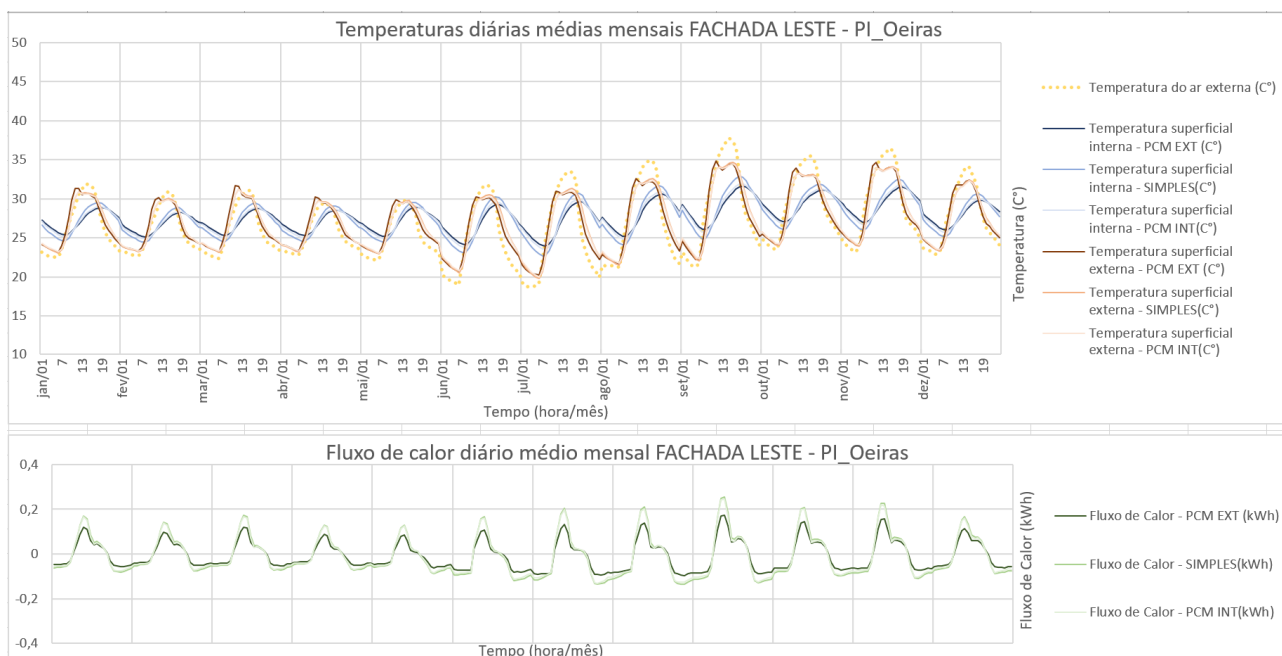
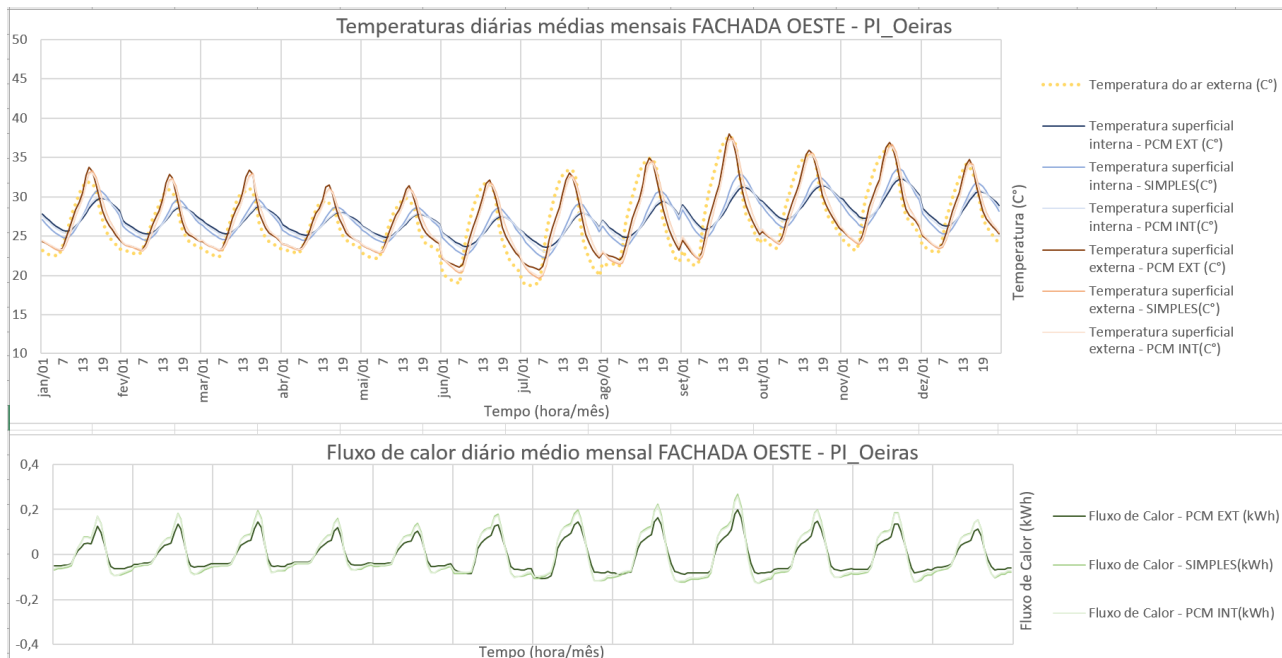
|                | Parede Oeste         | Parede Leste         |
|----------------|----------------------|----------------------|
| <b>Externa</b> | PAREDE_PCM_EXT_20_21 | PAREDE_PCM_EXT_20_27 |
| <b>Interna</b> | PAREDE_PCM_INT_20_31 | PAREDE_PCM_INT_20_25 |

