



# ANÁLISE DA INFLUÊNCIA CLIMÁTICA SOBRE A CARGA ELÉTRICA NO BRASIL

Alex Yujhi Gomes Yukizaki

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Planejamento Energético.

Orientador: Amaro Olimpio Pereira. Junior,  
D.Sc.

Rio de Janeiro  
Março de 2020

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA CLIMÁTICA SOBRE A CARGA ELÉTRICA NO  
BRASIL

Allex Yujhi Gomes Yukizaki

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Orientador: Amaro Olimpio Pereira Junior

Aprovada por: Prof. Amaro Olimpio Pereira Junior

Prof. André Frossard Pereira de Lucena

Dr. Joilson de Assis Cabral

Dr. Leontina Maria Viana Graziadio Pinto

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2020

Yukizaki, Alex Yujhi Gomes

Análise da influência climática sobre a carga elétrica no Brasil. / Alex Yujhi Gomes Yukizaki – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2020.

XV, 187 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Amaro Olímpio Pereira Junior

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 138-144.

1. Carga de Energia. 2. Efeito Climático. 3. Comportamento do Consumidor. I. Junior, Amaro Olímpio Pereira. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

“Os mais fortes de todos os guerreiros são estes dois:  
Tempo e Paciência”  
(Liev Tolstói)

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por permitir tudo isto e por me mostrar o significado de resiliência.

Aos meus pais, pela abnegação ao longo da vida em prol da minha educação e sobretudo pelo exemplo.

Às minhas famílias, por toda a estrutura e reorganização logística na busca das melhores condições para meu desempenho, em especial minha mãe, sogra e esposa.

Aos meus pestinhas Yuri e Yasmim pela compreensão da minha ausência. Amo vocês. Papai está voltando.

À Jessica, minha esposa, companheira, psicóloga, que segurou o desafio de criação das nossas crianças sem minha participação neste período, além de sempre colocar meus pés no chão frente as mais diversas possibilidades da dissertação.

À minha mãe, pela curiosidade sobre o tema, *insigts* de arquitetura e urbanismo, pelo cuidado e dedicação para que nada tirasse meu foco.

À minha avó, por ser minha avó e tornar tudo mais leve na sua presença.

Aos colegas da EPE, que ao longo do tempo presenciaram meu esforço em aproveitar cada minuto. E foram muitos minutos. Obrigado a todos pela motivação e apoio.

Ao Arnaldo Júnior e Bruno Crotman pela dedicação e paciência nos diversos *brainstorms* sobre minha dissertação, pelos conhecimentos compartilhados, bem como dos comentários sempre pertinentes e precisos.

Ao professor Amaro, pela oportunidade de orientação, apoio e incentivo no tema escolhido para o desenvolvimento deste projeto.

Aos ilustres membros da Banca, por terem aceitado o convite para compô-la e pelos valiosos comentários que contribuíram para o aprimoramento da tese.

Agradeço ao Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), pela oportunidade de ter tido acesso aos dados que culminaram na elaboração deste estudo.

A todos os professores do PPE/COPPE, pelos conhecimentos transmitidos.

Aos funcionários do PPE, em especial ao Paulo e à Sandrinha, por sempre terem uma solução rápida para as minhas dúvidas e pelo apoio e torcida ao longo dessa fase.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## ANÁLISE DA INFLUÊNCIA CLIMÁTICA SOBRE A CARGA ELÉTRICA NO BRASIL

Alex Yujhi Gomes Yukizaki

Março/2020

Orientador: Amaro Olimpio Pereira Junior

Programa: Planejamento Energético

Em um setor de investimentos iniciais elevados e lenta maturação, garantir a segurança energética, modicidade tarifária e universalização do acesso e uso da energia elétrica tem como requisito antever os montantes de energia e potência necessários ao pleno funcionamento do sistema elétrico no futuro. Além da importância sistêmica, a previsão de demanda faz parte das estratégias de atuação dos diversos agentes do setor.

Dentre as diversas incertezas na previsão destaca-se a incerteza climática, sobretudo em um cenário de mudanças climáticas e de aumento da posse de equipamentos cujo acionamento é responsivo ao clima. Embora o tema já venha sendo abordado desde o século passado, a literatura trata o problema de forma parcial ao impor formas funcionais pré-definidas à relação entre clima e demanda de energia, as quais não são aplicáveis de forma genérica para a pluralidade de climas brasileiros. Além disso, há hegemonia do uso restrito à temperatura do ar externo como variável dependente, o que negligencia o efeito das diversas outras variáveis não só climáticas como comportamentais e construtivas.

Dessa forma, a presente dissertação tem por finalidade analisar a influência do efeito climático de forma holística e flexível sobre a demanda de eletricidade no Brasil, propondo uma metodologia de aplicabilidade nacional contemplando as variáveis influentes de forma a complementar as projeções de demanda por parte dos agentes e instituições do setor elétrico.

Abstract of Dissertation presented to COPPE / UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ANALYSIS OF THE CLIMATE INFLUENCE ON THE ELECTRICITY LOAD IN  
BRAZIL

Alex Yujhi Gomes Yukizaki

March/2020

Advisor: Amaro Olimpio Pereira Junior

Department: Energy Planning

In a sector of high initial investments and slow ripening, ensuring energy security, tariff reasonable and universal access and use of electricity, has as a requirement foreseen the amounts of energy and power necessary for the full functioning of the system in the future. In addition to the systemic importance, the demand forecasting is part of the operating strategies of the various agents in the sector.

Among the various uncertainties in the forecast, climatic uncertainty stands out, especially in a scenario of climate change and increased ownership of equipment whose drive is responsive to the weather.

Although the theme has been addressed since the last century, the literature deals with a problem partially, establishing functional forms pre-defined to the relationship between climate and energy demand, which are not generally applicable to the plurality of Brazilian climates.

In addition, there is hegemony of use restricted to the temperature of the outside air as a dependent variable, which neglects the effect of several other variables, not only climatic but also behavioral and constructive.

Thus, the present dissertation aims to analyze the influence of the scalable and holistic effect on the demand for electricity in Brazil, proposing a methodology of national applicability considering influential variables. In this way this dissertation corroborates for the demand forecasting activities of agents and institutions in the electricity sector.

## Sumário

|  |          |
|--|----------|
| <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                | <b>1</b> |
| Objetivo .....   | 5        |
| Estrutura .....  | 5        |
| <b>1. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>                    | <b>8</b> |
| 1.1. Dimensão Termodinâmica – Trocas de Calor .....    | 8        |
| 1.1.1. Condução .....                                  | 9        |
| 1.1.2. Convecção.....                                  | 11       |
| 1.1.3. Radiação .....                                  | 13       |
| 1.1.4. Evaporação .....                                | 16       |
| 1.1.5. Condensação .....                               | 17       |
| 1.1.6. Aspectos da Termodinâmica a considerar .....    | 17       |
| 1.2. Dimensão Climática.....                           | 19       |
| 1.2.1. Fatores Climáticos Globais.....                 | 19       |
| 1.2.1.1. Radiação Solar.....                           | 19       |
| 1.2.1.2. Latitude.....                                 | 20       |
| 1.2.1.3. Altitude .....                                | 21       |
| 1.2.1.4. Circulação das Massas de Ar.....              | 23       |
| 1.2.1.5. Distribuição das massas de água e terra ..... | 23       |
| 1.2.2. Fatores Climáticos Locais.....                  | 25       |
| 1.2.2.1. Topografia .....                              | 25       |
| 1.2.2.2. Vegetação e superfície do solo .....          | 25       |
| 1.2.3. Elementos Meteorológicos .....                  | 26       |
| 1.2.4. Aspectos da Climatologia a considerar.....      | 29       |
| 1.3. Dimensão Comportamental .....                     | 29       |
| 1.3.1. Corpo Humano visto como Máquina Térmica .....   | 29       |
| 1.3.2. Teoria dos índices de conforto térmico .....    | 31       |

|  |           |
|--|-----------|
| 1.3.3. O modelo de dois nós .....  | 33        |
| 1.3.4. Aspectos Comportamentais a considerar.....                          | 37        |
| 1.4. Dimensão Arquitetônica .....  | 38        |
| 1.4.1. Aspectos Construtivos .....   | 38        |
| 1.4.2. Caracterização das envoltórias das edificações atuais.....          | 41        |
| 1.4.3. Aspectos Arquitetônicos a considerar .....                          | 46        |
| <b>2. CARACTERIZAÇÃO DA CARGA .....</b>                                    | <b>47</b> |
| 2.1. Composição da Carga de Energia.....                                   | 47        |
| 2.1.1. Perdas e diferenças. ....   | 48        |
| 2.1.2. Consumo na Rede do SIN.....   | 50        |
| 2.1. Carga de Energia suscetível as oscilações climáticas.....             | 55        |
| <b>3. ESCOLHA DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA DO MODELO.....</b>                  | <b>60</b> |
| 3.1. Análise exploratória da sensação de desconforto térmico do homem..... | 63        |
| 3.2. Análise exploratória da precipitação .....                            | 68        |
| <b>4. METODOLOGIA.....</b>   | <b>71</b> |
| 4.1. Revisão Bibliográfica .....   | 71        |
| 4.1.1. Abordagem paramétrica linear .....                                  | 71        |
| 4.1.2. Abordagem paramétrica não-linear .....                              | 72        |
| 4.1.3. Abordagem fundamentalista não-paramétrica.....                      | 73        |
| 4.1.4. Regressão Lopes .....   | 77        |
| 4.1.5. Validação Cruzada.....  | 78        |
| 4.2. Definição do escopo de análise.....                                   | 79        |
| 4.2.1. Recortes e frequência dos dados.....                                | 80        |
| 4.2.2. Abrangência das séries .....  | 81        |
| 4.3. Tratamento da base de dados de Carga de Energia .....                 | 83        |
| 4.3.1. Correção do efeito calendário.....                                  | 83        |
| 4.3.2. Tratamento das demais imperfeições das séries de carga.....         | 85        |

|   |            |
|---|------------|
| 4.4. Tratamento da base de dados climática .....  | 87         |
| 4.4.1. Transformação das variáveis externas das estações meteorológicas em variáveis internas aos edifícios ..... | 88         |
| 4.4.2. Composição de base climática histórica única .....   | 91         |
| 4.5. Aplicação do modelo de dois nós .....  | 92         |
| 4.6. Cálculo da Carga Neutra.....   | 94         |
| 4.6.1. Identificação dos vales.....   | 94         |
| 4.6.2. Identificação dos dias de carga mínima.....  | 95         |
| 4.6.3. Interpolação dos dias neutros.....   | 96         |
| 4.7. Cálculo do Efeito Climático (Curvas S) .....   | 98         |
| 4.7.1. Cálculo das vestimentas coletivas do vale de carga .....   | 98         |
| 4.7.2. Cálculo das Curvas S .....   | 102        |
| 4.8. Cálculo da Carga Livre de clima .....  | 103        |
| 4.9. Cálculo da Carga Típica Esperada.....  | 104        |
| <b>5. RESULTADOS .....</b>  | <b>106</b> |
| 5.1. Carga corrigida de calendário' .....   | 106        |
| 5.2. Carga Neutra .....   | 110        |
| 5.3. Identificação da forma funcional .....   | 114        |
| 5.4. Carga Livre de Clima e com Clima Típico.....   | 119        |
| <b>6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>   | <b>124</b> |
| 6.1. Melhorias nas projeções .....  | 125        |
| 6.2. Aprimoramento de políticas públicas .....  | 126        |
| <b>Referências Bibliográficas .....</b>   | <b>127</b> |
| <b>APÊNDICE A – Identificação de Correções da Carga Diária Equivalente Semanal por UF por Jornada.....</b>        | <b>134</b> |
| <b>APÊNDICE B – Dias com desvios superiores aos critérios de corte.....</b>                                       | <b>138</b> |
| <b>APÊNDICE C – Carga Diária Equivalente Semanal Corrigida de Imperfeições por UF por Jornada.....</b>            | <b>139</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>APÊNDICE D – Procedimento de classificação da sensação de desconforto dado clima e vestimenta.....</b>                                    | <b>143</b> |
| <b>APÊNDICE E – Carga Diária Equivalente Semanal Corrigida de Imperfeições <i>versus</i> Carga Neutra por UF por Jornada.....</b>            | <b>144</b> |
| <b>APÊNDICE F – Vestimentas Coletivas do vale de carga por UF por Jornada....</b>  | <b>148</b> |
| <b>APÊNDICE G – Efeito da chuva no uso elétrico de condicionamento ambiental por UF por Jornada para o ano de 2015. ....</b>                 | <b>149</b> |
| <b>APÊNDICE H – Carga livre de clima por UF por Jornada.....</b>   | <b>153</b> |
| <b>APÊNDICE I – Efeito da posse de equipamentos por UF por Jornada.....</b>  | <b>157</b> |
| <b>APÊNDICE J – Uso da eletricidade, em MW médio, em resposta as condições climáticas por UF por Jornada por mês para o ano de 2015.....</b> | <b>161</b> |
| <b>APÊNDICE K – Desempenho do modelo por UF .....</b>  | <b>165</b> |
| <b>ANEXO I – Calor metabólico produzido em função da atividade exercida .....</b>  | <b>166</b> |
| <b>ANEXO II – Resistência Térmica das Vestimentas .....</b>  | <b>167</b> |
| <b>ANEXO III – Estimação de área da superfície corporal .....</b>  | <b>168</b> |
| <b>ANEXO IV – Lista de Feriados Nacionais e Estaduais considerados .....</b>   | <b>169</b> |
| <b>ANEXO V – Estatística de energia elétrica das instituições.....</b>   | <b>170</b> |

## Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1-1: Efeito da temperatura sobre a energia cinética média das moléculas.....                                    | 8  |
| Figura 1-2: Transferência de energia Térmica por Condução.....   | 10 |
| Figura 1-3: Transferência de energia Térmica por Condução.....   | 13 |
| Figura 1-4: Trocas de energia por radiação em paredes.....   | 16 |
| Figura 1-5: Gráfico psicrométrico de uma condensação.....  | 17 |
| Figura 1-6: Fatores Climáticos e Elementos Meteorológicos.....   | 19 |
| Figura 1-7: Efeito dos movimentos de translação e rotação sobre a abóboda celeste....                                  | 21 |
| Figura 1-8: Variação da temperatura com a altitude. ....   | 22 |
| Figura 1-9: Variação da intensidade do vento com a altitude. ....  | 22 |
| Figura 1-10: Circulação das massas de ar no globo terrestre. ....  | 23 |
| Figura 1-11: Circulação das massas de ar no globo terrestre. ....  | 24 |
| Figura 1-12: Fenômeno sombra de chuva. ....  | 25 |
| Figura 1-13: Dinâmica horária dos elementos meteorológicos.....  | 28 |
| Figura 1-19: Escala de Conforto Térmico da ASHRAE. ....  | 31 |
| Figura 1-20: Resumo do modelo de dois nós. ....  | 34 |
| Figura 1-14: Curvas de variação de temperaturas externa e interna de uma edificação .                                  | 39 |
| Figura 1-15: Rosa dos ventos para a cidade Florianópolis.....  | 40 |
| Figura 1-16: Fator de correção da velocidade do vento para a abertura da entrada de ar .<br>.....                      | 41 |
| Figura 1-17: Materiais predominantemente utilizados nas envoltórias residenciais<br>brasileiras.....                   | 44 |
| Figura 1-18: Características construtivas utilizadas nas envoltórias do setor de comércio<br>e serviços no Brasil..... | 45 |
| Figura 2-1: Decomposição da Carga de Energia.....  | 48 |
| Figura 2-2: Uso da eletricidade pelas classes de consumo por níveis de tensão.....                                     | 50 |
| Figura 2-3: Sazonalidade do consumo por classe por região. ....  | 52 |
| Figura 2-4: Perfis de carga das classes de consumo por faixa de tensão.....  | 54 |
| Figura 2-5: Representatividade da demanda susceptível as condições climáticas.....                                     | 55 |
| Figura 2-6: Responsividade climática dos serviços energéticos.....   | 56 |
| Figura 2-7: Horários de uso do chuveiro elétrico.....  | 57 |
| Figura 2-8: Decomposição do Consumo Elétrico destinado à Refrigeração.....   | 57 |
| Figura 2-9: Horários de uso dos equipamentos de condicionamento ambiental nas  |    |

|   |     |
|---|-----|
| residências. ....   | 58  |
| Figura 3-1: Natureza das variáveis influentes sobre a carga de energia.....   | 61  |
| Figura 3-2: Comportamento do gradiente da superfície $\Delta S$ .....   | 63  |
| Figura 3-3: Influência mútua de Temperatura do Ar, Umidade Relativa, Velocidade do Vento e Vestimenta sobre a sensação térmica do indivíduo ..... | 65  |
| Figura 3-4: Temperatura horária do ar medida em dias selecionados .....   | 67  |
| Figura 3-5: Carga diária do estado do Rio de Janeiro. ....  | 68  |
| Figura 3-6: Efeito da precipitação sobre a carga diária do Rio de Janeiro.....  | 69  |
| Figura 4-1: Consumo coletivo hipotético segundo distribuição individual uniforme ....   | 74  |
| Figura 4-2: Probabilidade teórica de conforto térmico coletivo.....   | 75  |
| Figura 4-3: Hipótese quanto a forma funcional da relação entre clima e carga de energia no Brasil.....  | 76  |
| Figura 4-4: Definição do span por validação cruzada .....   | 79  |
| Figura 4-5: Procedimento de tratamento dos feriados.....  | 84  |
| Figura 4-6: Procedimento para obtenção dos Pus típicos dos dias da semana.....  | 85  |
| Figura 4-7: Ajustes remanescentes das séries de carga diária equivalente semanal após a correção do efeito calendário.....                        | 87  |
| Figura 4-8: Atraso térmico das envoltórias brasileiras.....   | 89  |
| Figura 4-9: Amortecimento e defasagem entre temperaturas externa e interna para o Rio de Janeiro no dia 19 de janeiro de 2013 .....               | 90  |
| Figura 4-10: Desconforto térmico em função da vestimenta .....  | 93  |
| Figura 4-11: Primeira etapa na identificação dos pontos mais neutros possíveis para o estado de Santa Catarina.....                               | 95  |
| Figura 4-12: Segunda etapa na identificação dos dias neutros do estado de Santa Catarina.....   | 96  |
| Figura 4-13: Terceira etapa na identificação dos dias neutros para o estado de Santa Catarina.....  | 97  |
| Figura 4-14: Carga neutra suavizada para o estado de Santa Catarina.....  | 98  |
| Figura 4-15: Desconfortos térmicos individuais e coletivos .....  | 99  |
| Figura 4-16: Sensação de desconforto térmico típico diário para o estado do Rio Grande do Sul.....  | 105 |
| Figura 5-1: Demonstração do efeito calendário para a jornada da tarde da carga de São Paulo. ....   | 107 |
| Figura 5-2: Ajustes na série de Carga original de UFs selecionadas, por jornada. ....   | 108 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 5-3: Carga ajustada de UFs selecionadas por jornada.....   | 110 |
| Figura 5-4: Carga com clima <i>versus</i> Carga suavizada sem clima para o estado de São Paulo. ....                                      | 112 |
| Figura 5-5: Vestimentas do vale coletivas por jornada para o estado de São Paulo. ...   | 113 |
| Figura 5-6: Características regionais das vestimentas do vale coletivas para a jornada da Tarde. ....                                     | 114 |
| Figura 5-7: Relação entre clima e carga de energia para UFs selecionadas no turno da Madrugada para os dias sem chuva do ano de 2016..... | 115 |
| Figura 5-8: Efeito da chuva no uso elétrico de refrigeração para o ano de 2016 no RJ. ....  | 117 |
| Figura 5-9: Efeito da posse de equipamentos no RS. ....   | 118 |
| Figura 5-10: Desempenho do modelo para a dupla de estados com responsividade térmica mais relevante. ....                                 | 119 |
| Figura 5-11: Comparação da carga com e sem efeito climático para a jornada da Madrugada do RJ.....  | 120 |
| Figura 5-12: Taxas mensais de evolução da carga com e sem efeito climático para a jornada da tarde do estado de São Paulo. ....           | 121 |
| Figura 5-13: Sazonalidade do uso da energia para conforto térmico para o ano de 2017. ....  | 123 |
| Figura 0-1: Regre dos nove. ....  | 168 |
| Figura 0-1: Arranjos de medição dos agentes de geração e autoprodução na CCEE...  | 171 |
| Figura 0-2: Óticas das instituições quanto ao uso da energia elétrica no SIN.....   | 173 |

## Lista de Tabelas

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 1-1: Características térmicas dos materiais.....   | 11  |
| Tabela 1-2: Valores típicos do coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m <sup>2</sup> °K)..... | 12  |
| Tabela 1-3: Valores de Coeficientes de Absortividade e Emissividade.....                                      | 15  |
| Tabela 1-4: Valores de Coeficiente de Absorção da Radiação Solar específico de pintura .....                  | 15  |
| Tabela 1-5: Variação da condutância térmica superficial externa.....  | 36  |
| Tabela 4-1: Definição das Jornadas diárias .....  | 81  |
| Tabela 4-2: Estações meteorológicas convencionais e automáticas selecionadas .....                            | 82  |
| Tabela 4-3: Atividades selecionadas para o modelo .....   | 92  |
| Tabela 4-4: Lista de vestimentas coletivas possíveis para jornadas da noite e madrugada. ....                 | 101 |
| Tabela 4-5: Lista de vestimentas coletivas possíveis para jornadas da manhã e tarde. ....                     | 102 |

## INTRODUÇÃO

O acesso a formas modernas de energia é essencial para elevar os padrões de vida no mundo, sobretudo nos países subdesenvolvidos e em desenvolvimento. De fato, do ponto de vista econômico, o emprego em atividades do setor formal e não-formal está positivamente correlacionado ao aumento do acesso a opções de energia mais limpa, como a eletricidade, conforme descrito em GEA (2012). Entretanto, diversas outras áreas são beneficiadas pelo acesso à energia moderna.

O uso de energia para bombeamento de água, por exemplo, traz melhores condições de saneamento e irrigação, promovendo aumento na produtividade agrícola e geração de renda adicional para as famílias pobres, sobretudo nas áreas rurais. Nos centros de saúde, por sua vez, o acesso a eletricidade permite a prestação de serviços médicos à noite, o controle de temperatura dos ambientes e maior uso de equipamentos médicos avançados. Além disso, a eletrificação rural ajuda a reter pessoal qualificado em centros de saúde rurais, bem como a manter bons professores no campo. (GEA, 2012)

A relação entre energia e desenvolvimento é tão relevante que se manifesta em metas acordadas mundialmente como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). De forma explícita, assegurar a todos o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia é um dos objetivos deste acordo, embora seja condição para o cumprimento de vários dos outros ODS. Segundo (Itamaraty, 2014), a postura brasileira frente aos ODS traduziu-se em diretrizes nacionais tais como:

- Até 2030, assegurar o acesso universal, a preços acessíveis, a serviços de energia seguros, modernos e sustentáveis.
- Promover o suprimento energético eficiente, seguro e de qualidade, que contribua ao crescimento econômico, à redução da pobreza e à inclusão social.
- Estimular a eficiência energética em toda a cadeia de valor: geração, transmissão, distribuição e uso.
- Desenvolver infraestrutura energética de qualidade, confiável, sustentável e resiliente, para apoiar o desenvolvimento econômico e o bem-estar humano, com foco no acesso equitativo e a preços acessíveis para todos.

Segundo (GEA, 2012), a relação entre energia e desenvolvimento faz com que a garantia no suprimento de energia elétrica, de forma robusta, soberana e resiliente seja

indispensável para a política energética de uma nação. Ou seja, a fim de não limitar o desenvolvimento, o governo deve preocupar-se com a suficiência de recursos, confiabilidade da infraestrutura, fornecimento do serviço a preços estáveis e acessíveis, protegendo a nação contra ameaças potenciais de agentes externos e com capacidade de resistir a diversas perturbações nos sistemas de energia.

À luz destas preocupações e entendendo a eletricidade como fonte provedora de diversos serviços energéticos, os quais sob uma ótica microeconômica geram aumento de bem estar dos indivíduos e, portanto, da qualidade de vida, o setor elétrico brasileiro estruturou-se experimentando diversos desenhos de mercado ao longo do tempo.

Uma das características importantes da primeira reforma foi a desverticalização dos segmentos de geração, transmissão e distribuição . Entretanto, as falhas de planejamento e execução das reformas levou ao racionamento de energia em 2001. De fato, Kelman (2001) aponta que o atraso das obras, a não realização dos investimentos programados e o problema do fluxo de informações entre MME, ANEEL e ONS foram alguns dos aspectos que, além da hidrologia desfavorável, levaram à crise de suprimento de energia elétrica em 2001.

O severo racionamento de energia instaurado a nível nacional como resposta à crise, embora bem sucedido, levou a fortes reduções de receita nas concessionárias de energia (Giambiagi, et al., 2002). Dessa forma, foi iniciado em 2003 novamente um processo de reestruturação do setor, com as Medidas provisórias MP 145/03 e MP 144/03 que no ano seguinte deram origem às Leis 10.847 e 10.848, respectivamente. Este modelo, cuja vigência se dá na atualidade, tem como objetivos fundamentais:

- A Universalização do acesso e uso da energia elétrica;
- A Modicidade Tarifária; e
- A Segurança Energética

Em um setor de investimentos iniciais elevados e de lenta maturação, garantir o cumprimento dos objetivos supracitados e aumentar a possibilidade de captação financeira com vistas à expansão da oferta tem como requisito antever os montantes de energia e potência necessários ao pleno funcionamento do sistema elétrico no futuro. Nesse sentido, para as instituições do setor, previsões de demanda assertivas são essenciais ao exercício de suas atividades, conforme detalhado abaixo:

- A Empresa de Pesquisa Energética (EPE), criada em 2004 pela Lei 10.847, preencheu as lacunas do planejamento indicativo, sinalizado como necessário desde os estudos do RE-SEB. A previsão de demanda, por parte da instituição, configura-se em uma sinalização aos agentes de um quadro de referência para seus investimentos.
- O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), por sua vez, pauta a política de operação energética nas previsões de demanda nos curto e médio prazos de forma a otimizar a operação do sistema eletroenergético, visando menor custo para o sistema.
- A remuneração do serviço Energia Elétrica de forma adequada é uma das atribuições da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Para o seu cumprimento, a análise do mercado atual e futuro de energia elétrica é aspecto relevante, pois traduz-se na aplicabilidade adequada das tarifas de energia entre os diversos tipos de consumidores, além da possibilidade de simulação dos impactos regulatórios no mercado.

Além da importância sistêmica, a previsão de demanda de eletricidade faz parte das estratégias de atuação dos diversos agentes do setor.

- As distribuidoras, segundo o Art. 2º da Lei 10.848/04 devem garantir o atendimento à totalidade de seu mercado, mediante contratação regulada, por meio de licitação. Entretanto, há possibilidade de repasse à tarifa do consumidor um percentual do excesso de contratação em relação à demanda efetiva.
- Já para as comercializadoras, intrinsecamente ao seu negócio está a previsão de disponibilidade de oferta em relação à demanda por eletricidade no futuro, a fim de aproveitar os momentos críticos do sistema. Momentos estes em que o preço de liquidação das diferenças (PLD) alcança patamares mais elevados no mercado de curto prazo.
- Para os agentes de geração, boas previsões de demanda elétrica traduzem-se na celebração de contratos de suprimento de combustíveis de forma adequada, realização de manutenções programadas em períodos mais vantajosos, além da venda de energia/potência no mercado livre em melhores condições.
- Para os consumidores livres, prospectar seu mercado e conseqüentemente sua demanda energética futura adequadamente possibilita celebrar contratos mais

vantajosos no mercado livre, além de elaborar estudos de viabilidade para autossuprimento.

É importante ressaltar que do ponto de vista sistêmico a demanda de energia, quando subdimensionada, deixa de atender às necessidades do mercado gerando custos elevados a economia brasileira. De fato, segundo Junior & Costa (2017), a redução de 1% da oferta de energia gera uma perda de cerca de 0,5% do valor adicionado da economia. Por outro lado, a projeção de demanda quando superdimensionada, indevidamente antecipa custos ao consumidor final e aumenta a competição por recursos financeiros em outros setores também prioritários como saúde e educação. (La Rovere, 1986)

Dada a relevância do tema, para projetar a demanda é necessário compreendê-la através da evolução de suas componentes ao longo do tempo, observando aspectos sazonais, horários, espaciais, comportamentais, contratuais, entre outros. Grande parcela dos estudos das comunidades técnica e acadêmica elencam as variáveis econômicas e demográficas como as mais relevantes para a previsão das componentes da demanda. Entretanto, a preocupação com os efeitos das altas temperaturas sobre a demanda de energia elétrica tem se tornado mais veemente nos últimos anos, sobretudo em função do aumento da posse de equipamentos de ar condicionado. De fato, segundo (EPE, 2018), o consumo de energia elétrica para condicionamento de ar nas residências brasileiras mais que triplicou nos últimos 12 anos e pode crescer 5,4% ao ano até 2035. O ONS, por sua vez, divulgou consecutivos recordes de carga de energia em janeiro/2019, corroborando para a premência no tratamento de variáveis climáticas nos estudos de planejamento de forma explícita.

- 30/01/2019 – (ONS, 2019a)
- 23/01/2019 – (ONS, 2019b)
- 22/01/2019 – (ONS, 2019c)
- 16/01/2019 – (ONS, 2019d)
- 15/01/2019 - (ONS, 2019e)

Apesar do efeito manifestar-se já no presente, corroborando para os picos de carga do sistema, há potencial significativo para agravamento desta situação. Hoje, somente 17% dos domicílios possuem ar condicionado (PROCEL/ELETROBRAS, 2019) e segundo estimativa da Agência Internacional de Energia (IEA) em seu relatório “*The Future of*

*Cooling*”, a carga de energia do Brasil em 2050 estará, aproximadamente, 40% destinada à climatização de ambientes. Desta forma, o aquecimento global e o aumento de ocorrência de eventos extremos, intensificados pelas mudanças climáticas, aliados a demanda reprimida por equipamentos de condicionamento ambiental podem trazer ampliação das oscilações de carga intra-anuais no longo prazo.

Na literatura, modelos que mensurem o efeito climático sobre a demanda de energia já vêm sendo formulados desde o século passado. Embora haja reconhecimento da não-linearidade da relação, a maioria dos modelos propostos calcam-se em métodos lineares. Os poucos modelos não-lineares propostos são paramétricos, impondo formas funcionais limitadas a aplicações específicas. Dessa forma, a adoção destes modelos de forma generalizada para os estados brasileiros não é recomendada. Quanto as variáveis de entrada dos modelos, há hegemonia de uso restrito à temperatura do ar externa. Tal abordagem negligencia a influência das demais variáveis climáticas e comportamentais sobre a carga de energia, bem como do papel da envoltória das construções na atenuação da exposição climática do indivíduo.

### **Objetivo**

Nesse sentido, a presente dissertação tem por objetivo ampliar a discussão do efeito temperatura sobre a carga de energia incluindo outras variáveis climáticas e considerando aspectos comportamentais e arquitetônicos relevantes. Além disso, propõe-se uma abordagem flexível para captura das particularidades de cada estado, indicando, de maneira conjunta, uma forma funcional genérica da relação entre carga e clima para o Brasil.

Dessa forma, este estudo complementa o arcabouço de modelos do setor elétrico para previsão de demanda, possibilitando o tratamento de efeitos econômicos e demográficos sobre a carga livre de efeitos climáticos.

### **Estrutura**

Para isto, o trabalho estrutura-se em uma introdução e seis capítulos, cujos conteúdos são apresentados resumidamente da seguinte forma:

Na introdução, expõem-se os principais objetivos do trabalho, a relevância do tema para o planejamento energético, e indica-se como a dissertação foi estruturada.

No primeiro capítulo é apresentado o referencial teórico associado a todas as camadas de influência desde a origem das variáveis climáticas até a percepção de desconforto térmico pelo indivíduo. O capítulo inicia-se pelos conceitos termodinâmicos associados as trocas térmicas entre corpos, explicando como variáveis climáticas e construtivas interagem nestas trocas. Em seguida são abordados como os fatores climáticos e elementos meteorológicos relacionam-se entre si, indicando que, na construção do modelo, não se deve especificar variáveis climáticas separadamente. Posteriormente, aborda-se, através da teoria dos índices de conforto térmico bem como o modelo de balanço térmico generalizado, como variáveis climáticas e comportamentais podem compor uma única escala de desconforto térmico. Por fim, são mostradas as diferenças entre variáveis climáticas externas e internas às construções, bem como são caracterizadas as envoltórias brasileiras na atualidade de forma a possibilitar a transposição das medidas das estações meteorológicas para o interior das edificações.

No capítulo 2 é feita a caracterização da carga do SIN através de suas componentes de consumo em termos de participação, sazonalidade bem como dos perfis horários típicos. Os serviços energéticos também são explorados neste capítulo, sobretudo aqueles sensíveis ao clima.

O terceiro capítulo consta de análises exploratórias das variáveis climáticas e comportamentais associadas ao modelo de dois nós no intuito de visualizar as influências destas variáveis sobre a sensação de desconforto térmico do indivíduo. Além disso, são investigados os impactos da precipitação sobre as envoltórias, consequentemente influenciando a relação entre clima externo e interno à edificação.

O capítulo 4 faz uma breve revisão bibliográfica sobre como o presente tema é tratado na literatura, elencando suas deficiências. Em seguida são fundidos os conhecimentos descritos nos capítulos anteriores formulando hipótese sobre a forma funcional da relação. Por fim, sob processo de *feature engineering*, é descrita a metodologia para tratamento dos dados de energia e clima, seleção do recorte e frequência dos dados, definição do escopo temporal e espacial e escolha do método quantitativo adequado para mensuração do efeito.

No quinto capítulo são exibidos os resultados do processo metodológico etapa a etapa. Dentre os aspectos abrangidos destacam-se a correção do efeito calendário, elaboração

da carga neutra suavizada, a identificação da forma funcional do efeito em cada estado por jornada, análise do efeito da precipitação, verificação do efeito do aumento da posse de equipamentos e elaboração da carga livre de clima.

Por fim, no sexto capítulo, são apresentadas as conclusões e considerações finais, ratificando a importância do tema, as deficiências nos modelos propostos em literatura até então, bem como são propostos estudos que façam uso da modelagem proposta por esta dissertação no intuito de aprimoramento das políticas públicas.

## 1. REFERENCIAL TEÓRICO

O uso da energia elétrica oriundo de condições climáticas ocorre no interior das edificações/indústrias pelo acionamento de diversos tipos de equipamentos tais como chuveiro elétrico, ar condicionado, aquecedor térmico, entre outros. Tal acionamento ocorre em momentos de desconforto térmico experimentado pelo indivíduo em função de diversos fatores dentre os quais destacam-se os climáticos e comportamentais. Entretanto, o uso destes equipamentos é heterogêneo dada às diferentes características do clima entre as localidades, dentre outros fatores. Adicionalmente, há de se considerar as diferenças entre o clima externo e no interior de uma construção moldados pelo partido arquitetônico construído.

Desta forma, entender a relação entre o uso da energia elétrica em função das condições climáticas incorre na compreensão do efeito ao longo das diversas camadas que permeiam esta relação: Termodinâmica, Climática, Arquitetônica e Comportamental.

### 1.1. Dimensão Termodinâmica – Trocas de Calor

A temperatura, é uma propriedade macroscópica que reflete a energia cinética médias das moléculas. Para qualquer valor de temperatura há uma distribuição de Maxwell-Boltzmann de energias cinéticas moleculares. Em temperaturas mais altas a distribuição desloca-se no sentido de se ter um maior número de moléculas rápidas e menos moléculas lentas, conforme ilustrado na Figura 1-1. (Russell, 1994a)

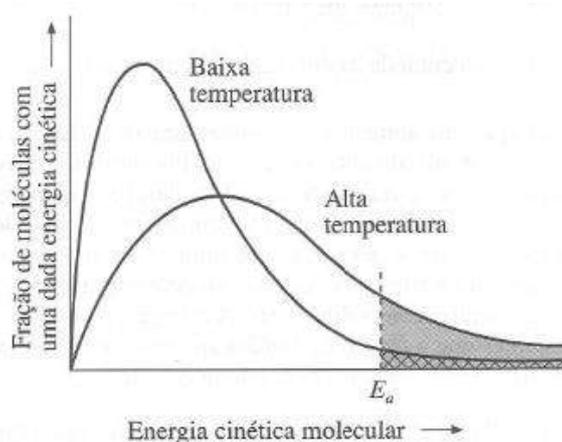


Figura 1-1: Efeito da temperatura sobre a energia cinética média das moléculas.

Fonte: Russell (1994a)

O Calor, por sua vez, sempre foi percebido como algo que produz sobre o homem uma sensação de aquecimento. Entretanto, o termo calor é usualmente aplicado de forma equivocada no nosso vocabulário. A expressão “Estou com calor.”, por exemplo,

emprega incorretamente o termo, pois o calor não indica um estado e sim uma transferência de energia térmica. (Yunus A. Çengel, 2013)

Tal transferência, pode ocorrer por meio de três mecanismos: condução, convecção e radiação. Enquanto houver diferença de temperatura entre dois corpos, estes mecanismos atuarão sobre eles buscando o equilíbrio térmico. Além disso, tais mecanismos podem encadear processos graduais de alteração do estado físico da matéria como a evaporação e condensação. (Yunus A. Çengel, 2013)

Portanto, para compreensão do impacto do clima sobre o indivíduo bem como sobre as envoltórias é necessário detalhar como as trocas térmicas ocorrem.

### **1.1.1. Condução**

Em escala infinitesimal, pela Lei de Fourier da condução de calor, a taxa com a qual o calor é conduzido em uma direção é proporcional ao gradiente de temperatura naquela direção, onde a constante de proporcionalidade depende do material utilizado. (Yunus A. Çengel, 2013)

A extrapolação prática, descrita abaixo, desta lei, traduz a transferência de energia térmica por condução, que ocorre entre dois corpos em contato, com temperaturas diferentes ( $\theta_e \neq \theta_i$ ). (Frota & Schiffer, 2001)

$$q_{cd} = \frac{\lambda}{e} (\theta_e - \theta_i)$$

Onde:

$q_{cd}$  = intensidade do fluxo térmico por condução ( $W/m^2$ );

$e$  = espessura da parede (m);

$\theta_e$  = temperatura da superfície externa da envolvente ( $^{\circ}C$ );

$\theta_i$  = temperatura da superfície interna da envolvente ( $^{\circ}C$ ); e

$\lambda$  = coeficiente de condutibilidade térmica do material ( $W/m^{\circ}C$ ).

Para o caso de condução entre as superfícies interna e externa de uma parede, Frota & Schiffer(2001) ilustram a transferência por condução em paredes homogêneas e heterogêneas, conforme Figura 1-2.

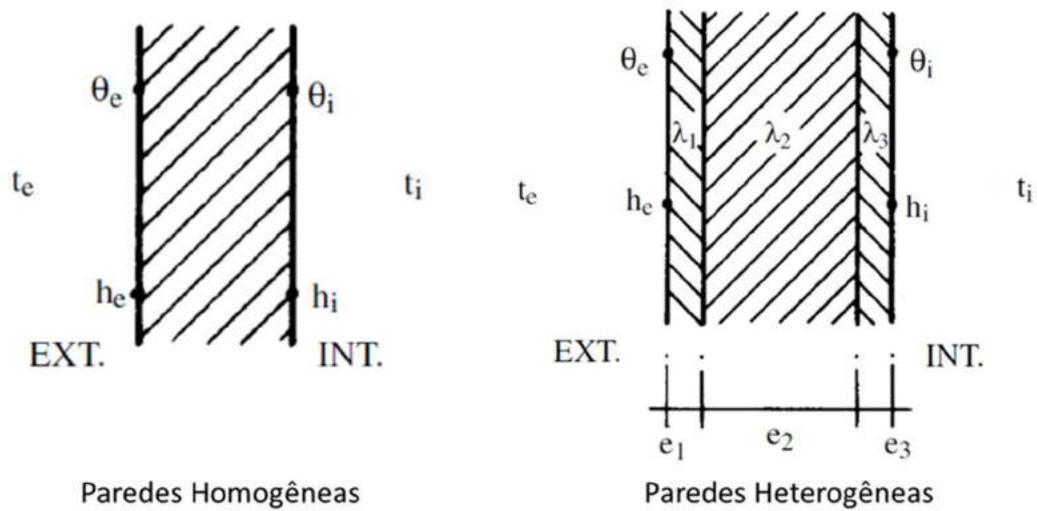


Figura 1-2: Transferência de energia Térmica por Condução

Fonte: Adaptado de Frota & Schiffer (2001)

O coeficiente de condutibilidade térmica dos materiais pode assumir diversos valores. Alguns destes, comuns na envoltória das construções brasileiras seguem destacados na Tabela 1-1.

Tabela 1-1: Características térmicas dos materiais

| Material   | $\lambda$ (W/m°C) | d (kg/m <sup>3</sup> ) | c (J/Kg°C) |
|--|-------------------|------------------------|------------|
| Água   | 0,58              | 1000                   | 4187       |
| Espuma rígida de poliuretano                       | 0,03              | 35                     |            |
| Plásticos alveolares                               | 0,04              | 11                     |            |
| Amianto projetado                                  | 0,05              | 160                    |            |
| Concreto celular (bloco)                           | 0,05              | 450                    | 963        |
| Lã de vidro  | 0,05              | 24                     | 754        |
| Palha comprimida                                   | 0,12              | 350                    |            |
| Madeiras (pinho perpendicular ad fibra)            | 0,14              | 550                    | 2721       |
| Amianto  | 0,15              | 580                    |            |
| Madeiras (bétula, pinho silvestre, pinho marítimo) | 0,15              | 500                    | 1424       |
| Madeiras (carvalho, frutíferas)                    | 0,23              | 700                    | 1424       |
| Gesso c/vermiculite 1:2                            | 0,25              | 600                    |            |
| Argamassa celular                                  | 0,3               | 600                    | 1047       |
| Madeiras (pinho paralelo a fibra)                  | 0,3               | 900                    | 1256       |
| Gesso c/vermiculite 1:1                            | 0,3               | 850                    |            |
| Gesso (placa)                                      | 0,35              | 750                    | 837        |
| Cerâmica   | 0,46              | variável               | 837        |
| Cimento-amianto-celulose                           | 0,46              | 1600                   |            |
| Terra argilosa seca                                | 0,52              | 1700                   | 837        |
| Argamassa de cal e cimento                         | 0,65              | 1600                   | 754        |
| Cimento-amianto                                    | 0,65              | 1600                   |            |
| Telha de fibrocimento                              | 0,65              |                        | 1600       |
| Tijolo maciço prensado                             | 0,72              | 1600                   | 921        |
| Vidro  | 0,8               | 2200                   |            |
| Argamassa de cimento                               | 0,85              | 1800                   | 754        |
| Tijolo de concreto furado (8 furos)                | 0,91              | 1700                   | 1005       |
| Telha de barro moldada (ou cerâmica)               | 0,93              |                        | 921        |
| Terra comprimida (bloco)                           | 1,15              | 1800                   | 837        |
| Concreto comum                                     | 1,28              | 2000                   | 1005       |
| Concreto aparente                                  | 1,65              | 2200                   | 1005       |
| Concreto armado                                    | 1,75              | 2400                   | 1005       |
| Pedras (mármore)                                   | 3,26              | 2700                   | 837        |
| Pedras (granito)                                   | 3,5               | 2700                   | 837        |
| Metais (aço)                                       | 52                | 7780                   |            |
| Metais (duralumínio)                               | 160               | 2800                   |            |
| Metais (alumínio)                                  | 230               | 2700                   |            |

Fonte: Adaptado de CTSB (1958) *apud* Frota & Schiffer (2001).

### 1.1.2. Convecção

A transferência de energia térmica por convecção ocorre entre um sólido e o fluido em movimento, e envolve os efeitos combinados da condução e do movimento do fluido. Tal movimento pode ser forçado, por exemplo com o uso de ventiladores ou pode ocorrer naturalmente com a ascensão do ar quente e queda do ar frio ocupando seu

lugar. Pela Lei de Newton do resfriamento, a taxa com a qual o calor por convecção é transferido depende da diferença de temperatura entre a superfície do sólido e do fluido, além de diversos outros fatores tais como a geometria da superfície, as propriedades, natureza do movimento e velocidade do escoamento do fluido. (Yunus A. Çengel, 2013)

Segundo Frota & Schiffer (2001), a intensidade da transferência térmica por convecção segue a expressão descrita abaixo.

$$q_c = h_c (t - \theta)$$

Onde:

$q_c$  = intensidade do fluxo térmico por convecção (W/m<sup>2</sup>)

$h_c$  = coeficiente de trocas térmicas por convecção (W/m<sup>2</sup>°C)

$t$  = temperatura do ar (°C)

$\theta$  = temperatura da superfície do sólido (parede) (°C)

Como observado, diversos fatores influentes na transferência de energia por convecção resumem-se em um coeficiente de trocas térmicas por convecção ( $h_c$ ) A Tabela 1-2 destaca valores típicos para este coeficiente.

Tabela 1-2: Valores típicos do coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m<sup>2</sup>°K)

| <b>Estado da matéria do fluido</b> | <b>Tipo de convecção</b> | <b>h (W/m<sup>2</sup>°K)</b> |
|------------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| Gasoso                             | Natural                  | 2 a 25                       |
| Gasoso                             | Forçada                  | 25 a 250                     |
| Líquido                            | Natural                  | 50 a 1.000                   |
| Líquido                            | Forçada                  | 50 a 20.000                  |

Fonte: Yunus A. Çengel (2013)

Entretanto, para uma determinação mais precisa do coeficiente Frota & Schiffer (2001), argumentam que a intensidade e sentido do vento desempenham papel importante. Em paredes verticais, as autoras defendem o valor do coeficiente sob convecção natural de  $4,7 \text{ W/m}^2\text{°C}$ , argumentando que este intensifica-se com o aumento da velocidade do ar incidente sobre a superfície segundo a Figura 1-3.

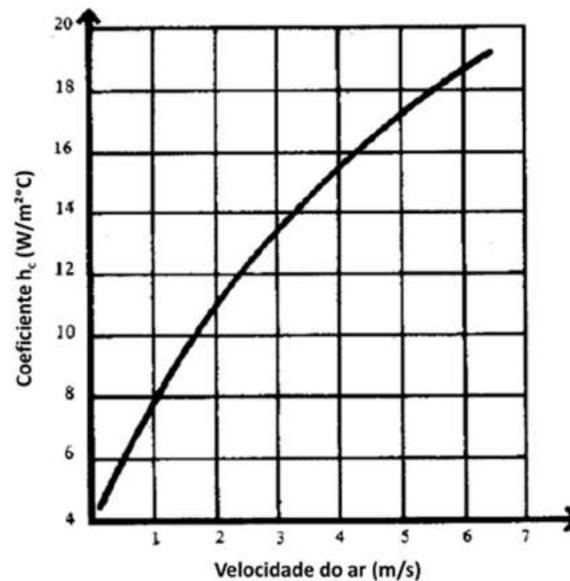


Figura 1-3: Transferência de energia Térmica por Condução

Fonte: Croiset (1972) *apud* Frota & Schiffer (2001)

Já para paredes horizontais, quando o fluxo é ascendente, as autoras argumentam que há coincidência com o natural deslocamento ascendente das massas de ar aquecidas, favorecendo a troca térmica ( $h_c = 7 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ). Por outro lado, quando o fluxo é descendente, há dificuldade na substituição da camada de ar, reduzindo a convecção ( $h_c = 1,2 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ). (Croiset, 1972 *apud* Frota & Schiffer ,2001).

### 1.1.3. Radiação

Ao contrário da condução e da convecção, a transferência de energia por radiação não exige a presença de um meio intermediário, podendo propagar-se no vácuo. Esta propriedade dificulta bastante a mensuração desta troca térmica, dado que esta troca pode ocorrer entre corpos a quilômetros de distância. A radiação térmica é emitida por todos os corpos com uma temperatura acima do zero absoluto. Pela Lei de Stefan-Boltzmann a radiação emitida ou absorvida por um corpo é proporcional a quarta potência da temperatura absoluta, a área e emissividade da superfície. Dessa forma, o saldo de transferência de energia por radiação em um corpo segue a relação: (Yunus A. Çengel, 2013)

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{viz}^4)$$

Onde:

$q_{rad}$  = intensidade do fluxo térmico por radiação (W/m<sup>2</sup>);

$\varepsilon$  = emissividade da superfície, cujo valor encontra-se entre 0 e 1, representando a similaridade do material da superfície a um corpo negro<sup>1</sup>;

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann, 5,67 x 10<sup>-8</sup> (W/m<sup>2</sup>°K<sup>4</sup>);

$T_s$  = Temperatura absoluta da superfície (°K);e

$T_{viz}$  = Temperatura absoluta média das superfícies vizinhas (°K) .

O sentido inverso da emissividade é a absorvidade, que é a fração da energia de radiação incidente sobre uma superfície que é absorvida por ela. Ambas propriedades dependem da temperatura e do comprimento de onda da radiação, porém na maioria das aplicações práticas emissividade e absorvidade são consideradas iguais e independentes das propriedades mencionadas (Yunus A. Çengel, 2013). Dentre os valores de emissividade destacados pelos autores, estão os referentes a pele humana( $\varepsilon=0,95$ ), solo ( $\varepsilon=0,93-0,96$ ), água ( $\varepsilon=0,96$ ) e vegetação ( $\varepsilon=0,92-0,96$ ). Outras referências coletadas por Frota & Schiffer (2001), descritas na Tabela 1-3 e

Tabela 1-4, descrevem magnitudes diferentes de radiação solar e radiação entre corpos, bem como a possibilidade de uso de cores para a alteração dos valores de absorção da radiação solar.

---

<sup>1</sup> Um corpo negro é aquele que emite e absorve toda a radiação que incide sobre ele ( $\alpha = \varepsilon=1$ ). (Yunus A. Çengel, 2013)

Tabela 1-3: Valores de Coeficientes de Absortividade e Emissividade

| Superfície                             | ( $\alpha$ )<br>Absorção para<br>radiação solar | ( $\alpha$ ) e ( $\epsilon$ )<br>para temperatura<br>entre 10 e 40°C |
|--|---|--|
| preto fosco                            | 0,85 — 0,95                                     | 0,90 — 0,98  |
| tijolo ou pedra ou telha cor vermelha  | 0,65 — 0,80                                     | 0,85 — 0,95  |
| tijolo ou pedra cor amarela, couro     | 0,50 — 0,70                                     | 0,85 — 0,95  |
| tijolo ou pedra ou telha cor amarela   | 0,30 — 0,50                                     | 0,40 — 0,60  |
| vidro da janela                        | transparente                                    | 0,90 — 0,95  |
| alumínio, ouro, bronze (brilhantes)    | 0,30 — 0,50                                     | 0,40 — 0,60  |
| latão, alumínio fosco, aço galvanizado | 0,40 — 0,65                                     | 0,20 — 0,30  |
| latão, cobre (polidos)                 | 0,30 — 0,50                                     | 0,02 — 0,05  |
| alumínio, cromo (polidos)              | 0,10 — 0,40                                     | 0,02 — 0,04  |

Fonte: Koenigsberger (1977 *apud* Frota & Schiffer (2001))

Tabela 1-4: Valores de Coeficiente de Absorção da Radiação Solar específico de pintura

| Cor                                      | ( $\alpha$ ) |
|--|--------------|
| branca                                   | 0,2 — 0,3    |
| amarela, laranja, vermelha-clara         | 0,3 — 0,5    |
| vermelha-escura, verde-clara, azul-clara | 0,5 — 0,7    |
| marrom-clara, verde-escura, azul-escura  | 0,7 — 0,9    |
| marrom-escura, preta                     | 0,9 — 1,0    |

Fonte: Croiset (1972 *apud* Frota & Schiffer (2001))

Dessa forma, a troca de energia térmica por radiação depende de uma série de fatores relacionados ao material, de acordo com sua similaridade a um corpo negro. Na prática, a radiação não é totalmente absorvida podendo passar através do corpo (corpos transparentes) ou ainda ser refletida (corpos opacos), conforme ilustrados na Figura 1-4.