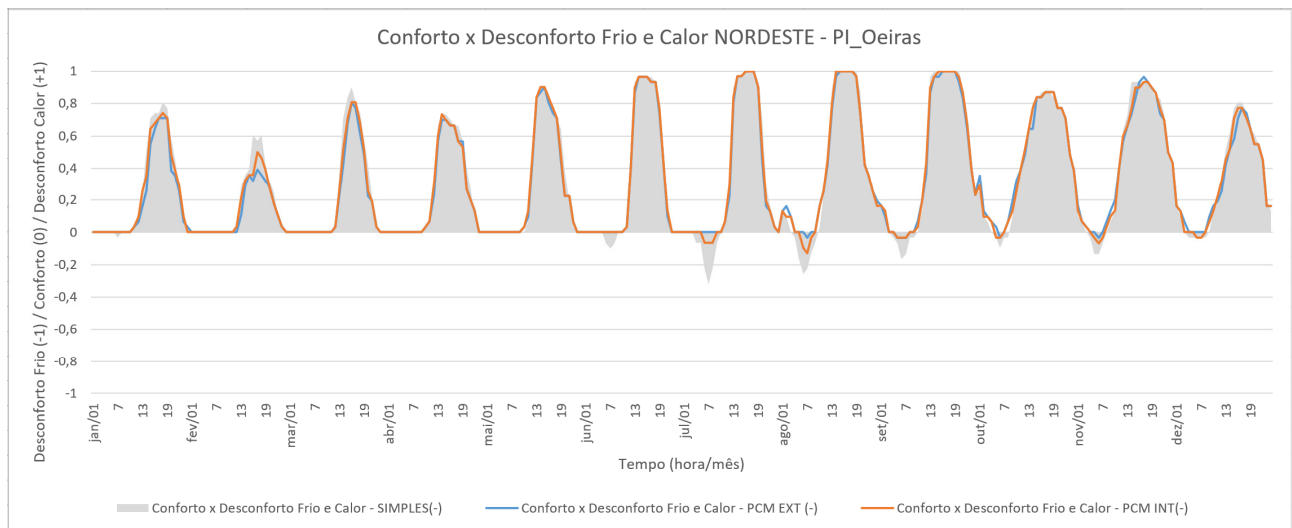
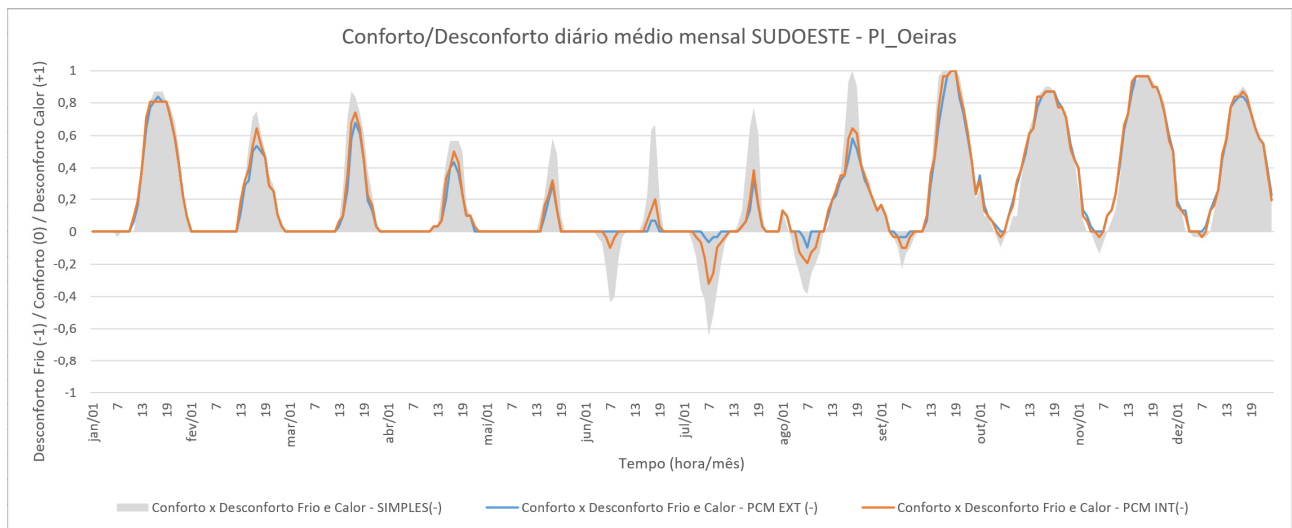




### Configurações PCM Externo/Interno de maior influência – Oeiras-PI

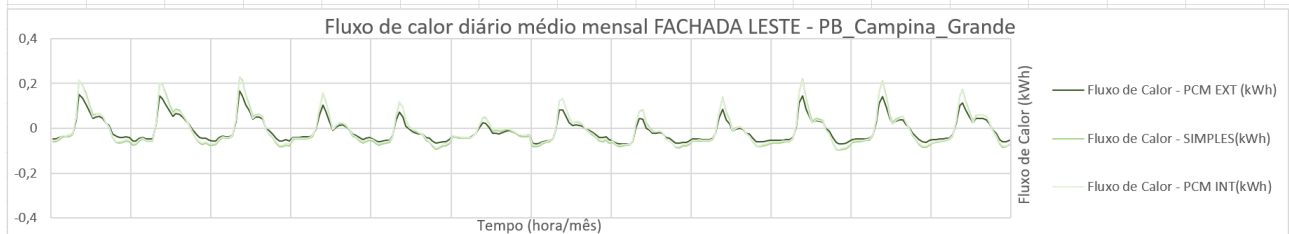
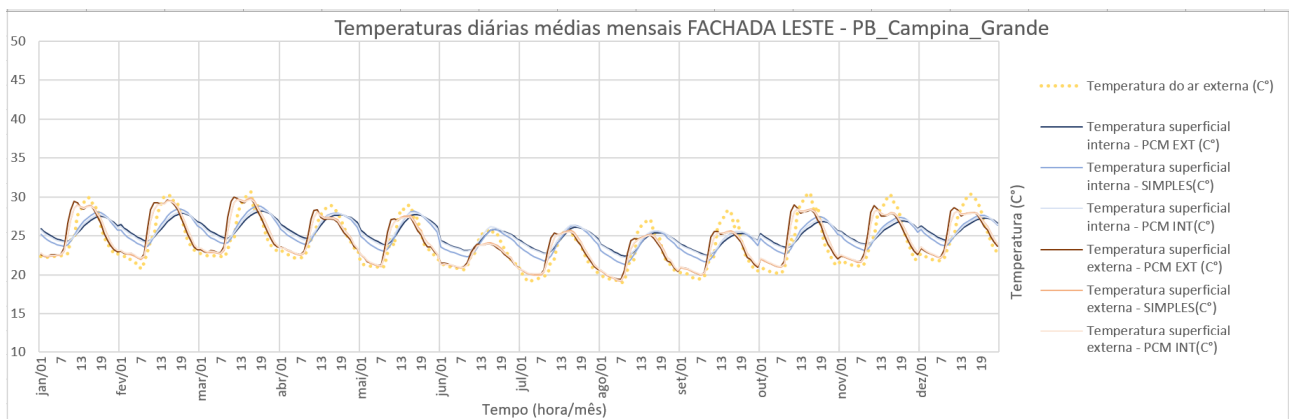
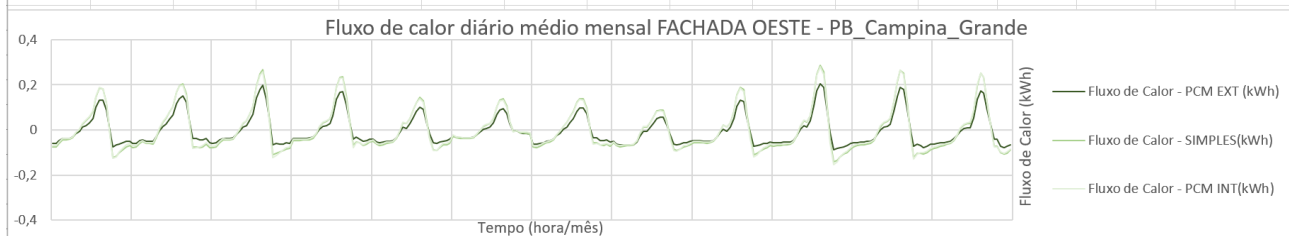