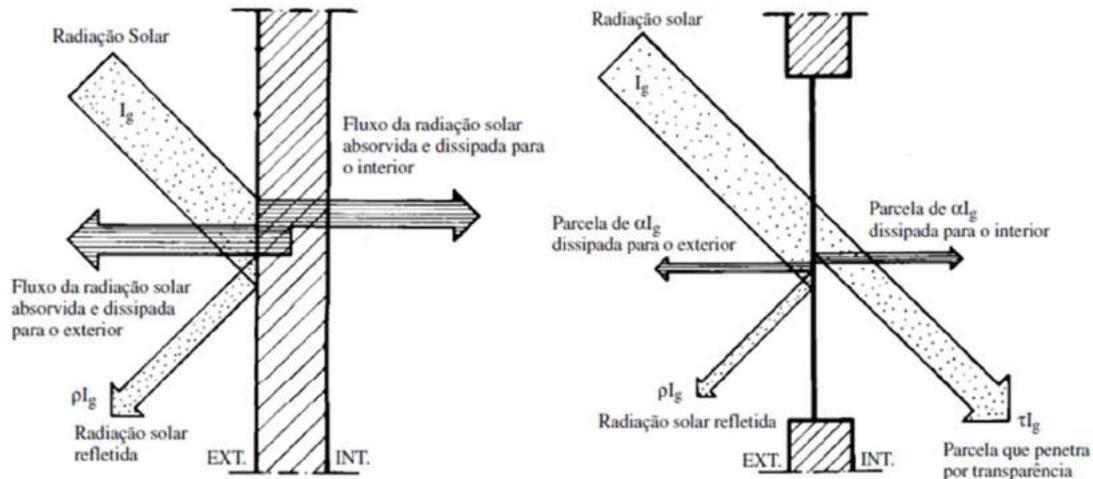


Figura 1-4: Trocas de energia por radiação em paredes

Fonte: Adaptado de Frota & Schiffer (2001)

Nota:  $\alpha$ ,  $\tau$  e  $\rho$  são adimensionais positivos, onde a soma delas equivale a unidade.

Portanto, as características construtivas das edificações são variáveis determinantes sobre a intensidade com as trocas de calor por condução, convecção e radiação ocorrem.

#### 1.1.4. Evaporação

Em função dos mecanismos de trocas térmicas secas anteriormente citados (condução, convecção e radiação), a energia absorvida por um líquido, a uma certa temperatura, pode desencadear um processo de evaporação caso a pressão do vapor atmosférico seja menor que a pressão de saturação do líquido. (Yunus A. Çengel, 2013)

Em escala microscópica, a temperatura de um líquido pode ser interpretada como a velocidade média das moléculas, porém individualmente há moléculas que apresentam velocidades superiores à média e outras mais lentas, conforme ilustrado na Figura 1-1. As moléculas mais rápidas podem possuir energia cinética suficiente para contrapor-se a atração exercida pelas moléculas vizinhas, quebrando as ligações de hidrogênio. Neste momento, a pressão atmosférica é superada e a molécula evapora. O líquido, por sua vez, perde energia cinética, a velocidade média das moléculas no líquido reduz, e portanto, há queda na temperatura. (Russell, 1994b)

O vento é outro aspecto influente sobre a taxa de evaporação, por possuir um efeito de resfriamento em função da sua velocidade. Segundo Auliciems & Szokolay (2007), durante a evaporação do suor, uma camada de ar praticamente saturado é formada na superfície do corpo, o que reduz a evaporação. Entretanto, o vento faz com que essa camada seja renovada, aumentando a taxa de evaporação. Dessa forma, além diferença

de temperatura entre os copos, a intensidade do vento contribui como fator influente tanto a troca térmica via convecção quanto na evaporação.

### 1.1.5. Condensação

Contrariamente à evaporação, a mudança de estado físico gasoso para líquido de forma gradual é a condensação. Quando a umidade relativa do ar se eleva a 100%, a temperatura em que ele se encontra é denominada ponto de orvalho, ponto a partir do qual inicia-se a condensação. (Frota & Schiffer, 2001)

A quantidade de umidade que o ar pode conter aumenta com a temperatura. Uma queda na temperatura do ar úmido reduz sua capacidade de retenção de umidade e pode resultar na condensação de parte da umidade do ar em forma de gotículas suspensas (neblina) ou como uma película de líquido sobre superfícies frias (orvalho). Dessa forma, em locais úmidos a ocorrência deste tipo de evento é comum, sobretudo no início da manhã quando as temperaturas são mais baixas. (Yunus A. Çengel, 2013)

Pelo gráfico psicrométrico ilustrado na Figura 1-5, a uma determinada pressão, se a temperatura vai esfriando o ponto vai caminhando para a esquerda até tocar na curva de saturação da pressão de vapor (ponto de orvalho). Se a temperatura continuar a abaixar, a pressão de vapor cairá ao longo da curva, sendo o deslocamento vertical a quantidade condensada. (Auliciems & Szokolay, 2007)

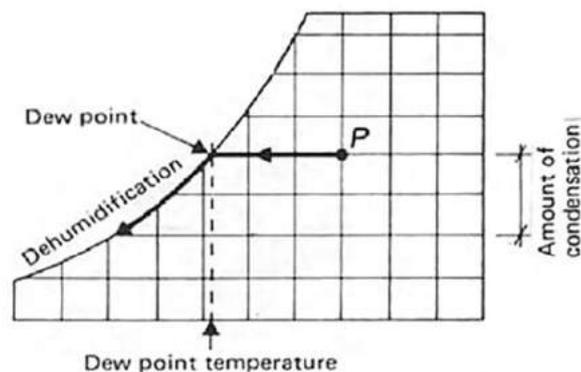


Figura 1-5: Gráfico psicrométrico de uma condensação

Fonte: Auliciems & Szokolay (2007)

### 1.1.6. Aspectos da Termodinâmica a considerar

A temperatura manifesta-se como a principal engrenagem das trocas de calor entre corpos. Não à toa, os diversos trabalhos da literatura consideram esta variável no cálculo do efeito do clima sobre a carga de energia. Entretanto, há outras variáveis que,

conjuntamente à temperatura, moldam a intensidade das trocas térmicas, conforme descrito ao longo da seção 1.1, devendo, portanto, serem avaliadas quanto a utilização.

## 1.2. Dimensão Climática

Segundo Romero (2000), todos os elementos meteorológicos e os fatores climáticos atuam em conjunto, sendo cada um deles a conjugação dos demais. Desta forma, a autora disserta sobre a dificuldade de consenso de uma classificação geral entre os diversos autores que tratam o tema. Entretanto, de forma didática, Romero(2000) argumenta que os fatores climáticos globais dão origem aos elementos meteorológicos, mas que estes podem ser alterados em função de fatores climáticos locais, conforme ilustrado na Figura 1-6.

Diversos são os modelos e especificações nos quais há limitações quanto ao uso de variáveis dependentes entre si para mensurar efeitos sobre a variável predita. Nesse sentido, entender a dependência entre as variáveis se faz necessária para a formulação adequada de um modelo.

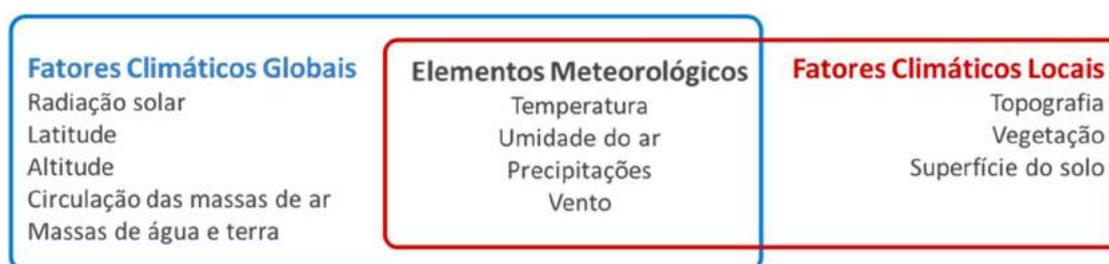


Figura 1-6: Fatores Climáticos e Elementos Meteorológicos

Fonte: Elaboração própria a partir de Romero(2000)

### 1.2.1. Fatores Climáticos Globais

#### 1.2.1.1. Radiação Solar

A radiação solar que penetra na atmosfera, sob influência dos diversos componentes do ar, altera seu espectro de frequências de ondas eletromagnéticas. O ozônio absorve parcela de radiação oriunda de ondas de menor frequência, enquanto o vapor d'água e o dióxido de carbono absorvem parcela dos raios infravermelhos. (Romero, 2000)

Os corpos após receberem radiação solar de onda curta, aquecem e emitem radiação de onda longa (Lamberts, et al., 2014). Desta forma, a presença de H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub> na atmosfera, gera o efeito estufa, fazendo com que a radiação solar originalmente de onda curta passe por uma série de ciclos de absorção e emissão até que seu comprimento de onda saia do espectro térmico.

A radiação solar é elemento chave para todos os elementos meteorológicos. Em

conjunto com a latitude, altitude e distribuição das massas de terra e água ao longo da superfície, a radiação solar faz com que haja gradientes de temperatura e pressão, formando a circulação das massas de ar atmosférica, além de ser a engrenagem para o ciclo da água no planeta.

### **1.2.1.2. Latitude**

A latitude é uma medida de afastamento da linha do equador, de forma que em latitudes mais altas (mais próximas dos polos) a temperatura tende a esfriar-se. (Romero, 2000)

A radiação solar incidente na atmosfera terrestre é o elemento climático mais previsível tendo sazonalidade definida pelos movimentos de translação e rotação da Terra bem como do ângulo de inclinação entre os eixos destes dois movimentos. Tal ângulo, de  $23,5^\circ$ , define a posição dos trópicos e faz com que os dois hemisférios recebam radiação diferente ao longo do ano. (Lamberts, et al., 2014)

As quatro posições notáveis do movimento de translação marcam as estações climáticas do ano. Nos solstícios, o Sol está perpendicular aos trópicos, devido ao grau de inclinação supracitado, recebendo inclusive mais radiação solar que o equador. Já nos equinócios, o ângulo não traz efeito sobre a radiação solar incidente, propiciando durações iguais entre dia e noite em ambos os hemisférios. (Lamberts, et al., 2014)

Se tomarmos um observador situado na Terra como referência, a posição aparente do Sol na abóboda celeste depende basicamente de dois ângulos: Altura Solar (H), o qual varia com o horário do dia, e o Azimute Solar (A), cujo valor varia o período do ano. A Figura 1-7 ilustra em seu lado direito um exemplo da posição aparente do Sol na latitude  $23,5^\circ$  do hemisfério Sul. Na figura, o azimute solar é representado nos solstícios e equinócios pelos arcos vermelho, verde e azul, ilustrando que na latitude exemplificada, em 21 de dezembro, o observador receberá o sol “a pino”. Já o ângulo denotado por altura solar mostra a posição do Sol ao longo de um mesmo arco, nascendo a leste e se pondo a oeste.

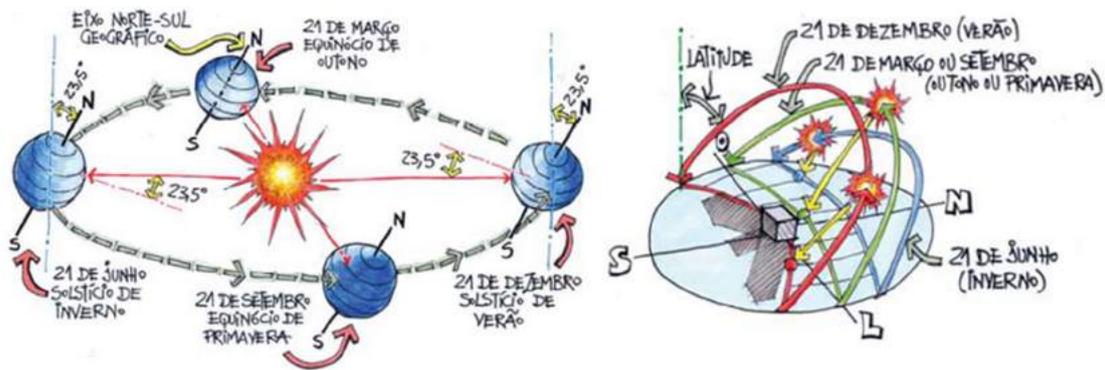


Figura 1-7: Efeito dos movimentos de translação e rotação sobre a abóboda celeste.

Fonte: Adaptado de Lamberts et al. (2014)

É importante ressaltar que a posição aparente do sol na abóboda celeste faz com que não só a duração da radiação solar seja alterada como também sua intensidade pois a medida que a altura solar varie, mais, ou menos espessa será a camada atmosférica na qual as ondas eletromagnéticas terão de atravessar. (Lamberts, et al., 2014)

Dessa forma, a latitude é o principal fator geográfico na determinação da intensidade e duração da radiação solar de determinada localidade.

### 1.2.1.3. Altitude

A altitude afeta diretamente a temperatura. O efeito, apesar de ser aproximadamente linear, não apresenta comportamento monotônico, conforme Figura 1-8. A composição química distinta das camadas atmosféricas propicia absorção diferenciada da radiação solar originando gradientes de temperatura diferentes entre as camadas. A luz ultravioleta é absorvida pelo ozônio na estratopausa, a luz visível é absorvida no solo e a maioria das outras frequências é absorvida na termosfera. (Stull, 2015)

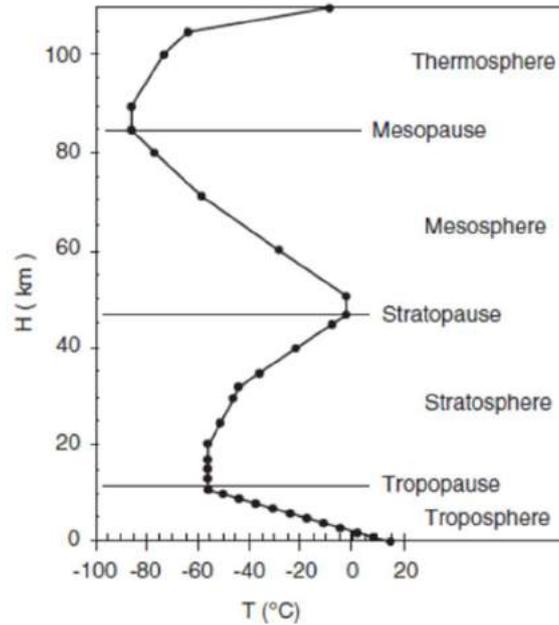


Figura 1-8: Variação da temperatura com a altitude.  
 Fonte: Stull (2015)

Desta forma, para o escopo do presente estudo, pode-se delimitar o gradiente vertical térmico na troposfera como linear seguindo a relação descrita por Stull (2015) de  $-6,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ .

Outro aspecto relevante está na influência da altura e rugosidade ( $Z_g$ ) do terreno sobre a intensidade do vento. A Figura 1-9 ilustra quão intenso torna-se o movimento do ar a medida em que a altura aumenta. Por outro lado, a geografia do terreno pode atenuar tal efeito quanto mais obstáculos à passagem do ar estiverem presentes.

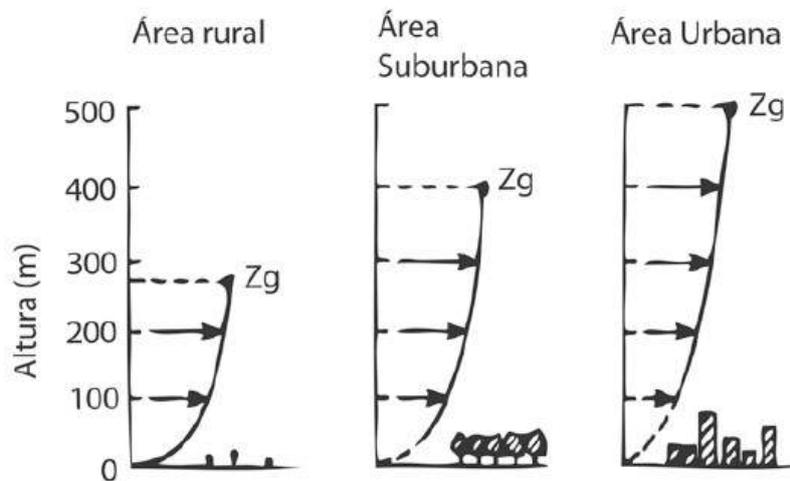


Figura 1-9: Variação da intensidade do vento com a altitude.  
 Fonte: PROCEL/ELETROBRAS (2013)

#### 1.2.1.4. Circulação das Massas de Ar

O aquecimento diferenciado entre as latitudes propicia pressões atmosféricas diferentes ao longo do globo terrestre. A circulação das massas de ar surge como uma tentativa natural de igualar tais diferenciais de aquecimento entre as latitudes, sempre no sentido de alta para baixa pressão. (Romero, 2000)

Em virtude do movimento de rotação da Terra, surge uma força, chamada de Força de Coriolis, que realiza um desvio no curso das massas de ar originais. Devido a isso, no hemisfério Sul, os ventos que vem do Leste detêm um efeito retardado enquanto os de Oeste, um efeito acelerado. (Romero, 2000)

A Figura 1-10 ilustra as células de circulação das massas de ar e o efeito de Coriolis no globo terrestre.

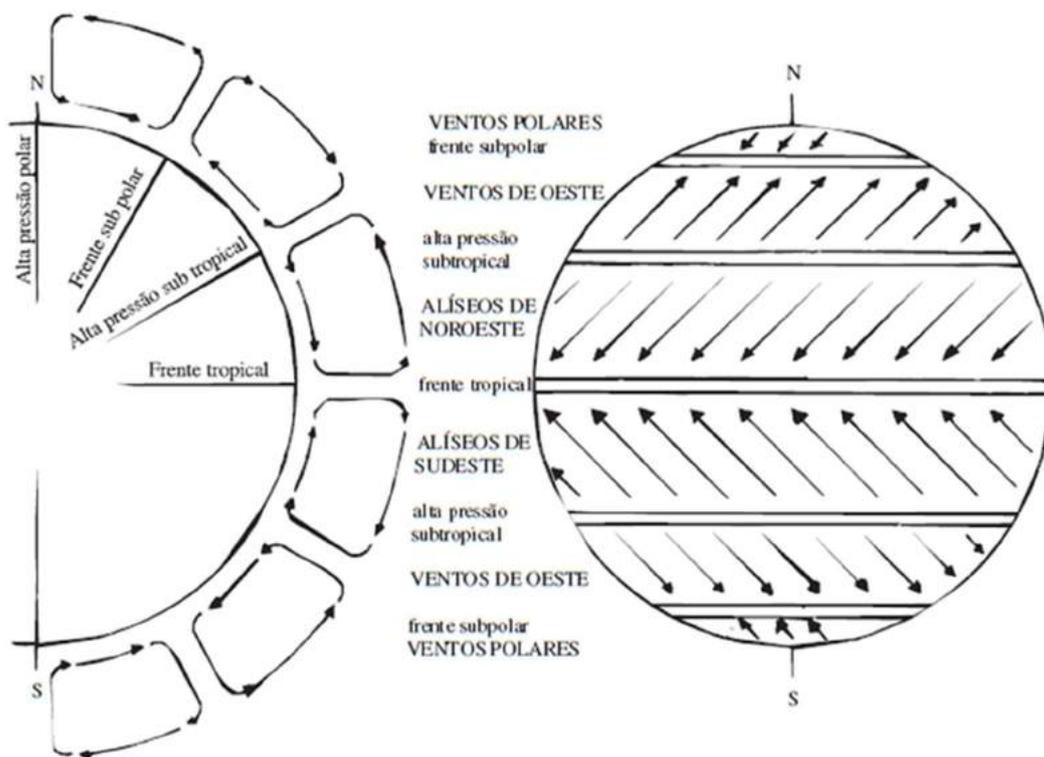


Figura 1-10: Circulação das massas de ar no globo terrestre.

Fonte: Koenigsberger (1977) *apud* Frota & Schiffer (2001)

#### 1.2.1.5. Distribuição das massas de água e terra

O calor específico da água é aproximadamente o dobro do da terra, ou seja, a água precisa de quase o dobro de energia térmica que a terra para uma mesma elevação de temperatura. De forma análoga, ao resfriar-se a água também perde grande quantidade de energia quando comparada a terra (Frota & Schiffer, 2001). Deste modo, a não

uniformidade de distribuição de massas de terra e água, combinado aos efeitos da altura, circulação das massas de ar e água, entre outros, propiciam temperaturas distintas, ainda que sobre um mesmo paralelo (Romero, 2000). Na Figura 1-11, percorrendo-se o traçado de um paralelo qualquer, é possível observar o efeito da distribuição desigual de terras e oceanos distorcendo as isotérmicas.

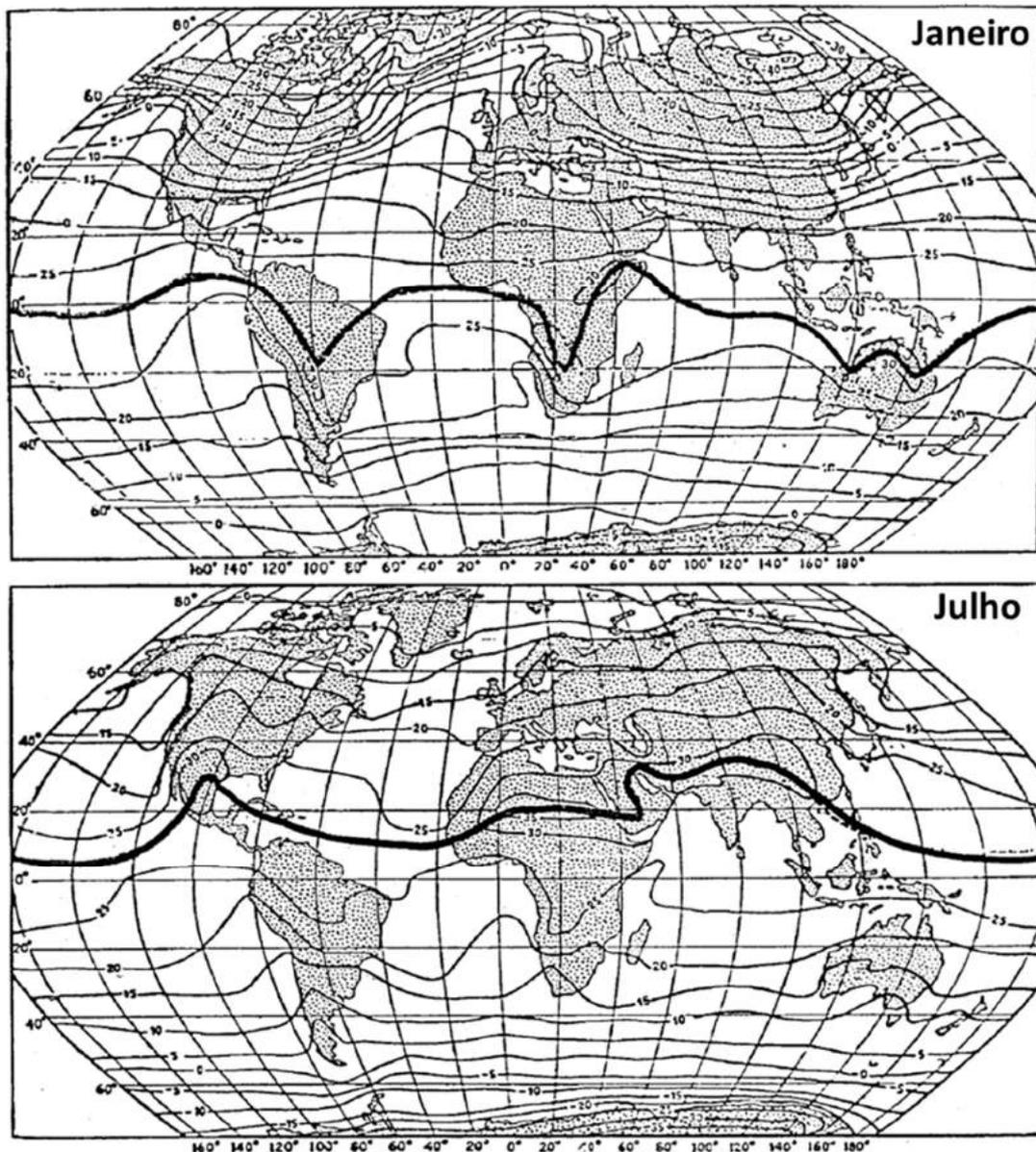


Figura 1-11: Circulação das massas de ar no globo terrestre.

Fonte: Adaptado de Albá Lleras (1960) *apud* Frota & Schiffer (2001)

Em escala local, o calor específico da água, superior ao da terra, gera brisas em regiões litorâneas. Durante o dia a terra aquece mais rapidamente que a água. O ar, ao aquecer, perde densidade dando lugar a um ar mais "pesado" (frio), advindo do mar. À noite, no entanto, o sentido se inverte pois a água por demorar mais a esfriar-se estará mais

quente propiciando a convecção em sentido oposto. (Frota & Schiffer, 2001)

## 1.2.2. Fatores Climáticos Locais

### 1.2.2.1. Topografia

Analogamente a escala global, a presença ou ausência de água na superfície no que tange ao conteúdo de umidade do solo, dreno do solo e posição do lençol freático é um dos fatores mais importantes na modificação do clima local (microclima). (Romero, 2000)

Entretanto, as elevações influenciam de forma significativa as terras baixas das proximidades. A chamada sombra de chuva, ilustrada na Figura 1-12, por exemplo, é um fenômeno que ocorre nas proximidades de uma elevação, onde o relevo força a massa de ar úmida a subir e neste processo, o ar esfriado provoca a condensação no lado mais quente. No Brasil, este fenômeno ocorre, por exemplo, na região nordestina em função das cadeias montanhosas ao longo da costa. (Romero, 2000)

De forma genérica, a disposição das barreiras naturais ou artificiais em relação a posição aparente do sol propicia radiação solar diferenciada, e portanto diferentes níveis de temperatura nas superfícies. Além disso, o relevo acidentado modifica o curso macro climático do vento alterando também os níveis de umidade e de temperatura em determinado local. (Frota & Schiffer, 2001)

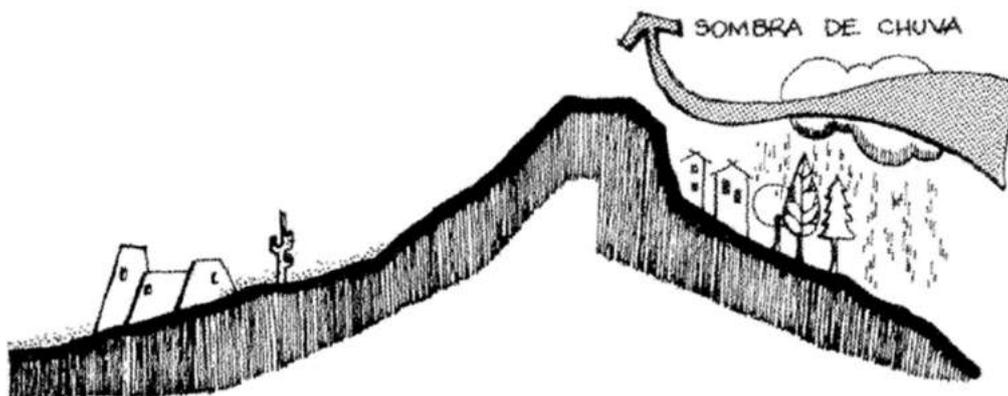


Figura 1-12: Fenômeno sombra de chuva.

Fonte: Romero (2000)

### 1.2.2.2. Vegetação e superfície do solo

A cobertura vegetal dos solos tende a estabilizar os efeitos do clima sobre seus arredores imediatos reduzindo extremos ambientais, como a diminuição da temperatura do ar. Um

espaço gramado possibilita absorção de maior quantidade de radiação devido a utilização em seu processo metabólico (fotossíntese), emitindo ao meio uma quantidade inferior de radiação e auxiliando na umidificação do ar através da evapotranspiração. (Romero, 2000)

Por outro lado, em uma superfície construída, toda a energia absorvida é transformada em calor. Dessa forma, o efeito do calor específico dos materiais e da taxa de reflexão da radiação (albedo das superfícies) traz alterações sobre os elementos meteorológicos locais. (Romero, 2000)

O processo de urbanização produz alterações no macro clima regional, as modificações podem ser tais que resultem em “ilhas de calor”. A presença de revestimento em concreto e asfalto das superfícies modifica a drenagem do solo e portanto as condições de umidade e amplitude térmica diária. Cidades são produtoras de calor advindo de equipamentos termoelétricos e de combustão para a produção de mercadorias e transporte de pessoas e cargas. A ventilação natural no interior do núcleo urbano é prejudicada em função do aumento da rugosidade e conseqüente desvio do curso natural dos ventos. A emissão de contaminantes modifica a composição química do ar, aumentando a probabilidade de precipitação e modificando a transparência da atmosfera. (Frota & Schiffer, 2001)

### **1.2.3. Elementos Meteorológicos**

O macro e micro clima formado pelos fatores climáticos moldam o comportamento dos elementos meteorológicos. Conforme visto, as diferenças de temperatura entre os corpos é a principal engrenagem para as trocas térmicas de energia. De fato, a temperatura do ar, pela predominante presença nos trabalhos acadêmicos, técnicos e científicos sobre o tema de conforto ambiental, aparenta ser o principal elemento climático a ser considerado. Entretanto, outros elementos interagem nesta troca, conforme descrito anteriormente. Além disso, é interessante ratificar que os elementos meteorológicos influenciam uns nos outros, sendo necessário seu detalhamento.

Os valores de temperatura oriundos da incidência desigual de radiação, dos diferentes coeficientes de absorção da radiação solar da matéria e dos diferentes tipos de solos e corpos d'água nas superfícies geram movimentos das massas de ar e água, que em

escala local traduzem-se nos elementos meteorológicos: ventos, umidade e precipitação. (Romero, 2000)

Quando a intensidade do movimento do ar é pequena, a temperatura é reflexo das variáveis climáticas locais. Por outro lado, em locais onde o vento é mais proeminente, os valores de temperatura do ar sofrem menos influência das condições climáticas locais. (Lamberts, et al., 2014)

A umidade contida no ar atmosférico origina-se majoritariamente da evapotranspiração dos vegetais e evaporação da água, as quais aumentam de intensidade com a temperatura e velocidade do vento. A capacidade do ar na retenção deste vapor d'água, ou seja, saturação, eleva-se de nível com o aumento de temperatura. No momento em que a umidade relativa alcança os 100%<sup>2</sup>, significa que o ar está saturado para aquela temperatura e que há iminência de condensação, manifestada, por exemplo, sob a forma de precipitação. (Romero, 2000)

A umidade relativa influencia a amplitude térmica diária. Quanto mais seco for o clima, mais acentuadas serão suas temperaturas extremas (máxima e mínima). Por outro lado, quanto mais úmido, maior será a quantidade de água em suspensão e menor amplitude térmica (Frota & Schiffer, 2001). Entretanto, menor amplitude térmica não significa, necessariamente, condições mais amenas de calor, visto que o vapor d'água absorve radiação infravermelha e portanto funciona como estufa da radiação emitida pela superfície ao longo do dia. Por outro lado, em locais de maior umidade relativa, a probabilidade de ocorrência de precipitação é maior. Esta ao ocorrer, cobre as superfícies com água, que devido ao seu elevado calor específico, atua amortecendo a radiação.

A título de exemplificação, a Figura 1-13 ilustra a dinâmica horária dos dados climáticos para o dia 08 de abril de 2019 da estação meteorológica do Forte de Copacabana no Rio de Janeiro. Neste dia é possível observar as dependências entre os elementos meteorológicos. A temperatura alcançou seu máximo às 10 horas da manhã, em movimento oposto ao da umidade relativa, dado que ao amanhecer a elevação da temperatura vai aumentando o ponto de orvalho. Ao longo do dia, sob ação da radiação solar, a água vai sendo evaporada, aumentando a concentração de vapor d'água no ar.

---

<sup>2</sup> Isto ocorre para o ar atmosférico padrão, podendo ocorrer antes de acordo com o grau de poluição do ar e portanto menos espaço para a retenção de vapor d'água. (Frota & Schiffer, 2001)

Quando a temperatura começa a decair, o ponto de saturação do ar vai reduzindo aumentando a umidade relativa até que se inicia o processo de condensação por volta das 18 horas. O vento por sua vez, devido a esta estação meteorológica ser litorânea, o vento é pouco influenciado pelas outras variáveis locais estando mais susceptível aos fatores climáticos de latitude e distribuição das massas de terra e água.

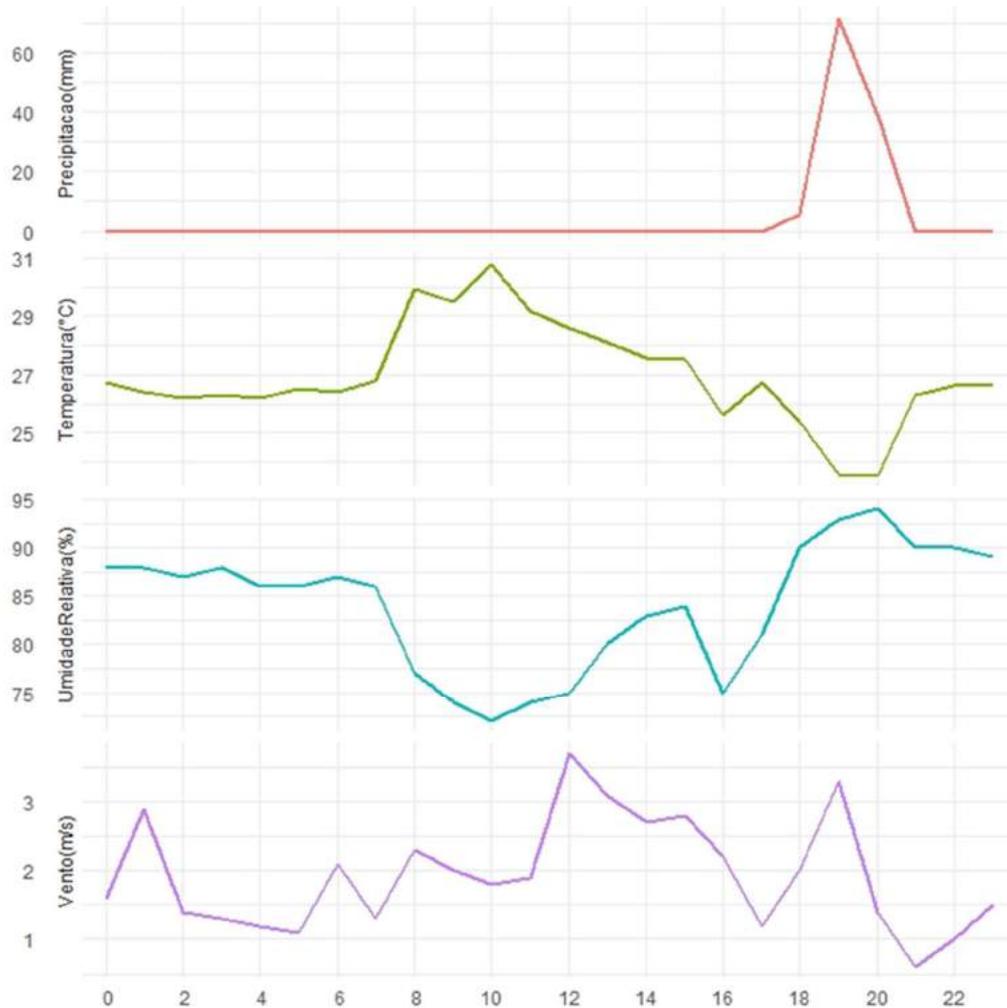


Figura 1-13: Dinâmica horária dos elementos meteorológicos .

Fonte: Elaboração própria a partir de INMET (2019c)

Nota: Dados do dia 08/04/2019 da estação meteorológica do Forte de Copacabana – RJ.

#### **1.2.4. Aspectos da Climatologia a considerar**

As variáveis climáticas são interdependentes, dificultando a consideração destas de forma separada na especificação de um modelo. Entretanto, a temperatura é insuficiente para mensuração das trocas térmicas, conforme detalhado na seção 1.1. Dessa forma, torna-se necessária a conversão dos efeitos das variáveis climáticas em uma única escala de desconforto térmico para que seja considerada no modelo.

### **1.3. Dimensão Comportamental**

#### **1.3.1. Corpo Humano visto como Máquina Térmica**

O organismo humano assemelha-se a uma máquina térmica que converte insumos em energia interna necessária ao pleno funcionamento do corpo. O carbono, presente nos alimentos ingeridos, aliado ao oxigênio, extraído do ar na respiração, são os insumos deste processo. Entretanto, tal processo, chamado metabolismo, está sujeito a um rendimento, onde somente 20% dessa energia é transformada em potencialidade de trabalho, sendo os 80% restantes convertidos em calor. (Frota & Schiffer, 2001)

O homem é um ser homeotérmico, ou seja, mantém sua temperatura corporal interna constante em torno de 37°C. Apesar disso, a temperatura da pele varia de 31-34°C em uma situação de conforto. Dessa forma, há transferência de energia continuamente do núcleo do corpo até a superfície onde é dissipada por radiação, convecção e/ou evaporação. (Auliciems & Szokolay, 2007)

A taxa de dissipação de calor é regulável e depende de fatores ambientais. Dentre eles, o fator mais importante é a temperatura do ar, medido pela temperatura de bulbo seco. Ela determina a dissipação de calor por convecção, juntamente com o vento. Este, por sua vez, corrobora para a redução da resistência térmica da superfície do corpo além de afetar a evaporação da umidade da pele, juntamente com a umidade do ar. A troca por radiação dependerá da temperatura média das superfícies circundantes. (Auliciems & Szokolay, 2007)

Por outro lado, os fatores pessoais também influenciam na preferência térmica dos indivíduos. A taxa metabólica varia com a atividade física, mas também pode ser influenciada pelos tipos de alimentos e bebidas ingeridos, além do estado de aclimação. A produção de calor é proporcional à massa corporal, mas a dissipação desse calor depende da superfície corporal bem como da gordura subcutânea. Outros

aspectos como idade e gênero também afetam as preferências térmicas. Em idosos estudos indicam uma faixa de condições de conforto mais estreitas. Mulheres preferem uma temperatura de 1°C mais alta que os homens, embora alguns autores afirmem que isso se deva apenas a diferenças na vestimenta. (Auliciems & Szokolay, 2007)

Em síntese, o fluxo da energia térmica sempre segue a direção do interior do corpo humano para o ambiente circundante a uma determinada taxa de dissipação sujeita a influências de fatores pessoais e ambientais. Dessa forma, a sensação de conforto térmico humano ocorre mesmo quando há perda de calor do corpo para o ambiente, porém sem a atuação de qualquer mecanismo de termorregulação. Por outro lado, se houver alteração da taxa de dissipação de calor pelo corpo, mecanismos termorreguladores são recrutados a fim de manter a temperatura corporal interior constante.

Quando as perdas de calor são inferiores as necessárias para a manutenção de sua temperatura interna, há uma sensação de calor no corpo, os vasos sanguíneos subcutâneos se expandem (vasodilatação) aumentando o suprimento sanguíneo na pele. Isto intensifica a troca de calor do corpo para a pele, incrementando a dissipação para o meio ambiente. Caso a vasodilatação não seja suficiente, inicia-se o processo de resfriamento evaporativo (Auliciems & Szokolay, 2007). Além disso, há redução das combustões internas (termólise) a fim de reduzir a taxa metabólica. Se os mecanismos termorreguladores supracitados não conseguirem restaurar a condição de equilíbrio, o corpo entra em estado de hipertermia. Neste estado a temperatura interna aumenta podendo alcançar a níveis críticos (aproximadamente 42°C) e consequente óbito. (Frota & Schiffer, 2001)

Quando as condições ambientais proporcionam perdas de calor do corpo além das necessárias para a manutenção de sua temperatura interna, há uma sensação de frio no corpo, diversos mecanismos termorreguladores são acionados: os vasos sanguíneos subcutâneos se contraem (vasoconstrição) reduzindo a circulação na pele e consequente dissipação para o ambiente, a tensão muscular e tremores aquecem a pele por atrito, os pelos arrepiados dificultam a troca da camada de ar próxima a pele “aprisionada” nos pelos. Além disso, a termogênese, que se configura pelo aumento da produção de calor metabólico, pode incrementar em até 10 vezes a produção de calor. Se esses ajustes fisiológicos não forem suficientes, ocorre hipotermia. A temperatura interna vai caindo

podendo levar ao óbito aos 25-30°C. (Auliciems & Szokolay, 2007)

Além das consequências extremas mencionadas acima, diversas outras motivações têm exigido a mensuração das trocas térmicas entre homem e clima. Em 1916, estudos da ASHVE foram elaborados com o intuito de determinar a influência do clima sobre o rendimento no trabalho. Questões relacionadas ao aumento da produção, rendimento do trabalho físico do operário e às situações especiais de guerra, quando as tropas são deslocadas para regiões de diferentes tipos de clima foram catalisadoras do tema na instituição. Na Inglaterra, estudos demonstraram menor rendimento do trabalho em minas quando em temperaturas mais elevadas. De maneira mais ampla, foram observadas variações no rendimento do trabalho de acordo com as estações do ano, além de maior índices de acidentes do trabalho em ambientes termicamente desconfortáveis. (Frota & Schiffer, 2001)

Atualmente, segundo Auliciems & Szokolay (2007), diversas são as motivações para a mensuração da relação entre clima e conforto térmico tais como: definir limites de exposição térmica, definir limites de conforto, avaliação de exposições passadas, determinar as medidas de controle ideais (por exemplo, escolha entre ventilação ou ar condicionado), limites de calor radiante na indústria, classificação de zonas climáticas.

### 1.3.2. Teoria dos índices de conforto térmico

Para quantificar a influência das condições térmicas de um ambiente no homem é preciso mediar as variáveis do ambiente, medir a reação humana à ação destas variáveis e expressar a relação entre causa e efeito com o emprego de um único valor numérico, quando possível. (Romero, 2000).

Uma das formas de avaliação do conforto térmico dos indivíduos está na aplicação de questionários concomitante a medições das condições ambientais em espaço controlado ou a céu aberto. Segundo ASHRAE 55 (2010), pode-se marcar em uma escala de 7 categorias a sensação térmica, conforme Figura 1-19.



Figura 1-14: Escala de Conforto Térmico da ASHRAE.

Fonte: Elaboração própria a partir de ASHRAE 55 (2010)

Entretanto, responder a questionários implica em julgamento subjetivo, experiências passadas e fatores socioculturais que podem influenciar a preferência térmica efetiva das

pessoas. (Auliciems & Szokolay, 2007)

Outros métodos consistem na medição, em ambientes controlados, de alterações fisiológicas, como temperatura e umidade da pele e sudorese.

Apesar da diferença, os dois métodos foram os alicerces para a pesquisa e construção de diversos índices de conforto térmico ao longo do tempo. É importante pontuar que, em geral, os índices não são aplicáveis a situações e locais diferentes dos originais sendo criados para propósitos específicos, como por exemplo: níveis limites de estresse térmico na indústria para uma dada atividade e a vestimenta padrão. Segundo Frota & Schiffer (2001), os índices são desenvolvidos fixando um tipo de atividade e a vestimenta utilizada pelo indivíduo para, a partir daí, relacionar as variáveis do ambiente e reunir, sob a forma de cartas ou nomogramas, as diversas condições ambientais que proporcionam respostas iguais por parte dos indivíduos.

Segundo Romero (2000), os índices de conforto térmico podem ser extremamente eficazes para situações específicas, mas não são amplamente aplicáveis, sobretudo em locais onde o clima distancia-se das condições climáticas de origem.

Apesar da especificidade, a cada índice publicado foram sendo identificadas novas variáveis influentes sobre o conforto térmico humano e com isso, de forma analítica, foram propostos modelos de trocas térmicas que englobassem cada vez mais variáveis relevantes.

O primeiro modelo de balanço térmico generalizado foi proposto por Gagge (1936) através da seguinte expressão:

$$\Delta S = M \pm R \pm C - E$$

Onde:

$\Delta S$  = variação no calor armazenado no corpo;

M = taxa metabólica;

R = trocas de calor por radiação;

C = trocas de calor convecção; e

E = calor perdido por evaporação.

A troca de calor por condução foi admitida como insignificante, premissa que até hoje é considerada pelos modelos de trocas térmicas. Segundo Auliciems & Szokolay (2007), as parcelas da equação foram moldando e sendo moldadas pelos índices de conforto térmico até chegar em duas abordagens principais:

- 1) Modelo de Dois Nós;
- 2) Equação de Conforto de Fanger.

Auliciems & Szokolay (2007) argumentam que a equação de conforto de Fanger é provavelmente a análise mais meticulosa e detalhada da relação térmica humana com o ambiente proximal. O índice analítico o PMV (Voto Médio Previsto) relacionado ao PPD (Porcentagem Prevista Insatisfeita) formam a base da ISO 7730:1994 – “Determinação dos índices PMV e PPD e especificação de condições para aquecimento térmico, conforto, bem como vários padrões nacionais”. Por outro lado, o modelo de dois nós e os índices de conforto derivados deste modelo formam a base do padrão ASHRAE 55 (1992) – “Condições Térmicas Ambientais para Ocupação Humana”.

Na atualidade, internacionalmente, os dois modelos são válidos para a avaliação do conforto térmico dos ambientes, ancorando algumas tratativas também das Normas Brasileiras, como por exemplo a norma de desempenho térmico em edificações NBR 15220. Entretanto, o índice PMV de Fanger ainda sofre críticas na literatura:

- Williamson (1995) mostra que o PMV superestima fortemente o desconforto quente, especialmente em clima quentes.
- Karyono (1996) descobriu que pessoas em ambientes quentes e úmidos preferem temperaturas até 6°K mais altas que a ISO.

Portanto, a presente dissertação frente a pluralidade cultural e climática brasileira evita o uso dos índices de conforto térmico criados, dando preferência ao uso das equações de balanço térmico, sobretudo o modelo de dois nós.

### **1.3.3. O modelo de dois nós**

O modelo divide o problema em dois blocos: transferência de calor do núcleo do corpo para o ambiente e transferência de calor da pele para o ambiente. Para estimar tais transferências, além das variáveis climáticas, é necessária a adoção de parâmetros, detalhados nos ANEXOS I, II e III, relacionados à atividade exercida, vestimentas utilizadas, área da superfície corporal bem como a fração da superfície corporal exposta às trocas térmicas. A Figura 1-20 ilustra as variáveis inerentes ao modelo.

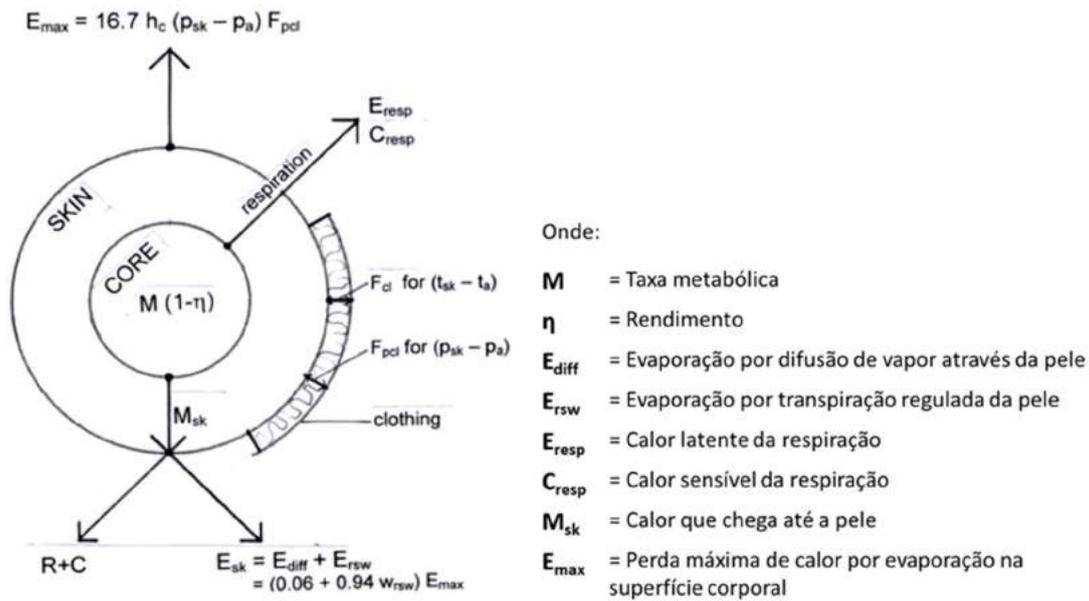


Figura 1-15: Resumo do modelo de dois nós.

Fonte: : Elaboração própria a partir de Auliciems & Szokolay (2007)

A produção de energia pelo metabolismo ( $M$ ) é convertida em trabalho mecânico a uma certa eficiência ( $\eta$ ). Portanto, a quantidade de calor produzido no núcleo do corpo pode ser descrita como  $M \cdot (1 - \eta)$ . Todo o calor produzido tende a ser dissipado na superfície do corpo ou durante o processo respiratório.

Durante a respiração há troca de calor sensível, pois o ar é inspirado a uma certa temperatura ( $T_a$  em  $^{\circ}\text{C}$ ) e posteriormente expirado com temperatura superior ( $34^{\circ}\text{C}$ ). Por outro lado, também há troca de calor latente devido a diferença de pressão de vapor entre pulmões<sup>3</sup> e ar atmosférico (kPa). A velocidade com que tais trocas térmicas ocorrem é influenciada pela atividade a qual o indivíduo está exercendo, e portanto sua taxa metabólica. Neste sentido, as expressões de troca de calor sensível ( $C_{resp}$ ) e latente ( $E_{resp}$ ) na respiração são descritas como:

$$C_{resp} = 0,0014 \cdot M \cdot (34 - T_a)$$

$$E_{resp} = 0,0173 \cdot M \cdot (5,87 - P_a)$$

Subtraindo estas parcelas do montante de calor produzido, obtém-se o total de calor que chega até a pele:

$$M_{sk} = M \cdot (1 - \eta) - C_{resp} - E_{resp}$$

Parte deste montante é perdido ainda por um processo de evaporação na pele que ocorre

<sup>3</sup> Saturação da pressão de vapor pulmonar à temperatura de  $35^{\circ}\text{C}$

na parte da superfície coberta por roupas ( $E_{diff}$ ) e na parte descoberta ( $E_{rsw}$ ). Entretanto, a soma destas parcelas de evaporação pode alcançar no máximo ( $E_{max}$ ). As equações que regem tais parcelas seguem descritas abaixo:

$$E_{max} = 16,7 \cdot h_c \cdot (P_{sk} - P_a) \cdot F_{pcl}$$

$$E_{rsw} = w_{rsw} \cdot E_{max}$$

$$E_{diff} = (1 - w_{rsw}) \cdot 0,06 \cdot E_{max}$$

Onde:

16,7 = Relação de Lewis entre os coeficientes de evaporação e convecção ao nível do mar [ $^{\circ}\text{K}/\text{kPa}$ ]

$h_c$  = Condutância da convecção da superfície para o ar [ $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ ]

$P_{sk}$  = Saturação da pressão de vapor na temperatura média da pele (Pressão de saturação a  $35^{\circ}\text{C} = 5,6\text{kPa}$ ).

$P_a$  = Pressão de saturação ambiente [ $\text{kPa}$ ]

$F_{pcl}$  = Eficiência da permeabilidade de vapor através da roupa

$w_{rsw}$  = fração da área do corpo suada e exposta

Por fim, transferência de calor sensível dissipada por radiação (R) e convecção (C) são influenciadas pela diferença de temperatura entre a pele e o ar ambiente, pelas condutâncias de convecção( $h_c$ ) e radiação( $h_r$ ) e pelo fator de isolamento da roupa (Fcl).

$$R + C = (h_r + h_c) \cdot (T_{sk} - T_a) \cdot F_{cl}$$

Embora grande parte da transferência de calor ocorra através das próprias fibras, quase toda a transferência de umidade atua por difusão de vapor através dos poros do tecido. Todos os tecidos, dependendo do seu grau de isolamento ( $clo$ )<sup>4</sup>, possuem determinado percentual de fibras por volume, sendo o restante do espaço ocupado por ar. Este auxilia o isolamento do tecido, porém quando o usuário está exposto ao movimento do ar, ou ainda quando o próprio usuário se movimenta, parte deste isolamento do ar é perdido. As equações que descrevem a medida de eficiência da permeabilidade de vapor através da roupa ( $F_{pcl}$ ) e do valor de isolamento da vestimenta (Fcl) seguem abaixo:

$$F_{pcl} = \frac{1}{1 + 0,344 \cdot h_c \cdot clo}$$

---

<sup>4</sup> A unidade “clo” corresponde a uma cobertura isolante sobre todo o corpo de uma resistência de  $0,155 \text{ m}^2 \text{ }^{\circ}\text{K}/\text{W}$

$$F_{cl} = \frac{1}{1 + 0,155 \cdot (h_r + h_c) \cdot clo}$$

Segundo Auliciems & Szokolay (2007), a condutância da convecção da superfície para o ar ( $h_c$ ) geralmente assume valor de 3,3 W/m<sup>2</sup>°C. e que as condutâncias de convecção e radiação, em conjunto ( $h_c+h_r$ ), somam 8 W/m<sup>2</sup>°C. Esta soma de condutâncias de convecção e radiação é tratada em Frota & Schiffer (2001) como a condutância superficial externa ( $h_e$ ) em uma edificação, na qual de acordo com a Tabela 1-5 ratifica o valor definido por Auliciems & Szokolay (2007) como ar calmo.

Tabela 1-5: Variação da condutância térmica superficial externa

| Tipo de vento          | Velocidade do vento (m/s) | $h_e$ (W/m <sup>2</sup> °C) |
|------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| ar calmo               | 0,1                       | 8                           |
| velocidade muito fraca | 0,5                       | 10                          |
| velocidade fraca       | 1                         | 13                          |
| velocidade média       | 3                         | 21                          |
| velocidade forte       | 9                         | 35                          |
| velocidade muito forte | 18                        | 50                          |

Fonte: CTSB (1958) *apud* Frota & Schiffer (2001)

A termodinâmica apresentada nas seções anteriores, cuja indicação é de maior influência do vento sobre a parcela convectiva na troca de calor sensível, aliada aos valores de referência supracitados permitem a segmentação da condutância superficial externa. Na condição de ar calmo, a medida da condutância de radiação típica pode ser obtida pela subtração de valores típicos  $h_e$  e  $h_c$  na condição de ar calmo. Portanto,  $h_r=4,7$  W/m<sup>2</sup>°C. Já a condutância de convecção( $h_c$ ) pode ser obtida pela diferença entre o valor de  $h_e$  interpolado da Tabela 1-5 e a condutância de radiação típica calculada ( $h_r$ ), conforme equação:

$$h_c = (8,6494105415 + 3,7944442139 \cdot v - 0,0838050870 \cdot v^2) - h_r$$

Em síntese, o modelo de dois nós, de forma fisiológica, considerando todas as parcelas de produção e dissipação de calor em sua equação de balanço térmico, indica se há ou não conforto térmico. A equação, em função das variáveis climáticas cotidianas: temperatura, umidade relativa e intensidade do vento, pode ser expressa como:

$$\Delta S = M \cdot (1 - \eta) - C_{resp} - E_{resp} - E_{diff} - E_{rsw} - R - C$$

Onde:

$$C_{resp} = 0,0014.M.(34 - T_a)$$

$$E_{resp} = 0,0173.M.\left(5,87 - \frac{UR}{100} * 0,133322 * e^{\left(18,6686 - \frac{4030,183}{T_a + 235}\right)}\right)$$

$$E_{diff} + E_{rsw} = (0,94.w + 0,06) \cdot \frac{16,7.(8,6494 + 3,7944.v - 0,0838.v^2 - 4,7) \cdot \left(5,6 - \frac{UR}{100} * 0,133322 * e^{\left(18,6686 - \frac{4030,183}{T_a + 235}\right)}\right)}{1 + 0,344.(8,6494 + 3,7944.v - 0,0838.v^2 - 4,7).clo}$$

$$R + C = (34 - T_a) \cdot \frac{(8,6494 + 3,7944.v - 0,0838.v^2)}{1 + 0,155.(8,6494 + 3,7944.v - 0,0838.v^2).clo}$$

#### 1.3.4. Aspectos Comportamentais a considerar

Os diversos índices de conforto e equações de balanço térmico criados ao longo do tempo possibilitam a composição de diversas variáveis climáticas em uma única escala de desconforto térmico, considerando aspectos comportamentais como a atividade exercida além da vestimenta utilizada pelos indivíduos. Entretanto, os valores climáticos medidos nas estações meteorológicas devem ser transpostos para o ambiente interno às edificações, onde, de fato, os indivíduos estão propensos a acionar seus equipamentos elétricos de controle térmico.

## **1.4. Dimensão Arquitetônica**

### **1.4.1. Aspectos Construtivos**

A racionalização do uso da energia apresenta estreitos laços com a adequação da arquitetura ao clima. Cabe à arquitetura amenizar as sensações de desconforto impostas pelos elementos meteorológicos, os quais condicionam o ambiente em que o homem desenvolve suas atividades. (Romero, 2000)

A adoção de propostas arquitetônicas que maximizem o desempenho térmico natural das edificações, ainda que não seja suficiente, deve sempre ser levadas em consideração a fim de possibilitar a redução do consumo de energia elétrica destinado ao conforto térmico interno da edificação. (Frota & Schiffer, 2001)

Como visto, a sazonalidade climática é fruto das diversas consequências dos fatores climáticos e elementos meteorológicos, tendo como ponto de partida o movimento de translação da Terra ao redor do Sol. Deste fato, decorre a solução de compromisso das diversas estratégias arquitetônicas, as quais podem ser soluções ou problemas dependendo da época do ano.

A radiação solar, por exemplo, pode ser desejável no inverno e excessiva no verão. Dentre as estratégias de controle da radiação incidente sobre uma edificação está o uso da vegetação. Em locais arborizados, a vegetação pode interceptar entre 60-90% da radiação solar causando redução substancial da temperatura da superfície do solo. Outra característica interessante da vegetação, sobretudo de folhagem caducifólia<sup>5</sup>, é da possibilidade de sombreamento no verão e da passagem do sol no inverno. (Lamberts, et al., 2014)

A radiação transmitida para o interior é a principal fração dos ganhos térmicos das edificações. Entretanto, o uso de proteções solares internas ou externas, como cortinas, persianas, toldos, dentre outros, podem atenuar este efeito. Adicionalmente, alguns materiais possuem baixa condutividade térmica, os quais podem trazer inércia térmica à construção. Materiais porosos, os quais possuem ar parado nos poros e portanto baixa densidade, detém este tipo de característica, por exemplo. (Lamberts, et al., 2014)

Por outro lado, bloquear a radiação solar pode levar a redução de incidência de luz

---

<sup>5</sup> Folhas caducas caracterizam-se por cair na estação do inverno, voltando a brotar somente na primavera.

natural no interior dos ambientes. Determinados tipos de vidro podem filtrar a radiação de onda longa, permitindo assim a passagem da luz visível para o interior, porém há de se avaliar o uso de tais elementos, pois os corpos, dispostos nos cômodos da edificação, após receberem radiação solar de onda curta, aquecem e emitem radiação solar de onda longa podendo, esta, ficar aprisionada e superaquecer o ambiente interno. (Lamberts, et al., 2014)

Desta forma, a curva de temperatura do ar interior pode ser alterada em função da característica construtiva da envoltória da edificação e de sua orientação cardinal. A variação da temperatura externa ocorre mais rapidamente que a interna, pois o fluxo de calor que penetra a parede deve primeiro aquecê-la antes de atravessá-la. A esta defasagem e atenuação da temperatura atribui-se o nome de inércia térmica, a qual é função da densidade, condutibilidade e do calor específico dos materiais da edificação (Frota & Schiffer, 2001). A Figura 1-14 ilustra o conceito da inércia térmica comparando as curvas de temperatura interna e externa de uma edificação ao longo das horas do dia. É interessante ratificar que os valores médios diários de temperatura interna e externa são iguais, porém o horário de ocorrência do pico de temperatura bem como sua magnitude são diferentes. Valores de defasagem e atenuação podem ser obtidos através da norma de desempenho térmica das edificações NBR 15220-2.

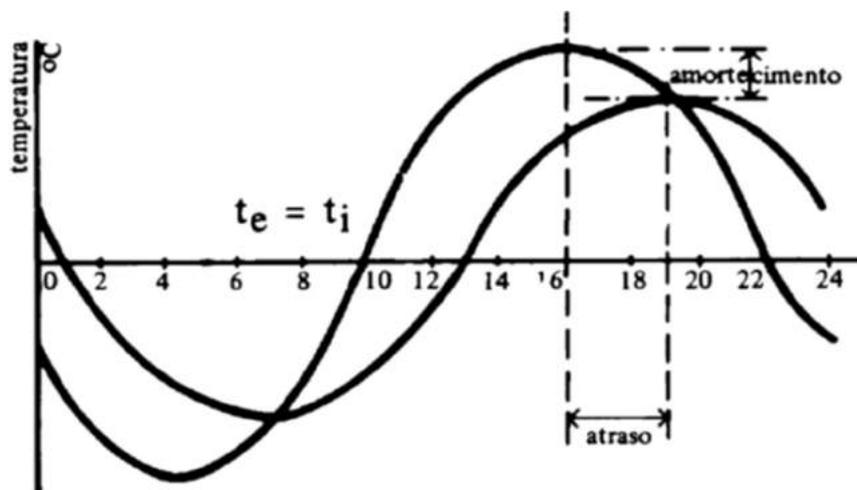


Figura 1-16: Curvas de variação de temperaturas externa e interna de uma edificação .

Fonte: Frota & Schiffer (2001)

Assim como a radiação, a ventilação natural, pode ser desejável no verão e indesejável no inverno. Ambos são influenciados não só pela orientação geográfica da edificação como pelo aspecto urbanístico na qual está inserida. Os dados de vento relacionados a

direção, intensidade e frequência, em uma determinada região, podem ser representados pela rosa dos ventos, tal como apresentado na Figura 1-15.

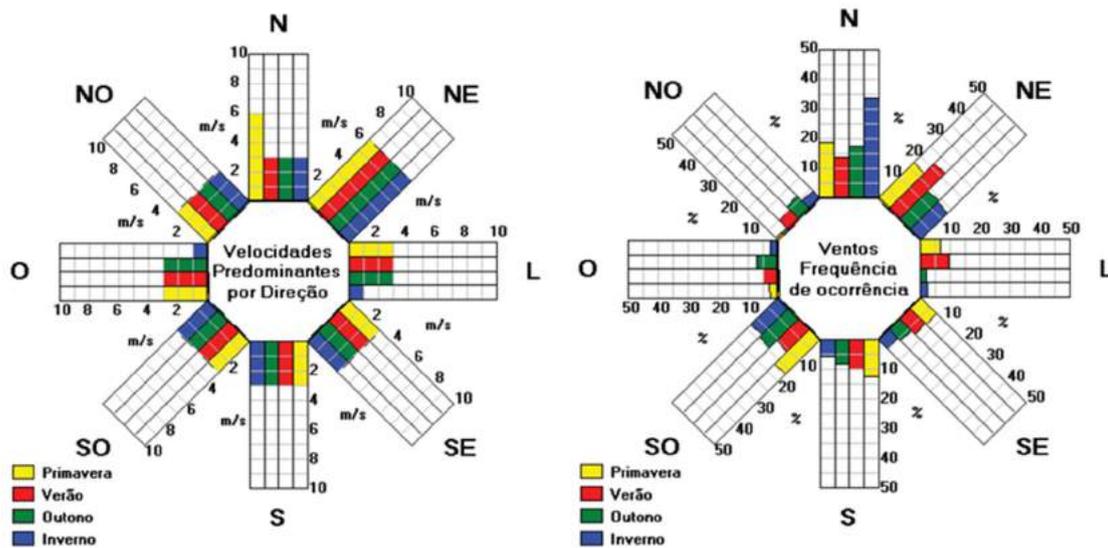


Figura 1-17: Rosa dos ventos para a cidade Florianópolis .

Fonte: Lamberts, et al. (2014)

É importante pontuar que os dados de vento assim como os demais dados de elementos meteorológicos são aferidos em estações meteorológicas, instaladas em área livre de obstruções naturais e prediais, com instrumentos de medição situados a 10 metros de altura, com exceção das medições de chuva e radiação solar, cuja medição é realizada ao nível do solo. (INMET, 2011)

Entretanto, é possível corrigir a velocidade do vento na altura da abertura da entrada de ar das edificações pela expressão abaixo, considerando os valores dos coeficientes de rugosidade do terreno, conforme ilustrado na Figura 1-16. (Bittercourt & Cândido, 2010)

$$\frac{V}{V_m} = k \cdot z^a$$

Onde:

V = velocidade corrigida;

V<sub>m</sub> = velocidade da estação meteorológica;

k, a = coeficientes de acordo com a rugosidade do terreno; e

z = altura da abertura das janelas.

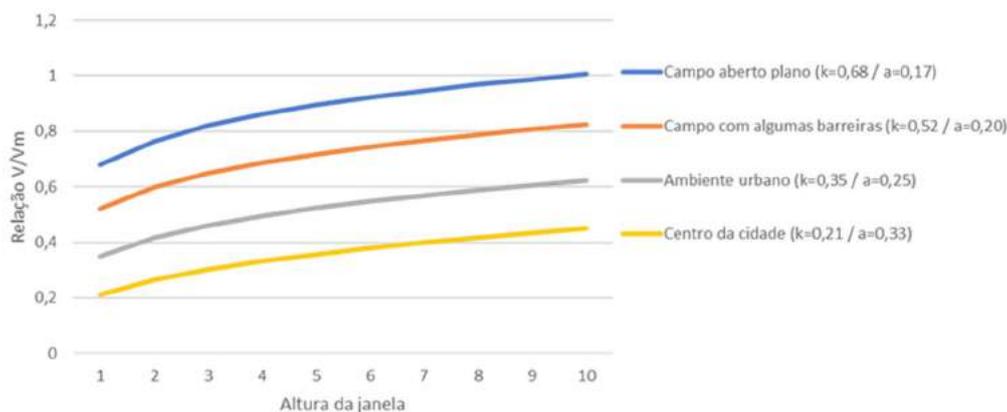


Figura 1-18: Fator de correção da velocidade do vento para a abertura da entrada de ar .

Fonte: Elaboração própria a partir de Bittercourt & Cândido (2010)

Apesar do ajuste da velocidade do vento para a entrada de ar nas edificações, em um projeto segundo Lamberts *et al.* (2014), há de se considerar adicionalmente outros aspectos como o ângulo de incidência do vento sobre as janelas, área útil de ventilação, barreiras de vegetação ou outras edificações, dentre outros.

Além da adequação dos elementos meteorológicos para as condições internas de uma edificação, outras questões são relevantes na determinação da carga térmica dos ambientes construídos tais como: a taxa de ocupação, atividade exercida pelos ocupantes, a iluminação artificial, motores e equipamentos. (Frota & Schiffer, 2001)

Em síntese, a carga térmica interior resulta, conjuntamente, do macro e microclima em que está inserida a edificação bem como da influência de todos os seus aspectos construtivos e ocupacionais, conforme descrito ao longo do capítulo. Desta forma, para a aplicação do referencial teórico arquitetônico ao caso brasileiro deve-se analisar o parque instalado de construções até então.

#### 1.4.2. Caracterização das envoltórias das edificações atuais

O estoque de construções brasileiras caracteriza-se pela forma como as normas, métodos construtivos e sobretudo desenvolvimento tecnológico evoluíram ao longo do tempo.

A ideia de integração da edificação ao ambiente iniciou-se forma espontânea e difundida ao redor do mundo sob a forma de uma arquitetura vernacular<sup>6</sup>. (Lamberts, et al., 2014)

<sup>6</sup> Entende-se por arquitetura vernacular aquela isenta de estrangeirismos, onde o conhecimento era aprendido empiricamente e transferido de geração a geração, de pai para filho, de mestre para aprendiz. (Lamberts, et al., 2014)

Portanto, o potencial dos controles disponíveis para o conforto interno de ambientes era limitado e com isso não havia risco de superaquecimento no inverno e nem super resfriamento no verão.

Entretanto, a tecnologia de aquecimento evoluiu a partir do século XVIII e o resfriamento mecânico tornou-se uma possibilidade no início do século XX. Em 1848, Dr. John Gorrie, considerado como pai da refrigeração, inventou<sup>7</sup> a máquina de fazer gelo. No final da década de 1880 há uma ruptura tecnológica de máquinas a vapor para elétricas com a “Guerra das Correntes” entre Edison e Tesla dando origem a motores elétricos de corrente contínua e corrente alternada. Em 1911, Willis Carrier, inventor do ar condicionado, criou um gráfico psicrométrico baseado em suas fórmulas empíricas. Até que em 1928, o primeiro prédio de escritórios com ar condicionado nos EUA foi construído em San Antonio "The Milam Building". (ESL, 2012)

De fato, o ímpeto da pesquisa de conforto veio dos engenheiros pois naquele momento era possível superaquecer e super esfriar os edifícios e tornou-se necessário o estabelecimento de “temperaturas de projeto”. Nos EUA iniciou-se a busca nos laboratórios da ASHVE pela “zona de conforto”, enquanto na Inglaterra, a motivação era estabelecer os limites adequados de condições ambientais para o trabalho na indústria. (Auliciems & Szokolay, 2007)

Ao longo do tempo o avanço científico foi incorporado nas normas e melhores práticas de projeto das duas instituições vanguardistas americanas, ASHVE<sup>8</sup> e ASRE<sup>9</sup>. Entretanto, o desenvolvimento do tema não ocorreu de forma coesa até 1959 quando as instituições fundiram-se formando a ASRAE (ESL, 2012). Com as crises do petróleo na década de 70, a preocupação com eficiência energética nos países desenvolvidos veio à tona estando o uso racional da energia nos edifícios incluído nas discussões. No Brasil a questão normativa da eficiência energética dos equipamentos e das envoltórias das edificações tomou proporção somente com a lei de eficiência energética (Lei N°10.295, 2001) estabelecendo níveis máximos de consumo específico de energia, ou mínimos de eficiência energética de máquinas e equipamentos consumidores de energia fabricados ou comercializados no país. Nos anos seguintes a regulamentação da construção

---

<sup>7</sup> A invenção de Gorrie começou com uma tentativa de curar a Febre Amarela durante um surto em Apalachicola em 1841

<sup>8</sup> ASHVE – American Society of Heating and Ventilation Engineers

<sup>9</sup> ASRE - American Society of Refrigeration Engineers

também evoluiu com a criação, em 2003, do PROCEL Edifica e do GT edificações. Em 2005 houve a aprovação da norma técnica de desempenho térmico em edificações, NBR 15220<sup>10</sup> e com os Regulamentos Técnicos da Qualidade<sup>11</sup> para edificações comerciais, de serviços e públicas, em 2010, e residenciais, em 2012. Além disso, em 2014 foi instituída a IN02, a qual dispõe sobre o uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) nos projetos e respectivas edificações públicas federais novas ou que recebam *retrofit*.

Paralelamente ao desenvolvimento tecnológico dos equipamentos, a Revolução Industrial trouxe uma série de novos materiais tais como aço e concreto armado, e conseqüentemente novas técnicas estruturais, modificando a forma de se construir no mundo. (Lamberts, et al., 2014).

No Brasil, inicialmente o aço era importado na forma de estruturas pré-fabricadas e utilizado para construção de pontes e edifícios. Com a criação da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) e com a política de substituição de importações, a produção nacional passou a reduzir a importação de aço. Entretanto, a produção nacional não era suficiente para o atendimento simultâneo das crescentes demandas do setor automotivo e construção civil. Com isso, desde o início do século XX, a construção civil se desenvolveu privilegiando o concreto e a alvenaria até o início dos anos 2000, quando, de fato, o aço passou a ser mais utilizado nas construções. (CBCA, 2015)

Segundo a amostra da Pesquisa de Posse e Hábitos divulgada pelo PROCEL em 2019 (PROCEL/ELETOBRAS, 2019), de fato, o material predominantemente utilizado na construção das paredes externas dos domicílios brasileiros é a alvenaria. Por outro lado, os principais materiais utilizados nas coberturas dos domicílios são lajes de concreto,

---

<sup>10</sup> A NBR 15220 é dividida em cinco partes:

(NBR 15220-1, 2003) - Definições, símbolos e unidades;

(NBR 15220-2, 2003) - Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações;

(NBR 15220-3, 2003) - Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social;

(NBR 15220-4, 2003) - Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida;

(NBR 15220-5, 2003) - Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico;

<sup>11</sup> (RTQ-R, 2012) RTQ-R – Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais

(RTQ-C, 2010) RTQ-C - Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas

telhas de barro e telhas de amianto, embora a produção, venda e uso do amianto tenham sido proibidas em 2017. A Figura 1-17 ilustra alguns dos resultados do perfil de uso desses materiais pelas categorias econômicas<sup>12</sup>, sendo possível verificar o efeito da renda sobre a qualidade dos materiais empregados nas residências brasileiras.

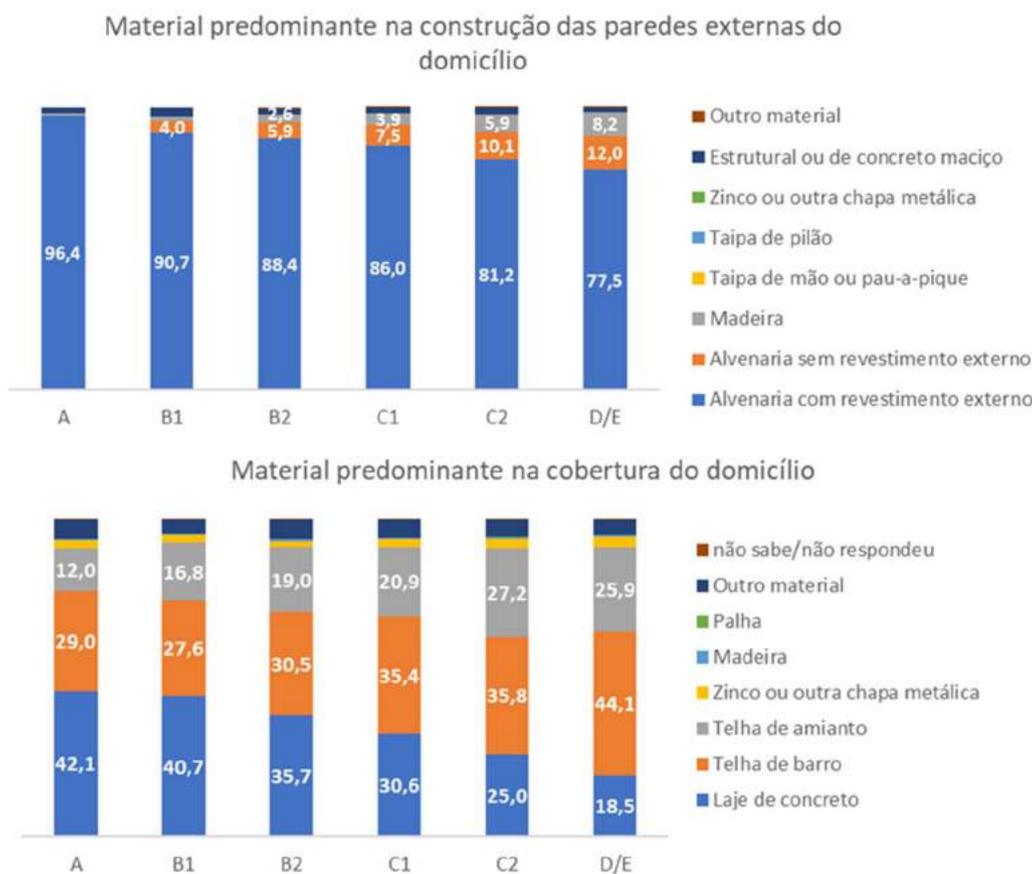


Figura 1-19: Materiais predominantemente utilizados nas envoltórias residenciais brasileiras

Fonte: Elaboração própria a partir de PROCEL/ELETROBRAS (2019)

Em relação as edificações comerciais, de forma análoga a classe residencial, há hegemonia do emprego de alvenaria nas fachadas e de lajes de concreto e telhas de barro nas coberturas das edificações. Entretanto, apesar dos toldos representarem parcela significativa dentre as escolhas de proteção externa contra insolação, há disparidade entre os segmentos quanto ao principal tipo de proteção adotada. Para alguns segmentos brises são a principal escolha, enquanto em outros quase metade dos estabelecimentos sequer utilizam proteção externa. A Figura 1-18 ilustra as características construtivas utilizadas em alguns dos segmentos do setor de comércio e

<sup>12</sup> Embora seja uma *proxy* da renda, as categorias de “A” a “E” desenhadas pela PPH consideram classes de consumo, sendo a categoria “A” aquela associada a maiores posses de equipamentos elétricos, maior nível de escolaridade, entre outros quesitos.

serviços no Brasil, conforme (EPE/MME, 2016).

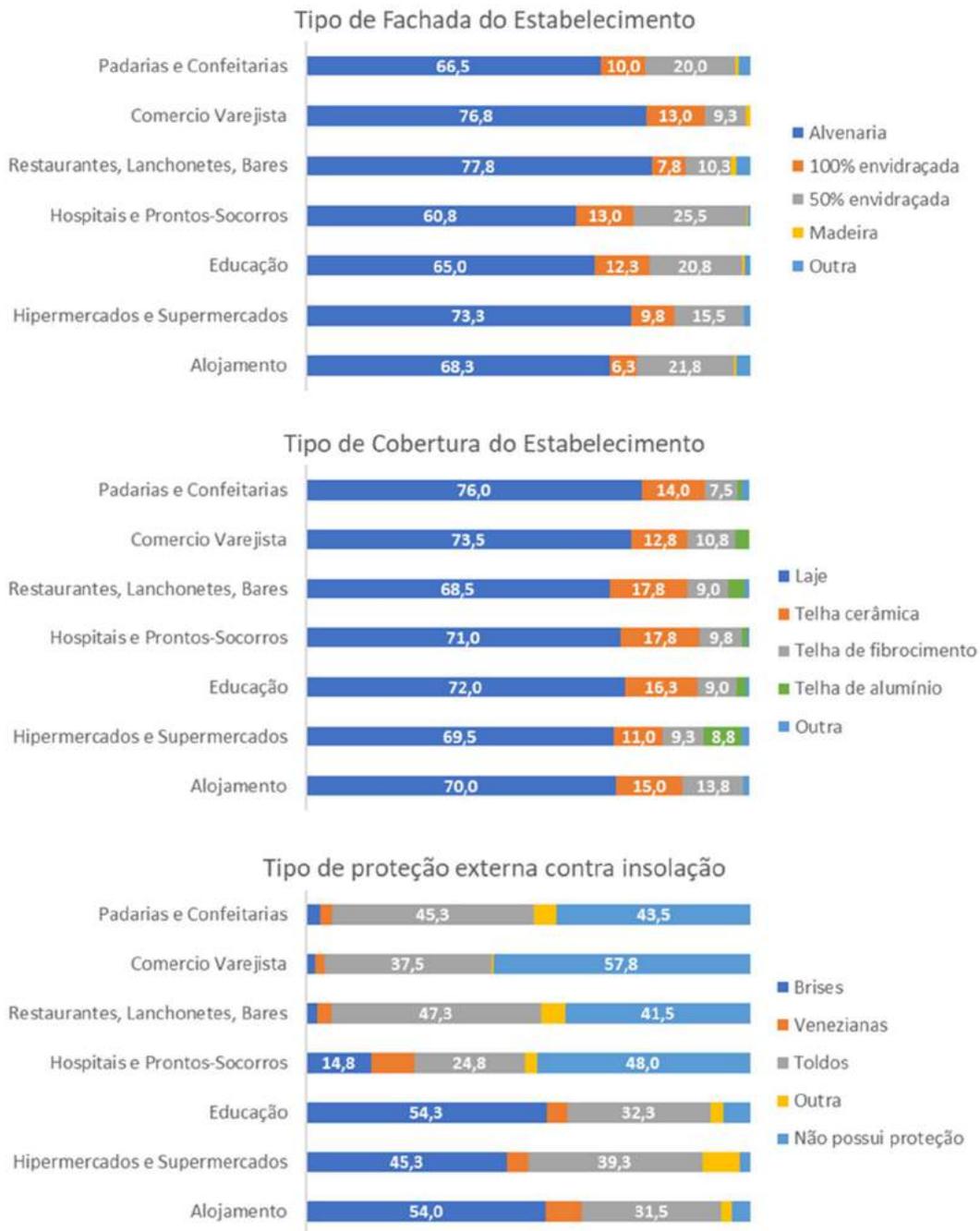


Figura 1-20: Características construtivas utilizadas nas envoltórias do setor de comércio e serviços no Brasil .

Fonte: Elaboração própria a partir de EPE/MME (2016)

Dessa forma, os edificios foram sendo construídos sob o arcabouço legal, normativo e tecnológico mutante ao longo do tempo de forma tardia não demonstrando grandes disparidades quanto aos materiais utilizados nas edificações brasileiras.

### **1.4.3. Aspectos Arquitetônicos a considerar**

Conhecido o perfil das envoltórias brasileiras é possível transpor os valores das variáveis climáticas das estações meteorológicas para o interior das edificações, ambiente no qual o indivíduo está propenso ao uso de equipamentos elétricos para controle de seu desconforto térmico. Entretanto, verifica-se dificuldade na mensuração da velocidade do ar nos ambientes internos dada as diferenças urbanísticas e geométricas circunscritas à edificação.

## **2. CARACTERIZAÇÃO DA CARGA**

Segundo GEA (2012), é indispensável para a política energética de uma nação que a garantia do suprimento de energia elétrica, de forma robusta, soberana e resiliente pautese na relação entre energia e desenvolvimento. Entretanto, a segurança energética não é o único pilar estratégico a ser perseguido. Questões como fornecimento do serviço a preços estáveis e acessíveis, uso racional do recurso e redução dos impactos ambientais trazem ampliação do escopo de planejamento. Nesse sentido, tão importante quanto a acurácia na previsão de carga, está a compreensão dos fatores que condicionam tais resultados, de modo a priorizar a atuação do setor reduzindo o custo energético, social e ambiental do país.

O uso final da energia pelos consumidores manifesta-se na demanda por diversos serviços energéticos<sup>13</sup>, sobretudo força motriz, iluminação, aquecimento direto, calor de processo e refrigeração. Há consenso na literatura de que a demanda energética para provimento de tais serviços no médio e longo prazo pauta-se em aspectos econômicos, demográficos, tecnológicos e regulatórios. Dessa forma, a conjuntura econômica, contexto político-social e regulatório do país impõem diversas incertezas a estas previsões. Adicionalmente, nos últimos anos as discussões relacionadas as mudanças climáticas vêm trazendo enfoque a outra fonte de incerteza tanto no longo quanto no curto prazo. De fato, o aquecimento global inclui a temperatura no escopo de variáveis que condicionam a demanda no longo prazo. Por outro lado, anomalias climáticas, tais como o aumento de eventos extremos de frio e calor, acrescentam incertezas à previsão de curto prazo.

Nesse sentido, o presente capítulo caracteriza a carga de energia, detalhando, em sequência, as parcelas susceptíveis as oscilações climáticas.

### **2.1. Composição da Carga de Energia**

A informação de consumo por classe, declaradas pelos agentes de distribuição à EPE, está relacionada ao consumo faturado, estando o montante total registrado suscetível a periodicidade de leitura dos medidores. Entretanto, há outras parcelas de consumo

---

<sup>13</sup> É interessante pontuar que os serviços energéticos citados podem ser providos por diferentes fontes de energia além da eletricidade e a adoção de determinada fonte em detrimento de outra, por parte do consumidor, leva em conta os mais variados aspectos como preço, escala, segurança no fornecimento, controlabilidade, rendimento energético, infraestrutura/logística de acesso, restrições ambientais, além de outros fatores.

declarado pelas distribuidoras oriundas de consumidores livres inseridos nas redes de distribuição, tendo, portanto, consumo medido no mês civil. A informação dos demais consumidores livres interligados à rede básica (>230KV) é informado pelas transmissoras de energia às duas instituições supracitadas. A soma de todos estes consumos em cada subsistema forma o consumo na rede do SIN.

Por outro lado, a estatística de carga global de energia, considera o fato de que a eletricidade ainda não é armazenada de forma significativa, sendo quantificada pela ótica da geração. O ONS, mede em seu sistema de supervisão o montante gerado pelas usinas de maior relevância para o sistema. Entretanto, neste processo acaba por considerar usinas de alguns autoprodutores, que pelo seu potencial significativo de impacto no sistema são supervisionadas/programadas pelo operador nacional. As demais usinas não monitoradas pelo ONS, mas que comercializam energia no mercado tem a sua medição informada pela CCEE.

Para mais detalhes relativos as estatísticas de carga das instituições, ver Anexo V.

### 2.1.1. Perdas e diferenças.

Intuitivamente, o confronto das estatísticas de geração (ONS/CCEE) e de consumo (EPE/ANEEL), gera parcelas associada às perdas tanto técnicas, devido ao processo natural de escoamento da energia pelas redes de transmissão/distribuição, quanto perdas comerciais, devido a estatística de consumo estar associada ao faturamento da unidade. Entretanto, há outras diferenças oriundas da forma de contabilização do uso da energia elétrica pelo setor, conforme Figura 2-1.

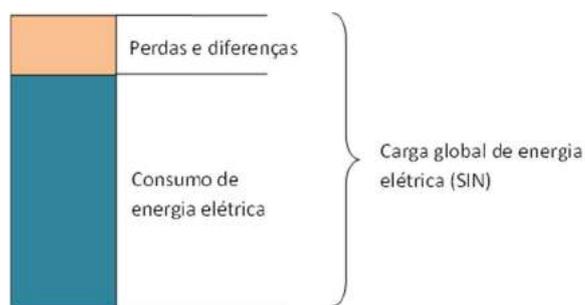


Figura 2-1: Decomposição da Carga de Energia.

Fonte: (MME/ANEEL/EPE/ONS/CCEE, 2017)

As diferenças são oriundas do processo de contabilização sob óticas diferentes. A consideração da geração total de alguns autoprodutores nas estatísticas do ONS por fins

operativos, não se verifica compatível a contabilização no consumo na rede da EPE dado que esta não é injetada no SIN. Adicionalmente, o consumo interno das usinas, considerado na carga de energia devido a localização do medidor na “boca” do gerador não é capturado nas estatísticas da EPE devido a energia não ser injetada na rede.

Segundo EPE (2020) a definição da parcela de “Perdas e Diferenças” é:

*“A parcela de “perdas e diferenças” engloba as chamadas perdas técnicas nas redes de transmissão e distribuição e as denominadas perdas não técnicas, que consideram ligações irregulares/clandestinas, erros de medição, erros no processo de faturamento, unidades consumidoras sem equipamento de medição, efeito calendário etc. Adicionalmente, a parcela de “perdas e diferenças” contabilizam outras diferenças relativas aos próprios conceitos utilizados de carga global (ONS/CCEE) e de consumo na rede (EPE), como é o caso de alguns consumidores livres conectados na rede básica que possuem autoprodução de energia, cujo consumo é integralmente considerado na carga global, porém, não no consumo na rede.”*

É importante ressaltar que apesar do uso ilegal da energia (perdas comerciais) não receber os sinais de escassez energética, e portanto fugindo a racionalidade econômica do recurso, as demais parcelas do montante de perdas e diferenças flutua, *ceteris paribus*, proporcionalmente ao mercado faturado, ou seja, se o consumo faturado como um todo aumenta, espera-se que ocorra mais geração e portanto mais consumo interno das usinas além de maiores perdas técnicas no escoamento desta energia. Nesse sentido, o consumo na rede é parcela da carga de energia que detém maior informação sobre os drivers econômicos da carga, devendo ser mais aprofundada.

### 2.1.2. Consumo na Rede do SIN

Segundo o Anuário Estatístico (2019), o consumo na rede do Brasil<sup>14</sup> é demandado pelas redes de baixa e alta tensão em proporções próximas, 48% e 52%, respectivamente. Entretanto, apesar do uso equilibrado da energia elétrica entre os níveis de tensão, há preferências distintas de atendimento pelas classes de consumo. A indústria e o serviço público, possuem nítida preferência pelo atendimento elétrico de suas instalações via linhas de alta tensão, conforme ilustrado na Figura 2-2. Tal escolha, está associada a diversos fatores como tarifas diferenciadas, participação no mercado livre, além de questões operativas frente ao grande volume de energia demandado. Por outro lado, por questões de segurança, o uso da eletricidade nas residências bem como nas instalações de iluminação pública advém por níveis de tensão mais baixos. As demais classes de consumo possuem participações parecidas entre baixa e alta tensão, destacando-se a classe comercial<sup>15</sup> por englobar diversos segmentos heterogêneos entre si.

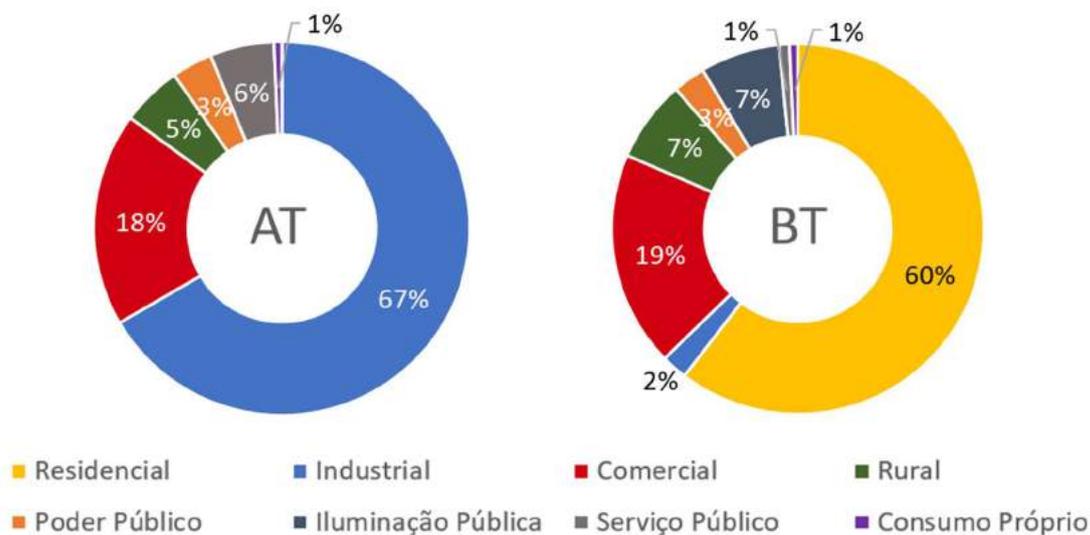


Figura 2-2: Uso da eletricidade pelas classes de consumo por níveis de tensão.

Fonte EPE (2019b)

Dessa forma, é possível estimar a carga de energia futura através da soma dos valores esperados das classes de consumo supracitadas, vinculando a previsão de carga às premissas macroeconômicas vislumbradas. Tal método, adotado por EPE (2019c),

<sup>14</sup> Considera o sistema interligado nacional e os sistemas isolados.

<sup>15</sup> Estão incluídos na classe comercial, os hospitais, comércio varejista e atacadista, hotéis, shoppings centers, supermercados, farmácias, consultórios, escritórios, condomínios prediais, entre outros segmentos de consumo.

atribui como vantagem não só a previsão da carga, como também o detalhamento do resultado por classe. Isto possibilita verificar impactos setoriais, sugerir políticas ou ajustes regulatórios que tornem mais racional o uso da energia e da infraestrutura do setor.

Historicamente, o setor elétrico brasileiro estruturou-se predominantemente por usinas hidrelétricas com grandes reservatórios distribuídos ao longo das bacias hidrográficas. As linhas de transmissão exploram a diversidade dos regimes de hidrológicos das bacias transferindo energia entre as regiões do país. Adicionalmente as usinas termelétricas, permitem ao ONS elaborar estratégias de gestão da água armazenada a fim de atender a demanda no curto e médio prazo com o menor custo para a sociedade. Tais estratégias levam em consideração o balanço entre oferta e demanda previstas para os meses seguintes. Nesse sentido, mais uma vez, a tradução da conjuntura econômica e setorial em termos energéticos mensais ocorre por meio das classes de consumo mencionadas, trazendo mais informação e segurança na decisão da política de operação energética do sistema.

A Figura 2-3, ilustra a sazonalidade mensal do consumo por classe e região. Observa-se que nem todas as classes possuem sazonalidade mensal, como iluminação pública, consumo próprio e serviço público. A classe industrial, por sua vez, demonstra tipicamente maior consumo na rede no 2º semestre do ano de maneira unânime entre regiões. Por outro lado, a classe rural, possui sazonalidades distintas entre as regiões do país, uma vez que o consumo na rede desta classe vincula-se fortemente às dinâmicas agropecuárias locais. Por fim, as classes residencial, comercial e poder público, integrantes do setor de edificações, denotam sazonalidade significativa com maior demanda de energia nos meses mais quentes do ano, sugerindo responsividade às variações climáticas intra-anuais.

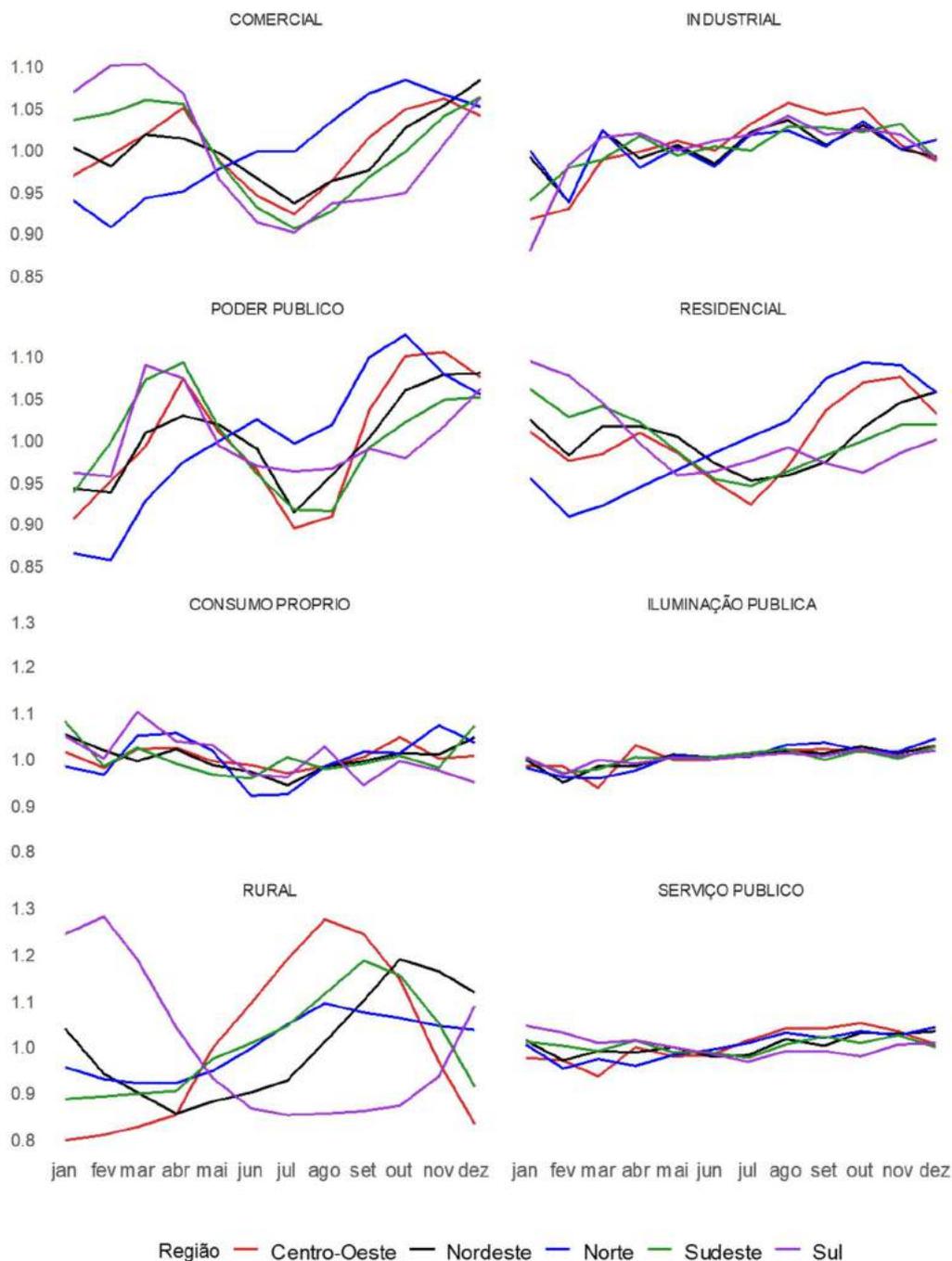


Figura 2-3: Sazonalidade do consumo por classe por região.

Fonte: Elaboração própria a partir de EPE (2019d)

Nota: Média do consumo mensal por classe normalizado pelos respectivos consumos médios anuais.

Com o aumento da participação de fontes não-controláveis no parque gerador e consequente redução de participação das hidrelétricas, a resiliência do sistema passa a pautar-se em questões tanto energéticas quanto elétricas. De fato, o GT de modernização do setor elétrico, o programa piloto de resposta da demanda, cálculo de preço horário

para o mercado livre, novas modalidades tarifárias para o mercado regulado, expansão da geração lastreadas em curvas de carga horárias, são algumas das iniciativas das instituições do setor no sentido de modernizar o mercado. Nesse sentido, o detalhamento do uso da energia elétrica pelas classes consumidoras caminha para estudos cada vez mais granulares.

Segundo EPE (2020), o perfil da curva de carga horária do SIN é majoritariamente moldado pelo comportamento das classes de consumo na rede. O uso diário de energia pelas diversas classes de consumo possui características distintas em função da dinâmica de cada setor. O uso da energia para iluminação pública, por exemplo, só ocorre nos períodos de baixa luminosidade natural, a indústria na baixa tensão concentra seu uso de energia no período diurno e vespertino. Já nas residências, o ápice de consumo se dá no período noturno, dada uma intensificação no uso de televisores, condicionadores de ar, chuveiros elétricos e eletrodomésticos em geral. O setor comercial possui perfil parecido ao da indústria na baixa tensão, diferenciando-se no período da noite pelo funcionamento de hospitais, hotéis, supermercados, escritórios, farmácias, shoppings, entre outros segmentos. Por outro lado, as classes de consumo conectadas a alta tensão possuem, de maneira geral, mais liberdade na escolha da forma como compra energia elétrica, estando seus perfis de consumo associados a tais escolhas. Há segmentos industriais, sobretudo os conectados à rede básica, por exemplo, que possuem perfil de consumo constante ao longo do dia. Tal fato decorre da forma como é comercializada a energia elétrica via contratos bilaterais em ambiente de contratação livre (ACL). Já as classes de consumo associadas a modalidade horosazonal de tarifação, atendidas pelas linhas de alta tensão das distribuidoras, recebem sinais de preço diferenciados ao longo do dia pagando tanto pela energia quanto pela potência. A Figura 2-4 ilustra os perfis de carga das classes de consumo por nível de tensão.

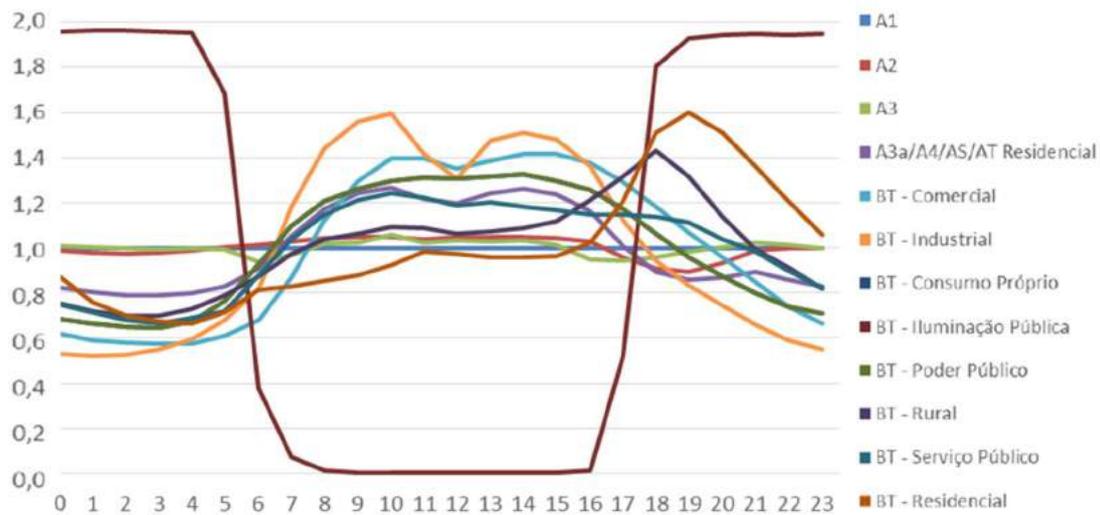


Figura 2-4: Perfis de carga das classes de consumo por faixa de tensão

Fonte: Elaboração própria a partir de ANEEL (2019)

Em síntese, os perfis de carga observados estão lastreados em diversos aspectos, dentre os quais destacam-se o horário comercial associado a jornada de trabalho e o preço da energia ao longo do dia. Entretanto, a sazonalidade destes perfis associa-se fortemente ao ciclo climático intra-anual. Desta forma, a compreensão da influência climática sobre a carga de energia torna-se fundamental para o processo de planejamento, operação e comercialização no mercado de energia elétrica.

## 2.1. Carga de Energia suscetível as oscilações climáticas

Devido à natureza geográfica do Brasil, os serviços energéticos com maior responsividade climática são “aquecimento direto<sup>16</sup>”, “calor de processo<sup>17</sup>” e, sobretudo, “refrigeração<sup>18</sup>”. Considerando o último balanço de energia útil disponível (MME, 2005), estima-se que estes serviços representem cerca de 36% de toda a eletricidade demandada pelo país, estando concentrada no setor industrial e nas edificações, conforme ilustrado na Figura 2-5.

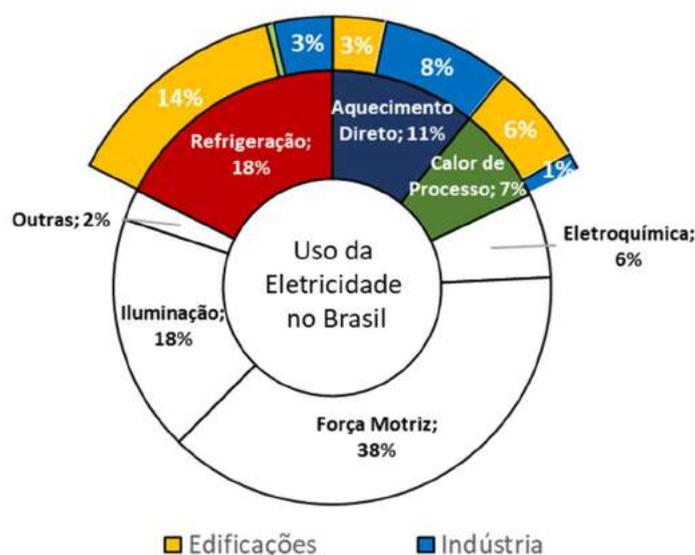


Figura 2-5: Representatividade da demanda susceptível as condições climáticas

Fonte: Elaboração própria a partir de MME (2005)

Embora haja separação do uso final da energia entre os serviços energéticos listados, há subparcelas mais voláteis as oscilações climáticas de curto prazo. O uso de eletricidade para aquecimento de água, aquecimento de ambientes, por exemplo, torna-se mais frequente nos meses frios, enquanto o condicionamento ambiental pelo uso de ar condicionado, ventilador ou climatizador intensifica-se nos meses mais quentes do ano. Por outro lado, o uso de energia por forno elétrico e ferro de passar roupa são pouco influenciados pelas condições climáticas, não alterando seu uso ao longo do ano.

<sup>16</sup> Inclui fornos elétricos, fornos a combustíveis, processos de fundição, laminação, secagem, aquecimento ambiental, ferro de passar roupa.

<sup>17</sup> Inclui geração de vapor, aquecimento de água e de fluidos térmicos. Os grandes usuários de calor de processo são indústrias de transformação e os equipamentos de grande porte. Já nos setores com pequeno uso de calor de processo, como o residencial, comercial, público e agropecuário, cujo uso basicamente é de aquecimento de água. (BEU,2004)

<sup>18</sup> Inclui climatização de ambientes e refrigeração de sistemas, alimentos, entre outros.

Adicionalmente, processos de aquecimento de fluidos térmicos, entre outros estão mais vinculados a questões produtivas, portanto menos responsivas ao clima. A Figura 2-6 exemplifica usos mais e menos sensíveis ao clima pelas indústrias e edificações.



Figura 2-6: Responsividade climática dos serviços energéticos

Fonte: Elaboração própria a partir de MME (2005)

Segundo PROCEL/ELETRONBRAS (2019) realizada sobre as residências brasileiras, alguns destes serviços são praticamente exclusivos da região Sul. Porém, apesar da exclusividade, os serviços são de pouco ou eventual uso. A secadora de roupas, por exemplo, está presente em apenas 4,2% dos domicílios sulistas, sendo utilizada de forma eventual em 56% dos casos nos horários entre 07:00 e 20:00. O uso de eletricidade para calefação encontra-se presente somente em 2,4% das residências sulistas, com o uso típico entre 18:00 e 22:00.