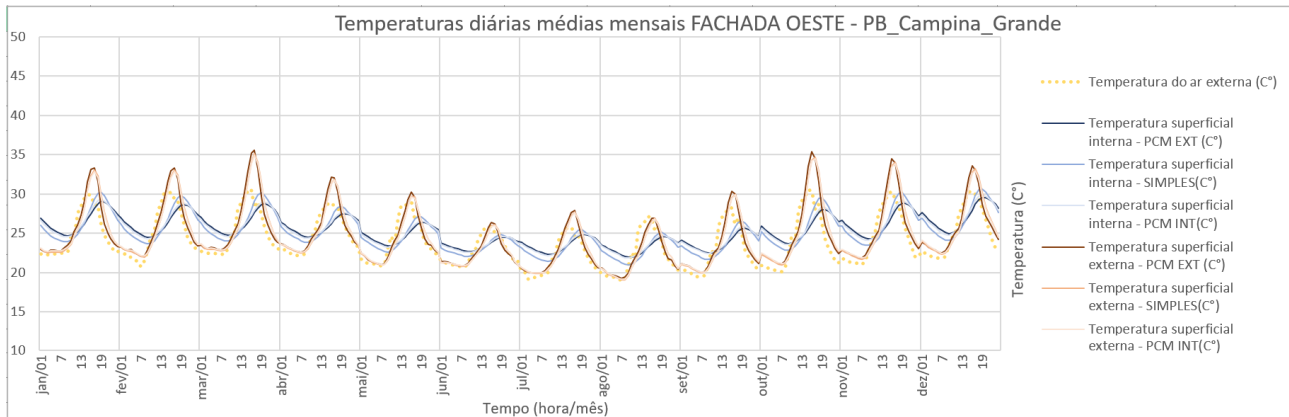
|                | Parede Oeste         | Parede Leste         |
|----------------|----------------------|----------------------|
| <b>Externa</b> | PAREDE_PCM_EXT_20_21 | PAREDE_PCM_EXT_20_19 |
| <b>Interna</b> | PAREDE_PCM_INT_20_27 | PAREDE_PCM_INT_20_29 |

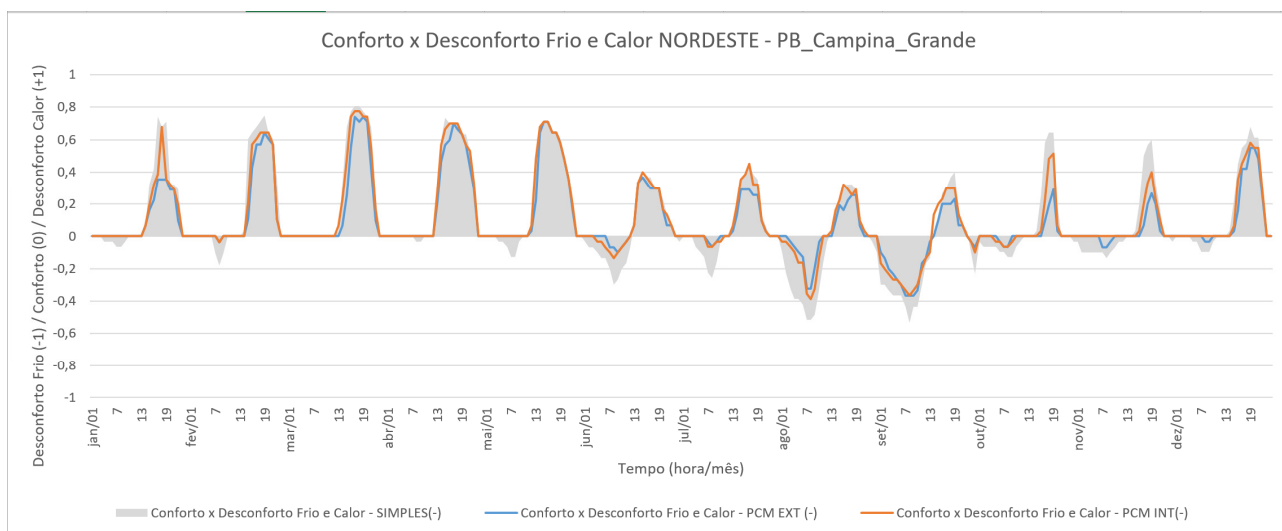