De maneira oposta, a pesquisa mostra protagonismo do chuveiro elétrico dentre as tecnologias de aquecimento de água no setor residencial, sobretudo<sup>19</sup> nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste. A Figura 2-7 demonstra os horários de uso do chuveiro elétrico por região. Observa-se que há uma distribuição bimodal determinada pelo horário comercial da jornada de trabalho.

<sup>19</sup> Nas regiões Norte e Nordeste, o aquecimento de água para banho é pouco utilizado nos domicílios, sendo preferível o uso da água em temperatura ambiente.

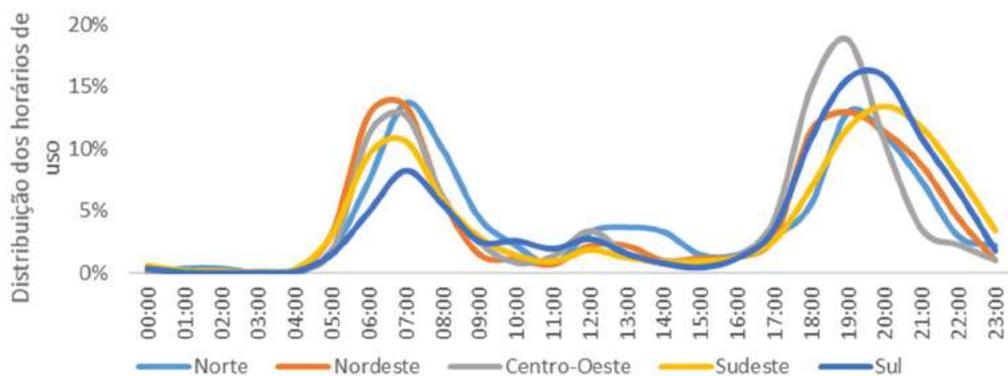


Figura 2-7: Horários de uso do chuveiro elétrico

Fonte: Elaboração própria a partir de PROCEL/ELETROBRAS (2019)

Com relação ao serviço energético de refrigeração, de acordo com MME (2005) e EPE (2019e), é possível estimar a parcela da energia final destinada a refrigeração, conforme ilustrado na Figura 2-8. É importante ressaltar que a demanda por refrigeração está presente em diversas classes de consumo, as quais conjuntamente somam aproximadamente 19% do total de eletricidade demandada pelo País.

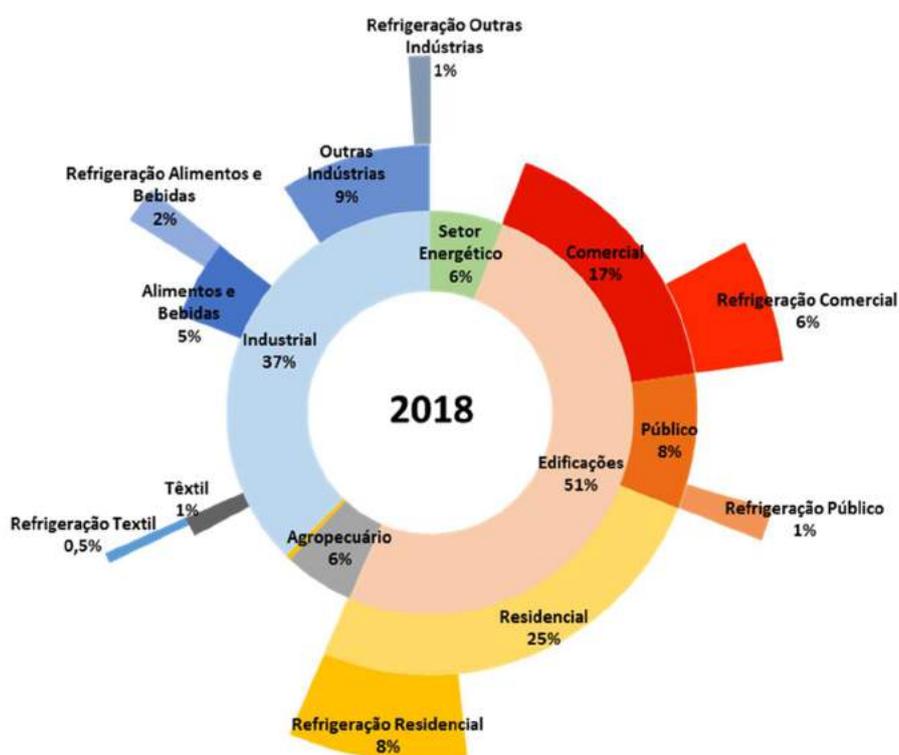


Figura 2-8: Decomposição do Consumo Elétrico destinado à Refrigeração

Fonte: Elaboração própria a partir de MME (2005) e EPE (2018)

É importante pontuar que o consumo de 19% estimado considera tanto o serviço de refrigeração<sup>20</sup> quanto climatização<sup>21</sup> de ambientes, refletindo uma média anual. Portanto há de se esperar valores maiores para os meses quentes e menores para os meses mais frios do ano. Além da sazonalidade mensal, a demanda pelo serviço energético de refrigeração para conforto térmico ocorre em momentos distintos ao longo do dia. Os equipamentos mais utilizados nas residências para fins de climatização ambiental, de acordo com PROCEL/ELETRONBRAS (2019), são ar condicionado, ventilador de teto e circulador de ar. A Figura 2-9 ilustra a distribuição dos horários de uso destes equipamentos.

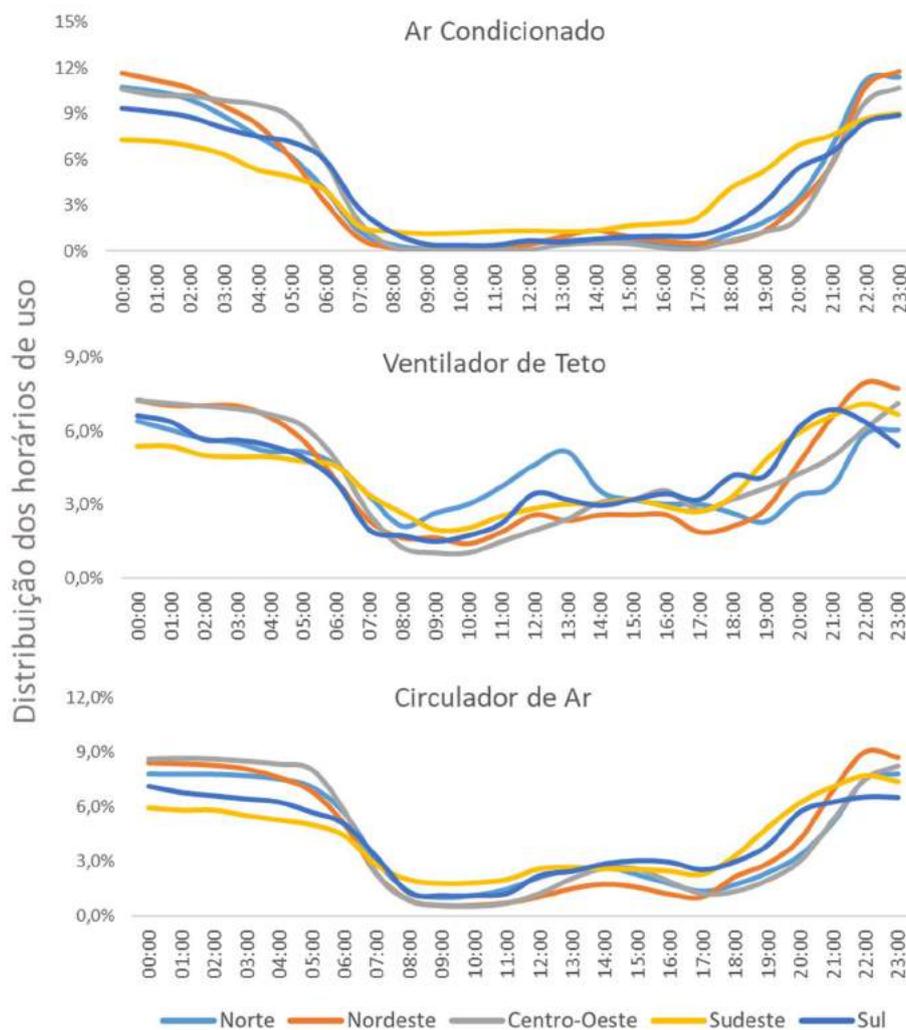


Figura 2-9: Horários de uso dos equipamentos de condicionamento ambiental nas residências.

Fonte: Elaboração própria a partir de PROCEL/ELETRONBRAS (2019)

<sup>20</sup> Considera geladeiras, freezers, equipamentos de conservação de alimentos/vacinas, entre outros.

<sup>21</sup> Considera Ar condicionado, ventiladores, circuladores de ar, climatizadores, entre outros.

Portanto, sob ótica do setor residencial, os horários mais suscetíveis à influência climática são o período da manhã, próximo as 6 horas da manhã, devido a necessidade de aquecimento de água para banho, no período da madrugada onde há demanda por climatização ambiental e sobretudo no período da noite, onde há demanda por diversos serviços sensíveis ao clima, como climatização de ambientes, aquecimento de água e calefação.

Quanto aos demais setores, a literatura carece de estudos mais aprofundados sobre a sazonalidade e horários dos serviços energéticos suscetíveis ao clima, lacuna a ser preenchida pela presente dissertação.

### 3. ESCOLHA DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA DO MODELO

Modelos estatísticos ganharam importância na sociedade, pois permitem gerar vários tipos de previsão de atividades na vida moderna. O entendimento de “melhor” modelo depende do contexto do problema, mas certamente envolve questões como precisão e simplicidade. Em geral, um modelo torna-se mais preciso quando se aumenta sua complexidade. Por outro lado, a parcimônia traz maior capacidade de interpretação dos resultados. Lidar com esta solução de compromisso é um ponto importante a ser considerado, porém há de se dar enfoque a questões igualmente críticas para a eficácia do modelo, como quais as variáveis que entram no modelo e como elas são representadas. (Kuhn & Johnson, 2019)

Dessa forma, o presente estudo, a fim de elencar as variáveis mais relevantes para a inferência do efeito climático sobre a sensação de desconforto térmico do indivíduo, fundamentou-se no referencial teórico apresentado nos capítulos anteriores.

Retomando o levantamento de variáveis influentes sobre o consumo de energia elétrica realizado ao longo do referencial teórico e da caracterização da carga, pode-se categorizar as variáveis em dois tipos: variáveis dinâmicas, ou seja, aquelas mais responsáveis pela oscilação da carga de energia em frequências mais altas, e variáveis estruturantes, cuja influência sobre a carga de energia ocorre em períodos mais longos, e portanto pouco influentes sobre a volatilidade no curtíssimo prazo<sup>22</sup>.

$$Carga\ de\ energia = f(x_{dinâmicas}, x_{estruturantes})$$

É importante ressaltar, que os elementos meteorológicos são mutuamente relacionados entre si e podem ser tratados como consequência da ação dos fatores climáticos globais e locais. Desta forma, os fatores climáticos serão tratados como estruturantes, ao passo que os elementos meteorológicos, relacionados ao tempo<sup>23</sup> enquadram-se como variáveis de caráter dinâmico. A Figura 3-1 ilustra a disposição das variáveis sobre as categorias em questão, destacando de forma mais detalhada as variáveis associadas ao desconforto térmico, foco da presente dissertação.

---

<sup>22</sup> Entende-se por curtíssimo prazo as escalas de tempo inferiores a mensal.

<sup>23</sup> Segundo (Lamberts, et al., 2014), tempo é a variação diária das condições atmosféricas, enquanto que clima é a condição média do tempo em uma dada região baseada em medições em longos períodos de tempo.

| Variáveis Dinâmicas (alta volatilidade)  | Variáveis Estruturantes (baixa volatilidade)   |
|--|--|
| Temperatura do ar<br>Intensidade do vento<br>Ângulo de incidência do vento sobre a janela<br>Umidade Relativa do Ar<br>Precipitação<br>Nível de Utilização de Plantas Eletrointensivas<br>Natureza do dia (4ª feira, feriado, domingo, outros)<br>Vestimentas<br>Perfil de carga semanal<br>Perfil de carga diário<br>Efeitos Aleatórios | Condutibilidade térmica dos materiais<br>Espessura de cada material da envoltória<br>Emissividade do material das superfícies<br>Absortividade solar dos materiais das superfícies<br>Cor da pintura da envoltória<br>Transparência dos materiais das aberturas<br>Geometria da vizinhança<br>Latitude<br>Altitude<br>Circulação das massas de ar<br>Distribuição das massas de água e terra<br>Vegetação<br>Topografia<br>Proximidade a água<br>Grau de urbanização<br>Inércia térmica dos materiais (amortecimento)<br>Inércia térmica dos materiais (defasagem)<br>Rugosidade do terreno<br>Altura das janelas<br>Taxa de renovação do ar interno<br>Taxa de ocupação da edificação<br>Atividade exercida pelos ocupantes<br>Ganhos de calor devido a iluminação artificial<br>Ganhos de calor devido a máquinas e equipamentos<br>Demais aspectos comportamentais<br>Radiação Solar<br>Ciclos macroeconômicos<br>Sazonalidade econômica<br>Crescimento populacional<br>Perfil etário da população<br>Participação das classes de consumo<br>Altura média do indivíduo<br>Peso médio do indivíduo |

Figura 3-1: Natureza das variáveis influentes sobre a carga de energia

Fonte: Elaboração própria.

Ao longo do ano, a sazonalidade do clima e os diferentes ciclos de atividade dos setores produtivos podem levar a carga a alcançar patamares cerca de 15% acima ou abaixo da energia média anual requerida do SIN. Por sua vez, a carga ao longo de uma semana apresenta, tipicamente, níveis diferenciados devido à natureza do dia, como sábados, domingos, feriados além das diferenças dos níveis produtivos dos dias úteis. Ao longo de uma semana sem feriados, espera-se que a carga diária mínima ocorra no domingo, com nível de 14% abaixo da carga média semanal, enquanto a máxima alcance, na quarta-feira, um patamar de 5% acima da média da carga da semana. Em um intervalo diário, a variabilidade é ainda maior, alcançando, por vezes amplitudes de 50% distantes da energia média diária. Tal volatilidade, fruto das diferentes necessidades de consumo de cada classe ao longo do dia, está associada a questões como jornada de trabalho, iluminação natural, posse e hábitos de uso dos equipamentos, entre outros.

Observando-se a parcimônia e interpretabilidade vislumbradas para o modelo, deve-se escolher o recorte temporal que reduza o número de variáveis de entrada com a menor perda possível de informação de forma a manter robusta a tratativa do problema. Representar todas as variáveis de forma explícita na especificação do modelo poderia trazer mais erros e consequentes resultados viesados. Neste sentido, apesar da dimensão climática estar presente em escalas anuais, mensais, diárias e horárias, analisar as variações da carga no curtíssimo prazo possibilita reduzir as entradas somente as variáveis dinâmicas, visto que as variáveis estruturantes são constantes neste horizonte de tempo.

Além disso, ao longo do dia, o perfil da demanda elétrica altera-se em função do diferente protagonismo horário das classes de consumo. Por outro lado, analisar o efeito climático sobre as variações da carga de forma horária traz dificuldades devido à defasagem e amortecimento da exposição climática entre os ambientes interno e externo à edificação. Desta maneira, adotou-se o recorte diário, segmentado em 4 jornadas<sup>24</sup>, para a análise do efeito climático sobre a carga no presente estudo.

Com o escopo restrito às variáveis dinâmicas, é possível tratá-las por etapas isolando alguns efeitos. O efeito da natureza do dia, dito efeito calendário, pode ajustar a carga diária a uma carga diária equivalente semanal e será tratada com detalhes no capítulo de metodologia. Apesar da restrição de escopo, há ainda limitações quanto as datas relacionadas as alterações dos níveis de produção de plantas eletrointensivas, dada a falta de informação e dificuldade de inferência sobretudo nos casos em estes eletrointensivos não detenham parcela significativa da carga estadual. Desta forma, como esta influência traz ruídos a solução, recomenda-se buscar métodos quantitativos resilientes à presença de *outliers*.

Em relação as demais variáveis dinâmicas, a seção 1.4 descreve a equação de balanço térmico do corpo humano, indicando sensação de conforto ou desconforto a luz das variáveis climáticas e comportamentais. Na seção a seguir, é explorada tal equação a fim de analisar as variáveis mais influentes para o modelo.

---

<sup>24</sup> As quatro jornadas consideradas: madrugada, manhã, tarde e noite estão igualmente distribuídas ao longo do dia, e seguem detalhadas no capítulo de metodologia.

### 3.1. Análise exploratória da sensação de desconforto térmico do homem

Diversos são os métodos em que se verificam as variáveis explicativas de maior influência sobre a variável dependente através da magnitude das elasticidades. Em linguagem matemática, tais elasticidades, grosso modo, podem ser interpretadas como derivadas parciais de uma diferenciação total. A partir da equação de dois nós apresentada na seção 1.4, observa-se na Figura 3-2 o espaço amostral do desconforto térmico do homem ( $\Delta S$ ) como função de diversas variáveis, ilustrando na cor vermelha a sensação de desconforto pelo calor, na cor azul o desconforto pelo frio e na cor branca a neutralidade térmica. Para que seja possível a observação tridimensional de seu comportamento, a Figura 3-2 ilustra o gradiente de duas variáveis climáticas tomando a restante como fixa.

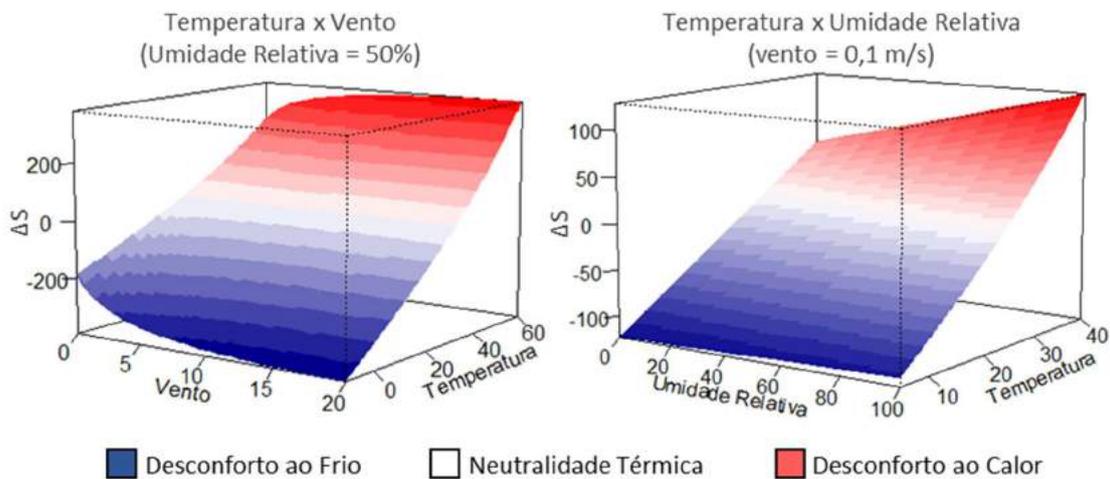


Figura 3-2: Comportamento do gradiente da superfície  $\Delta S$

Fonte: Elaboração própria

Nota: Parâmetros considerados:  $c_{lo}=0,65$ ,  $M=100$  W,  $\eta=20\%$ ,  $h_r = 4,7$ ,  $P_{sk}=5,6$ ,  $w=0,2$  e  $T_{sk}=34^\circ\text{C}$ .

A figura possibilita a verificação do comportamento monotônico da temperatura na sensação térmica de desconforto, sendo a variável de mais fácil interpretação. Quanto maior a temperatura, maior o calor. Quanto menor a temperatura, maior o frio. De fato, a partir do referencial teórico termodinâmico descrito no capítulo 2, verifica-se a temperatura como vetor principal nas trocas de calor entre os corpos. Entretanto, a sensação de calor imposta pela temperatura pode ser agravada para valores de umidade relativa maiores, sendo este efeito mais pronunciado em temperaturas mais altas. A velocidade do vento por sua vez possui caráter não linear intensificando tanto a sensação de calor quanto de frio. Portanto, o gradiente possui diferentes protagonistas

dependendo do ponto em que se analisa a superfície, sendo difícil estabelecer uma ordem de relevância das variáveis sobre a sensação térmica humana.

Apesar da noção intuitiva da Figura 3-2, o efeito do aumento da umidade relativa poderia ser mais ou menos inclinado caso a condição fixa de velocidade do vento fosse diferente no gráfico da direita. A não linearidade do efeito da velocidade do vento, por sua vez, poderia deter concavidade e convexidade diferentes dependendo da condição fixa de umidade relativa no gráfico da esquerda. Além disso, a vestimenta utilizada pelo indivíduo constitui camada isolante entre as variáveis climáticas e o desconforto térmico, sendo necessária a inspeção deste efeito.

Desta forma, para uma análise mais abrangente da influência mútua destas quatro variáveis sobre a sensação térmica do homem, a Figura 3-3 ilustra uma matriz de 8 linhas e 9 colunas, onde cada elemento desta matriz é um gráfico de velocidade do vento, de 0 a 3 m/s, na abcissa e umidade relativa, em %, na ordenada. As linhas da matriz são marcadas pelo tipo de vestimenta utilizada pelo usuário, ou seja, na quinta linha da matriz estarão dispostos os gráficos considerando clo de 1,5. Por sua vez, as colunas da matriz são marcadas pela temperatura do ar, em °C, ou seja, na terceira coluna estão dispostos os gráficos considerando  $T_a=21^{\circ}\text{C}$ . Dentro de cada elemento da matriz estão impressas todas as simulações do desconforto térmico considerando a temperatura da coluna, a vestimenta da linha, a umidade relativa do eixo vertical e a velocidade do vento do eixo horizontal, a fim de se analisar visualmente o efeito das quatro variáveis conjuntamente. Tais simulações detêm cor vermelha para situação de calor, cor azul para situação de frio e cor branca para neutralidade.

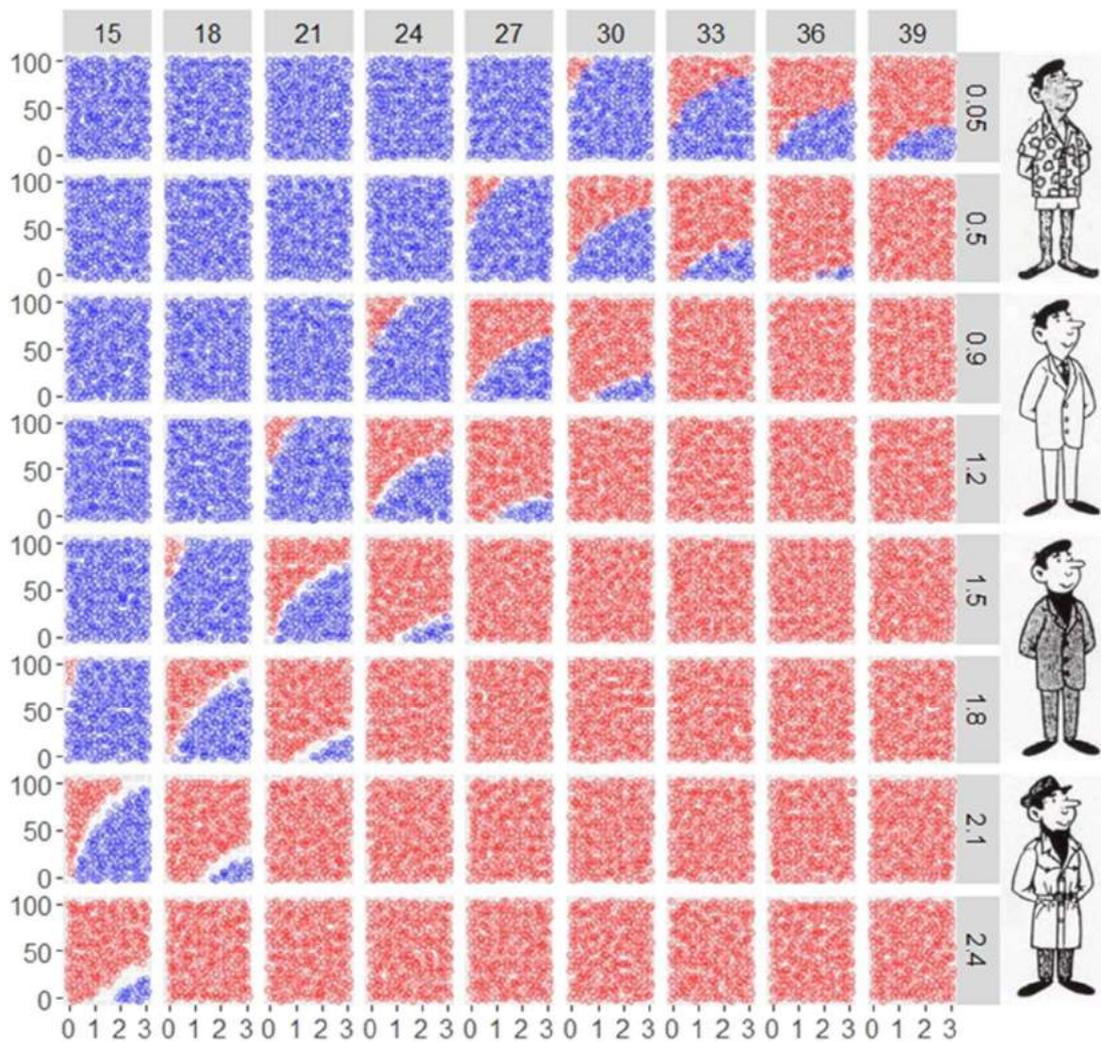


Figura 3-3: Influência mútua de Temperatura do Ar, Umidade Relativa, Velocidade do Vento e Vestimenta sobre a sensação térmica do indivíduo

Fonte: Elaboração própria a partir de Auliciems & Szokolay (2007)

Nota Parâmetros considerados:  $M=100$ ,  $n=20\%$ ,  $hr=4,7$ ,  $Ps_k=5,6$ ,  $w=0,2$ ,  $T_{sk}=34$ .

É interessante observar que, de fato conforme mencionado, a concavidade e inclinação de vento e umidade alteram-se dependendo do ponto de análise da superfície. O efeito não linear do vento torna-se mais assintótico na medida em que a temperatura aumenta. Além disso, a presença dos pontos vermelhos aumenta para maiores níveis de umidade relativa, antecipando a sensação de calor para uma determinada temperatura. Consistente ao senso comum, o uso inadequado de vestimentas em relação a temperatura ambiente pode, por si só, trazer desconforto térmico ao calor ou frio. Por outro lado, observa-se que a faixa de neutralidade aumenta para temperaturas mais baixas, dado o maior isolamento das trocas térmicas na superfície da pele do indivíduo.

Outro aspecto relevante, sobretudo ilustrado nos gráficos da diagonal sudoeste-nordeste da matriz, é o da possibilidade de calor ou frio para uma ampla faixa de temperaturas, dependendo do efeito combinado de umidade, vento e vestimenta.

Nesse sentido, o homem não é passivo à sensação de desconforto térmico, tentando mitigá-lo ou ao menos atenuá-lo adequando suas vestimentas. Entretanto, o aspecto cultural/comportamental possui forte presença nesta etapa na medida em que pode restringir a adequação das vestimentas no ambiente de trabalho, por exemplo. Em ambiente domiciliar, por sua vez, há casos em que o usuário faz uso simultâneo de ar condicionado e cobertor para o dormir, o que aparentemente não faz jus a racionalidade térmica, porém isto pode ser uma forma de controle à exposição térmica ao alterar a parcela da superfície corporal coberta e descoberta ao longo da noite.

Outras formas de controle da exposição climática estão no ajuste das aberturas da edificação à passagem de vento ou ainda de ajuste das proteções externas quanto redução da radiação solar direta incidente.

Nas simulações realizadas na Figura 3-3, admitiu-se produção de calor metabólico de 100W, compatível ao calor produzido por um indivíduo sentado, relaxado. Caso a atividade fosse mais intensa, a proporção de pontos vermelhos na figura aumentaria indicando maior desconforto térmico ao calor. Analogamente, para atividades mais leves, maior seria a proporção de pontos azuis. Desta forma, a atividade exercida pelo indivíduo influencia sua sensação de desconforto térmico, devendo ser considerada na modelagem.

Portanto, omitir qualquer das variáveis climáticas listadas como dinâmicas não é adequado para a mensuração do efeito climático sobre a carga de energia devendo serem tratadas de forma conjunta.

Os dados das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) destas variáveis podem ser obtidos em escalas horárias, diárias ou mensais. Os dados diários e mensais são dados calculados pelo instituto de forma a trazer medidas de resumo tais como mínima, máxima e média no período.

A escolha da medida resumo adequada para a entrada no modelo deve considerar o máximo de informação possível sobre aquele determinado dia. Apesar das medidas

extremas trazerem maior intuição sobre o uso da energia para controle térmico dos ambientes, as medidas máxima e mínima traduzem um único ponto de medição do dia e, desta forma descartam os outros 23 pontos. A Figura 3-4 ilustra a perda de informação ao se escolher temperaturas extremas como representativas das condições climáticas de um determinado dia, demonstrando que mesmo para valores similares de temperatura máxima, o “estoque de calor” atmosférico, representado pela temperatura média em linhas tracejadas, podem apresentar diferenças significativas.



Figura 3-4: Temperatura horária do ar medida em dias selecionados

Fonte: Elaboração própria a partir de INMET (2019c)

Nota Dados climáticos da estação meteorológica do Forte de Copacabana no Rio de Janeiro.

Adicionalmente, conforme descrito na seção 2.1, a demanda sensível ao clima ocorre em momentos distintos ao longo do dia pelas edificações e indústrias, contribuindo de forma diferenciada sobre a curva de carga horária. Além disso, as atividades exercidas pelos indivíduos ao longo do dia, bem como suas vestimentas são distintas ao longo do dia, devendo ser avaliadas por jornadas diárias. Desta forma, para evitar a volatilidade excessiva das medições horárias, porém considerando o perfil das classes de consumo distintos, vestimentas e atividades distintos ao longo do dia, serão utilizados registros médios diários para cada uma das 4 jornadas<sup>25</sup> do dia.

Apesar de definidas as variáveis que afetam diretamente o desconforto térmico do

<sup>25</sup> Madrugada, manhã, tarde e noite. A segmentação das jornadas segue detalhada no capítulo de metodologia.

indivíduo, a energia sensível ao clima por ele demandada não ocorre em ambiente externo. Dessa forma, todos os elementos meteorológicos selecionados devem ser referenciados ao ambiente interno das edificações, considerando os aspectos construtivos associados, sobretudo ao atraso e amortecimento térmico.

### 3.2. Análise exploratória da precipitação

Embora a ausência da variável precipitação nas equações de balanço térmico do homem e a mútua dependência entre os elementos meteorológicos possa induzir a negligência desta variável, deve-se analisar se não há prejuízo em tal omissão.

A Figura 3-5 ilustra a carga diária do estado do Rio de Janeiro destacando-se as estações climáticas do ano. Observa-se que a região de carga mais baixa do ano ocorre durante o inverno, momento no qual há menor demanda sensível ao clima. A carga eleva-se à medida em que se aproxima do verão e decai ao se aproximar do inverno seguinte, em linha com os movimentos sazonais das classes de consumo ilustradas na Figura 2-3. Além disso, é possível visualizar maior dispersão nos dados nas estações do verão e primavera, momento no qual há tendência de elevação da temperatura.

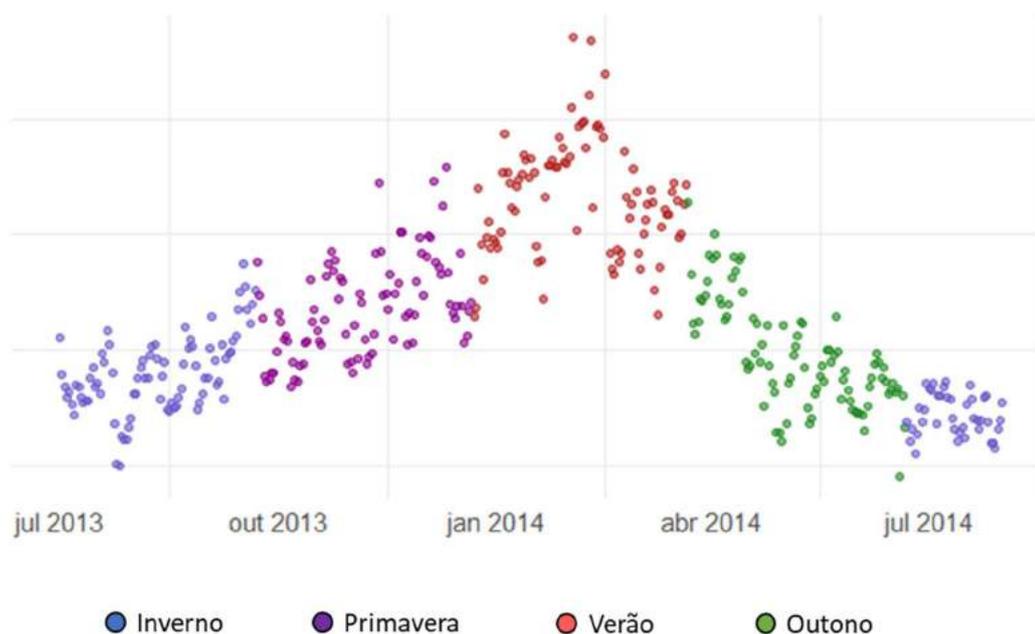


Figura 3-5: Carga diária do estado do Rio de Janeiro.

Fonte: Elaboração própria a partir de ONS (2019)

Conforme descrito na seção 1.2, a medida em que a temperatura do ar sobe, sua capacidade de retenção de vapor d'água aumenta, diminuindo os valores de umidade relativa. Entretanto, com esta elevação de temperatura mais intensivo torna-se o

processo de evaporação dos corpos d'água e evapotranspiração dos vegetais, proporcionando aumento da umidade do ar. Esta espiral ascendente culmina no alcance do ponto de orvalho e consequente precipitação.

É importante ressaltar que a precipitação não influencia diretamente o desconforto térmico, porém a ocorrência de chuva sobre a envoltória, bem como sobre elementos construtivos a sua volta configura maior amortecimento da radiação solar, alterando o microclima e adicionando inércia térmica ao local. A Figura 3-6 ilustra o efeito chuva sobre a carga de energia inspecionada inicialmente. De fato, verificam-se duas amplitudes distintas para a sazonalidade da carga. Uma mais elevada quando os arredores das edificações estão mais “secos” e outra em situação oposta.

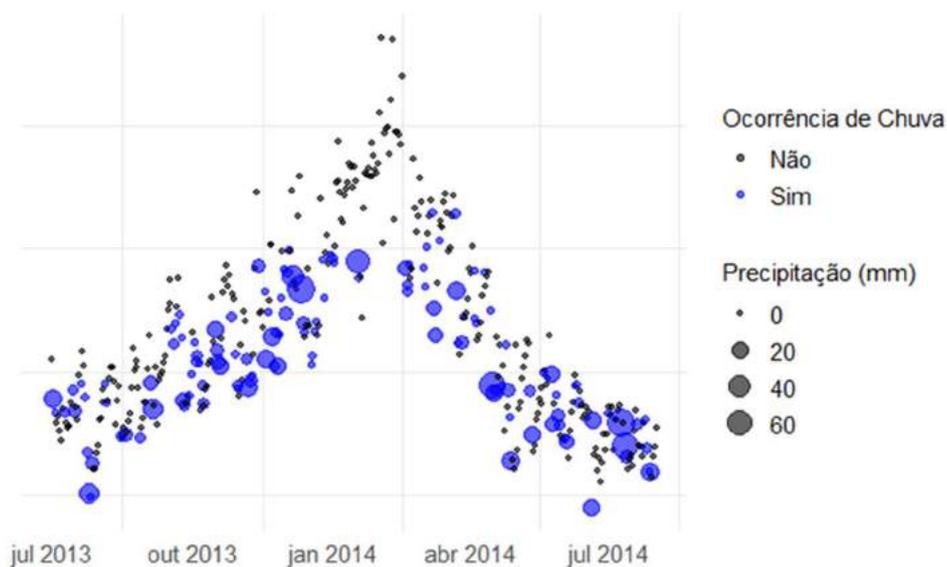


Figura 3-6: Efeito da precipitação sobre a carga diária do Rio de Janeiro.

Fonte: Elaboração própria a partir de ONS (2019f)

Nota: Para a precipitação foram considerados os valores acumulados das 24 horas anteriores a cada registro.

Com isso, fica clara a necessidade de inclusão do elemento meteorológico “precipitação” no modelo, bem como da consideração da inércia térmica das envoltórias a fim de determinar o grau de influência das variáveis externas sobre o desconforto térmico experimentado internamente nas edificações.

Em síntese, as variáveis de entrada adotadas no presente estudo foram as medidas médias diárias, por jornada, das variáveis: temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, precipitação, vestimenta e a natureza do dia da semana. No

capítulo de metodologia será tratada a forma com que estas variáveis estarão associadas a carga de energia bem como o procedimento a ser adotado para o cálculo dos efeitos calendário e climático.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. Revisão Bibliográfica

Estudos correlacionando variáveis climáticas ao uso da energia elétrica estão presentes na literatura desde o século passado. No entanto, como as oscilações da carga de energia decorrentes do clima são expressivas ao longo do ano, as consequências financeiras se tornam evidentes para os agentes do setor e consequentemente a relevância da tratativa deste tema. Além disso, a recorrência do tema demonstra que ainda há lacunas a serem exploradas, pois a maioria dos estudos contemplam a resposta energética ao clima de maneira parcial.

#### 4.1.1. Abordagem paramétrica linear

Na literatura, há unanimidade da temperatura como a variável climática mais relevante nesta relação, porém ao negligenciar o restante dos elementos climáticos, o bem-estar térmico não é amplamente mensurado. Outro ponto convergente na literatura é da relação não-linear entre temperatura e carga de energia. Entretanto, a identificação da temperatura como a variável de maior influência na relação, aliada ao princípio da parcimônia na modelagem corroborou para a ampla difusão de métodos de regressão linear do tipo CDD (*cooling degrees days*) e HDD (*heating degrees days*). Tais métodos contornam a questão da não-linearidade através do estabelecimento de temperaturas de gatilho, as quais dividem o domínio da relação em duas regiões: uma, sensível as variações de temperatura de forma linear e outra de comportamento perfeitamente inelástico a esta variável. (Sailor & Muñoz, 1997) (Lam, 1998) (Valor, et al., 2001)

Segundo Moral-Carcedo & Vicéns-Otero (2005), a metodologia de CDD e HDD foi muito difundida, porém as temperaturas de gatilho não têm sido analisadas com a devida cautela, utilizando-se referências fixas de outras regiões (tipicamente 18°). Os autores destacam que, na Espanha, a temperatura de gatilho para resfriamento e aquecimento não necessariamente devem ser as mesmas. Já Valor et al. (2001), reconhece que seria possível a utilização de duas temperaturas de gatilho diferentes, formando entre elas uma zona de conforto, a qual variações de temperatura podem não surtir efeito. Já Crowley & Joutz (2005) indicam que em regiões tropicais o consumo entre 18°C e 22° C é inelástico à temperatura.

Nesse sentido há necessidade de apuração da temperatura de gatilho ideal para cada

localidade. Alguns trabalhos tais como Amato, et al. (2005) encontram o gatilho de forma numérica, onde através de diversas simulações de gatilhos diferentes elege-se aquele com o maior poder explicativo na regressão ( $R^2$ ).

Embora haja reconhecimento da relação não-linear entre temperatura e carga de energia e da hegemonia dos métodos de CDD e HDD dentre as estratégias lineares na apuração desta relação, há métodos lineares que abordam o tema de forma diferente. Em Hekkenberg, et al. (2009) a relação é aferida pelo confronto da temperatura média diária ao longo do mês versus desvio padrão da demanda média mensal de eletricidade. Já Andrade & Sant'Anna (2013) utilizam métodos de decomposição sazonal de consumo e temperatura, associando-os posteriormente através de regressão *fuzzy* com função de pertinência triangular.

Em síntese, os trabalhos supracitados impõem formas funcionais lineares na tratativa da relação entre carga e temperatura, e por vezes é necessária separação do domínio da função em mais partes dependendo das características regionais em estudo, o que dificulta sua aplicação de forma generalizada para todos os estados do Brasil, objetivo da presente dissertação. Além disso, a ideia dos métodos lineares de CDD e HDD calcasse na suposição do uso de energia para condicionamento ambiental a partir de uma determinada temperatura. Entretanto, há outros pontos notáveis da relação entre carga e temperatura pouco abordados na literatura, como a saturação ao calor e ao frio. Na ocasião de extrema temperatura, por exemplo, a elevação de 1°C poderia não fazer efeito sobre a carga de energia dado que todo o estoque de equipamentos elétricos instalados para este fim já poderia estar acionado à carga máxima. Portanto, a metodologia dos graus dia pode superestimar o efeito nas situações de extremo calor e frio, não sendo recomendados para tais situações.

#### **4.1.2. Abordagem paramétrica não-linear**

Na literatura, abordagens paramétricas não-lineares são menos frequentes quando comparadas aos métodos de CDD e HDD para a tratativa climática associada a carga de energia. Alguns trabalhos não-lineares buscam inclusive a validação de temperaturas de gatilho de CDD e HDD, tais como em Moral-Carcedo & Vicéns-Otero (2005). Os autores, além da validação supracitada, propõem o uso de métodos de transição suave (*smooth transition*) para a tratativa do problema, ao verificar, para o caso da Espanha, a existência de três comportamentos distintos da relação entre temperatura e carga:

elasticidade ao calor, elasticidade ao frio e inelasticidade.

Em Bessec & Fouquau (2008) o método de transição suave também foi utilizado demonstrando a não linearidade da relação. Neste método, três dos principais regimes de transição são *dummy*, exponencial e logística. Os autores argumentam que embora a relação não linear possa ser complexa, é possível utilizar mais de um regime de transição.

Em ambos os trabalhos, como parte antecedente à aplicação da transição suave em si, são efetuados processos de retirada de tendência das séries de carga. As justificativas para esta tratativa giram em torno da retirada de efeitos demográficos e econômicos da relação, argumentando que o resíduo não explicado pelo ajuste anterior é devido as oscilações de temperatura. Entretanto, retirar completamente a tendência da série significa negligenciar as discussões acerca das mudanças climáticas globais, sobretudo do aquecimento gradual do planeta no longo prazo. Outro aspecto interessante é o fato da maioria dos estudos buscarem aferir as variações da carga de energia em resposta às oscilações de temperatura em valores absolutos (KW, por exemplo) para toda a série, o que é factível para países desenvolvidos, cuja demanda de energia apresenta relativa estabilidade. Entretanto, para o Brasil, tal abordagem não se torna viável sendo recomendada a análise em valores absolutos, segmentando o histórico. Dessa forma, há lacunas a serem preenchidas na literatura com relação a apuração total do efeito climático, ou seja, sem negligenciar tendência, sazonalidade e sobretudo considerando outros elementos climáticos além da temperatura.

#### **4.1.3. Abordagem fundamentalista não-paramétrica**

Partindo-se da ideia de que o indivíduo aciona seu equipamento elétrico de condicionamento ambiental a partir de certas temperaturas de gatilho, sua função de conforto térmico pode ser ilustrada como uma distribuição uniforme de probabilidade. Em uma situação hipotética, se os indivíduos fossem iguais e estivessem sob as mesmas condições, o acionamento conjunto da carga em resposta a temperatura resultaria em uma função degrau, conforme ilustrado na Figura 4-1:

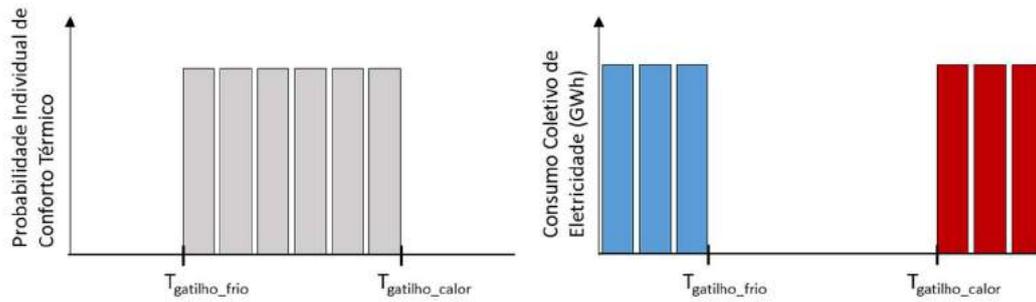


Figura 4-1: Consumo coletivo hipotético segundo distribuição individual uniforme

Fonte: Elaboração própria

Conforme ilustrado, há uma faixa de temperatura entre os gatilhos em que o indivíduo se encontra em estado de conforto térmico. Entretanto, diversos aspectos, abordados ao longo do capítulo “Referencial Teórico”, influenciam nesta faixa de conforto. A disparidade do clima entre localidades dentro de um mesmo estado, por si só, já traria não simultaneidade no consumo coletivo de eletricidade para condicionamento ambiental. Além disso, vastas são as diferenças que moldam a exposição individual ao clima. A resposta fisiológica do homem ao clima possui característica particular, em função de diversos aspectos tais como taxa de circulação sanguínea, atividade exercida, idade, gênero, grau de sedentarismo, gordura corporal, corroborando para preferências individuais distintas de temperatura. Além disso, há pessoas que podem não estar aclimatadas ao local, como é o caso de turistas ou trabalhadores em viagens temporárias. Aspectos culturais, como o tipo de vestimenta utilizada, também atuam no sentido de ampliação da faixa de conforto, postergando o acionamento de equipamentos elétricos. Outros aspectos relacionados ao local onde situam-se os indivíduos, tais como proximidade a corpos d’água, tipo de vegetação, altitude e latitude afetam os elementos meteorológicos intensificando ou atenuando-os. As características construtivas da edificação também possuem singularidades conferindo maior ou menor inércia térmica, modificando tanto a intensidade do pico de temperatura diária interna quanto o horário em que ela ocorre. Além disso, a geometria das construções ao redor da edificação pode intensificar as trocas térmicas por radiação, que de forma generalizada podem formar grandes ilhas de calor nos centros urbanos.

Nesse sentido, diversas são as justificativas para que a faixa de conforto térmico entre os indivíduos seja distinta. Adicionalmente, compor as probabilidades individuais de

conforto térmico significa , segundo o “Teorema Central do Limite”<sup>26</sup>, formar uma distribuição normal de probabilidade, conforme ilustrado na Figura 4-2.

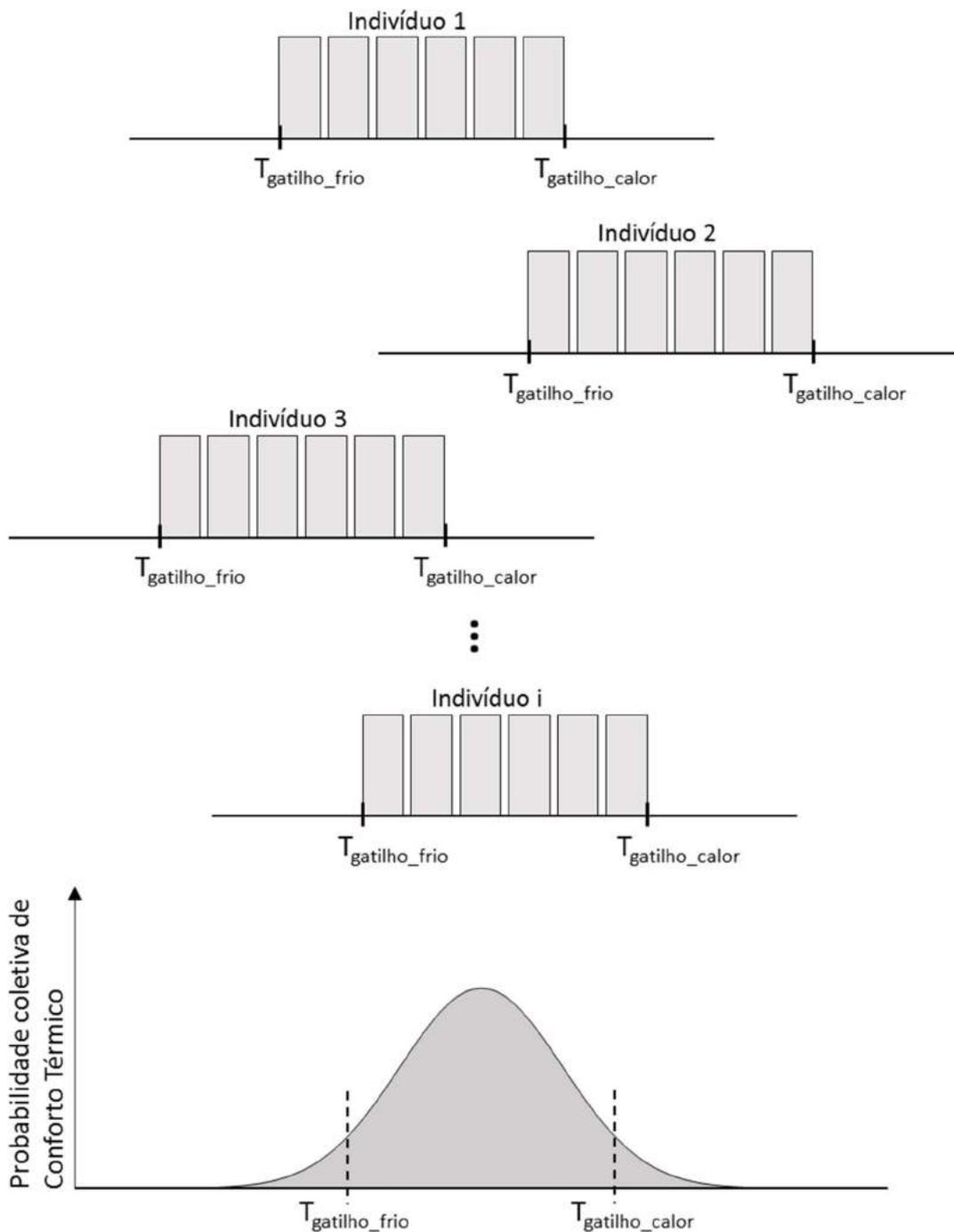


Figura 4-2: Probabilidade teórica de conforto térmico coletivo.

Fonte: Elaboração própria

A partir da Figura 4-2 fica clara a negligência da metodologia de CDD e HDD quanto

<sup>26</sup> Qualquer que seja a distribuição da variável de interesse para grande amostras, a distribuição das médias amostrais serão aproximadamente normalmente distribuídas, e tenderão a uma distribuição normal à medida que o tamanho de amostra crescer. (Bussab & Morettin, 2010)

ao início do desconforto (fim da zona de conforto). Desta forma, a ideia por trás da metodologia dos graus dia, na verdade, aponta para a temperatura de gatilho a partir da qual x% da população passa estar em desconforto térmico.

Sob a ótica do consumo coletivo de energia, é possível interpretar a forma funcional da relação entre clima e carga de energia como sendo o inverso da distribuição normal ilustrada. Entretanto, conforme descrito no capítulo de “Caracterização da Carga”, espera-se que o uso de eletricidade para climatização ambiental se dê majoritariamente para o resfriamento, dado a localização tropical brasileira além da facilidade no uso de outras fontes para o serviço energético de aquecimento, tais como gás natural, lenha, entre outros. Outro aspecto que leva a uma intensidade menor de aquecimento quando comparado ao resfriamento está no fato do indivíduo possuir mais controle sobre o frio ao fazer uso de camadas sobrepostas de roupas. De forma teórica, portanto, espera-se que a relação entre clima e carga de energia, no Brasil, siga a forma funcional ilustrada na Figura 4-3.

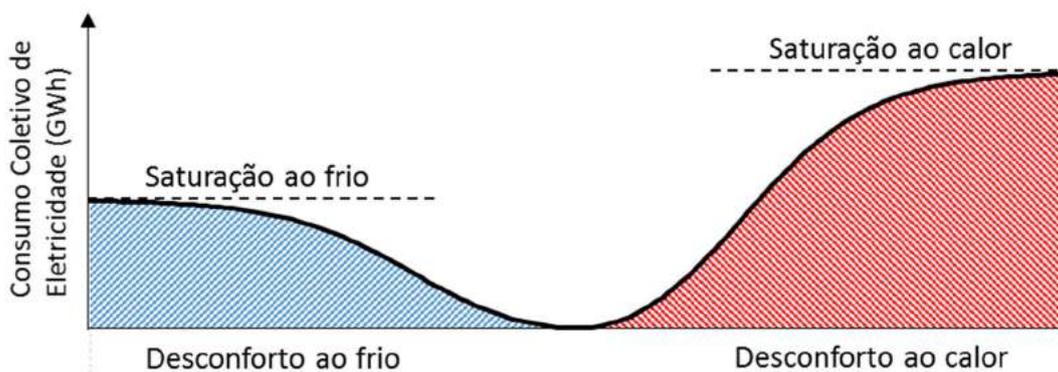


Figura 4-3: Hipótese quanto a forma funcional da relação entre clima e carga de energia no Brasil.