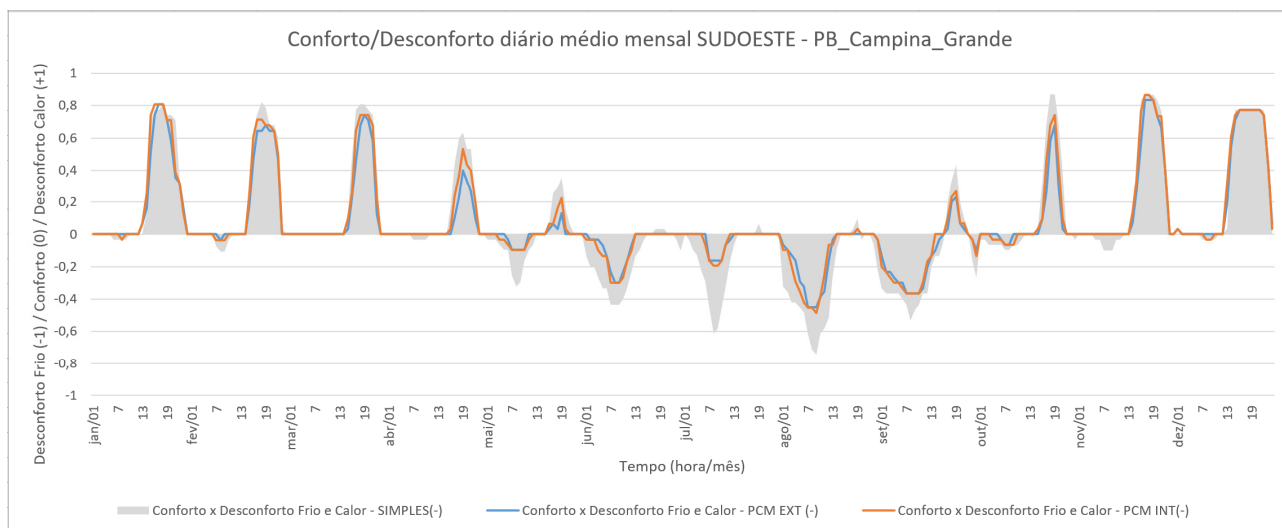




### Configurações PCM Externo/Interno de maior influência – Campina Grande-PB

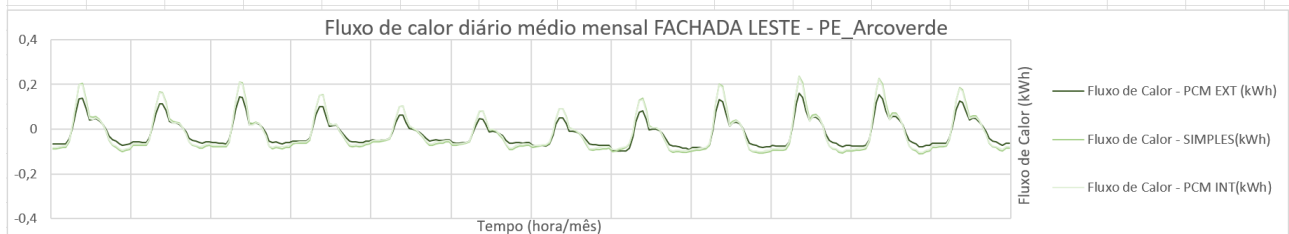
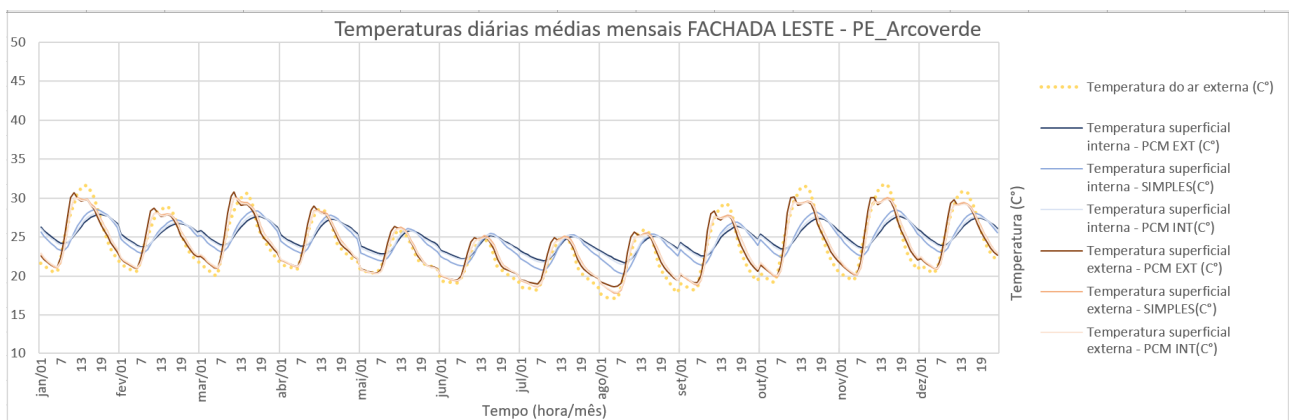
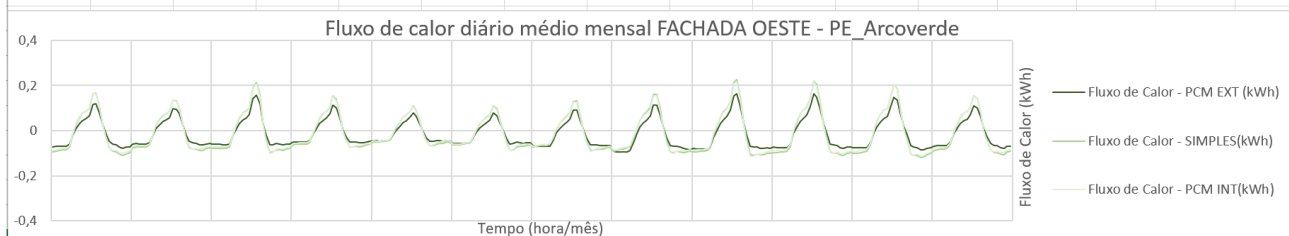
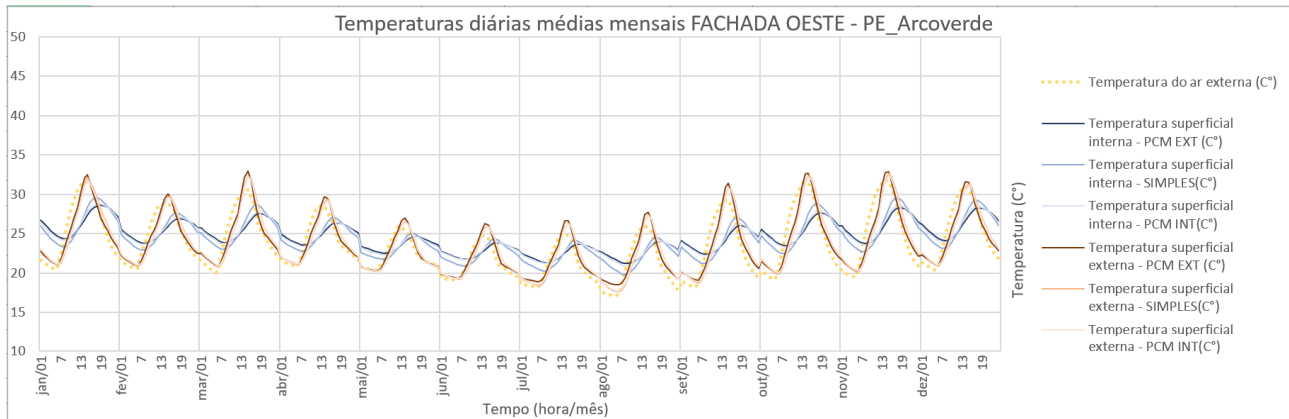