Fonte: Elaboração própria

É importante pontuar que a relação entre o desconforto térmico ( $\Delta S$ ) e a carga de energia apresenta características singulares para cada estado. Em latitudes mais baixas não se espera consumo de energia elétrica para o aquecimento de ambientes devido à natureza equatorial da localidade. Desta forma, a função teórica que descreve a relação entre desconforto térmico e carga de energia não apresentaria em seu domínio, valores negativos o suficiente de  $\Delta S$  que propiciasse o consumo de energia para calefação ou aquecimento de água para banho. Por outro lado, em latitudes tropicais, a amplitude térmica ao longo dos dias do ano corrobora para a ampliação do domínio da função

podendo ocasionar tanto situações de desconforto ao frio quanto ao calor.

Portanto, para que seja inferida a relação entre as variáveis, é necessário o emprego de métodos não-paramétricos que sejam flexíveis o suficiente para representar as particularidades de cada estado de modo que, a partir dos dados, seja possível verificar se a hipótese sobre a forma funcional, anteriormente descrita, é verdadeira.

#### 4.1.4. Regressão Lopes

Técnicas de suavização tem por finalidade detectar tendências na presença de dados ruidosos. Um destas técnicas é a regressão ponderada local (Loess), cujas ideias básicas podem ser observadas ao considerar-se o modelo mais simples dos modelos de regressão, onde a variável dependente,  $y$ , relaciona-se à variável independente,  $x$ , apresentando um termo de erro,  $\epsilon_i$ , independente e identicamente distribuído com distribuição normal, média zero e variância constante. (Irizarry, 2020)

$$y_i = f(x_i) + \epsilon_i$$

A regressão Loess consiste em um método não-paramétrico que estima a função “ $f$ ” na vizinhança de cada ponto de interesse  $x=x_0$ . Tal método fundamenta-se no Teorema de Taylor, no qual afirma que qualquer função, parecerá uma reta, se analisada por trechos menores. Devido a este fato, a regressão Loess torna-se vantajosa para explorar relações entre variáveis sem definir uma forma funcional previamente. (Cleveland, et al., 1992)

Ao ajustar uma linha localmente, Loess minimiza quadrados de forma ponderada, dando maior peso a valores mais próximos de  $x_0$ , conforme equação abaixo. Tal fato atribui outra característica desejável na inferência da relação entre clima e carga de energia, pois segundo, Cleveland, et al. (1992), a curva suavizada configura resiliência à presença de outliers.

$$\min \sum_{i=1}^N \omega_0(x_i) \cdot [Y_i - \{\beta_0 + \beta_1 \cdot (x_i - x_0)\}]^2$$

A função de Kernel “ $\omega$ ” é responsável por ponderar os erros desta minimização na vizinhança de cada ponto de interesse,  $x_0$ . A função de Kernel associada à técnica de suavização Loess mais popular na literatura é a função Tukey tri-weight, descrita abaixo. (Irizarry, 2020)

$$\omega_0(x_i) = W\left(\frac{x_i - x_0}{h}\right)$$

$$\begin{cases} W(u) = (1 - |u|^3)^3, & \text{se } |u| \leq 1 \\ W(u) = 0 & \text{se } |u| > 1 \end{cases}$$

Como o método é calculado localmente, na vizinhança de cada ponto de interesse, é necessário estabelecer o tamanho desta vizinhança. Tal hiper parâmetro, chamado “span”, define quantos pontos participarão, por vez, do processo de minimização e consequentemente propicia curvas mais, ou menos, suavizadas. Entretanto, a definição do span recai sobre o dilema Viés x Variância. Ou seja, com “span” muito pequeno, as janelas são curtas, poucos pontos participam da minimização, a curva fica mais ruidosa aproximando-se mais dos dados observados (menos viés), porém o fato de aproximar-se tanto dos dados desta amostra (overfit), demonstra péssimas previsões para outras amostras (alta variância). Por outro lado, com “span” muito grande, a janela de minimização abarca a quase totalidade dos dados, alterando-se pouco com a troca de amostras (baixa variância), porém de forma global, a função pode não apresentar particularidades locais da relação entre as variáveis (alto viés). Dessa forma, é recomendável a definição deste hiper parâmetro através do processo de validação cruzada. (Hastie, et al., 2008)

#### 4.1.5. Validação Cruzada

A verdadeira função entre as variáveis dependente e independente é desconhecida. Entretanto, diversos métodos quantitativos propõem-se a estimar tal relação através do treino do modelo em uma parte da base de dados e teste da acurácia nos dados restantes disponíveis. A regra fundamental deste processo é que a base de teste não deve ser utilizada para treinamento, de modo que a acurácia seja válida. Entretanto, ao fazer este processo uma única vez, valida-se o viés deste único resultado, mas não sua variância. (Irizarry, 2020)

$$M\hat{S}E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2$$

Nesse sentido, o processo de validação cruzada, como o nome sugere, consiste em simular mais situações para que a validação ocorra mais de uma vez. De forma detalhada, divide-se aleatoriamente a amostra de treino em “k” pedaços iguais, onde em

cada pedaço serão validados os resultados com base no treinamento dos k-1 pedaços restantes. Desta forma, ao final obtém-se um viés médio de todas as simulações bem como sua variância. (Irizarry, 2020)

$$MSE(\lambda) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i^b(\lambda) - y_i^b)^2$$

Além de propiciar mais chances de teste do modelo, o processo de validação cruzada também é muito utilizado na acurácia entre modelos. Desta forma, através do processo de validação cruzada, será obtido o valor do “span” que minimiza o viés médio de todas as simulações, conforme ilustrado na Figura 4-4.

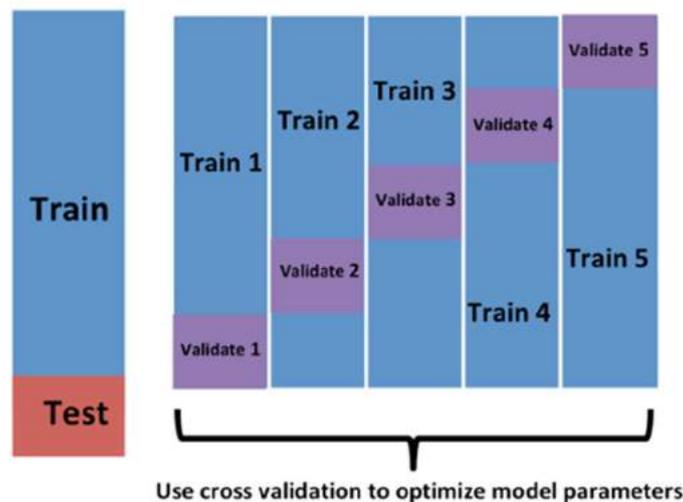


Figura 4-4: Definição do span por validação cruzada

Fonte: (Irizarry, 2020)

Entretanto, antes de aplicar o método na apuração da relação entre clima e carga de energia, é necessário definir de que forma esta influência será medida, além do tratamento de dados requisitado para isto.

#### 4.2. Definição do escopo de análise

A existência da relação entre clima e uso da energia é notável sendo discutida em diversos trabalhos acadêmicos. Entretanto, mensurar tal relação impõe diversos desafios não só na escolha das variáveis apropriadas, como na definição dos recortes de análise, frequência e abrangência das séries destas variáveis. Tal estratégia, chamada *feature engineering*, permite que características conhecidas dos dados possam definir o modo como serão analisadas as informações, ainda que não sejam utilizadas diretamente de

forma quantitativa na relação. A título de exemplificação, tentar aferir a influência, em base anual, da temperatura sobre a carga de energia certamente resultariam em baixa aderência, ainda que fossem utilizados os mais complexos métodos quantitativos. Desta forma, busca-se primeiramente a adequação das bases de dados a luz dos fundamentos descritos nos capítulos anteriores.

#### **4.2.1. Recortes e frequência dos dados**

Os elementos meteorológicos possuem alta volatilidade ao longo do ano, dos meses, dos dias e das horas, devido a uma série de fatores climáticos, sobretudo dos diferentes níveis de radiação solar ao longo do tempo. Apesar da quantidade expressiva de informação por trás de tais variações em bases horárias é preciso utilizar os dados com parcimônia a fim de atenuar possíveis erros de medição, falhas de sensores, ou outros aspectos funcionais das estações climáticas.

Adicionalmente, o uso da eletricidade pelas diversas classes de consumo ocorre de maneira diferenciada ao longo do dia. O consumo de energia elétrica nos diversos setores produtivos, por exemplo, concentra-se nos períodos da manhã e tarde, enquanto nas residências o uso da energia ocorre majoritariamente nos períodos da noite e madrugada. Entretanto, as informações disponíveis sobre o uso da energia em cada classe de consumo estão em bases mensais, dificultando a mensuração do efeito climático sobre as classes de forma isolada.

Nesse sentido, pela impossibilidade de uso direto das séries de consumo por classe em granularidade horária e pela parcimônia no uso dos dados climáticos, adotou-se a carga de energia diária do sistema de supervisão do ONS dividindo-a em 4 jornadas, discriminadas na Tabela 4-1. Para isto, foram calculadas as médias diárias de carga, temperatura, umidade relativa e velocidade do vento no período de cada jornada.

Tabela 4-1: Definição das Jornadas diárias

| <b>J</b> | <b>Jornada</b> | <b>Período</b> |
|----------|----------------|----------------|
| 1        | Madrugada      | 0:00 às 06:00  |
| 2        | Manhã          | 6:00 às 12:00  |
| 3        | Tarde          | 12:00 às 18:00 |
| 4        | Noite          | 18:00 às 24:00 |

Fonte: Elaboração própria.

#### 4.2.2. Abrangência das séries

Quanto a abrangência espacial dos dados, levou-se em consideração o fato das características do clima de cada localidade serem específicas dada a ação do macro clima da região e, sobretudo do microclima resultante do conglomerado urbanístico peculiar de cada estado. Embora em um mesmo estado, ou ainda, dentro de uma mesma cidade possa haver diversos microclimas, a menor granularidade dos dados de energia disponível, que atendam ao recorte e frequência definidos anteriormente, é de nível estadual. Entretanto, para buscar maior afinidade do efeito climático sobre a carga de energia, ainda que o escopo se limite a abrangência espacial por estado, elegeram-se estações meteorológicas situadas nas capitais de cada UF. Tal escolha considera a maior densidade populacional e concentração de renda como características que configuram maior probabilidade ao uso de equipamentos elétricos responsivos ao clima.

A base de dados de carga de energia horária por estado disponibilizada para este estudo possui registros de 2010 a 2018 e foi obtida do sistema de supervisão do ONS. Já as informações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) foram obtidas de duas bases de dados distintas e complementares. A base de informações das estações ditas convencionais possui registros diários de temperatura, umidade relativa e velocidade do vento desde 1961. Por outro lado, a base de informações meteorológicas das estações ditas automáticas possui registros em bases horárias a partir dos anos 2000. Apesar das bases de carga de energia e estações meteorológicas automáticas possuírem

ampla interseção temporal, foram coletados adicionalmente os dados das estações convencionais de forma a complementar os registros ausentes das estações automáticas bem como para formar uma base histórica, cuja utilidade será detalhada na seção “Tratamento da base climatológica”. Desta forma, as estações meteorológicas selecionadas para o estudo seguem listadas na Tabela 4-2.

Tabela 4-2: Estações meteorológicas convencionais e automáticas selecionadas

| UF | Município            | Estação Convencional | Estação Automática |
|----|----------------------|----------------------|--------------------|
| AC | RIO BRANCO           | 82915                | A104               |
| AL | MACEIÓ               | 82994                | A303               |
| AM | MANAUS               | 82331                | A101               |
| AP | MACAPÁ               | 82098                | A249               |
| BA | SALVADOR             | 83229                | A401               |
| CE | FORTALEZA            | 82397                | A305               |
| DF | BRASÍLIA             | 83377                | A001               |
| ES | VITÓRIA              | 83648                | A612               |
| GO | GOIÂNIA              | 83374                | A002               |
| MA | SÃO LUÍS             | 82280                | A203               |
| MG | BELO HORIZONTE       | 83587                | F501               |
| MS | CORUMBÁ/CAMPO GRANDE | 83513                | A702               |
| MT | CUIABÁ               | 83361                | A901               |
| PA | BELÉM                | 82191                | A201               |
| PB | JOÃO PESSOA          | 82798                | A320               |
| PE | RECIFE               | 82900                | A301               |
| PI | TERESINA             | 82578                | A312               |
| PR | CURITIBA             | 83842                | A807               |
| RJ | RIO DE JANEIRO       | 83743                | A652               |
| RN | NATAL                | 82598                | A304               |
| RO | PORTO VELHO          |                      | A925               |
| RR | BOA VISTA            | 82024                | A135               |
| RS | PORTO ALEGRE         | 83967                | A801               |
| SC | FLORIANÓPOLIS        | 83897                | A806               |
| SE | ARACAJU              |                      | A409               |
| SP | SÃO PAULO            | 83781                | A701               |
| TO | PALMAS               | 83033                | A009               |

Fonte: Elaboração própria.

Nota 1: Os estados de Rondônia e Sergipe não possuem estações meteorológicas convencionais nas capitais. Para estes estados utilizou-se apenas a base de informações oriundos das estações automáticas.

Nota 2: Embora tenham sido coletas as informações meteorológicas para os estados de Roraima e Amapá, estas não foram utilizadas por ausência ou insuficiência de dados de carga de energia nas respectivas competências.

### **4.3. Tratamento da base de dados de Carga de Energia**

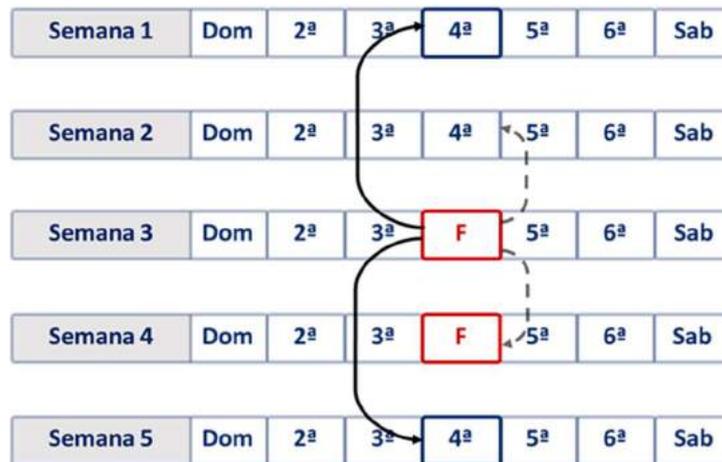
Apesar de definido o escopo de variáveis em análise bem como sua abrangência temporal e espacial, mais etapas de *feature engineering* devem ser consideradas para redução de ruídos nas séries de carga. Desta forma, buscou-se adequar as séries corrigindo questões como correção do efeito calendário, falha de registros, quebras de série ou eventuais desníveis por efeitos transitórios de grandes cargas industriais. Tais correções são detalhadas a seguir.

#### **4.3.1. Correção do efeito calendário**

Como descrito no capítulo de caracterização da carga há diferenças entre a carga diária em cada dia da semana, devido a diversos aspectos tais como econômicos e comportamentais. Adicionalmente, em feriados, o ciclo diário de atividade de cada classe de consumo assemelha-se a sábados ou domingos típicos. Desta forma, para que seja possível verificar o efeito climático sobre a carga é preciso, primeiramente, corrigir o efeito do calendário a fim de analisar dias sobre uma mesma base de comparação.

A metodologia apresentada inspira-se na proposta formulada por Castro, et al. (2016), na qual há tratamento diferenciado de cada dia da semana bem como dos feriados. Entretanto, novamente adequando a metodologia às características das variáveis de carga e clima fundamentados nos capítulos anteriores, alguns ajustes na metodologia proposta, descritos a seguir, foram realizados.

A carga de um dia de feriado não será considerada, utilizando em seu lugar a média das cargas diárias dos mesmos dias da semana das duas semanas adjacentes, desde que sejam dias isentos de feriados. Caso haja, feriado em pelo menos um destes dias, deve-se aplicar o método nas semanas equidistantes seguintes até que a condição seja atendida. Os feriados considerados no estudo seguem listados no Anexo IV. A Figura 4-5 ilustra o processo.



$$Carga(4^a\_Sem3)_{UF,j,r} = \frac{Carga(4^a\_Sem1)_{UF,j,r} + Carga(4^a\_Sem5)_{UF,j,r}}{2}$$

Figura 4-5: Procedimento de tratamento dos feriados

Fonte: Elaboração própria

Nota: j=Jornada, UF=unidade federativa, r=dia da semana

De forma similar ao proposto por Calili, et al. (2016), os quais calculam o PU da carga diária em relação a carga média semanal para cada dia do histórico e posteriormente obtém um valor típico de PU para cada dia da semana (2ª,3ª,...,Sábado, Domingo e Feriado) calculando a média histórica dos respectivos PUs. É importante observar que mesmo ao calcular os Pus de cada dia, ainda há presença do efeito climático sobre eles. Pode-se considerar, para grandes amostras, que o efeito climático sobre os dias da semana possui caráter aleatório e, dessa forma, não atribui viés de efeito climático sobre determinado dia da semana. Entretanto, ao calcularem uma única média de todo o histórico para cada dia da semana elegendo-as como típicas, os autores precipitam-se pois, a demanda por climatização ambiental é sazonal durante o ano e portanto, as semanas do verão demandam, tipicamente, mais energia elétrica que semanas de inverno, tendendo a suavizar os PUs calculados.

Dessa forma, a partir da carga corrigida de feriados deve-se calcular médias dos PUs em intervalos mais curtos para que comportamentos de diferentes perfis semanais não sejam tratados de forma igual. Por outro lado, reduzir demais o número de observações que participam destas médias, pode trazer problemas na representatividade do PU típico adequado. Desta forma, adotou-se PUs típicos para cada dia da semana em de cada mês, calculando médias diárias dos pus de cada jornada. A Figura 4-6 ilustra de forma esquemática o procedimento supracitado na obtenção do PU típico das 4ª feiras para o

mês de janeiro de São Paulo.

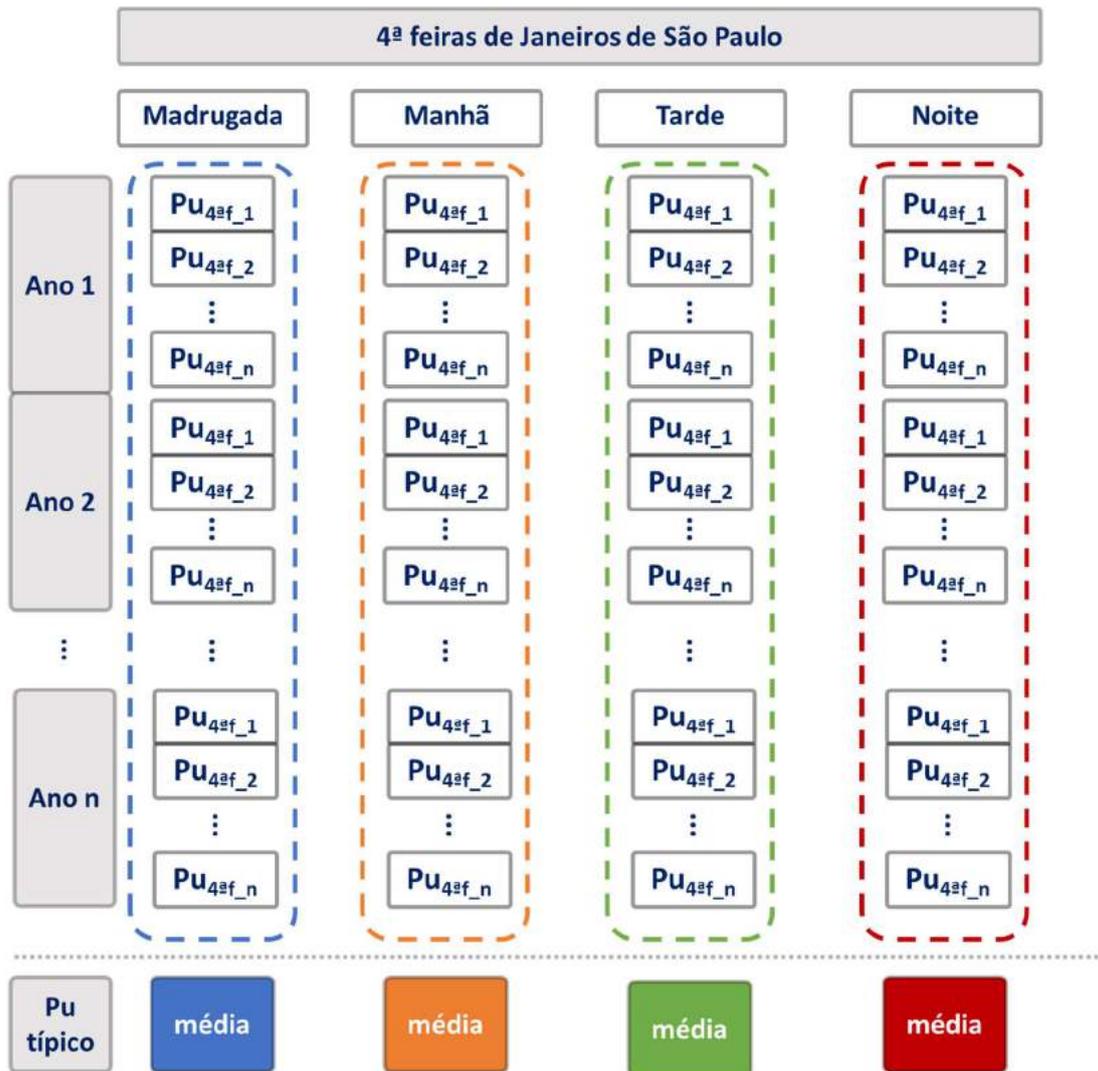


Figura 4-6: Procedimento para obtenção dos PUs típicos dos dias da semana

Fonte: Elaboração própria

Com a carga corrigida de feriados e os PUs típicos de cada dia da semana calculados por jornada e mês, calcula-se a carga diária equivalente semanal de cada jornada do histórico. Ou seja, faz-se uma normalização dos dados de cada dia do histórico para seu equivalente semanal em cada jornada, encerrando-se o processo de correção do efeito calendário.

#### 4.3.2. Tratamento das demais imperfeições das séries de carga

A partir da série de carga corrigida do efeito calendário, verifica-se em análise visual, possíveis imperfeições das séries de carga quanto aos desníveis e oscilações aleatórias não sistemáticas. Tais alterações de carga podem, de fato, ter ocorrido, porém devido ao

caráter não sistemático, pouco guardam relação com os efeitos climáticos em estudo, sendo suprimidas da análise. Adicionalmente há quebras de série a partir de fevereiro de 2012 dada a Resolução Normativa ANEEL-REN440/2011 a qual melhorou a governança<sup>27</sup> na coleta de dados de geração das pequenas usinas.

Pela indisponibilidade do montante de pequenas usinas por estado de forma horária, as séries de carga de Jan/2010 a Jan/2012 foram acrescidas por valores médios constantes relativos à diferença, por jornada, entre a carga anual média de cada ano em relação a carga anual média em 2013<sup>28</sup>.

A quebra das séries é notória nos estados: AL, BA, GO, MA, MG, PA, SE e SP. Para as demais UFs, a adição das pequenas usinas na base técnica de supervisão e programação do ONS foi nula ou não significativa frente ao respectivo montante de carga estaduais, sendo considerado, portanto, o histórico desde 2010. A título de exemplificação a Figura 4-7 ilustra, após a correção do efeito calendário, a necessidade de tratamento adicional supracitada das séries de carga diárias para a jornada da tarde dos estados de Alagoas e Bahia.

---

<sup>27</sup> O processo de coleta dos dados referentes as pequenas usinas não supervisionadas pelo ONS, que antes eram coletados pelas distribuidoras e declarados ao operador, encontravam inconsistências quanto a tempestividade e qualidade dos dados. De fato, os agentes de geração em questão não necessariamente possuíam relação comercial com as distribuidoras, o que dificultava o processo. Com a REN 440/2011 da ANEEL, a informação já coletada pela CCEE para fins de liquidação contábil, passou a ser fornecida da câmara para o operador diretamente.

<sup>28</sup> Exceção para os estados Maranhão e Alagoas com nivelamento aos anos de 2016 e 2014, respectivamente. O Espírito Santo, por sua vez, apesar de apresentar nivelamento relativo as pequenas usinas em 2013, também foi necessário nivelamento do período 2017-2018 em relação à 2015 devido ao nítido desnível de produção de eletrointensivo no estado.

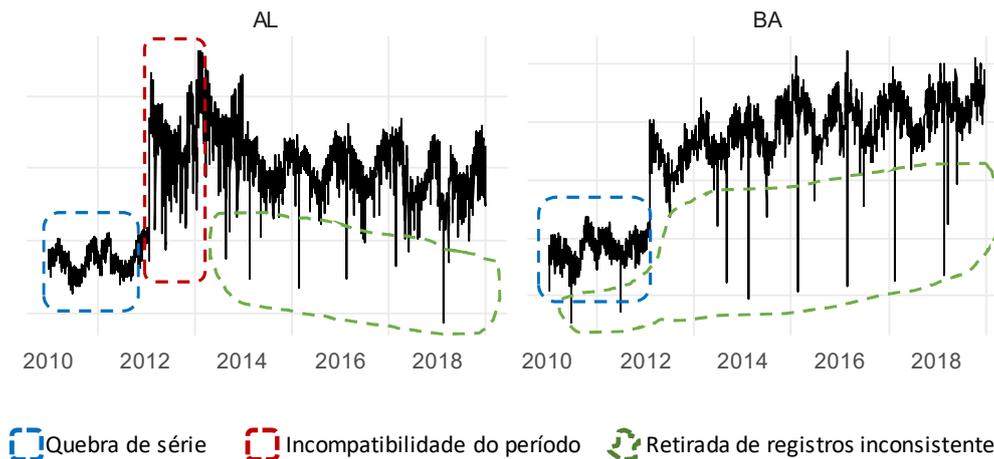


Figura 4-7: Ajustes remanescentes das séries de carga diária equivalente semanal após a correção do efeito calendário

Fonte: Elaboração própria a partir de ONS (2019)

Nota: Os demais resultados por UF e jornada estão dispostos no Apêndice A.

Nota: Devido a não disponibilidade pública dos dados de carga, os valores das abcissas foram omitidos.

Além do tratamento visual, foram retirados registros inconsistentes de carga, exemplificados em verde na Figura 4-7. Como método classificatório de inconsistência, adotou-se o critério dos desvios negativos além de -15% em relação a carga neutra, cuja conceituação e cálculo será abordada na seção “Cálculo da Carga Neutra”. Já para os desvios positivos inconsistentes, devido a sua eventual presença, foram retirados pontualmente por inspeção visual da série. As datas dos registros de inconsistência seguem listados no Apêndice B. Para fins de referência, a carga corrigida de calendário, nivelada, filtrada de imperfeições e períodos incompatíveis será tratada ao longo da dissertação pela nomenclatura: carga corrigida de calendário’.

#### 4.4. Tratamento da base de dados climática

Assim como realizado nos dados de carga de energia, o *feature engineering* deve sanear as bases meteorológicas de forma a propiciar maior relevância das variáveis explicativas na relação entre clima e carga de energia. Segundo o INMET (2011) os dados de temperatura, umidade relativa e velocidade do vento são medidos a 10 metros de altura em área livre de obstruções naturais e prediais. Nesse sentido, é necessário tratar os valores medidos a fim de mensurar medidas equivalentes internas às edificações, onde o uso de energia para adequação climática ocorre.

Adicionalmente, tão interessante quanto aferir a quantidade de energia dispendida em

resposta as alterações climáticas ao longo do ano é mensurar o quanto de energia foi utilizada além do que se esperava devido a anomalias climáticas de determinados períodos. Para configuração de tipicidade o INMET realiza médias de longos períodos, as chamadas Normais Climatológicas, por exemplo, levam em consideração 30 anos de observações. Nesse sentido a presente dissertação compôs uma base meteorológica histórica suficientemente grande, nos moldes de jornada, frequência, espacialidade e temporalidade definidas.

Portanto, esta seção descreve a metodologia para os dois tratamentos das bases climáticas mencionados.

#### **4.4.1. Transformação das variáveis externas das estações meteorológicas em variáveis internas aos edifícios**

Conforme descrito no capítulo “Referencial Teórico”, a envoltória de uma edificação é fundamental para atenuação da severidade climática externa ao longo do dia. A chamada inércia térmica das edificações não só atrasada como amortece a temperatura externa deixando-a mais amena no ambiente interno. A nível de projeto arquitetônico de conforto térmico, Frota & Schiffer (2001) demonstram um método de cálculo da temperatura interna máxima considerando o coeficiente de amortecimento da construção e temperaturas máximas e mínimas, conforme equação descrita abaixo:

$$t_{i\max} = \bar{t}_e + (1 - m).E + (1 - m).\Delta t$$

Onde:

$t_{i\max}$  = Pico de temperatura interna;

$\bar{t}_e$  = média entre temperatura máxima e temperatura mínima típicas;

$m$  = coeficiente de amortecimento. Com escalas de 0,4 para inércia muito fraca, 0,6 para inércia fraca, 0,8 para inércia média e 1,0 para construção de inércia muito forte;

$E$  = alongação da curva, equivalente a quarta parte da amplitude térmica diária; e

$\Delta t$  = diferença de temperatura externa e interna calculada via outros parâmetros de projeto.

De acordo com PROCEL/ELETOBRAS (2019) e MME/EPE (2017), observa-se que para a maior parte das edificações brasileiras tanto de estabelecimentos comerciais quanto de residências a envoltória, o mais comum é o uso de alvenaria com revestimento nas paredes e lajes de concreto/telhas de barro nas coberturas. Em consulta

ao Anexo D da Norma Brasileira de desempenho térmico das edificações NBR 15220-2, verifica-se que os parâmetros de atraso térmico correspondentes ao perfil levantado pelas pesquisas supracitadas permeiam valores de 3,3 a 3,7 horas, conforme destacado abaixo:

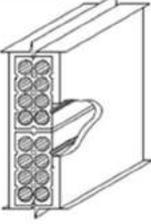
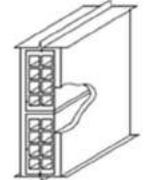
| Parede   | Descrição   | U [W/(m <sup>2</sup> .K)] | C <sub>T</sub> [kJ/(m <sup>2</sup> .K)] | φ [horas] |
|--|---|---------------------------|---|-----------|
|   | Parede de tijolos de 8 furos circulares, assentados na menor dimensão<br>Dimensões do tijolo: 10,0x20,0x20,0 cm<br>Espessura da argamassa de assentamento: 1,0 cm<br>Espessura da argamassa de emboço: 2,5 cm<br>Espessura total da parede: 15,0 cm | 2,24                      | 167                                     | 3,7       |
|   | Parede de tijolos 8 furos quadrados, assentados na menor dimensão<br>Dimensões do tijolo: 9,0x19,0x19,0 cm<br>Espessura da argamassa de assentamento: 1,0 cm<br>Espessura da argamassa de emboço: 2,5 cm<br>Espessura total da parede: 14,0 cm      | 2,49                      | 158                                     | 3,3       |
|  | Cobertura de telha de barro com forro de laje mista<br>Espessura da telha: 1,0 cm<br>Espessura da laje: 12,0 cm<br>R <sub>t(laje)</sub> = 0,0900 (m <sup>2</sup> .K/W)<br>C <sub>T(laje)</sub> = 95 kJ/(m <sup>2</sup> .K)                          | 1,92                      | 113                                     | 3,6       |

Figura 4-8: Atraso térmico das envoltórias brasileiras

Fonte: Adaptado de NBR 15220-2

Portanto, inspirando-se na fórmula de cálculo da temperatura interna descrita em Frota & Schiffer (2001), e considerando a partir de PROCEL/ELETOBRAS (2019), MME/EPE (2017) e NBR 15220-2 um atraso térmico de 4 horas, foram calculadas as temperaturas internas máximas de cada dia da base de estações automáticas do INMET, pela seguinte expressão:

$$t_{i\_max} = \frac{t_{e\_max} + t_{e\_min}}{2} + (1 - m) \cdot \frac{t_{e\_max} - t_{e\_min}}{4} + (1 - m) \cdot (t_{i\_max} - t_{e_{h+4}})$$

Onde:

$t_{e\_max}$  = temperatura externa máxima diária;

$t_{e\_min}$  = temperatura externa mínima diária;

$t_{i\_max}$  = pico de temperatura interna, cuja ocorrência se dá 4 horas após o pico de temperatura externa;

$m$  = segundo Frota & Schiffer (2001), coeficiente de amortecimento de 0,6 para alvenaria de tijolo com reboco interno e externo em configurações similares as

levantadas pelas pesquisas PROCEL/ELETRONBRAS (2019), MME/EPE (2017); e  $t_{eh+4}$  =temperatura externa no momento da ocorrência do pico da temperatura interna.

Após o cálculo da temperatura interna máxima é calculado, efetivamente, o amortecimento a ser aplicado sobre as diferenças da temperatura externa em relação a temperatura média diária em cada hora.

$$Amortecimento = \frac{(t_{i\_max} - t_{med})}{(t_{e\_max} - t_{med})}$$

Com isso, os registros de temperatura das estações automáticas são referidos ao ambiente interno as edificações, conforme exemplificado na Figura 4-9.

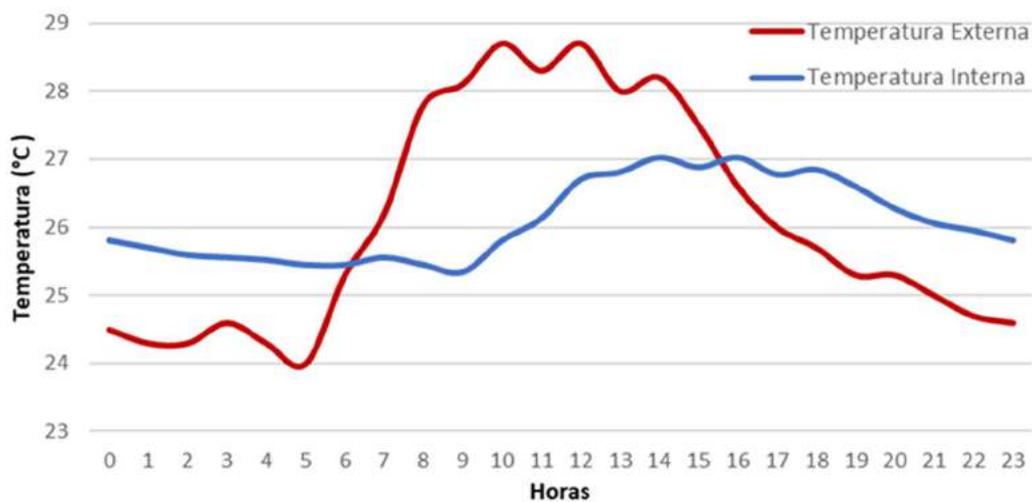


Figura 4-9: Amortecimento e defasagem entre temperaturas externa e interna para o Rio de Janeiro no dia 19 de janeiro de 2013

Fonte: Elaboração própria a partir de INMET (2019c)

Para a adequação da velocidade do vento no interior das edificações há extrema dificuldade na adoção de uma tratativa genérica representativa das diversas especificidades locais. A circulação de ar em um centro urbano sofre diversos desvios de curso devido ao aspecto urbanístico e orientação das aberturas em relação a direção de vento dominante. Além disso, a altura diferenciada das construções também traz desafios a eleição de um valor típico interno. Em residências, por exemplo, a intensidade do vento incidente sobre as janelas em uma casa é significativamente diferente de um apartamento de andar elevado, ainda que sob a mesma orientação cardinal. Dessa forma, considerou-se, como limite mínimo, vento ameno no interior dos ambientes (segundo Frota & Schiffer (2001),  $v=0,1$  m/s) e como limite máximo o menor

valor entre 1,0 m/s e intensidade do vento externo.

$$\begin{cases} v_{min} = \min \{0,1; v\} \\ v_{max} = \min \{1,0; v\} \end{cases}$$

Para a umidade relativa, adotou-se valores internos como iguais aos medidos nas estações meteorológicas assumindo como premissa a constante renovabilidade do ar no interior dos ambientes.

#### 4.4.2. Composição de base climática histórica única

Os dados meteorológicos disponíveis, foram coletados de duas bases de dados do INMET. Uma delas oriunda das estações convencionais, contendo registros diários de temperatura, umidade relativa e velocidade do vento com registros desde 1961. A outra, formada pelos dados de medição horária das estações meteorológicas automáticas possui registros das mesmas variáveis, porém com histórico somente a partir de 2000.

Apesar da extensa massa de dados, disponível, há ausência de diversos registros que devem ser complementados para que não haja viés no cálculo das médias das variáveis por jornada. Além disso, para que seja possível comparar e identificar períodos climáticos anômalos, faz-se necessário a formação de uma base suficientemente grande para o cálculo de valores típicos com representatividade adequada. Desta forma, a partir dos períodos em que há registros em ambas as bases, calculam-se as relações entre elas para cada registro de cada variável.

$$relação\_temp_{UF,j,m,d} = \frac{T_{interna\_UF,j,m,d}}{T_{media\ diária\ convencional}}$$

$$relação\_UR_{UF,j,m,d} = \frac{UR_{UF,j,m,d}}{UR_{media\ diária\ convencional}}$$

$$relação\_vento_{UF,j,m,d} = \frac{Vento_{externo\_UF,j,m,d}}{Vento_{médio\ diário\ convencional}}$$

Onde:

UF = estado;

j = Jornada;

m = mês; e

d = dia.

A partir da média por UF, mês e dia obtém-se as relações típicas para cada dia do ano para variável em cada jornada. A partir destas relações típicas, completam-se os dados de temperatura, umidade relativa, e vento, por jornada para cada dia do histórico de 1961 a 2018.

É importante ressaltar que o critério de adequação do vento à condição interna da edificação, descrita na seção anterior, ocorre após o preenchimento da série histórica de forma completa.

#### 4.5. Aplicação do modelo de dois nós

O modelo de dois nós possibilita o cálculo do conforto térmico de indivíduos segundo a fisiologia humana através de uma equação de balanço térmico. Para valores positivos de  $\Delta S$ , o homem experimenta sensação de desconforto ao calor e no de caso  $\Delta S < 0$ , o homem sente frio. Na situação de neutralidade térmica, a equação de balanço está em equilíbrio, ou seja, a taxa de produção de calor metabólica se iguala a taxa de dissipação deste calor para o ambiente ( $\Delta S = 0$ ).

A atividade exercida pelo indivíduo influencia a produção de calor metabólico e, portanto, a quantidade térmica a ser dissipada para a manutenção da temperatura interna corporal (homeotermia). Apesar de haver extensa dissimilaridade entre as atividades exercidas pelos indivíduos, a presente dissertação assume, para todas as jornadas, a produção de calor metabólico de  $93 \text{ W/m}^2$ , correspondente as atividades listadas na Tabela 4-3.

Tabela 4-3: Atividades selecionadas para o modelo

| Atividade                  | Referência                   |
|----------------------------|------------------------------|
| Atividades laborais        | (Lamberts, et al., 2014)     |
| Lavar pratos em pé         | (Lamberts, et al., 2014)     |
| Cozinhar                   | (Lamberts, et al., 2014)     |
| Fazer compras              | (Auliciems & Szokolay, 2007) |
| Trabalho muito leve        | (Auliciems & Szokolay, 2007) |
| Trabalho em indústria leve | (Auliciems & Szokolay, 2007) |

Fonte: Elaboração própria a partir das referências supracitadas.

Nota: A atividade basal (durante o sono) embora típica para a jornada da madrugada, não foi adotada, admitindo que a tomada de decisão sobre o uso elétrico para conforto térmico ocorre previamente ao repouso, ou seja, atividades semelhantes à jornada da noite.

Entretanto, o homem não é passivo à exposição climática adequando naturalmente suas vestimentas ou ainda ajustando as aberturas da edificação de modo a regular o fluxo de ar no interior dos ambientes. Dessa forma, ele alarga a faixa de conforto até certo ponto, estando propenso a consumir energia para controle térmico ambiental a partir destes limites.

A Figura 4-10 ilustra sobre a carga corrigida de calendário' da jornada da noite, qual seria a sensação de desconforto de um indivíduo que admite o uso mínimo de vestimentas leves cujo  $clo_{leve}=0,29$  e  $w_{leve}=0,324$  e que no máximo utiliza vestimentas pesadas de  $clo_{pesado}=0,35$  e  $w_{pesado}=0,130$ . Tal indivíduo experimentaria sensações distintas de desconforto quando exposto as condições climáticas do Amazonas e Rio Grande do Sul, conforme ilustrado. Analogamente, o mesmo indivíduo, exercendo a mesma atividade, caso admitisse outros limites de vestimenta ( $clo_{leve} = 0,5$ ,  $w_{leve} = 0,180$  e  $clo_{pesado} = 1,0$ ,  $w_{pesado} = 0,130$ ), teria seu balanço térmico corporal diferente quando exposto às mesmas situações climáticas. Nesta simulação, para classificar os registros como “Calor”, “Frio” e “Neutro” foi realizado o procedimento descrito no Apêndice D.

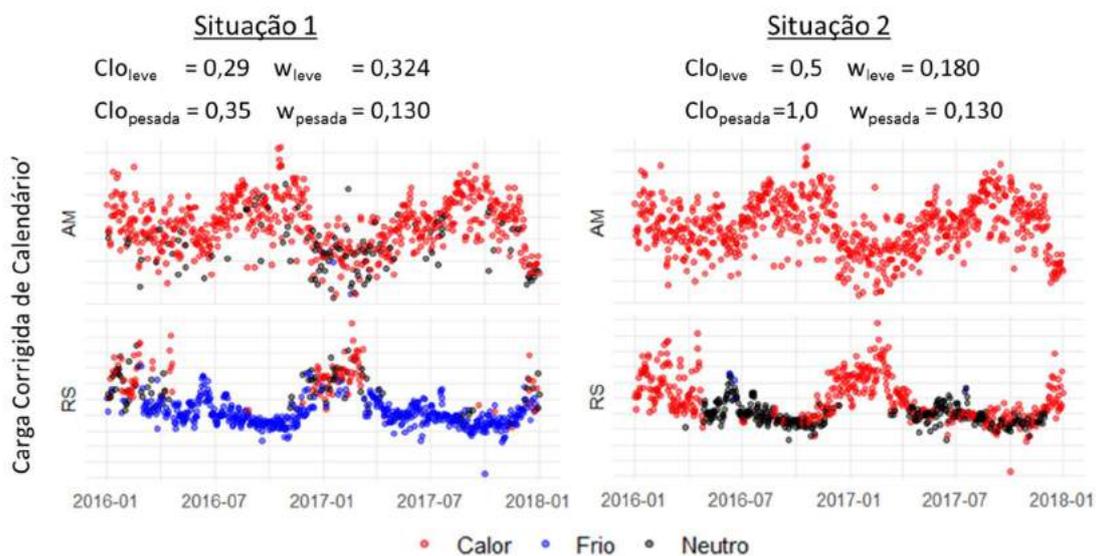


Figura 4-10: Desconforto térmico em função da vestimenta

Fonte: Elaboração própria a partir de INMET (2019c) e ONS (2019f)

Nota: Assumiu-se indivíduos lavando pratos, cozinhando ou praticando atividades laborais ( $M=93$  W/m<sup>2</sup>) (Lamberts, et al., 2014).

Na Figura 4-10 observa-se que para a situação 1, o indivíduo está propenso a acionar refrigeração artificial nas regiões vermelhas e passa no Amazonas quase o período inteiro com calor, por outro lado, sob a mesma vestimenta o indivíduo no Rio Grande do

Sul experimentaria frio no mesmo período estando propenso ao uso de energia para aquecimento artificial nas regiões azuis. Na situação 2, por sua vez, com limites de vestimentas de maior resistência térmica, o homem perceberia calor a todo instante no Amazonas, enquanto passaria boa parte do inverno com sensação neutra no Rio Grande do Sul. De forma genérica, a simulação exposta na Figura 4-10 mostra que individualidade e preferência de cada pessoa influem sobre sua sensação de desconforto térmico e, conseqüentemente, em sua propensão ao acionamento de equipamentos de controle climático artificial.

Além disso, é possível concluir que individualmente algumas pessoas conseguem mitigar o desconforto térmico, ao passo que outras podem eventualmente utilizar energia para adequação artificial do clima interno as edificações. Desta forma, para que possa ser capturado o efeito climático de maneira íntegra, ou seja, sem negligenciar o desconforto de alguns, e sobretudo, sem que haja arbitrariedade na escolha da vestimenta, a presente metodologia utiliza, para cada jornada e estado, valores únicos de “clo” e “w” que minimizem o desconforto nas regiões de carga mais baixa (vales das curvas de carga diárias), onde supõe-se utilização mínima ou nula de equipamentos elétricos para adequação climática. Tal método de identificação dos vales será detalhado na seção “Cálculo da Carga Neutra”.

#### **4.6. Cálculo da Carga Neutra**

A abordagem fundamentalista do efeito climático sobre a carga de energia, além da ampla compreensão do clima sobre a demanda energética sensível ao clima, atribui como vantagem a possibilidade da mensuração total deste efeito. Ou seja, enquanto outros estudos avaliam somente o quanto a demanda por climatização superou a demanda esperada para determinada época do ano, a abordagem da presente dissertação possibilita estimar a carga neutra, ou seja, aquela completamente isenta da demanda sensível ao clima.

##### **4.6.1. Identificação dos vales**

Para o cálculo da carga neutra, toma-se como ponto de partida a simulação de vestimenta mínima e máxima iguais, com valores de  $clo=4,0$ ,  $w=0,130$  para todas as jornadas. Observe que, conforme descrito na seção anterior, as vestimentas não devem ser arbitradas para que não haja viés na mensuração do efeito climático sobre a carga de energia. Por isto a utilidade destes limites nesta etapa é mero artifício para que os

registros de cada jornada do histórico sejam postos na condição de calor e os respectivos valores de  $\Delta S$  sirvam de métrica para uma primeira identificação dos momentos do ano em que a condição climática foi a mais neutra possível. Como critério de corte, foram selecionados todos registros cujos  $\Delta S$  foram menores que o primeiro<sup>29</sup> quartil dos  $\Delta S$  de cada ano. A Figura 4-11 ilustra o resultado para a jornada da noite do estado de Santa Catarina.

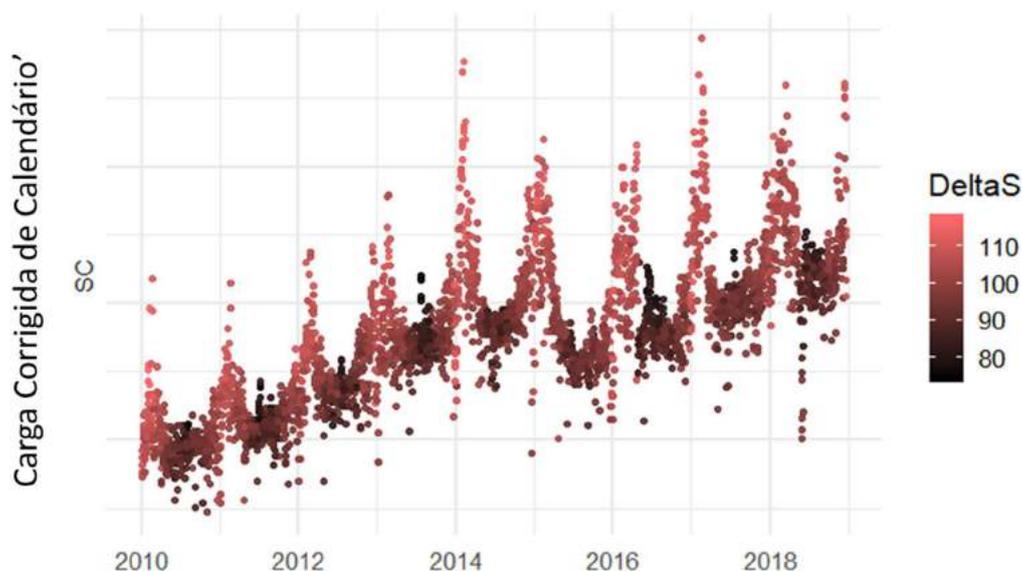


Figura 4-11: Primeira etapa na identificação dos pontos mais neutros possíveis para o estado de Santa Catarina

Fonte: Elaboração própria a partir de ONS (2019) e INMET (2019c)

#### 4.6.2. Identificação dos dias de carga mínima

Como esperado, a Figura 4-11 mostra que todos os pontos resultaram em situações de desconforto ao calor ( $\Delta S > 0$ ), porém alguns destes pontos aproximaram-se mais da neutralidade ( $\Delta S = 0$ ) que outros. Tal método levou a identificação dos registros situados nos vales das curvas, como pretendido. Entretanto, alguns destes dias não devem ser considerados neutros, pois podem ser ocasiões cujo clima foi de extremo frio, e portanto uma vestimenta de  $\text{clo} = 4,0$ , característica de uso de esquimós, propiciaria mais neutralidade do  $\Delta S$ . Tal ocorrência não é factível, dado que uma vestimenta com resistência térmica desta magnitude não é tipicamente utilizada no Brasil, sendo adotado o uso de eletricidade para calefação e atenuação do desconforto ao frio. Aparentemente, na Figura 4-12, tais momentos do estado de Santa Catarina manifestam-se nos meses de

<sup>29</sup> Como cada estação do ano permanece por aproximadamente 25% do ano, a escolha do 1º quartil como corte é uma proxy do limite dos 90 dias menos quentes do ano.

julho<sup>30</sup> no meio das regiões de “neutralidade” calculadas na etapa 1 configurando aumento da carga de energia.

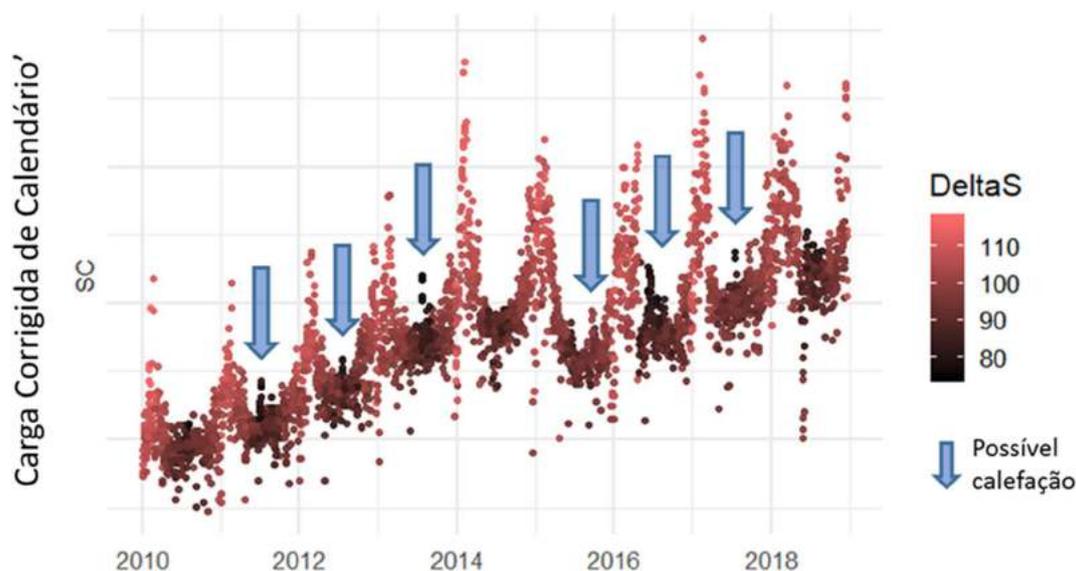


Figura 4-12: Segunda etapa na identificação dos dias neutros do estado de Santa Catarina

Fonte: Elaboração própria a partir de ONS (2019f) e INMET (2019c)

Nota: Gráfico referente à jornada da noite.

Portanto, nesta etapa, a fim de evitar a seleção de dias em que a energia elétrica foi utilizada para atenuar a sensação de desconforto ao frio, são escolhidos os 21 registros de menor carga dentre os dias neutros filtrados na primeira etapa.

É importante ratificar a necessidade do processo de seleção dos dias de vale da carga previamente a eleição dos dias de carga mínima, pois caso não fosse cumprido tal processo, o efeito de tendência sobre as séries de carga poderia deturpar tal seleção. Além disso, o procedimento proposto nesta dissertação, não adota seleção fixa de períodos do ano mais “neutros” evitando possíveis erros de seleção em momentos de anomalias climáticas<sup>31</sup>.

#### 4.6.3. Interpolação dos dias neutros

Adicionalmente, nas séries de carga de energia há ocorrência de outliers, tais como a greve dos caminhoneiros destacada na Figura 4-13 que alteram o nível da carga de

<sup>30</sup> De acordo com as Normais Climatológicas de 1961-1990 e de 1981-2010, o mês de julho para a maioria das capitais do país é o período do ano em que as temperaturas médias alcançam seus menores valores. (INMET, 2019a) e (INMET, 2019b)

<sup>31</sup> O fenômeno Veranico, por exemplo, pode elevar a temperatura média a níveis superiores a normalidade em pleno inverno. (G1, 2019), (O Dia, 2019)

energia a valores incompatíveis ao que se esperava para aquela época do ano. Na verdade há uma diversidade de outliers de magnitudes diferentes ao longo das séries que podem atuar aumentando ou reduzindo o nível da carga de energia pontualmente. A alteração brusca do nível de produção de plantas industriais eletrointensivas, dias de grandes eventos tais como dias de jogos da copa do mundo, olimpíadas, finais de novela são alguns exemplos deste fenômeno. Desta forma, ainda que fossem retirados pontualmente todos os outliers identificados de todas as jornadas em cada estado, ainda restariam uma infinidade de outros efeitos aleatórios não identificados, sendo inevitável a necessidade de se adotar métodos que sejam menos sensíveis a presença destes registros.

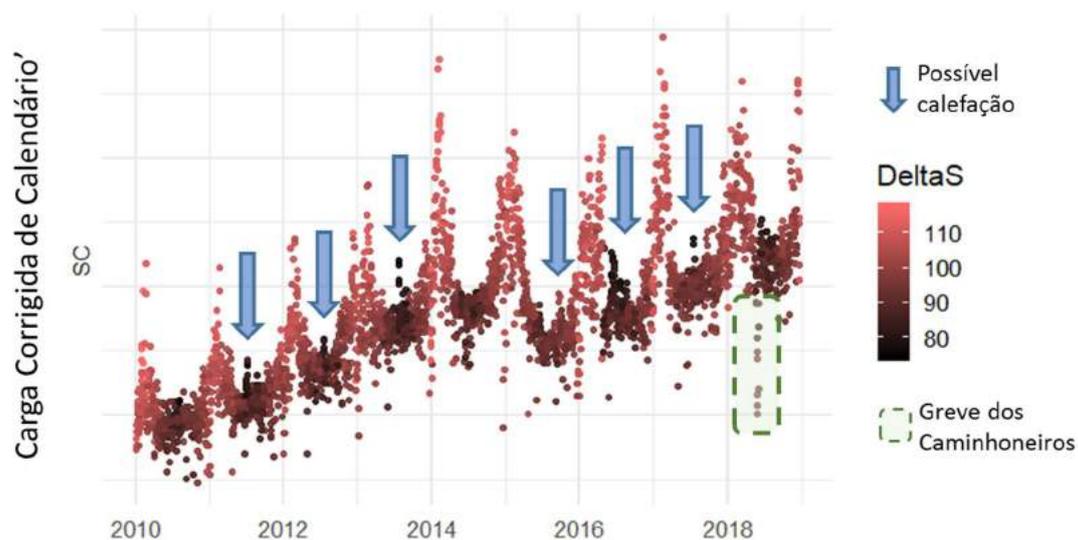


Figura 4-13: Terceira etapa na identificação dos dias neutros para o estado de Santa Catarina

Fonte: Elaboração própria a partir de ONS (2019f) e INMET (2019c)

Nota: Gráfico referente à jornada da noite.

Em posse dos 21 registros “neutros” da carga de energia selecionados da segunda etapa, aplica-se o método, descrito anteriormente, de suavização não linear Loess desses pontos. A vantagem de aplicação do método Loess nesta etapa reside no fato de que o processo de suavização oferece robustez na tratativa dos outliers, possibilitando desta maneira, curvas suavizadas menos sensíveis a variações abruptas da carga. A Figura 4-14 ilustra o resultado da aplicação deste método para cálculo da carga suavizada para o estado de Santa Catarina.

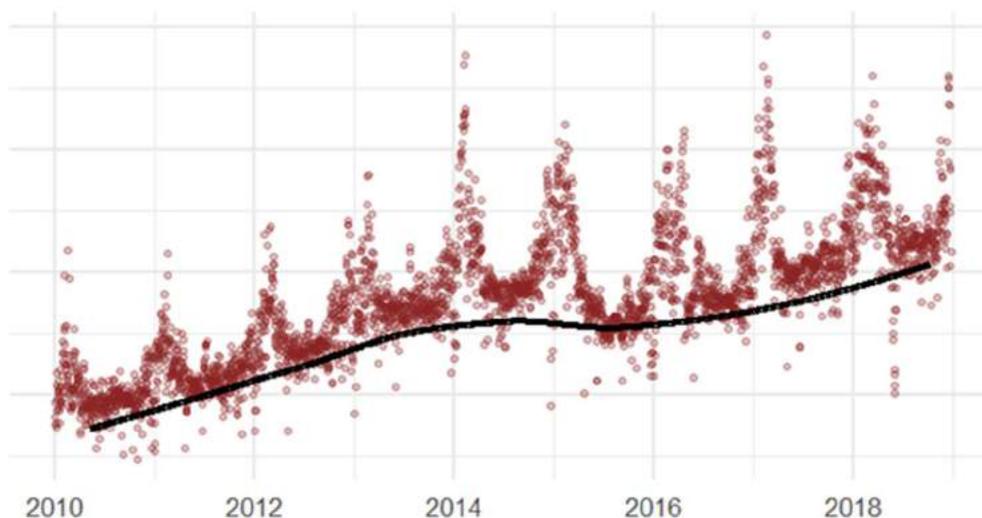


Figura 4-14: Carga neutra suavizada para o estado de Santa Catarina

Fonte: Elaboração própria a partir de ONS (2019f) e INMET (2019c)

Nota: Gráfico referente à jornada da noite.

#### 4.7. Cálculo do Efeito Climático (Curvas S)

A carga corrigida de calendário' representa o uso da energia sob influência das diversas variáveis dinâmicas e estruturantes, listadas no capítulo de escolha das variáveis de entrada do modelo. Por outro lado, a carga neutra, calculada na seção anterior, pode ser interpretada como sendo aquela cuja influência das variáveis dinâmicas e estruturantes, está livre das oscilações climáticas ao longo do ano. De forma mais rígida, a carga neutra detém o mínimo de utilização usos finais de refrigeração e aquecimento ao longo do ano, ou seja, contendo somente o uso basal destes serviços energéticos.

Desta forma, o efeito do uso mais intenso da energia elétrica em resposta às condições climáticas pode ser aferido comparando o desconforto térmico à diferença, ponto a ponto, das cargas de energia supracitadas. Entretanto, o desconforto térmico, conforme mencionado na seção “Aplicação do modelo de dois nós”, não deve ser calculado arbitrando-se os limites de vestimentas utilizadas pelos indivíduos, sendo necessária a apuração numérica destas grandezas a partir dos dados.

##### 4.7.1. Cálculo das vestimentas coletivas do vale de carga

Encontrar a vestimenta que melhor representa o desconforto coletivo da população de um estado, sem que haja arbitrariedade e de forma consistente aos dados, traduz-se na minimização da negligência do desconforto térmico seja para o calor, seja para o frio. A

intuição sobre o processo de minimização a ser elaborado está ilustrada na Figura 4-15, na qual são representadas diferentes faixas de conforto térmico individuais. Para cada pessoa, situar-se em fora da faixa de conforto significa estar exposto ao calor/frio. Observa-se que há momentos em que o indivíduo 1 pode experimentar sensação de calor, enquanto o indivíduo 3 encontra-se em neutralidade térmica. Por outro lado, há situações em que o indivíduo 3 pode sentir frio enquanto o indivíduo 1 encontra-se neutro. De maneira global, o desconforto coletivo dos “n” cidadãos deste estado mostra saturação em situações extremas de calor/frio, porém para situações intermediárias apresenta escalada gradual devido a não simultaneidade dos desconfortos individuais.

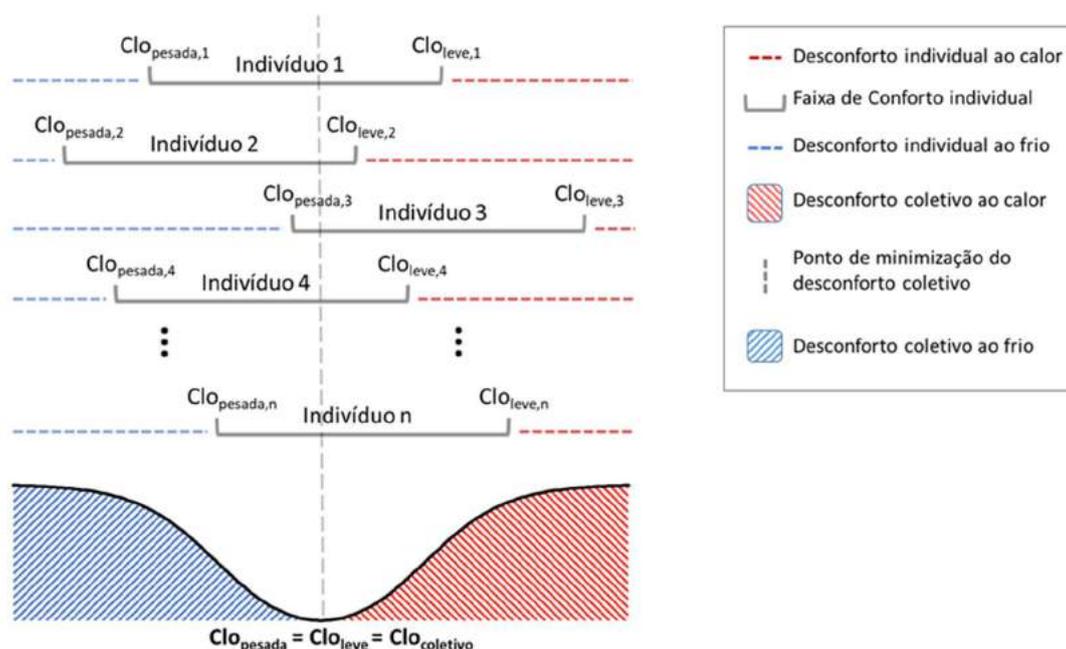


Figura 4-15: Desconfortos térmicos individuais e coletivos

Fonte: Elaboração própria

Desta forma, a curva coletiva de sensação de calor/frio não apresenta uma faixa de conforto, e sim um único ponto onde o desconforto conjunto da população é minimizado. Interpretando a minimização do desconforto como os momentos em que menos se acionam equipamentos elétricos de adequação climática interna nas edificações, o método de cálculo da vestimenta coletiva para cada estado leva em consideração os pontos neutros identificados na segunda etapa do processo de cálculo da carga neutra. A partir de intervalos de vestimenta possíveis listados nas Tabela 4-4 e Tabela 4-5 simulou-se para todos os pontos neutros, o desconforto coletivo, elegendo a vestimenta que apresenta  $\Delta S$  mais próximo de zero, conforme equações descritas abaixo.

$$(clo_{coletivo}, w_{coletivo}) = Min\left\{ \sum_{neutros=1}^n |\Delta S_{w_1, clo_1}|, \sum_{neutros=1}^n |\Delta S_{w_2, clo_2}|, \dots, \sum_{neutros=1}^n |\Delta S_{w_x, clo_x}| \right\}$$

Onde:

n = número de pontos neutros (21 pontos/ano x 9 anos); e

x = número de vestimentas possíveis (79 para jornadas da noite e madrugada, e 68 para jornadas da manhã e tarde).

Tabela 4-4: Lista de vestimentas coletivas possíveis para jornadas da noite e madrugada.

| <b>Jornada</b> | <b>w</b> | <b>clo</b> | <b>Jornada</b> | <b>w</b> | <b>clo</b> |
|----------------|----------|------------|----------------|----------|------------|
| 1 e 4          | 0,270    | 0,32       | 1 e 4          | 0,990    | 0,03       |
| 1 e 4          | 0,270    | 0,37       | 1 e 4          | 0,774    | 0,1        |
| 1 e 4          | 0,270    | 0,42       | 1 e 4          | 0,774    | 0,15       |
| 1 e 4          | 0,270    | 0,47       | 1 e 4          | 0,774    | 0,2        |
| 1 e 4          | 0,270    | 0,52       | 1 e 4          | 0,774    | 0,25       |
| 1 e 4          | 0,270    | 0,57       | 1 e 4          | 0,774    | 0,3        |
| 1 e 4          | 0,270    | 0,6        | 1 e 4          | 0,774    | 0,33       |
| 1 e 4          | 0,180    | 0,38       | 1 e 4          | 0,414    | 0,23       |
| 1 e 4          | 0,180    | 0,43       | 1 e 4          | 0,324    | 0,29       |
| 1 e 4          | 0,180    | 0,48       | 1 e 4          | 0,324    | 0,34       |
| 1 e 4          | 0,180    | 0,53       | 1 e 4          | 0,324    | 0,39       |
| 1 e 4          | 0,180    | 0,58       | 1 e 4          | 0,324    | 0,44       |
| 1 e 4          | 0,180    | 0,63       | 1 e 4          | 0,324    | 0,49       |
| 1 e 4          | 0,180    | 0,66       | 1 e 4          | 0,324    | 0,53       |
| 1 e 4          | 0,129    | 0,35       | 1 e 4          | 0,273    | 0,26       |
| 1 e 4          | 0,129    | 0,4        | 1 e 4          | 0,273    | 0,31       |
| 1 e 4          | 0,129    | 0,45       | 1 e 4          | 0,273    | 0,36       |
| 1 e 4          | 0,129    | 0,5        | 1 e 4          | 0,273    | 0,41       |
| 1 e 4          | 0,129    | 0,55       | 1 e 4          | 0,273    | 0,46       |
| 1 e 4          | 0,129    | 0,6        | 1 e 4          | 0,273    | 0,51       |
| 1 e 4          | 0,129    | 0,65       | 1 e 4          | 0,273    | 0,56       |
| 1 e 4          | 0,129    | 0,7        | 1 e 4          | 0,273    | 0,61       |
| 1 e 4          | 0,129    | 0,75       | 1 e 4          | 0,273    | 0,66       |
| 1 e 4          | 0,129    | 0,8        | 1 e 4          | 0,273    | 0,71       |
| 1 e 4          | 0,129    | 0,85       | 1 e 4          | 0,273    | 0,76       |
| 1 e 4          | 0,129    | 0,9        | 1 e 4          | 0,273    | 0,81       |
| 1 e 4          | 0,129    | 0,95       | 1 e 4          | 0,273    | 0,86       |
| 1 e 4          | 0,129    | 1          | 1 e 4          | 0,273    | 0,91       |
| 1 e 4          | 0,129    | 1,05       | 1 e 4          | 0,273    | 0,96       |
| 1 e 4          | 0,129    | 1,1        | 1 e 4          | 0,273    | 1,01       |
| 1 e 4          | 0,129    | 1,15       | 1 e 4          | 0,273    | 1,06       |
| 1 e 4          | 0,129    | 1,2        | 1 e 4          | 0,273    | 1,11       |
| 1 e 4          | 0,129    | 1,25       | 1 e 4          | 0,273    | 1,16       |
| 1 e 4          | 0,129    | 1,3        | 1 e 4          | 0,273    | 1,21       |
| 1 e 4          | 0,129    | 1,35       | 1 e 4          | 0,273    | 1,26       |
| 1 e 4          | 0,129    | 1,4        | 1 e 4          | 0,273    | 1,31       |
| 1 e 4          | 0,129    | 1,45       | 1 e 4          | 0,273    | 1,36       |
| 1 e 4          | 0,129    | 1,5        | 1 e 4          | 0,273    | 1,41       |
| 1 e 4          | 0,129    | 1,55       | 1 e 4          | 0,273    | 1,46       |
| 1 e 4          | 0,129    | 1,59       |                |          |            |

Fonte: Elaboração própria a partir de ASHRAE (1985), Lamberts, et al. (2014) e Auliciems & Szokolay (2007)

Tabela 4-5: Lista de vestimentas coletivas possíveis para jornadas da manhã e tarde.

| Jornada | w     | clo  | Jornada | w     | clo  |
|---------|-------|------|---------|-------|------|
| 2 e 3   | 0,414 | 0,27 | 2 e 3   | 0,180 | 0,42 |
| 2 e 3   | 0,324 | 0,33 | 2 e 3   | 0,180 | 0,47 |
| 2 e 3   | 0,324 | 0,38 | 2 e 3   | 0,180 | 0,52 |
| 2 e 3   | 0,324 | 0,43 | 2 e 3   | 0,180 | 0,57 |
| 2 e 3   | 0,324 | 0,48 | 2 e 3   | 0,180 | 0,62 |
| 2 e 3   | 0,324 | 0,53 | 2 e 3   | 0,180 | 0,66 |
| 2 e 3   | 0,273 | 0,30 | 2 e 3   | 0,129 | 0,39 |
| 2 e 3   | 0,273 | 0,35 | 2 e 3   | 0,129 | 0,44 |
| 2 e 3   | 0,273 | 0,40 | 2 e 3   | 0,129 | 0,49 |
| 2 e 3   | 0,273 | 0,45 | 2 e 3   | 0,129 | 0,54 |
| 2 e 3   | 0,273 | 0,50 | 2 e 3   | 0,129 | 0,59 |
| 2 e 3   | 0,273 | 0,55 | 2 e 3   | 0,129 | 0,64 |
| 2 e 3   | 0,273 | 0,60 | 2 e 3   | 0,129 | 0,69 |
| 2 e 3   | 0,273 | 0,65 | 2 e 3   | 0,129 | 0,74 |
| 2 e 3   | 0,273 | 0,70 | 2 e 3   | 0,129 | 0,79 |
| 2 e 3   | 0,273 | 0,75 | 2 e 3   | 0,129 | 0,84 |
| 2 e 3   | 0,273 | 0,80 | 2 e 3   | 0,129 | 0,89 |
| 2 e 3   | 0,273 | 0,85 | 2 e 3   | 0,129 | 0,94 |
| 2 e 3   | 0,273 | 0,90 | 2 e 3   | 0,129 | 0,99 |
| 2 e 3   | 0,273 | 0,95 | 2 e 3   | 0,129 | 1,04 |
| 2 e 3   | 0,273 | 1,00 | 2 e 3   | 0,129 | 1,09 |
| 2 e 3   | 0,273 | 1,05 | 2 e 3   | 0,129 | 1,14 |
| 2 e 3   | 0,273 | 1,10 | 2 e 3   | 0,129 | 1,19 |
| 2 e 3   | 0,273 | 1,15 | 2 e 3   | 0,129 | 1,24 |
| 2 e 3   | 0,273 | 1,20 | 2 e 3   | 0,129 | 1,29 |
| 2 e 3   | 0,273 | 1,25 | 2 e 3   | 0,129 | 1,34 |
| 2 e 3   | 0,273 | 1,30 | 2 e 3   | 0,129 | 1,39 |
| 2 e 3   | 0,273 | 1,35 | 2 e 3   | 0,129 | 1,44 |
| 2 e 3   | 0,273 | 1,40 | 2 e 3   | 0,129 | 1,49 |
| 2 e 3   | 0,273 | 1,45 | 2 e 3   | 0,129 | 1,54 |
| 2 e 3   | 0,273 | 1,46 | 2 e 3   | 0,129 | 1,59 |
| 2 e 3   | 0,270 | 0,36 |         |       |      |
| 2 e 3   | 0,270 | 0,41 |         |       |      |
| 2 e 3   | 0,270 | 0,46 |         |       |      |
| 2 e 3   | 0,270 | 0,51 |         |       |      |
| 2 e 3   | 0,270 | 0,56 |         |       |      |
| 2 e 3   | 0,270 | 0,60 |         |       |      |

Fonte: Elaboração própria a partir de ASHRAE (1985), Lamberts, et al. (2014) e Auliciems & Szokolay (2007)

#### 4.7.2. Cálculo das Curvas S

Considerando as vestimentas coletivas encontradas na etapa anterior, calcula-se a

sensação de desconforto térmico para todo o histórico de dados climáticos, de 1961 a 2018. Já para a base de carga de energia são calculados os desvios entre a carga neutra e a carga corrigida de calendário’, conforme equação descrita abaixo.

$$desvio = Carga_{calendario} - Carga_{neutra}$$

No período de interseção das bases de clima e carga de energia é, efetivamente, verificada a relação entre estas grandezas ao colocar sobre um gráfico de dispersão os pares ordenados ( $\Delta S$ , desvio) de cada dia do histórico.

Finalmente, nesta etapa é verificada a hipótese sobre a forma funcional da relação entre clima e carga de energia. Como descrito na seção inicial deste capítulo, para verificar tal hipótese é necessária a utilização de um método não-paramétrico. Desta forma, é ajustada uma curva de suavização Loess sobre a nuvem de pontos dispersa no gráfico mencionado.

Entretanto, como descrito anteriormente, há características importantes da relação entre o efeito climático e a carga corrigida de calendário’ que devem ser levadas em consideração. O ajuste no gráfico de dispersão dará respostas em termos absolutos da carga, e portanto suscetível a alterações ao longo do tempo em função do aumento da posse de equipamentos elétricos, entre outros fatores. A ocorrência de precipitação sobre a envoltória e seus arredores implica em diferentes níveis de inércia térmica.

Desta forma, o ajuste da curva de suavização Loess sobre o gráfico de dispersão deve ser elaborado por estado, jornada, ano<sup>32</sup> para o conjunto de dias de envoltória “seca” e envoltória “úmida”<sup>33</sup>.

#### **4.8. Cálculo da Carga Livre de clima**

Com o efeito climático calculado, é possível obter a carga livre deste efeito. Ou seja, de todas as variáveis influentes sobre o uso da energia elétrica, destacadas no capítulo “escolha das variáveis de entrada do modelo” é possível retirar a influência daquelas associadas ao clima de modo a obter uma carga diária neutra. É importante pontuar que a carga livre de clima é diferente da carga neutra suavizada, utilizada nas etapas

---

<sup>32</sup> Devido ao processo de validação cruzada, são necessários mais valores para o ajuste. Portanto para cada ano foram considerados os registros dos 4 anos adjacentes ao ano de referência.

<sup>33</sup> Para os registros de envoltória “úmida” consideraram-se os dias em que ocorreu precipitação nas últimas 24 horas da jornada de referência.

anteriores, pois desta vez todos os efeitos aleatórios não climáticos permanecerão na carga, como desejado.

Matematicamente, o cálculo da carga livre de clima segue a expressão abaixo:

$$Carga_{livre\_clima} = Carga_{calendário} - desvio$$

Note que a carga neutra suavizada só é possível ser atualizada anualmente após a ocorrência do vale da carga. Por outro lado, em posse da relação entre clima e carga corrigida de calendário' ajustada é possível obter a carga livre de clima a cada dia, na medida em que são medidos os valores de carga e variáveis climáticas, possibilitando maior tempestividade da informação.

#### **4.9. Cálculo da Carga Típica Esperada**

Diversas são as metodologias para o cálculo do efeito climático sobre a carga de energia, conforme descrito na parte inicial deste capítulo. Tais metodologias, em sua maioria, buscam analisar o efeito das variações atípicas da carga, ou seja, variações acima do esperado para aquela época do ano. De forma análoga, para possibilitar esta análise, a presente metodologia estima qual seria a carga típica esperada para cada ponto do histórico, e a compara à carga diária equivalente semanal, obtendo, assim, o efeito em questão.

Ajustar a carga corrigida de calendário' para uma carga típica esperada, significa manter suas variáveis condicionantes (estruturais e dinâmicas) idênticas, alterando apenas aquelas relacionadas ao clima de modo a considerar sensações de desconforto típicas para cada dia do ano. Dessa forma, é realizado o balanço térmico para cada dia do ano desde 1961, considerando as vestimentas coletivas encontradas. Posteriormente médias são calculadas para cada dia do ano. Por fim é feita uma suavização de cada valor através de média móvel de 31 dias<sup>34</sup>. A Figura 4-16 ilustra os resultados da sensação de desconforto típica para o estado do Rio Grande do Sul, com e sem suavização.

---

<sup>34</sup> Período aproximado de duração de um mês centrado na observação.

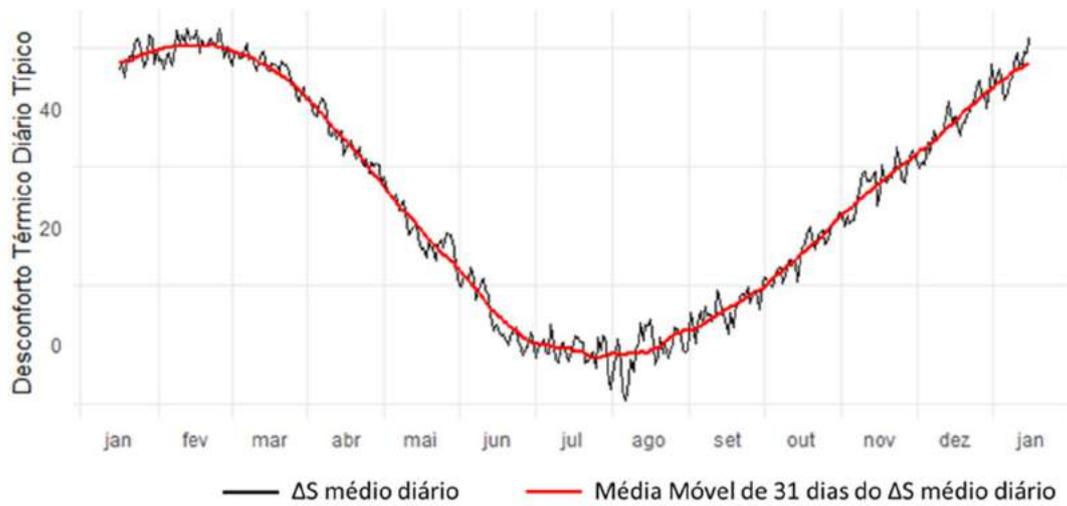


Figura 4-16: Sensação de desconforto térmico típico diário para o estado do Rio Grande do Sul  
 Fonte: Elaboração própria a partir de INMET (2019d) e INMET (2019c)

## 5. RESULTADOS

As séries de carga horária por unidade da federação, obtidas pelo sistema supervisionado do ONS, foram resumidas a cada dia em 4 médias de 6 horas cada, representando a carga média demandada por jornada, conforme descrito no capítulo anterior. Tal procedimento leva em consideração o perfil horário das classes de consumo na rede de modo a capturar o efeito climático sobre os serviços energéticos de “aquecimento direto”, “calor de processo” e “refrigeração” de forma mais desagregada.

Em relação as variáveis climáticas, procedimento similar de agregação dos registros horários em valores médios diários por jornada é realizado para temperatura, umidade relativa, intensidade do vento. Entretanto, tal agregação é realizada nos dados de temperatura somente após esta estar amortecida e defasada, conforme descrito na seção 4.4.1. Já os dados de precipitação foram usados para classificação das jornadas em envoltórias “secas” ou “úmidas” dependendo da ocorrência de precipitação nas últimas 24 horas referenciadas a jornada em análise.

O escopo espacial e temporal adotado nesta dissertação tem por motivação análise do efeito climático sobre a demanda por eletricidade de forma holística. Ou seja, o escopo idealizado presta-se a capturar não só as disparidades estaduais do efeito climático, como compreender o pleno domínio da função que rege este efeito. Dessa forma, a aplicação da metodologia apresentada abrange os 25<sup>35</sup> estados brasileiros selecionados em cada uma das 4 jornadas diárias. A multiplicidade de análises (25 x 4), que por vezes, manifestam similaridades, será apresentada de maneira única elencando os destaques de determinadas unidades da federação. Entretanto, todos os resultados, etapa a etapa da metodologia, estão dispostos nos Apêndices A-K ao final do documento.

### 5.1. Carga corrigida de calendário'

A carga média diária por jornada contém os diversos efeitos econômicos, culturais, comportamentais e climáticos. Os três primeiros levam a montantes de consumo diferenciados entre os dias da semana além de feriados. Com a aplicação da metodologia proposta, foram equalizados os dias do histórico da carga de energia em níveis equivalentes semanais, atenuando tais efeitos.

---

<sup>35</sup> Conforme descrito no capítulo de metodologia, os estados do Amapá e Roraima não possuem dados disponíveis suficientes para a aplicação do método, não sendo considerados neste estudo.

Com isso é possível acompanhar a dinâmica da carga de energia livre do efeito calendário, identificando com mais clareza os movimentos da carga livre de sazonalidade semanal. Como destaque para esta seção, a Figura 5-1 ilustra as taxas de variação da carga de energia do mês em relação ao mesmo mês do ano anterior para a jornada da tarde do estado de São Paulo. Este estado, segundo EPE (2019b) consome quase 30% da eletricidade do país, sendo a unidade da federação mais influente sobre o resultado no SIN. Pela figura, é possível observar que a taxa de crescimento mensal da carga livre de calendário tende a se tornar mais estável que a carga original. É importante ressaltar que mensalmente, as variações da carga original apresentam-se mais voláteis não só pela presença de feriados, como pela quantidade de dias tipicamente mais intensivos no mês. A taxa de variação de 06/2015 em relação a 06/2014, por exemplo, foi de -3,23% para a carga original e de -4,44% para a carga livre de calendário. Tal resultado, mostra pouca diferença devido ao mês de junho ser isento de feriado. No entanto, a diferença não é nula pois em 2015 o mês deteve um domingo a menos e uma terça-feira a mais que junho de 2014.

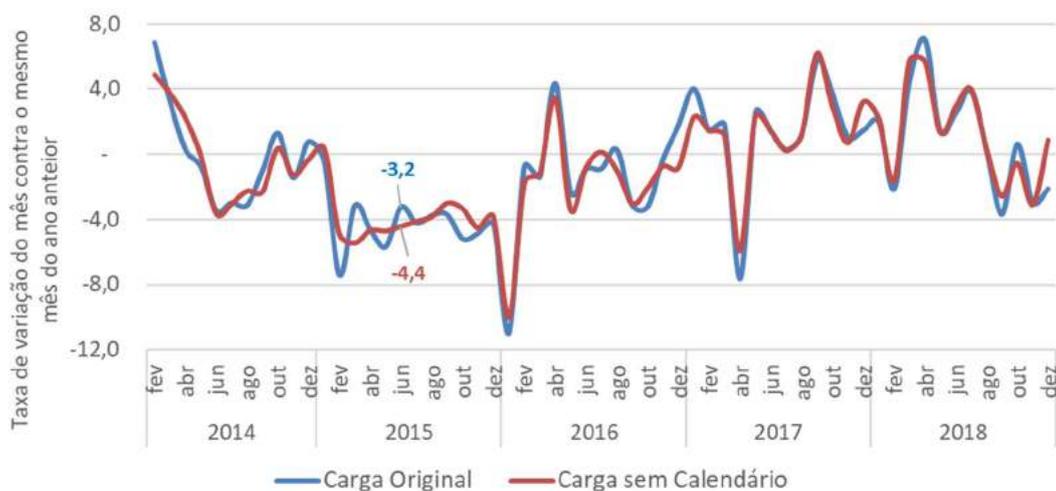


Figura 5-1: Demonstração do efeito calendário para a jornada da tarde da carga de São Paulo.

Fonte: Elaboração própria

É importante ressaltar que o tratamento do efeito calendário é bastante utilizado na comunidade técnico-acadêmica como em Castro, et al. (2016), Moral-Carcedo & Vicéns-Otero (2005) e Valor, et al. (2001). Entretanto, a aplicação do tratamento sob abordagem por jornada traz benefícios adicionais, como por exemplo a melhor apuração da carga de sábado, na qual para muitos segmentos de consumo possui comportamento semelhante a um dia útil até o meio do dia.

Além da retirada do efeito calendário, para que a relação entre clima e carga de energia seja apurada adequadamente, outros tratamentos devem ser realizados. Por se tratar de dados brutos de medição, há tratamentos a serem realizados nas séries de carga. Conforme metodologia, tais registros, listados no Apêndice B, foram retirados da análise. Adicionalmente, a partir de fevereiro de 2012, a coleta de informação relacionada a geração das pequenas usinas ampliou-se com o trâmite de dados entre CCEE e ONS segundo a Resolução Normativa da ANEEL REN440/2011. Com isso, as séries de carga estaduais desnivelam-se na transição de janeiro para fevereiro de 2012 devido a incorporação de dados mais apurados das pequenas usinas<sup>36</sup>. Além disso, para alguns estados, sobretudo onde o peso da indústria eletrointensiva é significativo no consumo, a carga pode manifestar comportamento incompatível com o perfil trigonométrico esperado para determinada época do ano.

A Figura 5-2, ilustra a necessidade do tratamento descrito anteriormente para os estados do Amazonas, Maranhão, Pará e Rio de Janeiro.

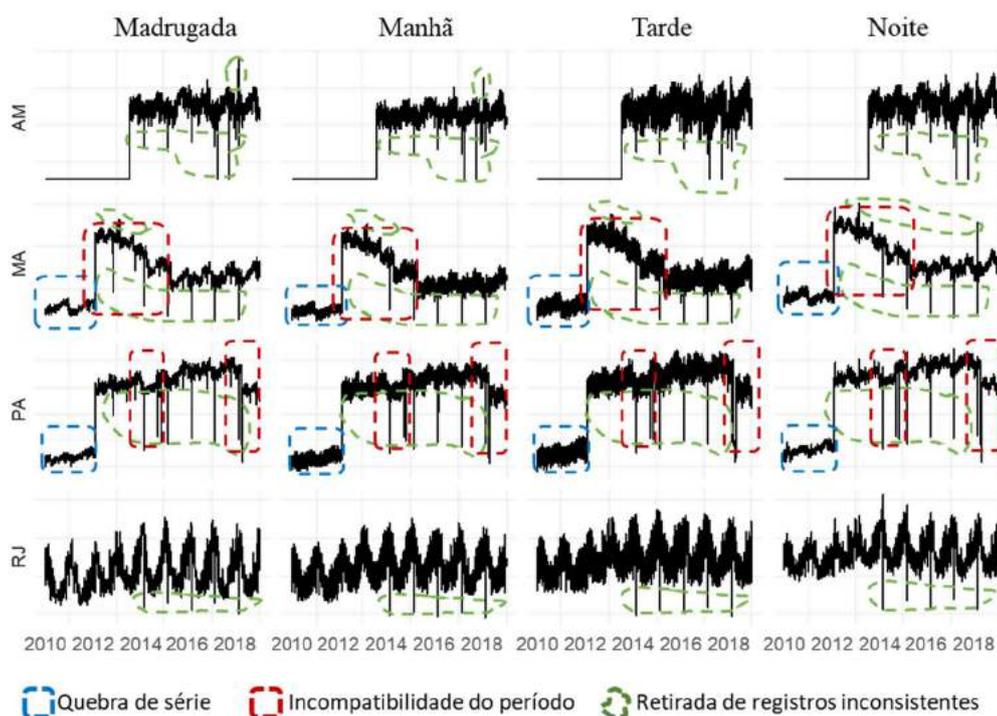


Figura 5-2: Ajustes na série de Carga original de UFs selecionadas, por jornada.

Pela figura acima, é possível verificar a quebra de série em decorrência da

<sup>36</sup> É importante ressaltar que apesar da melhoria na consideração destas usinas na base técnica do ONS, estas usinas não representam a totalidade da geração não medida pelo ONS. Há ainda parcelas de geração associadas a usinas antigas sem cadastro na CCEE, geração de autoprodutores clássicos, cujas usinas não injetam energia na rede bem como a geração mini e micro distribuída.

contabilização das pequenas usinas no início de 2012, sobretudo no PA e MA. É importante pontuar que a adição das pequenas usinas na carga de energia ocorreu em todas as UFs, porém tal adição manifesta desníveis diferentes, dada o seu peso em relação à carga estadual. Além disso, há períodos, destacados em vermelho na Figura 5-2, que registram movimentos não sistemáticos nas séries. Tais movimentos estão relacionados a efeitos dissociados ao clima, como alterações no nível de produção em plantas industriais eletrointensivas. De fato, o consumo de eletricidade de indústrias eletrointensivas, conforme descrito no capítulo de caracterização da carga, apresenta demanda constante ao longo do dia. Portanto, alterações no nível de produção destas plantas manifesta impacto em todas as jornadas, assim com os trechos em vermelho marcados na Figura 5-2.

Segundo G1 (2017), a produção de alumínio primário no Maranhão, que em nível máximo chegou a representar três vezes o consumo de eletricidade de todo o estado encerrou suas atividades a partir de 2015, alegando condições desfavoráveis de produção em um cenário de crise mundial e aumento nos preços da energia. Outro impacto relacionado ao alumínio primário ocorreu no estado do Pará em situações distintas 2014 e 2018 pela redução dos níveis de utilização da capacidade instalada da planta de alumínio primário da Albras, segundo ABAL (2019) e Hydro-RI (2014).

Adicionalmente, a Figura 5-2 ilustra o impacto do efeito calendário sobre carga de energia. É possível visualizar como as séries apresentam-se mais ruidosas (mancha mais grossa) nos períodos da manhã e tarde, períodos nos quais há diferença significativa do montante consumido de acordo com o dia da semana. Já nos períodos da noite e madrugada, a carga não sofre diferenças tão grandes em decorrência do tipo de dia da semana.

Foi aplicada a metodologia para tratamento nos registros de carga estadual por jornada descrita na seção 4.3 em todas as séries de carga. Todas as correções, relacionadas abaixo seguem detalhadas nos Apêndices A-C no final do documento.

- Efeito calendário;
- Registros diários que não foram considerados no estudo;
- Identificação de períodos com cargas incompatíveis ao perfil trigonométrico intra-anual característico de cada estado; e
- Nivelamento das séries de carga.

Com os ajustes realizados, as séries diárias por jornada dos estados do AM, PA, MA e RJ seguem ilustradas na Figura 5-3. É importante notar que mesmo ao “limpar” a série do efeito calendário, há presença de outros fatores determinantes na volatilidade intra-anual das séries de carga, calcados fortemente na componente climática.

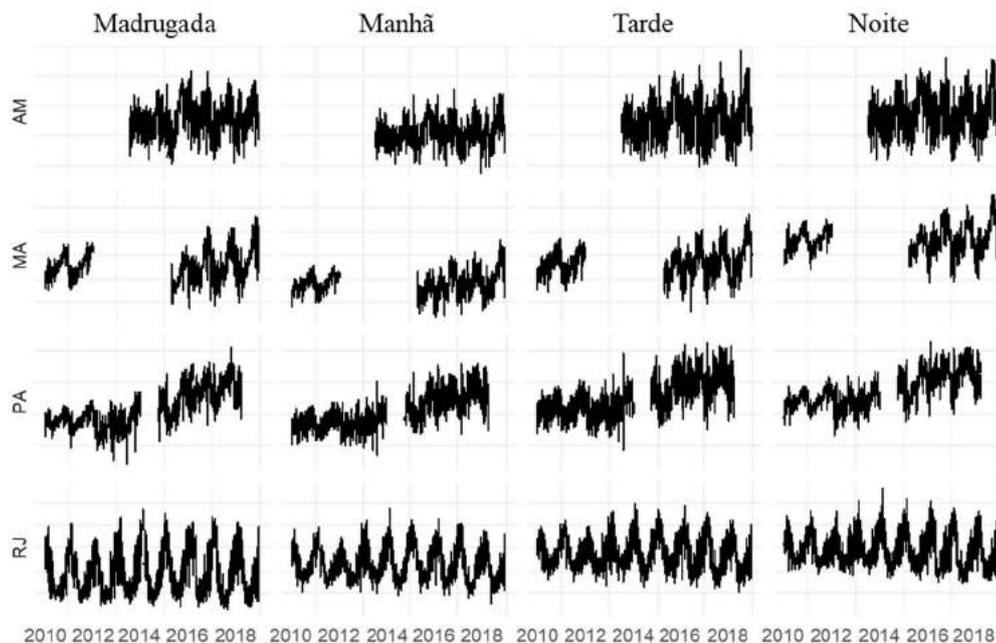


Figura 5-3: Carga ajustada de UFs selecionadas por jornada.

## 5.2. Carga Neutra

As oscilações da carga corrigida ao longo de cada ano demonstram padrão de comportamento periódico, em linha com a sazonalidade das classes de consumo ilustradas na Figura 2-3. Conforme descrito no capítulo de caracterização da carga, tal sazonalidade apoia-se sobre demanda por serviços energéticos sensíveis ao clima.

Dessa forma, a metodologia essencialmente busca verificar o consumo de energia responsivo ao clima ao comparar a carga corrigida de calendário com uma carga fictícia e neutra ao clima. Os macroprocessos da metodologia de cálculo da carga neutra são:

- Identificação dos vales;
- Identificação dos dias de carga mínima;
- Interpolação dos dias neutros.

De forma simples, os processos de identificação dos vales e identificação dos dias de carga mínima tem por objetivo, selecionar os dias do ano de menor demanda pelos serviços energéticos responsivos ao clima. É importante ressaltar que o cálculo do

desconforto térmico, nesta etapa, leva em consideração vestimentas de isolamento térmica extremas de modo colocar todos os registros em uma escala de calor. Dentre essa seleção, são filtrados os registros de carga mínima, onde subentende-se que não há uso da energia para conforto térmico. Embora para alguns estados tais pontos representem momentos de demanda neutra ao clima, para outros, sobretudo os estados mais próximos a linha do equador, pode não haver condição de neutralidade, sendo portanto, selecionados os dias mais “neutros” possíveis.

Identificados os registros de carga, por jornada, neutra ao clima, são traçadas curvas neutras fictícias interpolando tais pontos, conforme descrito na seção 4.6. A interpretação desta carga suavizada livre de clima traduz com mais facilidade os efeitos econômicos sobre dinâmica de uso da eletricidade. A parte superior da Figura 5-4 compara a carga ajustada de calendário’ à carga neutra por jornada para o estado de São Paulo. A carga corrigida de calendário’, nesta figura, apresenta maior uso da eletricidade durante a jornada da tarde devido à maior oscilação climática neste turno. Por outro lado, ao se analisar a carga neutra, verifica-se protagonismo de uso de eletricidade na jornada da noite em função da atividade noturna do estado, bem como da maior posse média de equipamentos elétricos nas residenciais paulistas. Além disso, observa-se que a carga em todas as jornadas decresce após 2014, evidenciando o impacto da crise econômica que assolou o país nos últimos anos. De fato, segundo EPE (2019b), as classes de consumo paulistas reduziram sua demanda por eletricidade de forma generalizada em 2015.

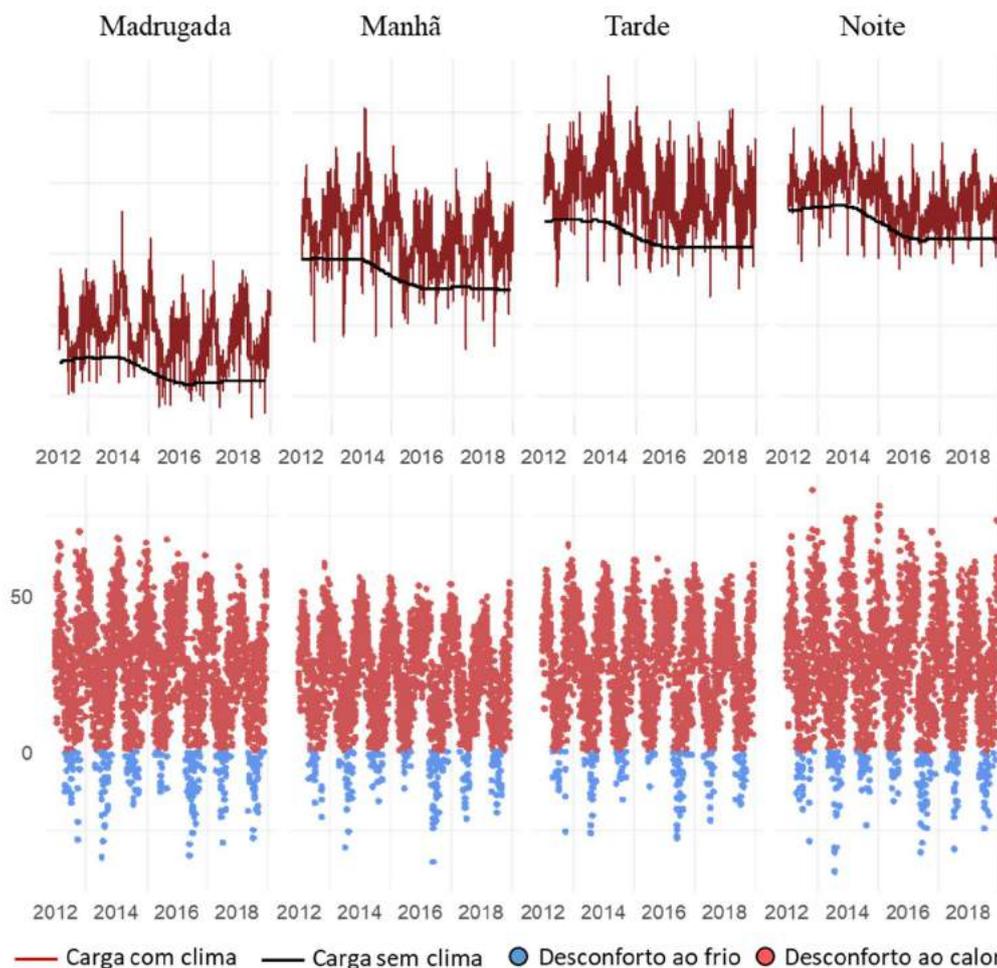


Figura 5-4: Carga com clima *versus* Carga suavizada sem clima para o estado de São Paulo.

Fonte: Elaboração própria.

Na parte inferior da Figura 5-4, estão ilustrados os registros diários de desconforto térmico por jornada. Verifica-se predominância da sensação de calor em todas as jornadas ao longo do ano indicando maior propensão ao uso da eletricidade para refrigeração do que para aquecimento. Observa-se que o comportamento da carga corrigida de calendário' segue as oscilações de desconforto térmico ao longo do ano. Além disso, a jornada da noite apresenta as maiores amplitudes de desconforto térmico. Tal fato, decorre do atraso térmico das envoltórias das edificações, propagando boa parte da energia térmica radiante diária para a jornada noturna. Apesar disso, a carga corrigida de calendário' não demonstra as maiores amplitudes nesta jornada, uma vez que há relativa atividade noturna no estado, além da maior possibilidade de vestimentas auxiliar na atenuação do desconforto térmico.

A metodologia proposta possibilita a verificação das vestimentas coletivas no momento da identificação dos pontos neutros da carga corrigida de calendário' histórica. Ou seja,

as vestimentas médias da população estadual as quais minimizam o desconforto térmico acumulado de todos os pontos neutros identificados. A Figura 5-5 exhibe, para o estado de São Paulo, os valores, por jornada, de resistência térmica das vestimentas (clo) e do percentual de área da superfície corporal suada e exposta (w). O valor de “w” indica que no momento em que a média da população paulista está em menor desconforto térmico, as vestimentas utilizadas cobrem quase toda a superfície corporal, restando apenas as áreas do pescoço, rosto e mãos. Já os valores de clo indicam o uso de vestimentas de resistência térmica maior nas jornadas da madrugada e da manhã, diminuindo ao longo do dia na medida em que a temperatura interna dos ambientes se eleva.



Figura 5-5: Vestimentas do vale coletivas por jornada para o estado de São Paulo.

O estado de São Paulo foi elencado para estas análises por se tratar do estado de maior consumo de eletricidade no Brasil. Todavia, cada estado está sujeito a exposições climáticas distintas e portanto diferem-se quanto as estratégias de redução do desconforto. Embora todos os estados estejam representados individualmente no Apêndice F, a Figura 5-6 ilustra as disparidades nas vestimentas coletivas de cada região geográfica para a jornada da tarde. Observa-se que para as regiões Norte e Nordeste, os indivíduos utilizam vestimentas com pouca cobertura corporal e de resistências térmicas baixas a fim de mitigar o calor mesmo nos momentos mais “neutros” do ano. Já para as regiões Centro-Oeste e Sul, há predominância no uso de vestimentas de maior cobertura corporal e maior resistência térmica como estratégia para a atenuação do frio.



Figura 5-6: Características regionais das vestimentas do vale coletivas para a jornada da Tarde.

### 5.3. Identificação da forma funcional

Conforme descrito anteriormente, há evidências da relação entre o desconforto térmico e a carga de energia. Pela metodologia proposta, nesta etapa busca-se mensurar tal relação. Para isto, aplicam-se regressões sobre os pares ordenados (x, y), onde nas abcissas está a escala de desconforto térmico calculada nas variáveis climáticas transpostas para o ambiente interno das edificações e nas vestimentas coletivas identificadas de cada estado e jornada. Já o eixo das ordenadas representa o efeito climático calculado pela diferença entre as séries de carga com clima (carga corrigida de calendário’) e sem clima (carga neutra suavizada).

A Figura 5-7 ilustra as regressões dos estados com maior amplitude de carga de cada região. De fato, ao se analisar conjuntamente o traçado das estimações não-paramétricas desses estados, confirma-se a hipótese sobre a forma funcional descrita no capítulo de metodologia. Como abordado, cada estado comporta-se em um local particular do

domínio da função teórica global ilustrada na Figura 4-3. Portanto, os diversos métodos paramétricos presentes na literatura podem ser extremamente úteis para determinadas localidades, mas podem mostrar-se ineficientes quando aplicados em outras condições. Os métodos de CDD e HDD, por exemplo, podem se mostrar eficazes, por exemplo para o estado do Rio Grande do Sul, porém se aplicados para o Mato Grosso do Sul iriam subestimar o efeito inicial da curva e superestimar a resposta ao clima na região de saturação. Os métodos de smooth transition, por sua vez, conseguiriam representar a concavidade e convexidade da curva em todo o domínio da função teórica, porém para isto seriam necessárias composições de funções de transição pois a simetria das funções logísticas e exponenciais não necessariamente são observadas no gráfico de dispersão.

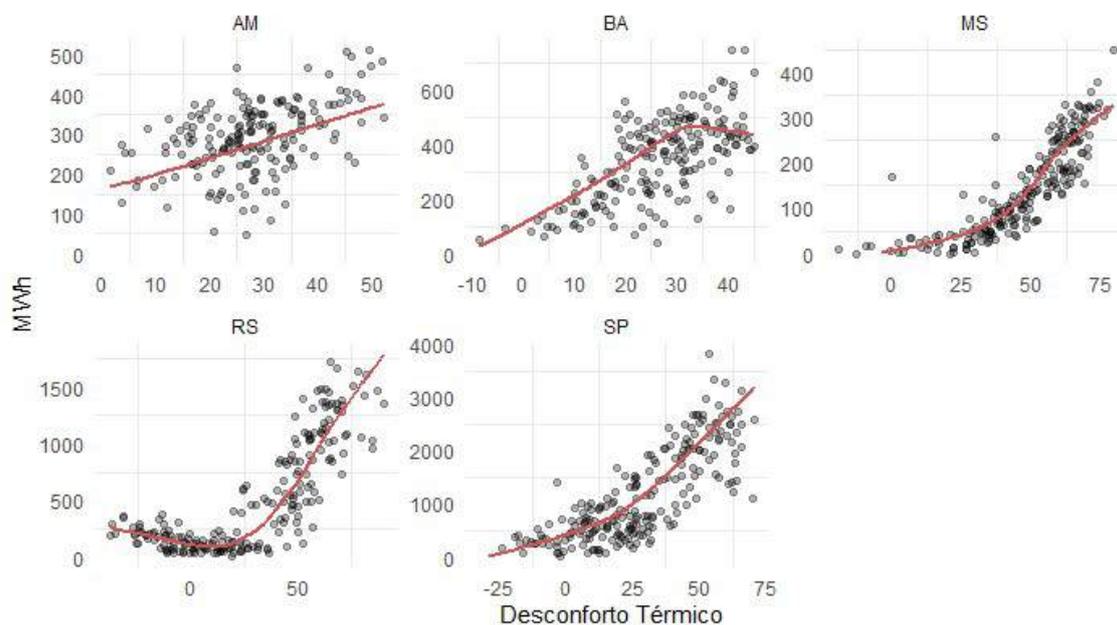


Figura 5-7: Relação entre clima e carga de energia para UFs selecionadas no turno da Madrugada para os dias sem chuva do ano de 2016.