|                | Parede Oeste         | Parede Leste         |
|----------------|----------------------|----------------------|
| <b>Externa</b> | PAREDE_PCM_EXT_20_19 | PAREDE_PCM_EXT_20_19 |
| <b>Interna</b> | PAREDE_PCM_INT_20_21 | PAREDE_PCM_INT_20_23 |

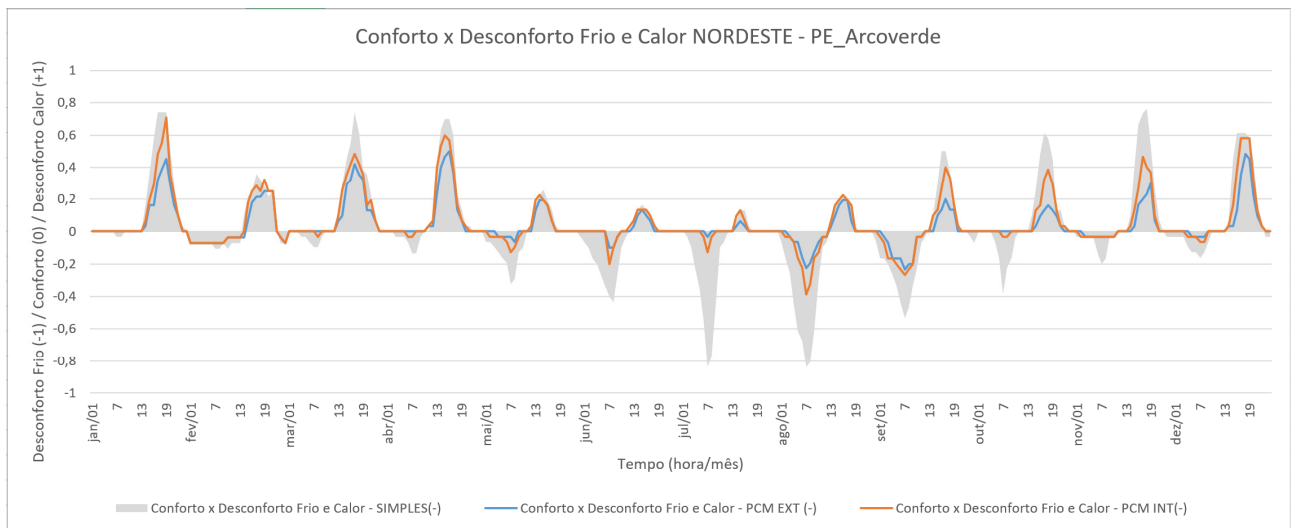