Ainda na Figura 5-7, observa-se para o estado do Amazonas que há uso de eletricidade mesmo desconforto térmico nulo. Isto ocorre pela natureza equatorial deste estado, ou seja, pelo fato de a amplitude térmica ser estreita leva o Amazonas a experimentar sensação de desconforto ao calor durante todo o ano, e com isso os pontos “neutros” identificados na verdade são pontos do ano de menor calor possível. Matematicamente, para que a curva passasse pelo desconforto zero, a carga neutra suavizada deveria ser, aproximadamente, 200 MWh inferior. Entretanto, tal ajuste não traria ganhos adicionais dado que não há registros de desconforto zero para este estado.

Assim como no Amazonas, a Bahia demonstra comportamento linear na maior parte

domínio da função, mostrando-se mais dispersa na região de saturação. É importante pontuar que o cálculo empregado utilizou dados de uma única estação meteorológica por estado, elegendo as estações instaladas nas capitais. Entretanto, a dispersão observada nos resultados mostra a necessidade da consideração de mais estações meteorológicas, sobretudo em estados de maior extensão territorial com densidade demográfica menos concentrada.

Nos estados do Mato Grosso do Sul e São Paulo, as curvas apresentam o perfil S esperado para relação de desconforto térmico ao calor. A curvatura da função indica as disparidades das preferências térmicas dos indivíduos e a maior probabilidade ao acionamento do serviço de refrigeração na medida em que o desconforto ao calor aumenta.

Por fim no Rio Grande do Sul observa-se o uso de energia elétrica também na região de desconforto ao frio. Como a figura exhibe os resultados para a jornada da madrugada, há possibilidade de uso de calefação e/ou aquecimento de água. Apesar de PROCEL/ELETRONAS (2019) não identificar uso destes serviços na madrugada, há outros equipamentos não mapeados pela pesquisa que poderiam estar associados a este efeito, como é o caso dos cobertores e travesseiros elétricos.

As análises da Figura 5-7 demonstram a relação entre clima e energia para situação de envoltória seca. Entretanto, conforme descrito no capítulo de referencial teórico, a água possui calor específico extremamente maior que os dos materiais edificantes. Ou seja, é necessário muito mais energia para aquecer a água do que os materiais. Isto confere maior inércia térmica à envoltória e aos arredores da edificação. Para ilustrar tal efeito, a Figura 5-8 mostra as curvas “S” para o estado do Rio de Janeiro em suas 4 jornadas nas situações de envoltória seca e molhada<sup>37</sup>. É interessante observar que em todas as jornadas, a chuva atenua o efeito climático sobre a demanda por refrigeração, principalmente nos momentos de maior desconforto ao calor. Apesar de contraintuitivo, a maior atenuação em momentos extremos de calor por estar associada a outros fatores. O consumidor, pode evitar o consumo de determinados eletrodomésticos em ocasiões de chuva com o receio da “queima” destes equipamentos. Além disso, em dias de chuva, a rigidez dielétrica dos transformadores e linhas de distribuição reduz, tornando-a mais

---

<sup>37</sup> Os registros nos quais considerou-se as envoltórias como molhadas foram aqueles em que nas últimas 24 horas a estação meteorológica registrou chuva.

suscetível a ocorrência de curtos-circuitos e falhas elétricas, sobretudo em áreas de elevado índice de perdas<sup>38</sup>.

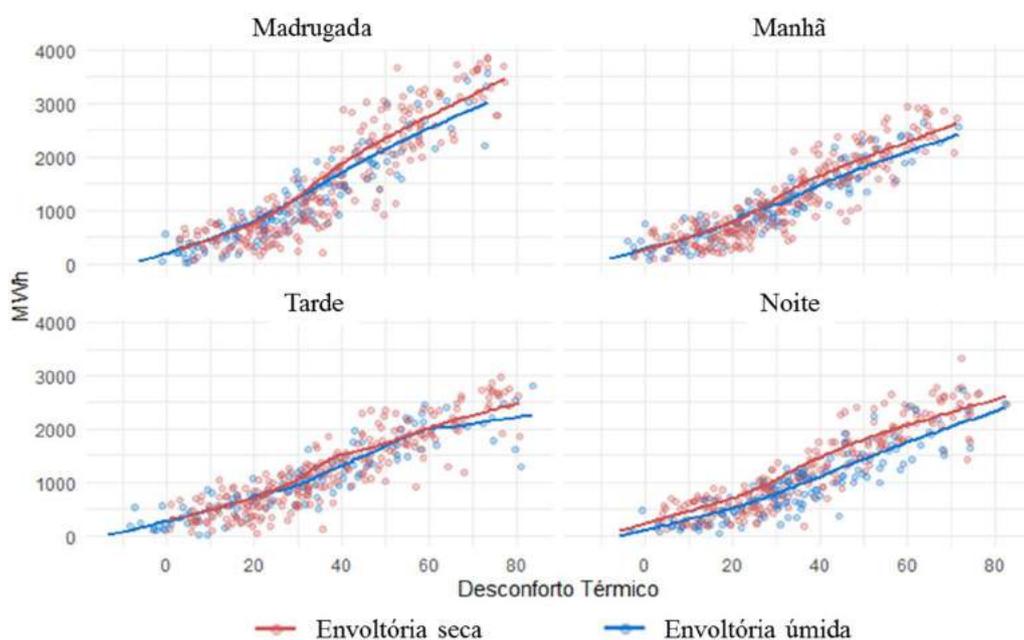


Figura 5-8: Efeito da chuva no uso elétrico de refrigeração para o ano de 2016 no RJ.

Apesar de serem exibidos os resultados para o ano de 2016, o ajuste das curvas S foi realizado para cada ano do histórico, utilizando sempre cinco anos de observação centrados no ano de referência. De fato, o consumo responsivo ao clima pode avançar ao longo do tempo com o aumento da posse de equipamentos de elétricos provedores de “refrigeração”, “aquecimento direto” e “calor de processo”.

A empresa de pesquisa energética, afirma em EPE (2019a) que os condicionadores de ar foram os equipamentos que apresentaram maior crescimento da posse nas residências, em taxa média anual de 8,4% entre 2005 e 2018. De fato, segundo ABRAVA (2020), a venda de ares condicionadores do tipo “Split” teve seu ápice de vendas em 2013 e 2014. Neste mesmo período, a quantidade de toneladas de refrigeração de equipamentos centrais<sup>39</sup>, característicos do setor comercial e industrial, registrou recorde de vendas que se mantém até hoje. É importante pontuar que os marcos de venda do comércio, ocorrem, em geral, após a estação quente do ano: dia das mães (maio), dia dos pais (agosto), Black Friday (outubro) e Natal (dezembro). Desta forma, espera-se que as

<sup>38</sup> No caso do Rio de Janeiro, por exemplo, há áreas com severas restrições operativas (ASRO), as quais dominadas pela criminalidade possuem ligações clandestinas à rede de distribuição, prejudicando a qualidade e segurança da rede.

<sup>39</sup> Soma de equipamentos Chiller, VRF e Package

elevadas vendas de 2013 e 2014, gerem impactos nos anos subsequentes: 2014 e 2015. Adicionalmente, segundo Nota Técnica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2015), o ano de 2015 apresentou-se como o mais quente do Brasil desde 1961, seguido dos anos de 1998 e 2012.

A Figura 5-9 ilustra o efeito do aumento da posse de equipamentos sobre o consumo de energia elétrica na jornada da noite para o estado do Rio Grande do Sul. É interessante observar a consistência dos resultados a luz dos fatos descritos pelas diferentes instituições. Na figura, observa-se o aumento da responsividade climática ao longo dos anos. De fato, a “tempestade perfeita” do aumento da posse e recordes de temperatura levaram a deslocamentos da curva em maiores proporções de 2013 para 2014 e de 2014 para 2015. Adicionalmente, é possível observar que entre 2011 e 2012, também ocorreu aceleração da responsividade climática em ambas as zonas de desconforto.

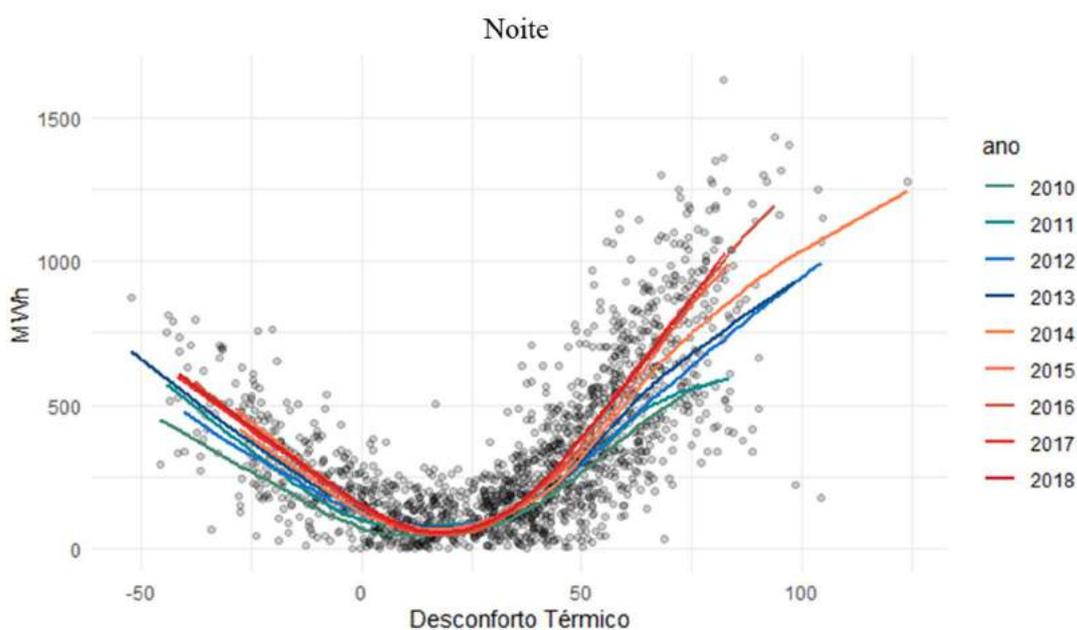


Figura 5-9: Efeito da posse de equipamentos no RS.

Dessa forma, aplicou-se a metodologia para cada jornada de cada estado a cada ano do histórico, considerando separadamente os dias secos e os dias em que ocorreu precipitação nas últimas 24 horas daquela jornada. O desempenho do modelo para as configurações supracitadas, aferido pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ), seguem listados no Apêndice K. Todavia, Figura 5-10 ilustra o desempenho dos 2 estados sob maior influência do efeito climático para cada região.

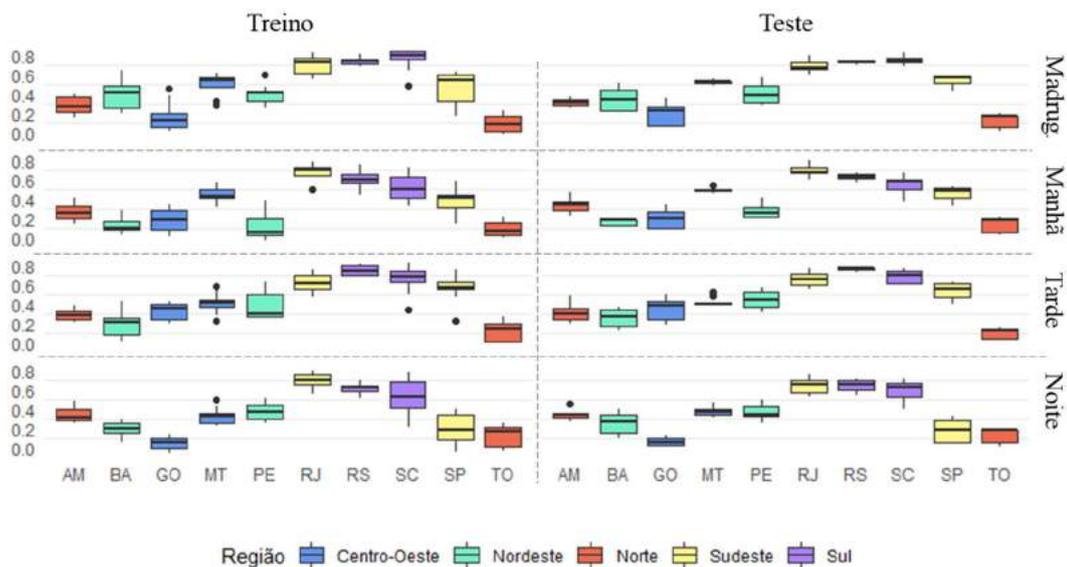


Figura 5-10: Desempenho do modelo para a dupla de estados com responsividade térmica mais relevante.

O desempenho apresentado mostra variâncias próximas entre as amostras de teste e de treinamento, demonstrando que o processo de validação cruzada consegue atenuar o “*overfit*” do modelo. Entretanto, o modelo não obtém associação forte para alguns estados, indicando causas não climáticas às variações da carga. De fato, as variações de consumo das classes não sensíveis ao clima podem deturpar a relação investigada, dependendo do peso deste consumo em relação a carga estadual. É importante ressaltar que a consideração de registros horários de mais estações meteorológicas poderia corroborar para melhores ajustes. A grande extensão territorial e densidade demográfica dispersa podem fazer com que os registros de uma única estação meteorológica não sejam representativos do estado como um todo. Além disso, o acréscimo horário da geração das pequenas usinas de 01/2010 a 02/2012 evitaria o processo aproximado de nivelamento das séries incorrendo em menores erros.

#### 5.4. Carga Livre de Clima e com Clima Típico

Com as curvas S ajustadas, é possível aplicá-las sobre a carga original para obter a carga livre de clima. É importante ratificar que a carga livre de clima se diferencia da carga neutra suavizada, pois a primeira detém todos os efeitos aleatórios não climáticos.

Adicionalmente, são calculadas as sensações de desconforto térmico do histórico das bases de dados do INMET desde 1961. A partir destes dados é elaborado um ano típico, com registros diários por jornada, para cada estado, conforme descrito na seção 4.9.

Feito isto, em posse do ano típico e da curva S ajustada foram estimados valores de carga caso os estados estivessem expostos ao clima típico daquela estação meteorológica.

A Figura 5-11 ilustra as três cargas descritas acima para jornada da madrugada no estado do Rio de Janeiro. É possível verificar que a carga original na maior parte do tempo fica acima das demais, ilustrando temperaturas acima da normalidade nessas situações. A série de carga livre de clima mostra certa estabilidade, como esperado. Entretanto, há momentos em que o modelo não captura adequadamente o efeito climático. Em 2014, por exemplo, a carga livre de clima ainda se mostra elevada no período de pico do ano. Em contrapartida, os meses de recorde histórico de temperatura (junho-dezembro/2015), frutos do fenômeno El-Niño, foram corretamente capturados. Desta forma, fica evidente a fragilidade na consideração de uma única estação meteorológica para todo o estado, implicando captura parcial do efeito.

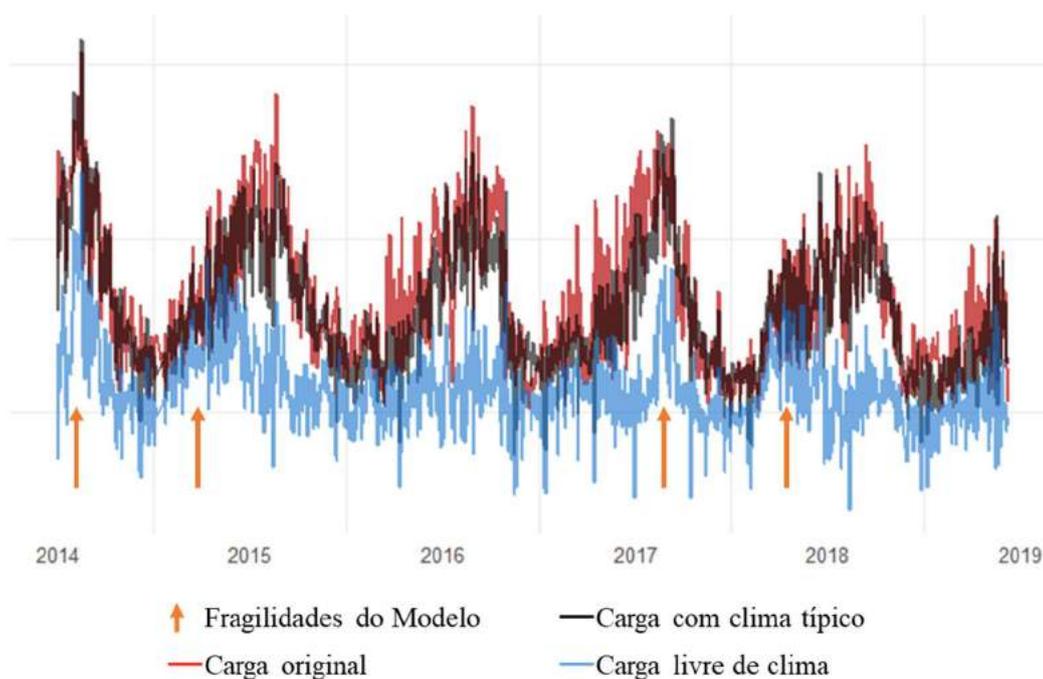


Figura 5-11: Comparação da carga com e sem efeito climático para a jornada da Madrugada do RJ.

Diversas são as utilidades para as cargas livre de clima. O acompanhamento da carga está inserido no processo dos diversos agentes do setor. A EPE, ONS e CCEE apuram os movimentos das séries de consumo e carga para traduzir a conjuntura no âmbito das

projeções mensais para o PLAN<sup>40</sup>, PMO<sup>41</sup>, entre outros. Para os agentes de distribuição prever a carga de seu mercado cativo para os próximos meses significa previsão de faturamento. Já as comercializadoras, intrinsecamente ao seu negócio está a previsão de disponibilidade de oferta em relação à demanda por eletricidade no futuro. Desta forma, a metodologia proposta vem a complementar as projeções dos agentes do setor. É importante mencionar que para a investigação de causas econômicas a partir da carga de energia, não se deve retirar o efeito calendário, dado que tal efeito persiste nas séries econômicas. Como exemplo, a Figura 5-12 ilustra para a jornada da tarde do estado de São Paulo, um dos momentos em que a conjuntura econômica era de incerteza quanto ao retorno da crise econômica iniciada em 2015. Pela análise da carga realizada é difícil identificar retomada. Entretanto, analisando a carga livre de clima, observa-se que em 2015 as taxas de variação seriam ainda menores se não fosse o efeito do El-Niño na elevação da temperatura, e que 2016 apresentou ascensão das taxas de variação, indicando retomada.



Figura 5-12: Taxas mensais de evolução da carga com e sem efeito climático para a jornada da tarde do estado de São Paulo.

Outra contribuição relevante da metodologia é a possibilidade de atualização do Balanço de Energia Útil (BEU), ainda que de forma parcial. Entendendo que a demanda da sociedade se apoia nos serviços energéticos<sup>42</sup>, podendo ser providos pelas diversas fontes<sup>43</sup> de energia existentes, o BEU busca mapear a destinação e rendimento das

<sup>40</sup> Projeções de carga para o Planejamento Anual da Operação Energética.

<sup>41</sup> Programa Mensal da Operação

<sup>42</sup> Iluminação, Calor de processo, aquecimento direto, refrigeração, força motriz, entre outros.

<sup>43</sup> Eletricidade, gás natural, óleo diesel, óleo combustível, lenha carvão vegetal, GLP, entre outras.

fontes para provimento dos diversos serviços energéticos. Entretanto, a última pesquisa realizada pelo Ministério de Minas e Energia (MME) que englobasse a totalidade da cadeia energética do país ocorreu em 2004<sup>44</sup>. A contribuição da metodologia desta dissertação reside na possibilidade de mensuração da energia elétrica destinada mensalmente para os serviços de “refrigeração”, “calor de processo” e “aquecimento direto” sensíveis ao clima em cada jornada e estado, conforme ilustrado no Apêndice J.

De forma global, a sazonalidade observada nas séries de consumo pauta-se, de fato, no uso mensal da energia para os serviços energéticos mencionados. A Figura 5-13 ilustra por jornada a demanda agregada de todos<sup>45</sup> os estados mensalmente. A segmentação dos serviços energéticos foi realizada agregando-se em separado as regiões de desconforto ao frio e ao calor das curvas “S”. Entretanto, como o calor específico da água é expressivamente mais elevado que o do ar ambiente, a temperatura de conforto para “calor de processo” difere-se bastante da temperatura de conforto para “refrigeração”, sendo difícil mensurar o efeito isolado de “calor de processo”.

A abordagem por jornada novamente traz mais informação sobre o uso dos serviços energéticos pelas classes de consumo. Observa-se para os meses iniciais e finais do ano que o serviço de refrigeração possui forte influência sobre as jornadas da madrugada (majoritariamente residências) e tarde (demais edificações) indicando uma demanda generalizada por este serviço. Aproximando-se da estação fria do ano, a preferência térmica dos indivíduos desvia o uso energético de eletricidade para calor de processo em detrimento a refrigeração, exceto para alguns estados do Norte e Nordeste que se mantém quentes durante todo o ano. Entretanto, como o uso de chuveiro elétrico é menos recrutado na jornada da madrugada e da tarde, é possível que a demanda nos meses de junho-agosto seja exclusiva de aquecimento direto, indicando possível uso de calefação. Apesar da suspeita, é possível que os resultados sejam meramente um efeito de borda, ou seja, o uso de chuveiro elétrico nos horários próximos das 00:00 e das 18:00. Dessa forma, estudos mais aprofundados devem ser realizados para confirmar tal hipótese.

---

<sup>44</sup> Recentemente o MME por meio da EPE com financiamento do Banco Mundial contratou uma pesquisa de campo no segmento energointensivo industrial chamado Projeto de Assistência Técnica dos setores Energético e Mineral – Projeto META.

<sup>45</sup> Não considera AP e RR.

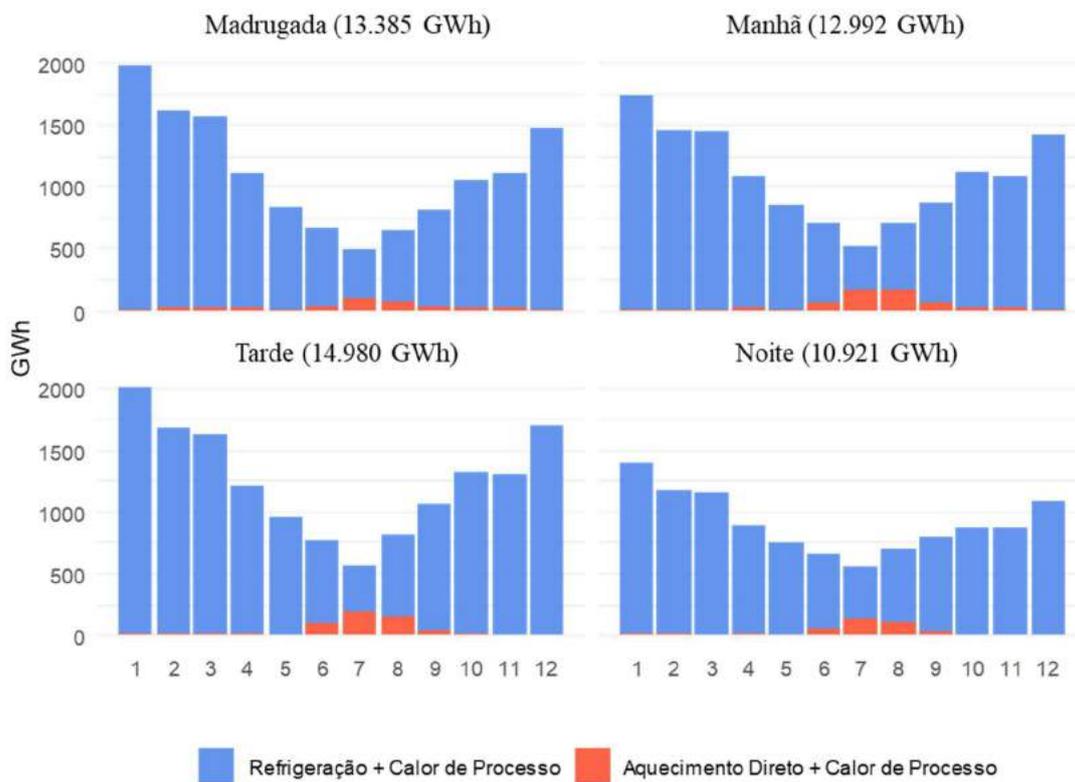


Figura 5-13: Sazonalidade do uso da energia para conforto térmico para o ano de 2017.

Nota: Não considera as UFs AP e RR

Portanto, a demanda sensível clima é sazonal representando em janeiro 15,3% da carga original e 5,2% em julho. Em termos anuais o ano de 2017 contabilizou 52.278 GWh de energia elétrica responsiva ao clima, representando cerca de 10% da carga original.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A relação entre energia e desenvolvimento é de fundamental importância para sociedade colocando a segurança energética, modicidade tarifária e universalização do acesso à energia elétrica como temas constantes na agenda das políticas públicas brasileiras, inclusive dentre os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS).

Garantir o cumprimento dos temas supracitados e aumentar a possibilidade de captação financeira com vistas à expansão da oferta tem como requisito antever os montantes de energia e potência necessários ao pleno funcionamento do sistema elétrico no futuro, sobretudo em um setor de investimentos iniciais elevados e de lenta maturação.

É importante pontuar que as projeções de demanda detêm diversas incertezas, as quais ampliam o leque de possibilidades no longo, médio e curto prazos. Uma delas, associada a questão climática, adiciona maiores desafios na previsão tanto da disponibilidade de recurso quanto no uso mais intensivo de eletricidade pelos consumidores, sobretudo em um contexto de mudanças climáticas, perspectiva de aumento da posse de equipamentos cuja demanda é sensível ao clima.

Estudos correlacionando variáveis climáticas à demanda por eletricidade são abordados pela literatura desde o século passado. No entanto, como as oscilações da carga de energia decorrentes do clima são expressivas ao longo do ano, as consequências financeiras se tornam evidentes para os agentes do setor e conseqüentemente a relevância da tratativa deste tema. Além disso, a recorrência do tema na literatura demonstra que ainda há lacunas a serem exploradas.

Dentro do escopo de modelos que se prestam a explicar o efeito do clima sobre a carga de energia, a abordagem predominante sobre a relação entre clima e uso de energia elétrica na literatura pauta-se na metodologia dos graus dia de refrigeração (CDD) e aquecimento (HDD). Tal metodologia contorna a não-linearidade da relação, propondo temperaturas de gatilho, a partir das quais variações de temperatura passam a surtir efeito sobre a carga. Outra gama de modelos propostos considera a não linearidade de forma direta ao utilizar métodos de transição suave (*smooth transition*), os quais podem representar as regiões de início e saturação da curva “S” de forma mais fidedigna.

Entretanto, tais abordagens impõe formas funcionais que não são aplicáveis de forma ampla para as peculiaridades locais brasileiras. Além disso, a literatura negligencia a

influência de outros fatores relevantes fora a temperatura como a umidade relativa, velocidade do vento, precipitação, características construtivas, vestimentas e atividades exercidas pelos seus ocupantes. Desta forma, os modelos disponíveis na literatura demonstram-se insuficientes para a determinação da influência do estado térmico de um indivíduo sobre o montante de energia elétrica consumido.

Diante da necessidade de consideração de todas as variáveis influentes supracitadas e sem impor formas funcionais pré-definidas, a presente dissertação propôs um modelo de regressão não-paramétrica (regressão Loess) utilizando como variável independente a sensação de desconforto térmico oriunda do modelo de dois nós.

O estudo atestou a hipótese teórica sobre a forma funcional do efeito climático identificando que cada local possui clima característico limitado a uma parte do domínio da função teórica, podendo este deter forma linear, por exemplo. Dessa forma, evidencia-se que os modelos propostos na literatura até então podem ser extremamente eficazes para determinados locais, mas podem não apresentar tal desempenho em outras localidades.

As implicações dos aprimoramentos metodológicos supracitados são as mais diversas e interessantes para os tomadores de decisão e podem ser classificadas em dois grandes blocos: Melhorias nas projeções e Aprimoramento de políticas públicas.

### **6.1. Melhorias nas projeções**

Conforme demonstrado no capítulo de escolha das variáveis de entrada do modelo, diversos são os fatores que levam a mudanças no montante de carga demandada pelo sistema. Previsões assertivas de carga enfrentam, portanto, o desafio de estimar a dinâmica de tais fatores de modo a calcular não somente o montante total de energia demandado no futuro, mas também a responsabilidade destes fatores frente ao montante previsto. O conhecimento da influência dos drivers da carga possibilita a elaboração de cenários, subsidiando decisões de longo prazo para o planejamento dos diversos agentes e instituições do setor elétrico.

Nesse sentido, com a metodologia proposta nesta dissertação, retirar o efeito climático do histórico da carga de energia possibilita elaborar estudos dos demais drivers da carga, econômicos e demográficos, por exemplo, livres de clima trazendo maior aderência aos resultados. Outra possibilidade está no destaque de forma explícita do efeito climático

dentre os drivers da carga especificados em modelos preditivos, como os modelos de séries temporais, por exemplo.

Além disso, a utilização da metodologia proposta permite a elaboração de cenários quantitativos de estresse de demanda a luz de anomalias climáticas tais como El-Niño.

## **6.2. Aprimoramento de políticas públicas**

Outro grupo de vantagens no uso da metodologia proposta nesta dissertação pauta-se na possibilidade de aprimoramento de políticas públicas. Com flexibilidade do modelo e sua abrangência nacional é possível verificar os diferentes impactos do clima sobre a carga de energia estadual, propiciando desenhos de políticas mais direcionadas para a realidade de cada estado com relação ao aspecto construtivo das edificações ou ainda aferir os impactos do padrão de vestimentas adotado sobre o montante a carga de energia.

Além da maior compreensão do fenômeno climático sobre a carga de energia a nível espacial, o uso da presente dissertação adiciona como vantagem um maior entendimento sobre o fenômeno entre as classes de consumo através da análise da carga por jornadas (madrugada, manhã, tarde e noite). Como o perfil de consumo das classes é diferenciado ao longo do dia, a análise da carga por jornadas possibilita a intuição aferir de forma aproximada o impacto sobre as classes de consumo. Desta maneira, a prospecção do efeito climático subsidia a tomada de decisão no presente com relação as políticas públicas de índices mínimos de equipamentos e etiquetagem de edificações, dando enfoque nas classes que mais impactam a expansão do sistema. É importante ratificar que o efeito climático diferenciado entre classes leva a mudanças no perfil da carga ao longo do tempo, sendo mais um ponto a favor do uso desta metodologia.

## Referências Bibliográficas

ABAL, 2019. Associação Brasileira do Alumínio. Disponível em: <http://abal.org.br/estatisticas/nacionais/aluminio-primario/producao-por-usina/>

ABRAVA, 2020. 1º Boletim econômico abrava – Previsão de faturamento e mercado de ar-condicionado residencial e central. Disponível em: <https://abrava.com.br/1-boletim-economico-abrava-previsao-de-faturamento-e-mercado-de-ar-condicionado-residencial-e-central/>

Amato, A., Ruth, M., Kirshen, P. & Horwitz, J., 2005. Regional energy demand response to climate change: methodology and application to the commonwealth of Massachusetts. Climate Change.

Andrade, G. N. d. & Sant'Anna, A. P., 2013. Estimativa do impacto das variações de temperatura sobre o consumo residencial de energia elétrica no Rio de Janeiro. Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional.

ANEEL, 2011. Resolução Normativa ANEEL- REN 440/2011, Brasília: ANEEL.

ANEEL, 2019. Resultado dos Processos Tarifários de Distribuição, Brasília: ANEEL.

ASHRAE 55, 2010. ASHRAE STANDARD - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Atlanta: ASHRAE.

ASHRAE, 1985. Handbook of Fundamentals.

Auliciems, A. & Szokolay, S. V., 2007. Thermal Comfort, Brisbane: Passive and Low Energy Architecture International in association with the University of Queensland department of Architecture.

Bessec, M. & Fouquau, J., 2008. The non-linear link between electricity consumption and temperature in Europe: a threshold panel approach. Energy Economics.

Bittercourt, L. & Cândido, C., 2010. Procel Edifica - Ventilação Natural em Edificações, Rio de Janeiro: Eletrobras.

Bussab, W. d. O. & Morettin, P. A., 2010. Estatística Básica. 6 ed ed. São Paulo: Saraiva.

Castro, R., Oliveira, F. L. C. & Souza, F. P., 2016. Proposta de um método empírico de ajuste de séries temporais influenciadas pelos ofensores calendário e temperatura. *Gestão & Produção*.

CBCA, 2015. A Evolução da Construção em Aço no Brasil. Disponível em: <https://www.cbca-acobrasil.org.br/site/noticias-detalhes.php?cod=7074>

CETESB, 2010. Qualidade do ar no Estado de São Paulo. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/noticias/pcpv.pdf> [Acesso em novembro 2013].

Cleveland, W. S., Grosse, E. & Shyu, W. M., 1992. Local regression models. chapter 8 of *Statistical Models in S* eds J.M. Chambers and T.J. Hastie. s.l.:Wadsworth & Books/Cole.

Crowley, C. & Joutz, F. L., 2005. *Weather Effects on Electricity Loads: Modeling and Forecasting*, Washington: USEPA.

CTSB apud Frota & Schiffer, 1958. REEF 58. Hygrothermique et ventilation (D5) - Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CTSB). Paris.

EPE/MME, 2016. Projeto de Assistência Técnica dos Setores de Energia e Mineral - Projeto META - TDR nº 16 - Pesquisa do Consumo de Energia no Setor de Serviços, Rio de Janeiro: EPE.

EPE, 2018. *Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética*, Rio de Janeiro: EPE.

EPE, 2019a. *Atlas da Eficiência Energética do Brasil*, Rio de Janeiro: EPE.

EPE, 2019b. *Anuário Estatístico de Energia Elétrica*, Rio de Janeiro: EPE.

EPE, 2019c. EPE-DEA-NT-003: Metodologia: Modelo de Projeção da Demanda de Eletricidade, Rio de Janeiro: EPE.

EPE, 2019e. *Balanco Energético Nacional - Ano Base 2018*.

EPE, 2020. EPE-DEA-NT-005: Metodologia: Projeção de Curva de Carga Horária, Rio de Janeiro: EPE.

- ESL, 2012. Energy Systems Laboratory. Dallas(Texas).
- Frota, A. B. & Schiffer, S. R., 2001. Manual de Conforto Térmico. São Paulo: Studio Nobel.
- G1, 2017. G1. Disponível em: <https://g1.globo.com/ma/maranhao/noticia/maranhao-sofre-impactos-depois-que-a-alumar-encerrou-atividades-com-aluminio.ghtml>
- Gagge, A. P., 1936. The linearity criterion applied to partitional calorimetry. American Journal of Physiology.
- GEA, 2012. Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria: Cambridge University Press.
- Giambiagi, F., Sales, A. F. & Pires, J. C. L., 2002. As perspectivas do Setor Elétrico após o Racionamento. Revista BNDES, DEZ, pp. V.9, N.18, P. 163-204.
- Hastie, T., Tibshirani, R. & Friedman, J., 2008. The Elements of Statistical Learning - Data Mining, Inference, and Prediction. California.
- Hekkenberg., M., Benders, R., Moll, H. C. & Uiterkamp, A. S., 2009. Indications for changing electricity demand pattern: The temperature dependence of electricity demand in the Netherlands. Energy Policy.
- Hydro-RI, 2014. Hydro.com. Disponível em: <https://www.hydro.com/pt-BR/investidores/relatorios-e-apresentacoes/relatorios-trimestrais/previous-reports/>
- INMET, 2011. NOTA TÉCNICA No. 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET - Rede de Estações Meteorológicas Automáticas do INMET, Brasília: INMET.
- INMET, 2015. ANALISE DAS ANOMALIAS DAS TEMPERATURAS NO ANO DE 2015, Brasília: INMET.
- INMET, 2019a. Normais CLimatológicas do Brasil 1961-1990, Brasília: INMET.
- INMET, 2019b. Normais CLimatológicas do Brasil 1981-2010, Brasília: INMET.
- INMET, 2019c. Dados Meteorológicos das Estações Automáticas, Brasília.

INMET, 2019d. Dados Meteorológicos das Estações Convencionais, Brasília: INMET.

Irizarry, R. A., 2020. Introduction do Data Science.

Itamaraty, 2014. Negociações da Agenda de Desenvolvimento Pós-2015: Elementos Orientadores da Posição Brasileira. Disponível em: [http://www.itamaraty.gov.br/images/ed\\_desenvsust/ODS-pos-bras.pdf](http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/ODS-pos-bras.pdf)

Junior, A. O. P. & Costa, F. W. I., 2017. 6th Latin American Energy Economics Meeting - ELADEE. Rio de Janeiro.

Karynono, T. H., 1996. Thermal comfort in the tropical South-East Asia region. Arch. Sc.Rev.

Kelman, J., 2001. Relatório Kelman - O Desequilíbrio entre Oferta e Demanda de Energia Elétrica, Brasília.

Kuhn, M. & Johnson, K., 2019. Feature Engineering and Selection: A Practical Approach for Predictive Models. London: CRC Press.

Lamberts, R., Dutra, L. & Pereira, F. O. R., 2014. Eficiência Energética na Arquitetura. s.l.:ELETROBRAS/PROCEL.

Lam, J., 1998. Climatic and economic influences on residential.. Energ. Convers. Manage.

Lei Nº10.295, 2001. Lei de Eficiência Energética - Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências., Brasília.

MME/ANEEL/EPE/ONS/CCEE, 2017. Nota Técnica 01/2017 - Grupo de Trabalho Perdas (GT-PERDAS) - Avaliação das Perdas no Sistema Elétrico Brasileiro, Rio de Janeiro: EPE.

MME/EPE, 2017. Pesquisa do Consumo de Energia no Setor de Serviços, Rio de Janeiro: EPE.

MME, 2005. Balanço de Energia Útil, Brasília: Ministério de Minas e Energia.

Moral-Carcedo & Vicéns-Otero, 2005. Modelling the non-linear response of Spanish

electricity demand to temperature variations. Energy Economics.

NBR 15220-1, 2003. Desempenho térmico de edificações - Parte1: Definições, símbolos e unidades, Rio de Janeiro.

NBR 15220-2, 2003. Desempenho térmico de edificações Parte2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações, Rio de Janeiro.

NBR 15220-3, 2003. Desempenho Térmico de Edificações Parte3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social, Rio de Janeiro.

NBR 15220-4, 2003. Desempenho térmico de edificações Parte4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida, Rio de Janeiro.

NBR 15220-5, 2003. Desempenho térmico de edificações Parte 5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico, Rio de Janeiro.

ONS, 2017. Procedimento de Rede - Submódulo 5.1 - Consolidação da previsão de carga: visão geral,.

ONS, 2018b. Procedimento de Rede - Submódulo 5.6 - Consolidação da previsão de carga para a elaboração do Programa Mensal da Operação Energética.

ONS, 2018. Procedimento de Rede - Submódulo 5.5 - Consolidação da previsão de carga para o planejamento anual da operação energética.

ONS, 2019a. SIN tem novo recorde de carga. Disponível em: [http://ons.org.br/Paginas/Noticias/20190130\\_novorecordesin.aspx](http://ons.org.br/Paginas/Noticias/20190130_novorecordesin.aspx)

ONS, 2019b. SIN tem novo recorde de carga. Disponível em: [http://ons.org.br/Paginas/Noticias/20190130\\_novorecordesin.aspx](http://ons.org.br/Paginas/Noticias/20190130_novorecordesin.aspx)

ONS, 2019c. ONS registra novo recorde de carga no SIN Disponível em: [http://ons.org.br/Paginas/Noticias/20190122\\_novorecordenosin.aspx](http://ons.org.br/Paginas/Noticias/20190122_novorecordenosin.aspx)

ONS, 2019d. ONS registra dois recordes de carga consecutivos no SIN. Disponível em:

[http://ons.org.br/Paginas/Noticias/20190116\\_recordesdoSIN.aspx](http://ons.org.br/Paginas/Noticias/20190116_recordesdoSIN.aspx)

ONS, 2019e. ONS registra dois recordes de carga consecutivos no SIN. Disponível em: [http://ons.org.br/Paginas/Noticias/20190116\\_recordesdoSIN.aspx](http://ons.org.br/Paginas/Noticias/20190116_recordesdoSIN.aspx)

ONS, 2019g. Procedimento de Rede - Submódulo 5.2 - Consolidação da previsão de carga para estudos de ampliações e reforços e do planejamento da operação elétrica.

ONS, 2019h. Procedimento de Rede - Submódulo 5.4 - Consolidação da previsão de carga para a programação diária da operação eletroenergética e para a programação de intervenções em instalações da Rede de Operação.

ONS, 2019i. Procedimento de Rede - Submódulo 2.7 - Consolidação da previsão de carga para a elaboração do Programa Mensal da Operação Energética.

ONS, 2019j. Procedimento de Rede - Submódulo 18.2 - Relação dos sistemas e modelos.

ONS, 2019k. Procedimento de Rede - submódulo 26.2 - Critérios para classificação da modalidade de operação de usinas.

ONS, 2019m. Base de dados técnica - SAGIC, Rio de Janeiro: ONS.

PROCEL/ELETROBRAS, 2013. Guia Técnico Procel Edifica - Planejamento e controle Ambiental-Urbano e a Eficiência Energética, Rio de Janeiro: Eletrobras.

PROCEL/ELETROBRAS, 2019. Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial, Rio de Janeiro: Eletrobras.

Romero, M. A. B., 2000. Princípios Bioclimáticos para o Desenho Urbano. Brasília.

RTQ-C, 2010. Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas, Brasília.

RTQ-R, 2012. Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, Brasília.

Russell, J. B., 1994a. Química Geral Volume 2. São Paulo: Makron Books do Brasil.

Russell, J. B., 1994b. Química Geral Volume 1. São Paulo: Makron Books.

Sailor, D. & Muñoz, J., 1997. Sensitivity of electricity and natural gas consumption to climate in the U.S.A: methodology and results for eight states. Energy.

Stull, R., 2015. Meteorology for Scientists and Engineers - Third Edition. Vancouver: UBC.

Valor, E., Meneu, V. & Caselles, V., 2001. Daily Air Temperature and Electricity Load in Spain. American Meteorological Society.

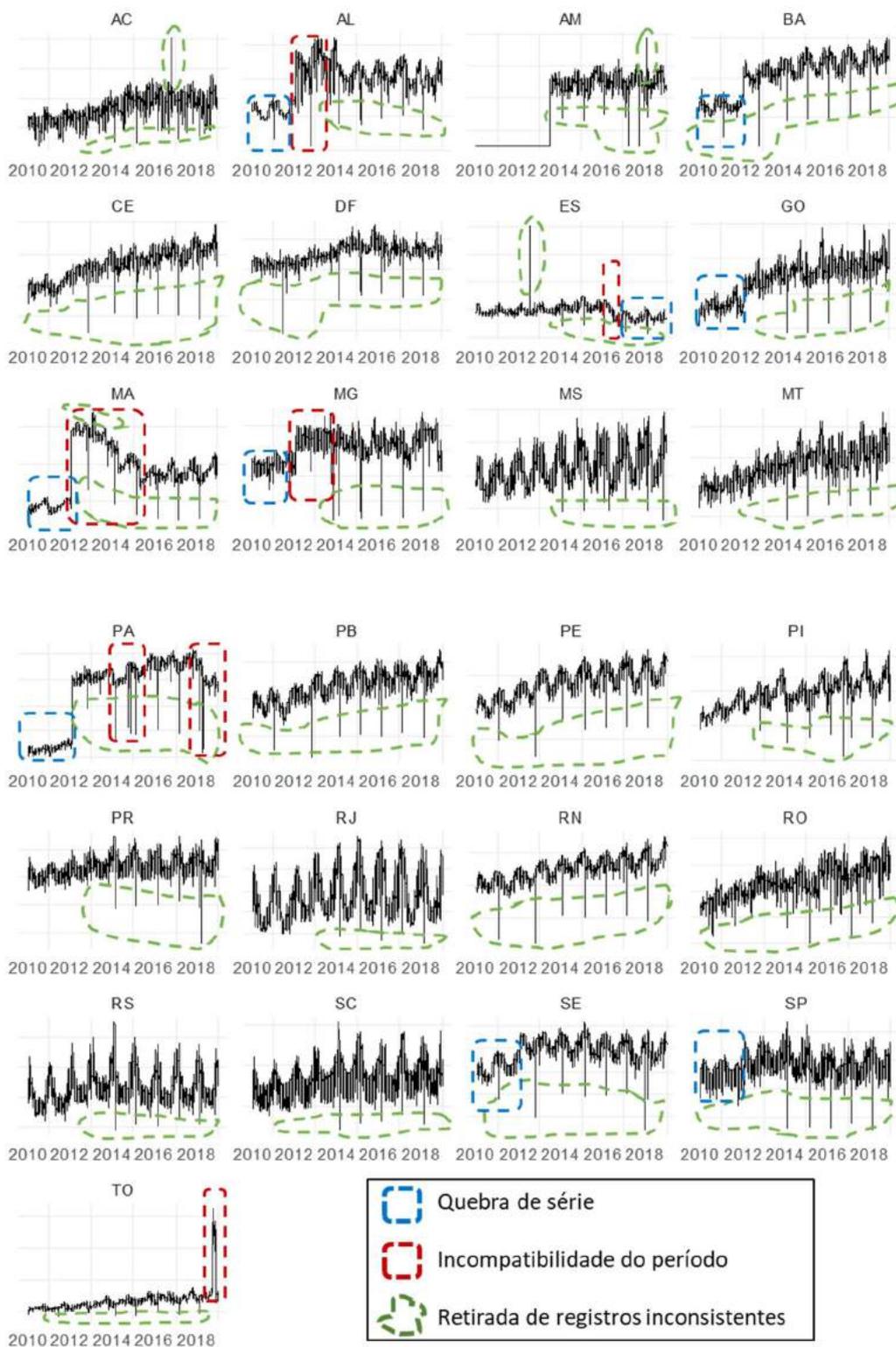
Wallace AB, 1951. The exposure treatment of burns. Lancet.

Williamson, T. J., Coldicutt, S. & Riordan, P., 1995. Comfort, preferences or design data. Standards for thermal comfort: Indoor air temperature standards for the 21st century.

Yunus A. Çengel, M. A. B., 2013. Termodinâmica. Nevada - EUA: AMGH Editora Ltda.

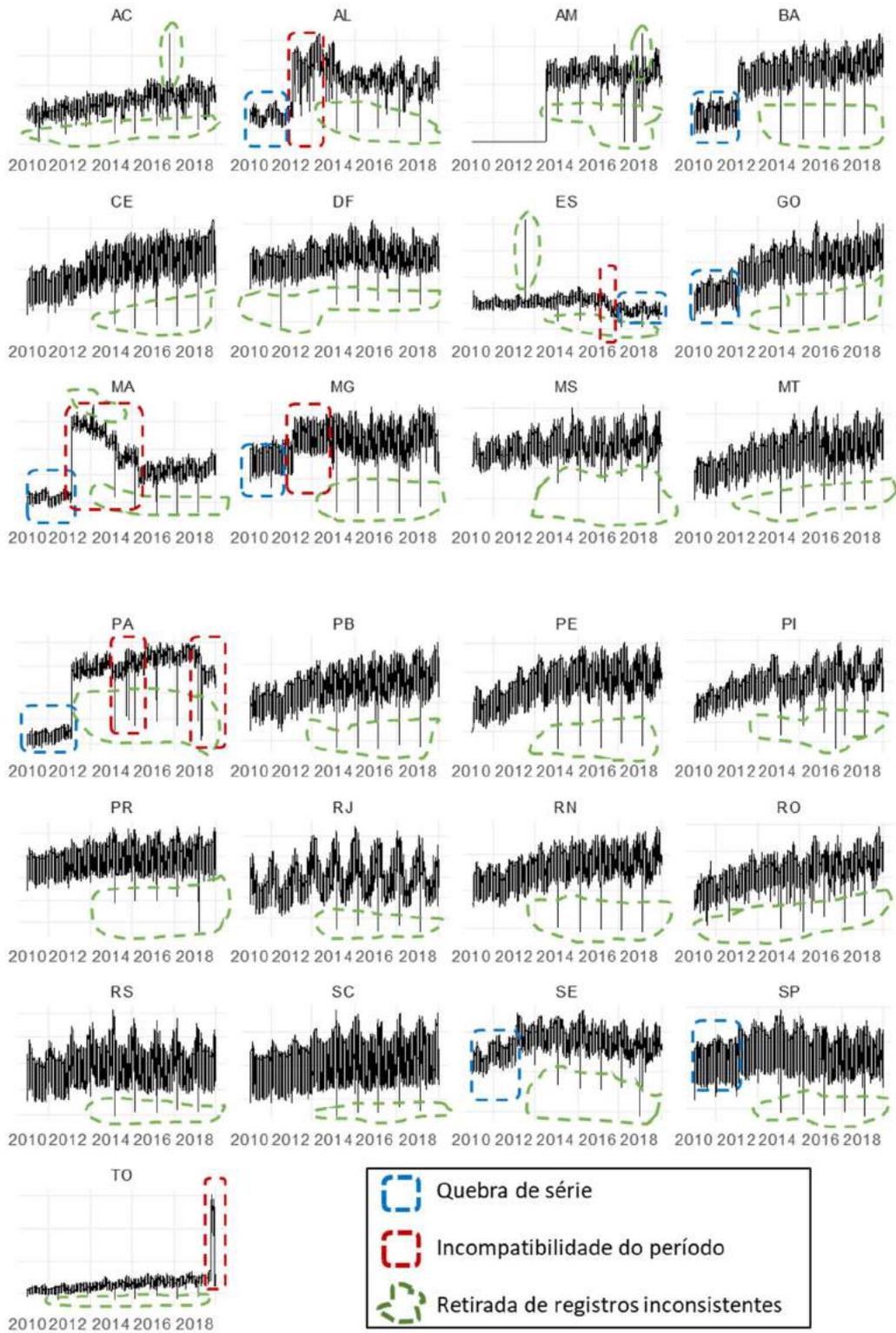
**APÊNDICE A – Identificação de Correções da Carga Diária Equivalente Semanal por UF por Jornada**

**Jornada da Madrugada**



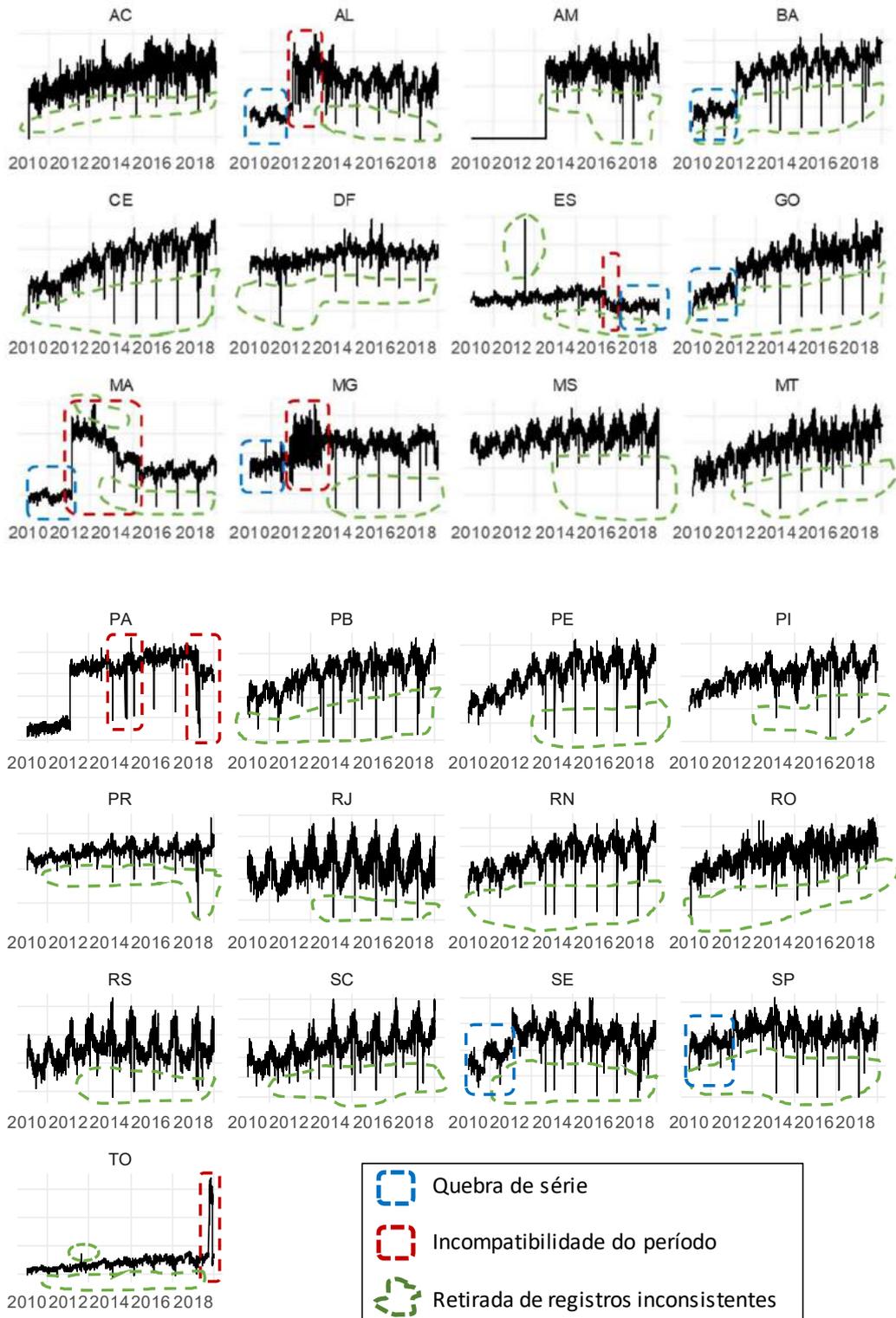
Fonte: Elaboração própria

## Jornada da Manhã



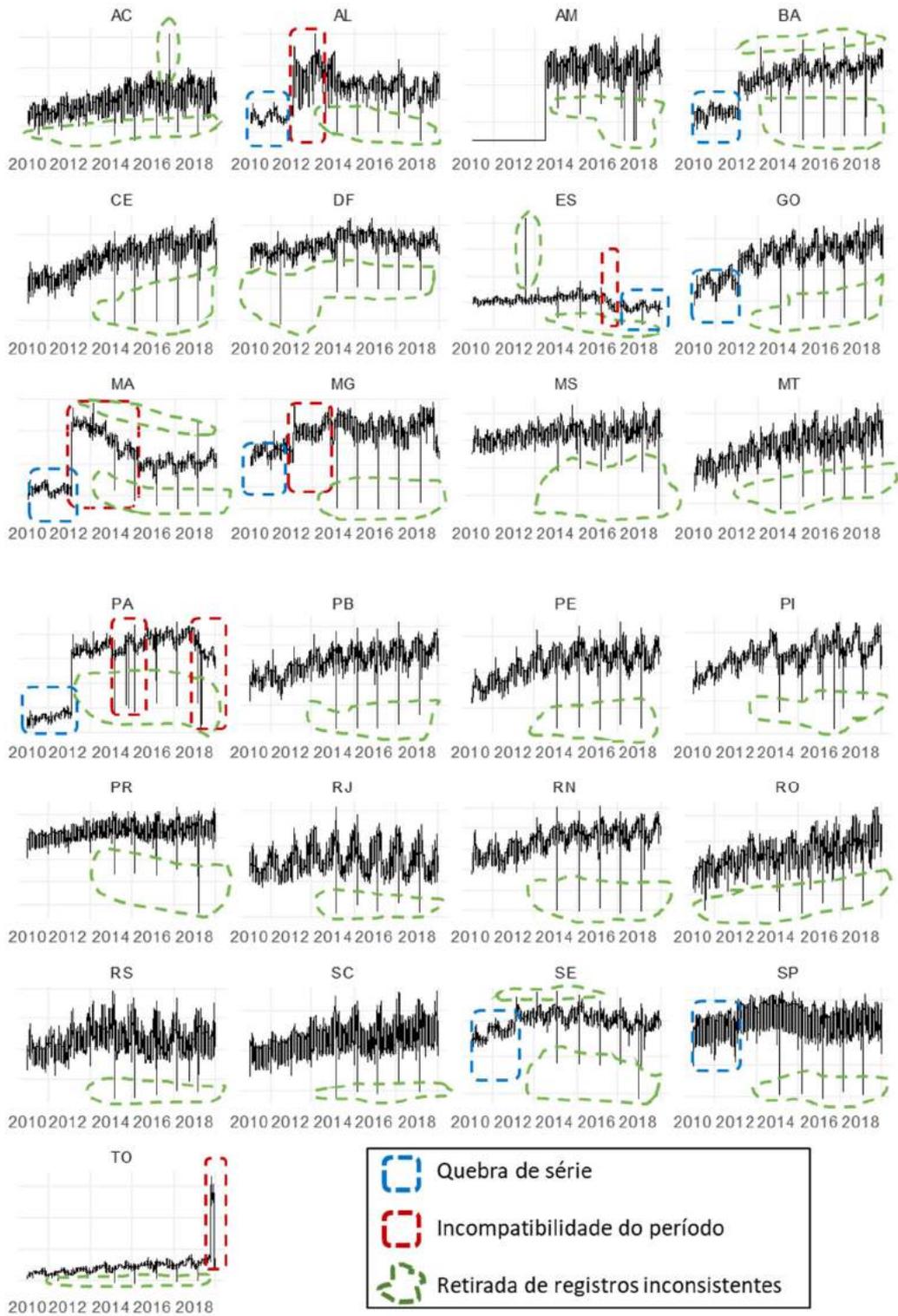
Fonte: Elaboração própria.