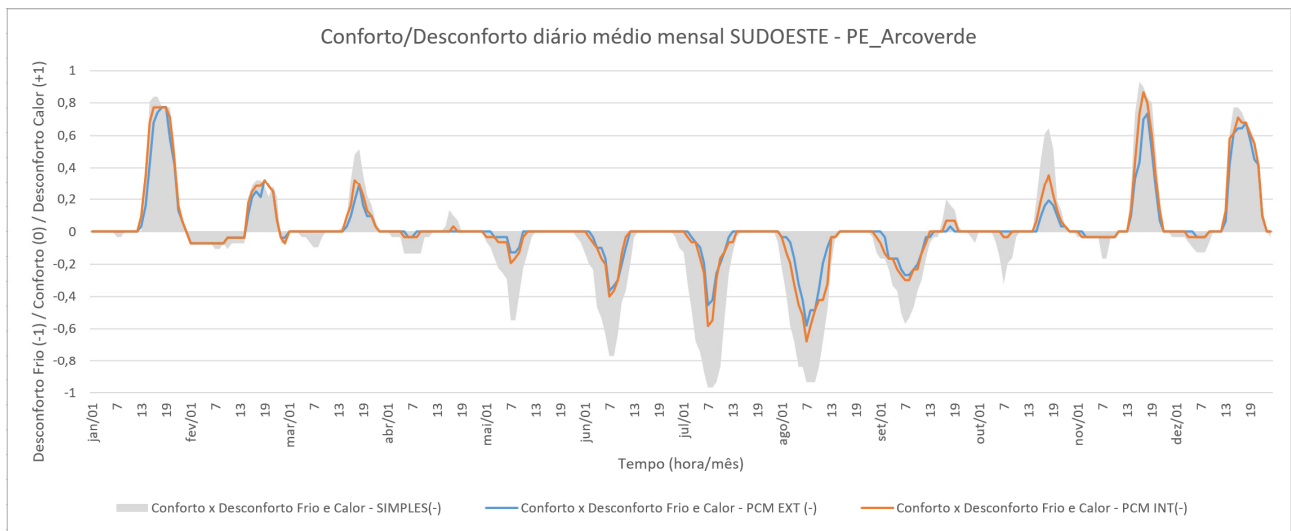




### Configurações PCM Externo/Interno de maior influência – Arco Verde-PE

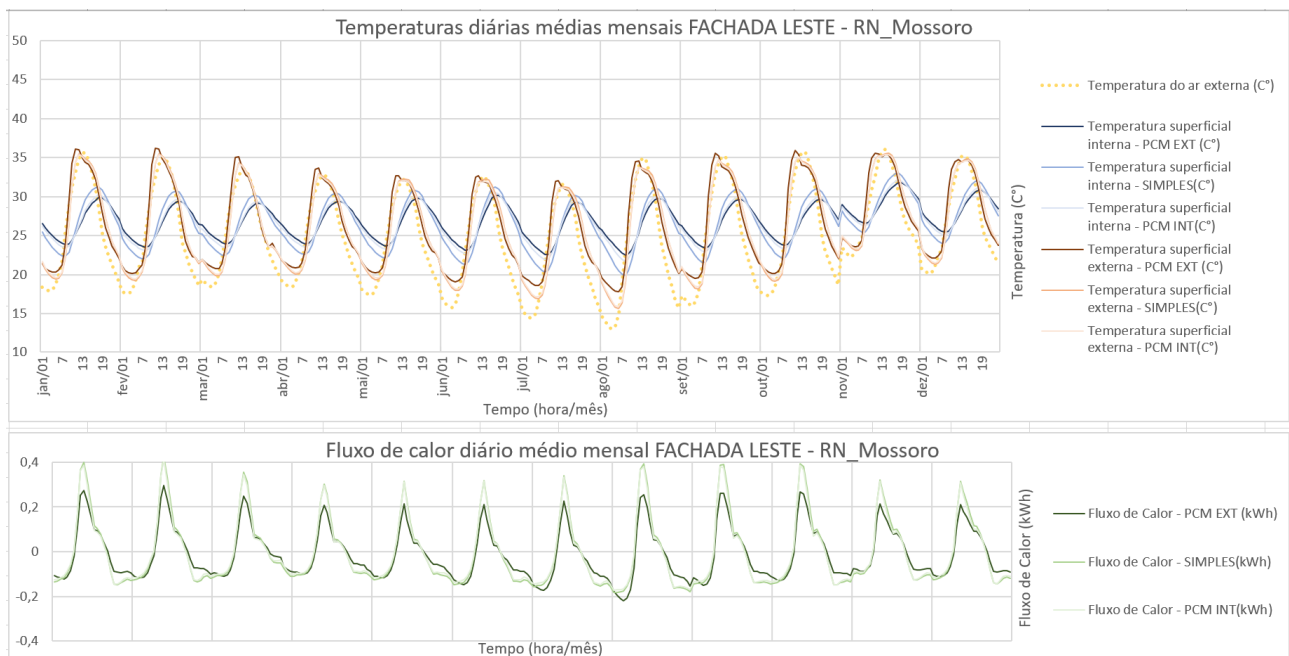
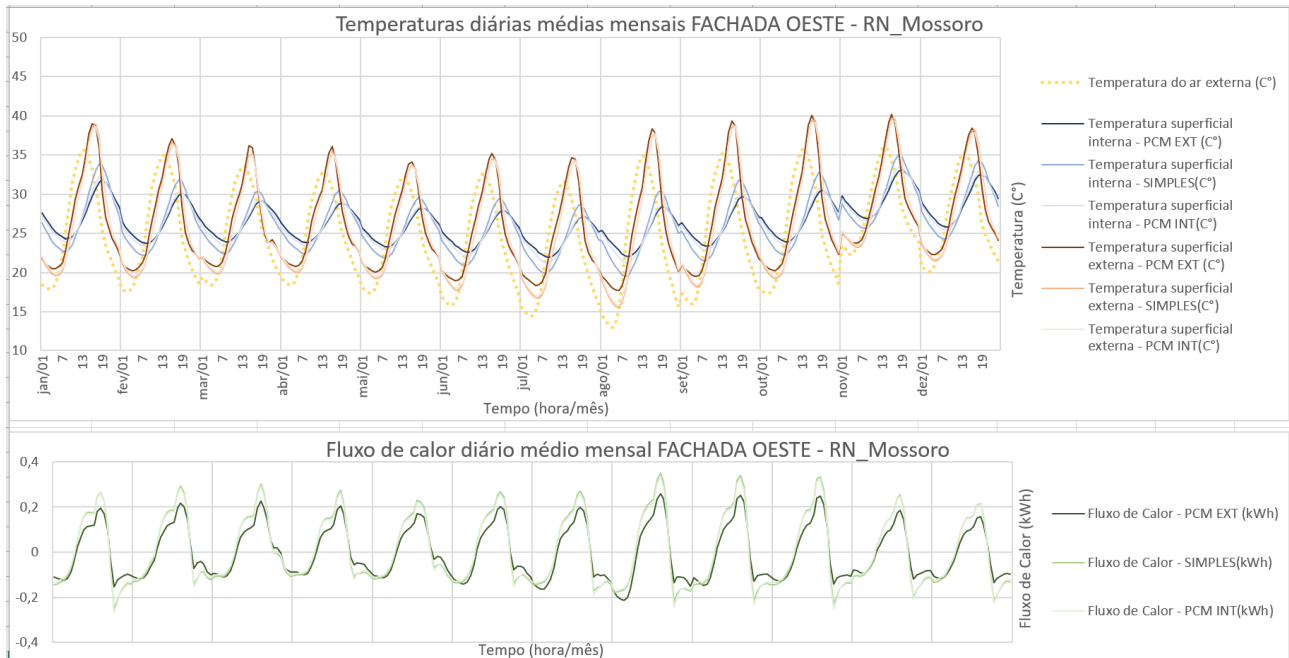
|                | Parede Oeste         | Parede Leste         |
|----------------|----------------------|----------------------|
| <b>Externa</b> | PAREDE_PCM_EXT_20_19 | PAREDE_PCM_EXT_20_19 |
| <b>Interna</b> | PAREDE_PCM_INT_20_21 | PAREDE_PCM_INT_20_23 |

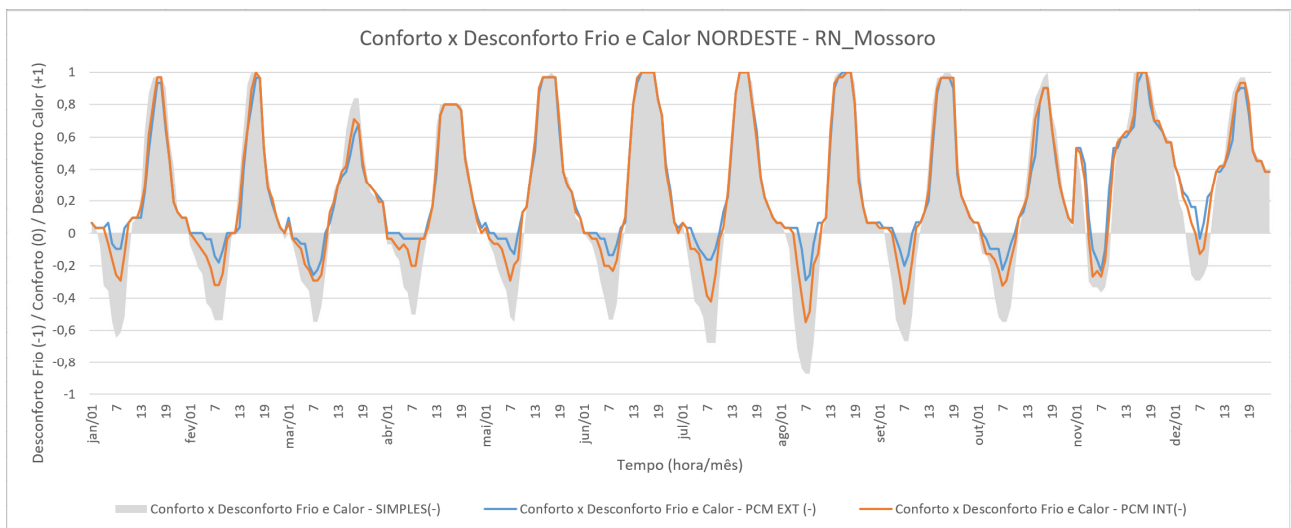
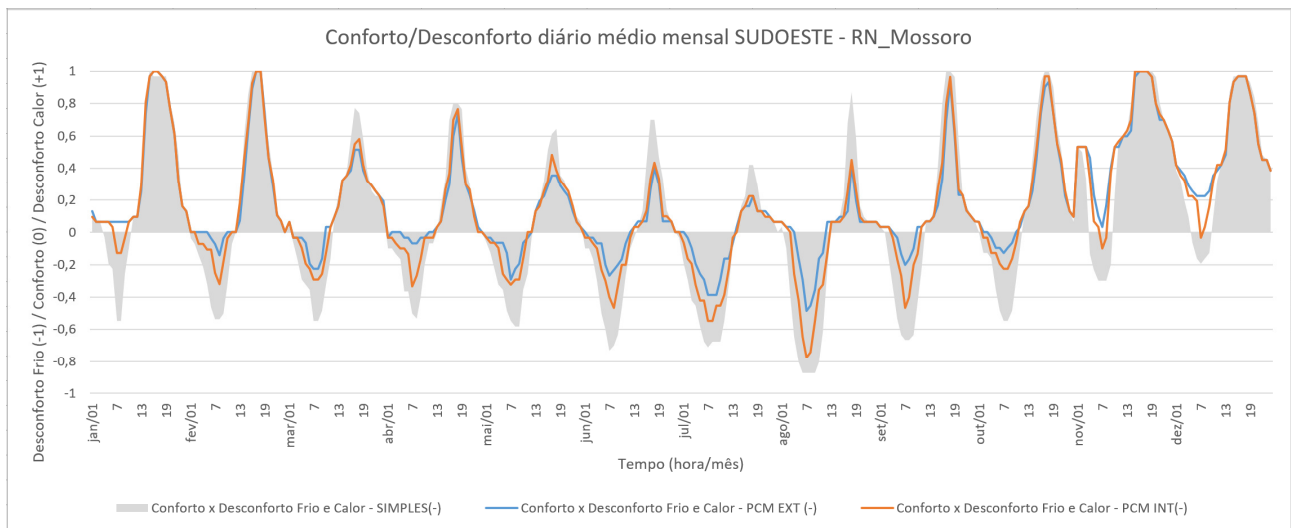




### Configurações PCM Externo/Interno de maior influência – Mossoró-RN

|                | Parede Oeste         | Parede Leste         |
|----------------|----------------------|----------------------|
| <b>Externa</b> | PAREDE_PCM_EXT_20_19 | PAREDE_PCM_EXT_20_19 |
| <b>Interna</b> | PAREDE_PCM_INT_20_21 | PAREDE_PCM_INT_20_21 |





## Apêndice H - Planilhas completas dos casos característicos (Planilha do Excel)