## Jornada da Tarde



Fonte: Elaboração própria.

## Jornada da Noite



Fonte: Elaboração própria.

## APÊNDICE B – Dias com desvios superiores aos critérios de corte

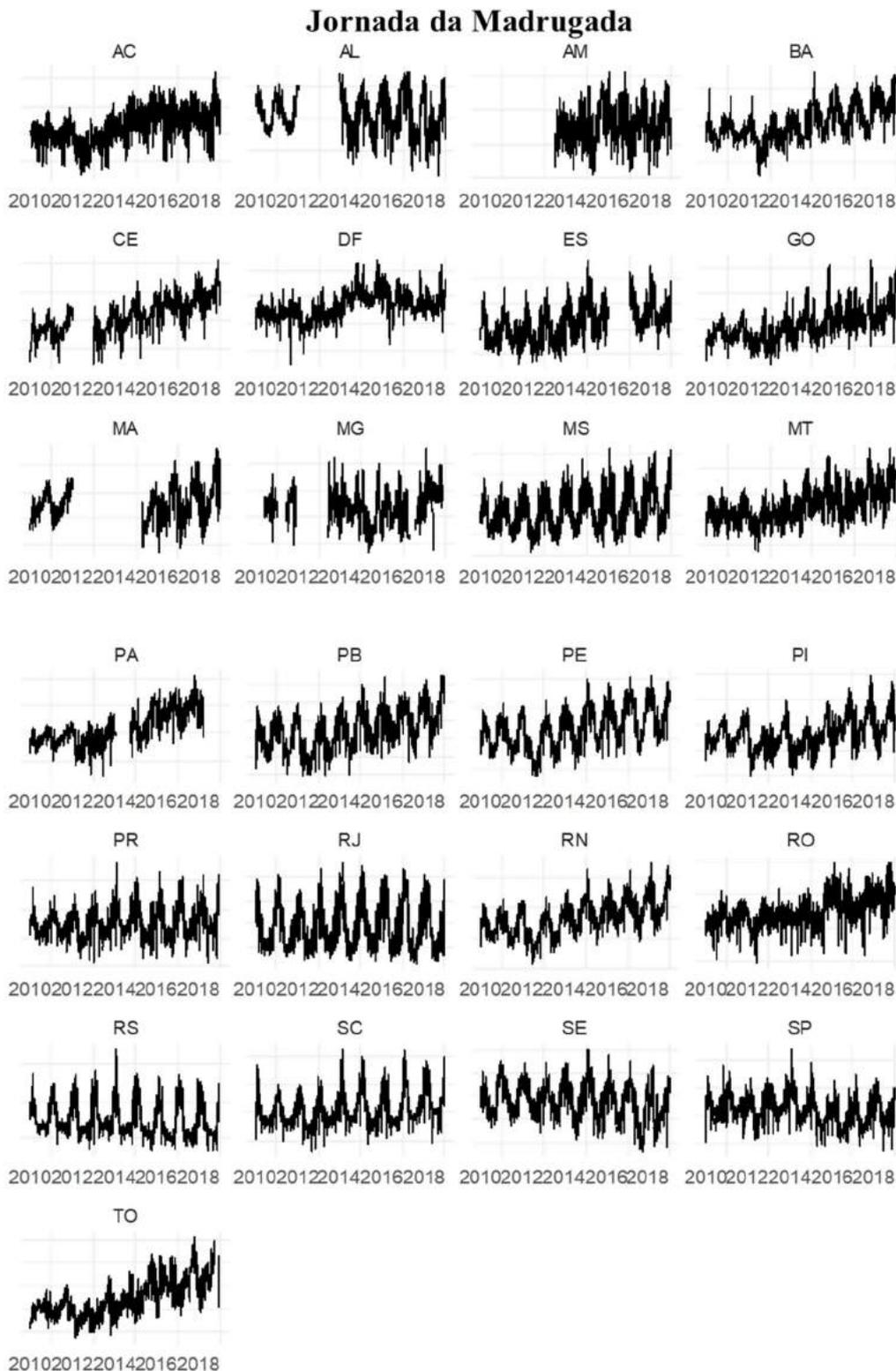
| UF | Data          |
|----|---------------|----|---------------|----|---------------|----|---------------|----|---------------|----|---------------|
| ↑  | AC 08/01/2010 | ↓  | AL 21/02/2016 | ↑  | ES 20/07/2012 | ↓  | MT 08/06/2012 | ↓  | PR 04/06/2015 | ↓  | SC 22/02/2015 |
| ↓  | AC 18/02/2018 | ↓  | AL 28/08/2013 | ↑  | ES 19/07/2012 | ↑  | PA 04/01/2015 | ↓  | PR 07/06/2012 | ↓  | SC 31/05/2018 |
| ↓  | AC 22/02/2015 | ↓  | AL 19/02/2017 | ↑  | ES 18/07/2012 | ↓  | PA 31/10/2014 | ↓  | PR 29/05/2018 | ↓  | SC 19/02/2017 |
| ↓  | AC 21/02/2016 | ↓  | AL 21/03/2018 | ↓  | ES 19/02/2017 | ↓  | PA 22/02/2015 | ↓  | PR 19/06/2014 | ↓  | SC 07/06/2012 |
| ↓  | AC 04/06/2018 | ↓  | AL 28/06/2016 | ↓  | ES 18/02/2018 | ↓  | PA 21/02/2016 | ↓  | PR 02/01/2015 | ↓  | SC 30/05/2013 |
| ↓  | AC 16/02/2014 | ↓  | AL 27/05/2017 | ↓  | ES 16/02/2014 | ↓  | PA 19/02/2017 | ↓  | PR 15/06/2017 | ↓  | SC 02/01/2012 |
| ↓  | AC 19/02/2017 | ↓  | AL 26/06/2016 | ↓  | ES 22/02/2015 | ↓  | PA 18/02/2018 | ↓  | PR 02/01/2012 | ↓  | SC 02/01/2013 |
| ↓  | AC 15/06/2018 | ↑  | AM 02/02/2018 | ↓  | ES 21/02/2016 | ↓  | PA 02/03/2016 | ↓  | PR 02/01/2010 | ↓  | SC 23/06/2011 |
| ↓  | AC 05/06/2018 | ↑  | AM 04/02/2018 | ↓  | GO 16/02/2014 | ↓  | PA 21/03/2018 | ↓  | PR 28/05/2018 | ↓  | SC 26/05/2016 |
| ↓  | AC 18/07/2017 | ↑  | AM 01/02/2018 | ↓  | GO 18/02/2018 | ↓  | PA 26/10/2012 | ↓  | RJ 16/02/2014 | ↓  | SC 02/01/2015 |
| ↓  | AC 21/08/2018 | ↓  | AM 22/02/2015 | ↓  | GO 19/02/2017 | ↑  | PB 26/10/2012 | ↓  | RJ 18/02/2018 | ↓  | SC 03/06/2010 |
| ↓  | AC 16/07/2010 | ↓  | AM 16/02/2014 | ↓  | GO 22/02/2015 | ↑  | PB 04/02/2011 | ↓  | RJ 21/02/2016 | ↑  | SE 26/10/2012 |
| ↓  | AC 13/09/2015 | ↓  | AM 19/02/2017 | ↓  | GO 21/02/2012 | ↑  | PB 02/11/2012 | ↓  | RJ 22/02/2015 | ↑  | SE 04/02/2011 |
| ↓  | AC 18/07/2010 | ↓  | AM 06/10/2016 | ↑  | MA 24/02/2013 | ↓  | PB 21/02/2016 | ↓  | RJ 19/02/2017 | ↑  | SE 02/11/2012 |
| ↓  | AC 03/06/2018 | ↓  | AM 23/12/2017 | ↑  | MA 03/02/2013 | ↓  | PB 22/02/2015 | ↑  | RN 26/10/2012 | ↑  | SE 14/07/2017 |
| ↓  | AC 07/06/2012 | ↓  | AM 18/02/2018 | ↑  | MA 17/02/2013 | ↓  | PB 18/02/2018 | ↑  | RN 04/02/2011 | ↓  | SE 21/02/2016 |
| ↓  | AC 05/09/2016 | ↓  | AM 19/06/2014 | ↑  | MA 17/02/2018 | ↓  | PB 16/02/2014 | ↑  | RN 02/11/2012 | ↓  | SE 22/02/2015 |
| ↓  | AC 06/06/2018 | ↓  | AM 21/02/2016 | ↑  | MA 13/01/2013 | ↓  | PB 28/08/2013 | ↓  | RN 22/02/2015 | ↓  | SE 28/08/2013 |
| ↓  | AC 27/04/2016 | ↓  | AM 10/12/2017 | ↓  | MA 19/02/2017 | ↓  | PB 19/02/2017 | ↓  | RN 19/02/2017 | ↓  | SE 18/02/2018 |
| ↓  | AC 08/06/2018 | ↓  | AM 25/02/2017 | ↓  | MA 22/02/2015 | ↓  | PB 24/06/2011 | ↓  | RN 18/02/2018 | ↓  | SE 16/02/2014 |
| ↓  | AC 10/07/2018 | ↓  | AM 12/12/2017 | ↓  | MA 21/02/2016 | ↓  | PB 21/03/2018 | ↓  | RN 21/02/2016 | ↓  | SE 19/02/2017 |
| ↓  | AC 05/08/2018 | ↓  | AM 05/01/2017 | ↓  | MA 18/02/2018 | ↓  | PB 24/06/2014 | ↓  | RN 16/02/2014 | ↓  | SE 21/03/2018 |
| ↓  | AC 19/07/2017 | ↑  | BA 26/10/2012 | ↓  | MA 16/02/2014 | ↓  | PB 24/06/2013 | ↓  | RN 28/08/2013 | ↓  | SE 24/06/2011 |
| ↓  | AC 26/08/2018 | ↑  | BA 02/11/2012 | ↓  | MA 04/06/2015 | ↓  | PB 24/06/2015 | ↓  | RN 21/03/2018 | ↓  | SE 31/03/2018 |
| ↓  | AC 10/06/2017 | ↑  | BA 04/02/2011 | ↑  | MG 28/10/2018 | ↓  | PB 24/06/2010 | ↓  | RN 23/06/2011 | ↓  | SE 24/06/2016 |
| ↓  | AC 25/07/2014 | ↓  | BA 16/02/2014 | ↑  | MG 01/06/2018 | ↑  | PE 29/01/2016 | ↓  | RO 08/01/2010 | ↓  | SE 24/06/2014 |
| ↓  | AC 26/09/2012 | ↓  | BA 22/02/2015 | ↑  | MG 02/06/2018 | ↑  | PE 26/10/2012 | ↓  | RO 22/02/2015 | ↓  | SE 13/07/2017 |
| ↓  | AC 08/07/2014 | ↓  | BA 21/02/2016 | ↑  | MG 03/06/2018 | ↑  | PE 04/02/2011 | ↓  | RO 13/09/2015 | ↓  | SE 23/06/2011 |
| ↓  | AC 17/07/2010 | ↓  | BA 18/02/2018 | ↑  | MG 03/11/2013 | ↑  | PE 02/11/2012 | ↓  | RO 16/02/2014 | ↓  | SE 24/06/2013 |
| ↓  | AC 25/11/2012 | ↓  | BA 19/02/2017 | ↑  | MG 10/10/2013 | ↓  | PE 21/02/2016 | ↓  | RO 19/02/2017 | ↓  | SP 18/02/2018 |
| ↓  | AC 09/07/2014 | ↓  | BA 28/08/2013 | ↑  | MG 30/05/2018 | ↓  | PE 18/02/2018 | ↓  | RO 18/02/2018 | ↓  | SP 21/02/2016 |
| ↓  | AC 28/04/2017 | ↓  | BA 21/03/2018 | ↑  | MG 20/10/2013 | ↓  | PE 16/02/2014 | ↓  | RO 22/12/2013 | ↓  | SP 16/02/2014 |
| ↓  | AC 11/07/2018 | ↓  | BA 24/06/2013 | ↓  | MG 22/02/2015 | ↓  | PE 19/02/2017 | ↓  | RO 07/06/2012 | ↓  | SP 22/02/2015 |
| ↓  | AC 09/06/2016 | ↓  | BA 24/06/2011 | ↓  | MG 21/02/2016 | ↓  | PE 22/02/2015 | ↓  | RO 21/02/2016 | ↓  | SP 19/02/2017 |
| ↓  | AC 04/09/2016 | ↓  | BA 24/06/2014 | ↓  | MG 19/02/2017 | ↓  | PE 28/08/2013 | ↓  | RO 13/03/2015 | ↓  | SP 31/05/2018 |
| ↓  | AC 17/06/2018 | ↓  | BA 24/06/2016 | ↓  | MG 18/02/2018 | ↓  | PE 21/03/2018 | ↓  | RO 18/09/2015 | ↓  | SP 23/06/2011 |
| ↓  | AC 06/07/2015 | ↑  | CE 26/10/2012 | ↓  | MG 16/02/2014 | ↑  | PI 26/10/2012 | ↓  | RO 17/07/2010 | ↓  | SP 04/06/2015 |
| ↓  | AC 19/07/2010 | ↑  | CE 02/11/2012 | ↓  | MS 01/12/2018 | ↓  | PI 30/09/2016 | ↓  | RO 20/02/2014 | ↓  | SP 26/05/2016 |
| ↓  | AC 20/08/2018 | ↑  | CE 04/02/2011 | ↓  | MS 16/02/2014 | ↓  | PI 18/02/2018 | ↓  | RO 18/07/2010 | ↓  | SP 03/06/2010 |
| ↓  | AC 20/07/2017 | ↓  | CE 19/02/2017 | ↓  | MS 21/02/2016 | ↓  | PI 19/02/2017 | ↓  | RO 13/02/2014 | ↓  | SP 02/01/2012 |
| ↓  | AC 05/07/2015 | ↓  | CE 22/02/2015 | ↓  | MS 18/02/2018 | ↓  | PI 16/02/2014 | ↓  | RO 01/07/2016 | ↑  | TO 12/08/2012 |
| ↓  | AC 24/03/2014 | ↓  | CE 16/02/2014 | ↓  | MS 22/02/2015 | ↓  | PI 21/02/2016 | ↓  | RO 18/07/2017 | ↑  | TO 05/08/2012 |
| ↓  | AC 20/05/2018 | ↓  | CE 21/02/2016 | ↓  | MS 19/02/2017 | ↓  | PI 22/02/2015 | ↓  | RS 16/02/2014 | ↑  | TO 11/08/2012 |
| ↓  | AC 28/04/2016 | ↓  | CE 18/02/2018 | ↓  | MS 07/06/2012 | ↓  | PI 17/02/2014 | ↓  | RS 22/02/2015 | ↑  | TO 04/08/2012 |
| ↓  | AC 11/10/2012 | ↓  | CE 21/03/2018 | ↓  | MS 03/06/2010 | ↓  | PI 21/03/2018 | ↓  | RS 21/02/2016 | ↓  | TO 16/02/2014 |
| ↓  | AC 15/07/2010 | ↓  | CE 17/06/2014 | ↓  | MS 30/05/2013 | ↓  | PI 26/02/2015 | ↓  | RS 21/03/2018 | ↓  | TO 22/02/2015 |
| ↓  | AC 26/07/2014 | ↓  | DF 24/06/2011 | ↓  | MT 16/02/2014 | ↓  | PI 26/01/2015 | ↓  | RS 18/02/2018 | ↓  | TO 19/02/2017 |
| ↓  | AC 21/08/2011 | ↓  | DF 16/02/2014 | ↓  | MT 22/02/2015 | ↓  | PI 25/02/2015 | ↓  | RS 31/05/2018 | ↓  | TO 18/02/2018 |
| ↓  | AC 14/06/2018 | ↓  | DF 18/02/2018 | ↓  | MT 19/02/2017 | ↓  | PR 15/03/2018 | ↓  | RS 03/06/2010 | ↓  | TO 12/06/2011 |
| ↓  | AC 26/03/2018 | ↓  | DF 19/02/2017 | ↓  | MT 18/02/2018 | ↓  | PR 16/02/2014 | ↓  | RS 30/05/2013 | ↓  | TO 21/02/2016 |
| ↓  | AC 18/06/2018 | ↓  | DF 22/02/2015 | ↓  | MT 21/02/2016 | ↓  | PR 22/02/2015 | ↓  | RS 02/01/2015 | ↓  | TO 11/06/2011 |
| ↓  | AC 03/09/2018 | ↓  | DF 21/02/2016 | ↓  | MT 07/06/2012 | ↓  | PR 18/02/2018 | ↓  | RS 19/02/2017 | ↓  | TO 18/01/2017 |
| ↓  | AC 08/06/2012 | ↓  | DF 05/07/2010 | ↓  | MT 05/09/2016 | ↓  | PR 21/02/2016 | ↓  | RS 23/06/2011 | ↓  | TO 25/01/2011 |
| ↓  | AC 29/06/2018 | ↓  | DF 08/09/2011 | ↓  | MT 06/09/2016 | ↓  | PR 10/02/2012 | ↓  | RS 26/05/2016 | ↓  | TO 10/11/2012 |
| ↓  | AC 30/08/2016 | ↓  | DF 06/05/2011 | ↓  | MT 02/01/2010 | ↓  | PR 19/02/2017 | ↓  | RS 06/09/2010 | ↓  | TO 02/01/2010 |
| ↓  | AC 27/09/2012 | ↓  | DF 21/03/2011 | ↓  | MT 04/09/2016 | ↓  | PR 31/05/2018 | ↓  | RS 07/06/2012 | ↓  | TO 25/01/2017 |
| ↑  | AL 04/02/2011 | ↓  | DF 30/03/2011 | ↓  | MT 27/04/2016 | ↓  | PR 30/05/2013 | ↓  | SC 16/02/2014 | ↓  | TO 10/06/2011 |
| ↓  | AL 18/02/2018 | ↓  | DF 30/05/2013 | ↓  | MT 03/06/2010 | ↓  | PR 23/06/2011 | ↓  | SC 18/02/2018 | ↓  | TO 26/01/2011 |
| ↓  | AL 22/02/2015 | ↓  | DF 31/05/2018 | ↓  | MT 23/06/2011 | ↓  | PR 03/06/2010 | ↓  | SC 21/02/2016 | ↓  | TO 08/06/2011 |
| ↓  | AL 16/02/2014 |    |               |    |               |    |               |    |               |    |               |

↑ Desvio Positivo

↓ Desvio Negativo

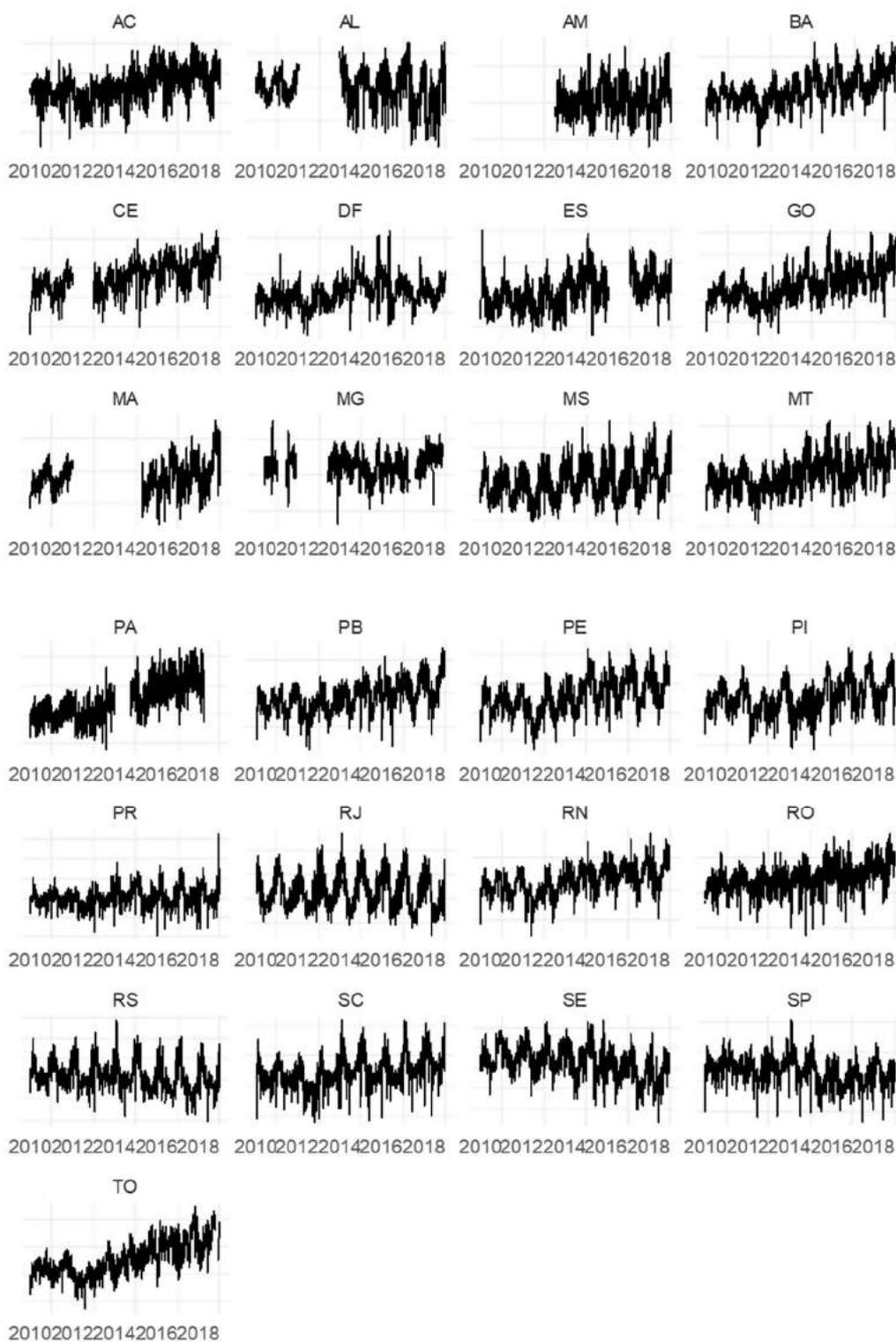
Fonte: Elaboração própria.

**APÊNDICE C – Carga Diária Equivalente Semanal Corrigida de Imperfeições por UF por Jornada.**



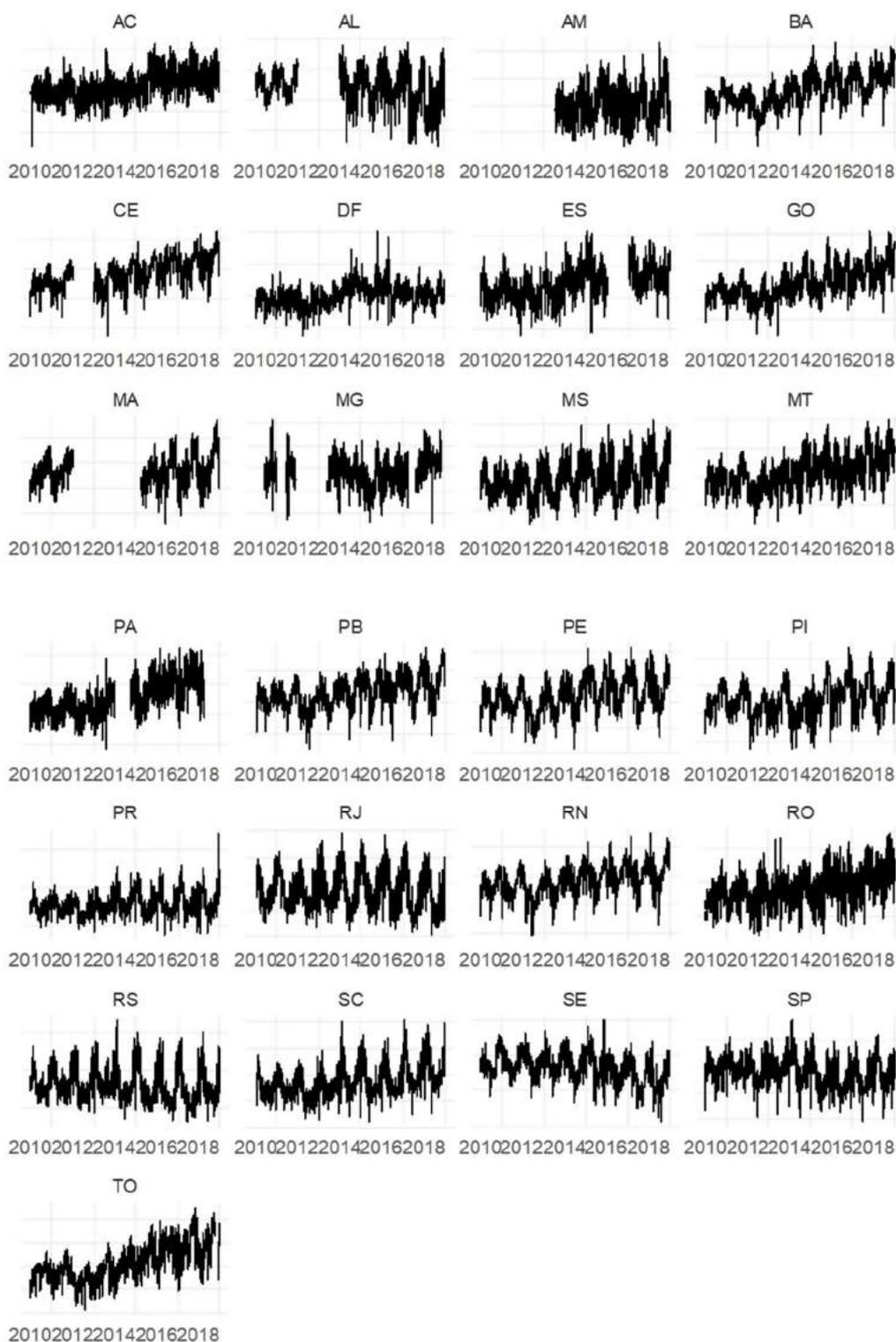
Fonte: Elaboração própria.

## Jornada da Manhã



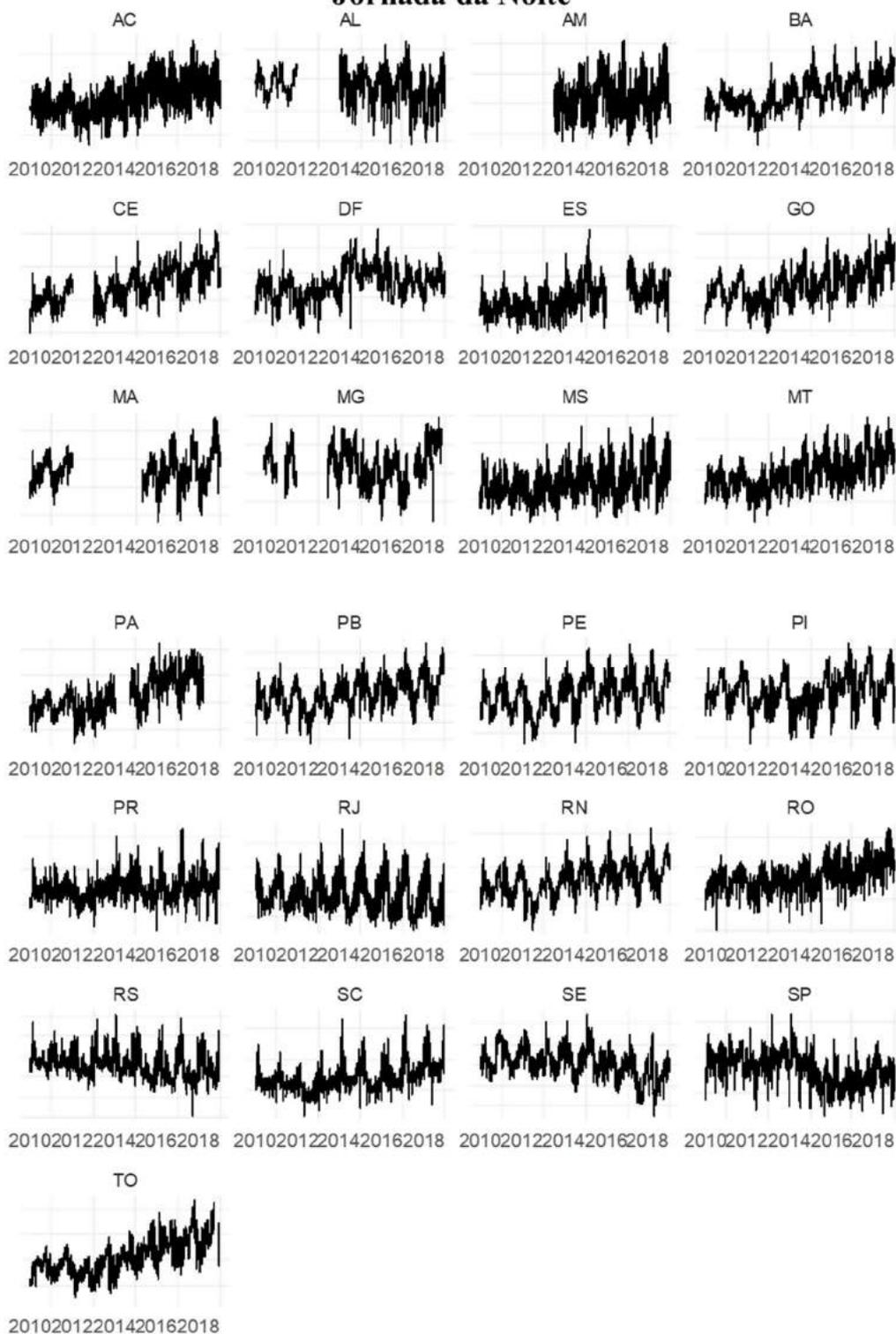
Fonte: Elaboração própria.

## Jornada da Tarde



Fonte: Elaboração própria.

## Jornada da Noite



Fonte: Elaboração própria.

## APÊNDICE D – Procedimento de classificação da sensação de desconforto dado clima e vestimenta

As margens de atuação do homem para mitigar ou atenuar sua sensação térmica de desconforto estão associadas as vestimentas e ao controle do fluxo de ar interior nas edificações. A simulação ilustrada na Figura 4-10 levou em consideração os seguintes parâmetros:

$$\text{situação 1: } \begin{cases} clo_{leve} = 0,29 & e & w_{leve} = 0,324 \\ clo_{pesada} = 0,35 & e & w_{pesada} = 0,130 \end{cases} \quad \begin{cases} v_{min} = 0,1 \\ v_{max} = \text{mínimo } \{1,0; v\} \end{cases}$$

$$\text{situação 2: } \begin{cases} clo_{leve} = 0,5 & e & w_{leve} = 0,180 \\ clo_{pesada} = 1,0 & e & w_{pesada} = 0,130 \end{cases}$$

Portanto, considerando os limites das possibilidades de atuação humana na tentativa de alcançar a neutralidade térmica são calculados para cada dia os  $\Delta S$  de cada uma das 2 situações as seguintes possibilidades  $\{(clo_{leve}, w_{leve}, v_{max}), (clo_{pesada}, w_{pesada}, v_{min})\}$ . Para determinado dia, a unanimidade positiva dos sinais dos  $\Delta S$  significa que o homem não consegue mitigar a sensação de calor. Analogamente, quando há unanimidade negativa dos sinais, o homem atenua mas não consegue mitigar a sensação de frio. Por fim, nas situações em que há dissimilaridade dos sinais o homem consegue mitigar a sensação de desconforto térmico ao ajustar vento e vestimenta para algum valor dentro dos respectivos limites de controle estipulados. A classificação do desconforto térmico para os dias do histórico passa, portanto, pelo seguinte procedimento:

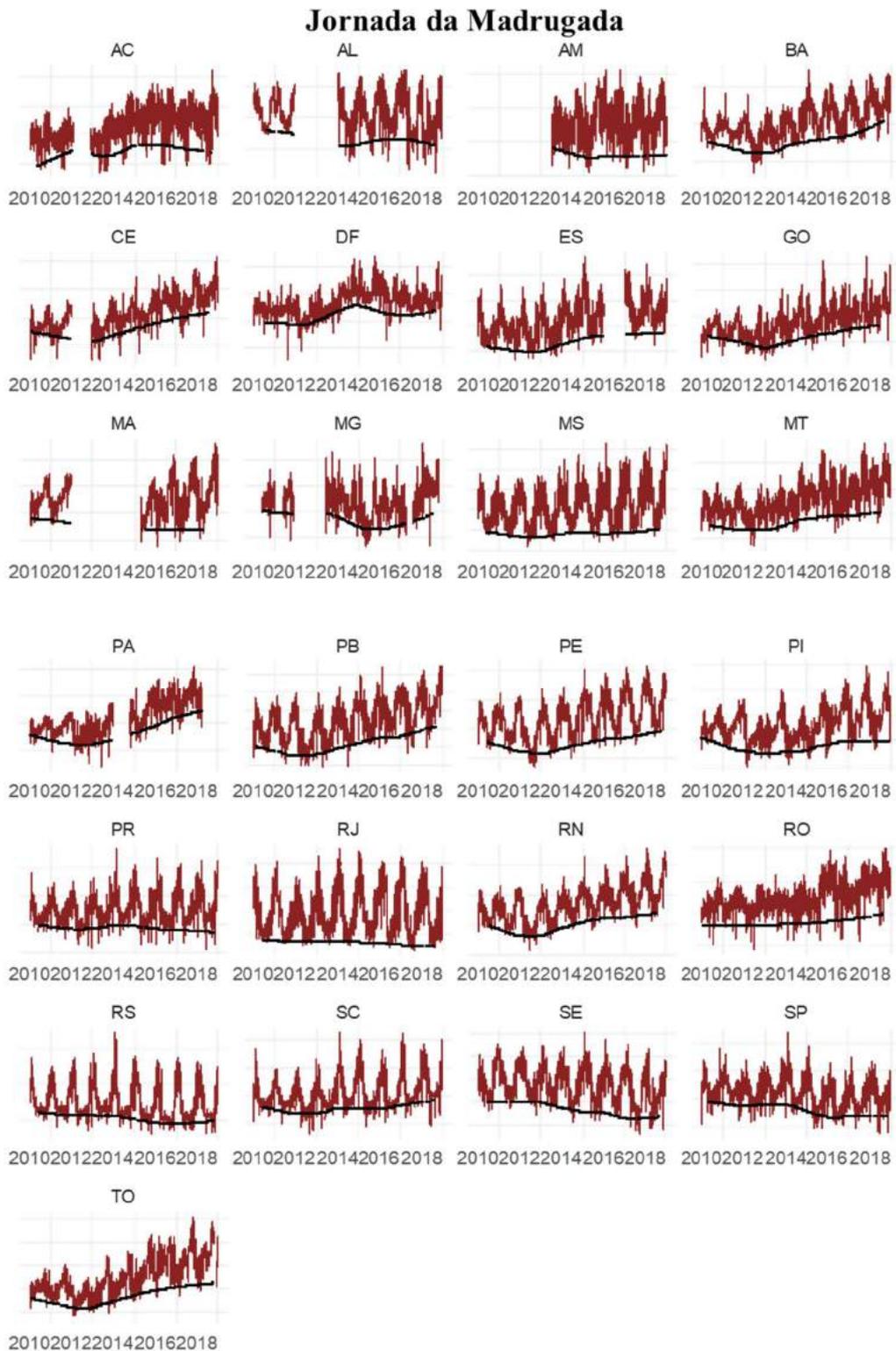
$$\begin{cases} \text{Calor,} & \text{se } \frac{\Delta S_1}{|\Delta S_1|} + \frac{\Delta S_2}{|\Delta S_2|} = +2 \\ \text{Neutro,} & \text{se } \frac{\Delta S_1}{|\Delta S_1|} + \frac{\Delta S_2}{|\Delta S_2|} = 0 \\ \text{Frio,} & \text{se } \frac{\Delta S_1}{|\Delta S_1|} + \frac{\Delta S_2}{|\Delta S_2|} = -2 \end{cases}$$

Onde:

$\Delta S_1$  = Sensação térmica calculada considerando  $clo_{leve}$ ,  $w_{leve}$  e  $v_{max}$ .

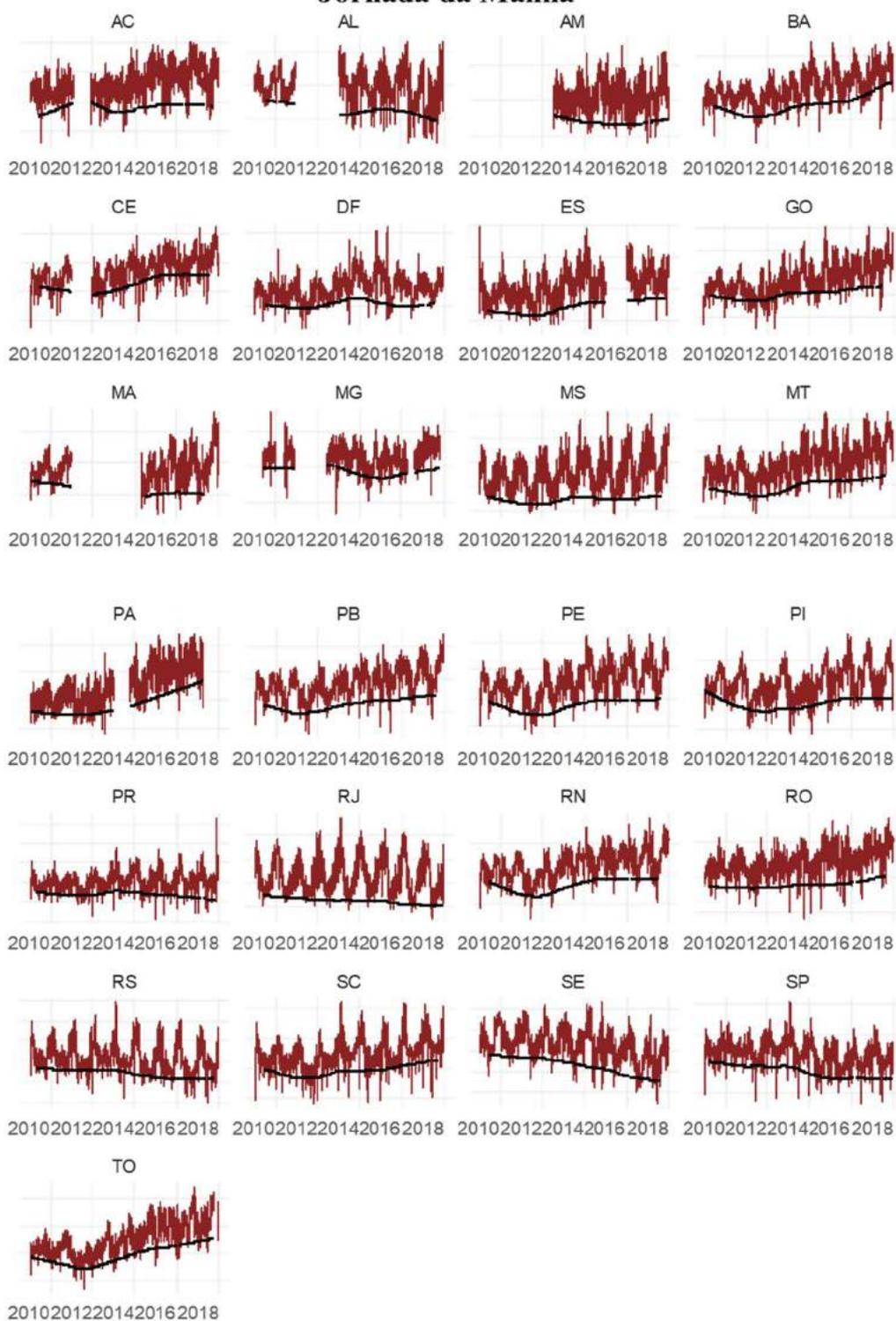
$\Delta S_2$  = Sensação térmica calculada considerando  $clo_{pesada}$ ,  $w_{pesada}$  e  $v_{min}$ .

**APÊNDICE E – Carga Diária Equivalente Semanal Corrigida de Imperfeições versus Carga Neutra por UF por Jornada.**



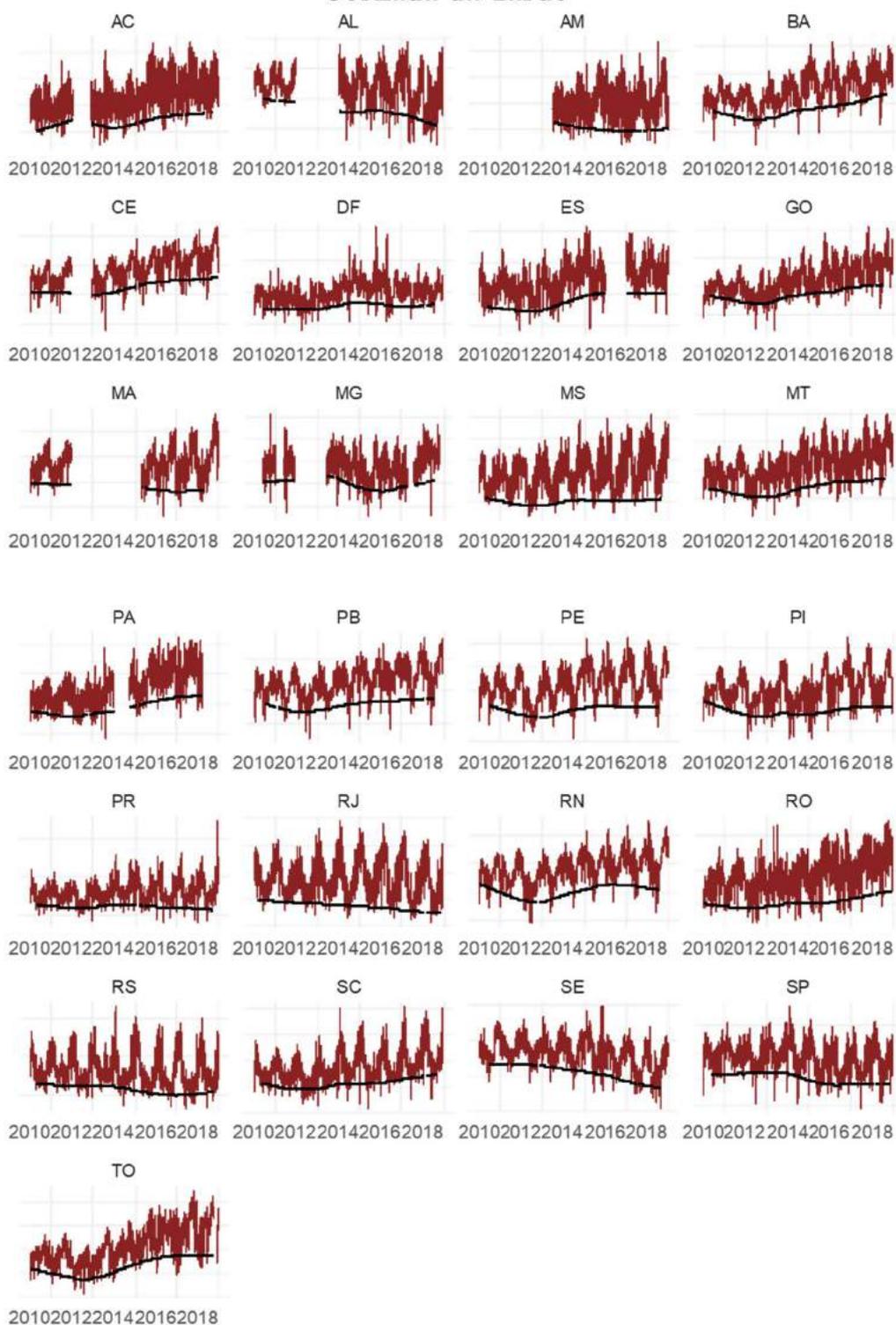
Fonte: Elaboração própria.

## Jornada da Manhã



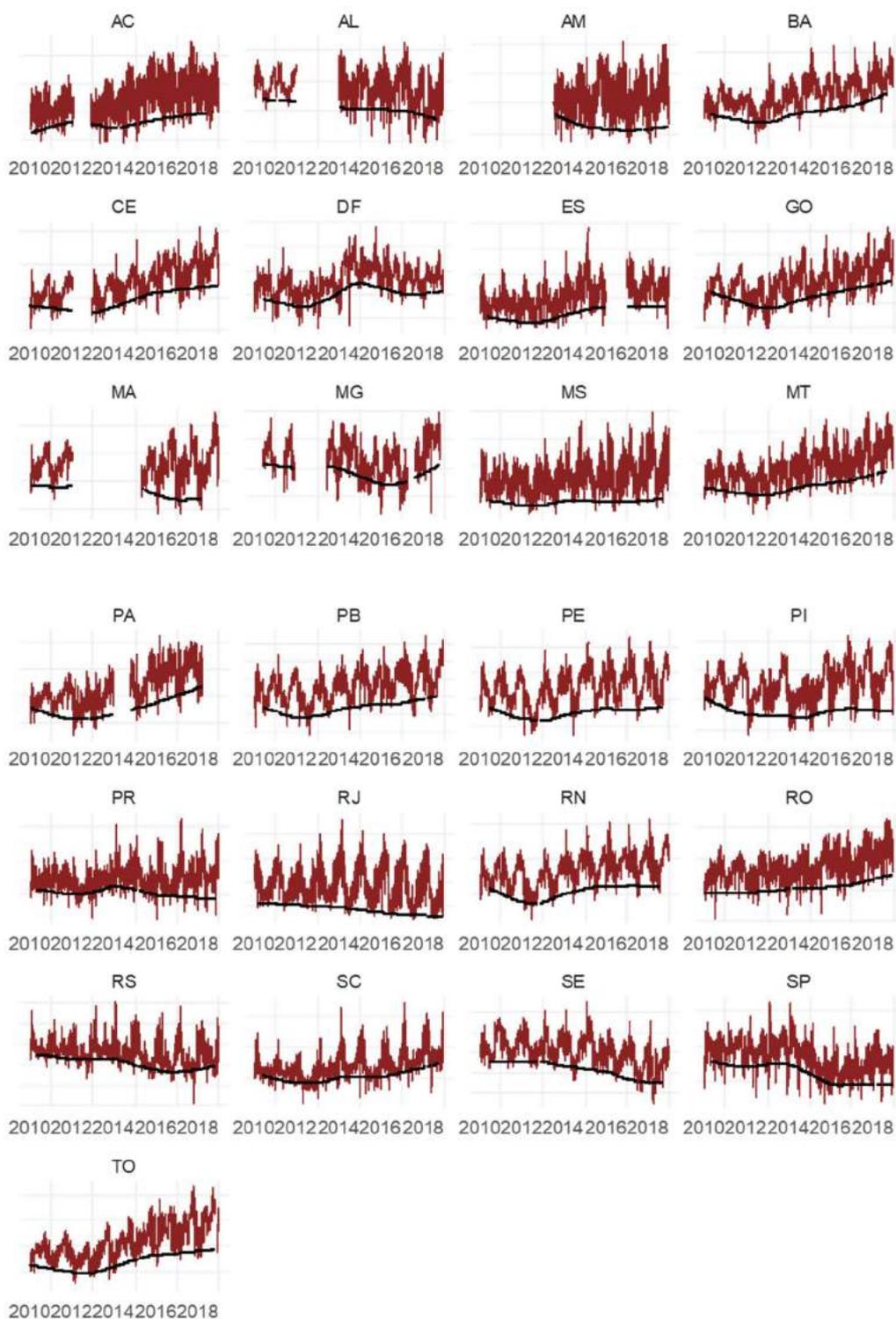
Fonte: Elaboração própria.

## Jornada da Tarde



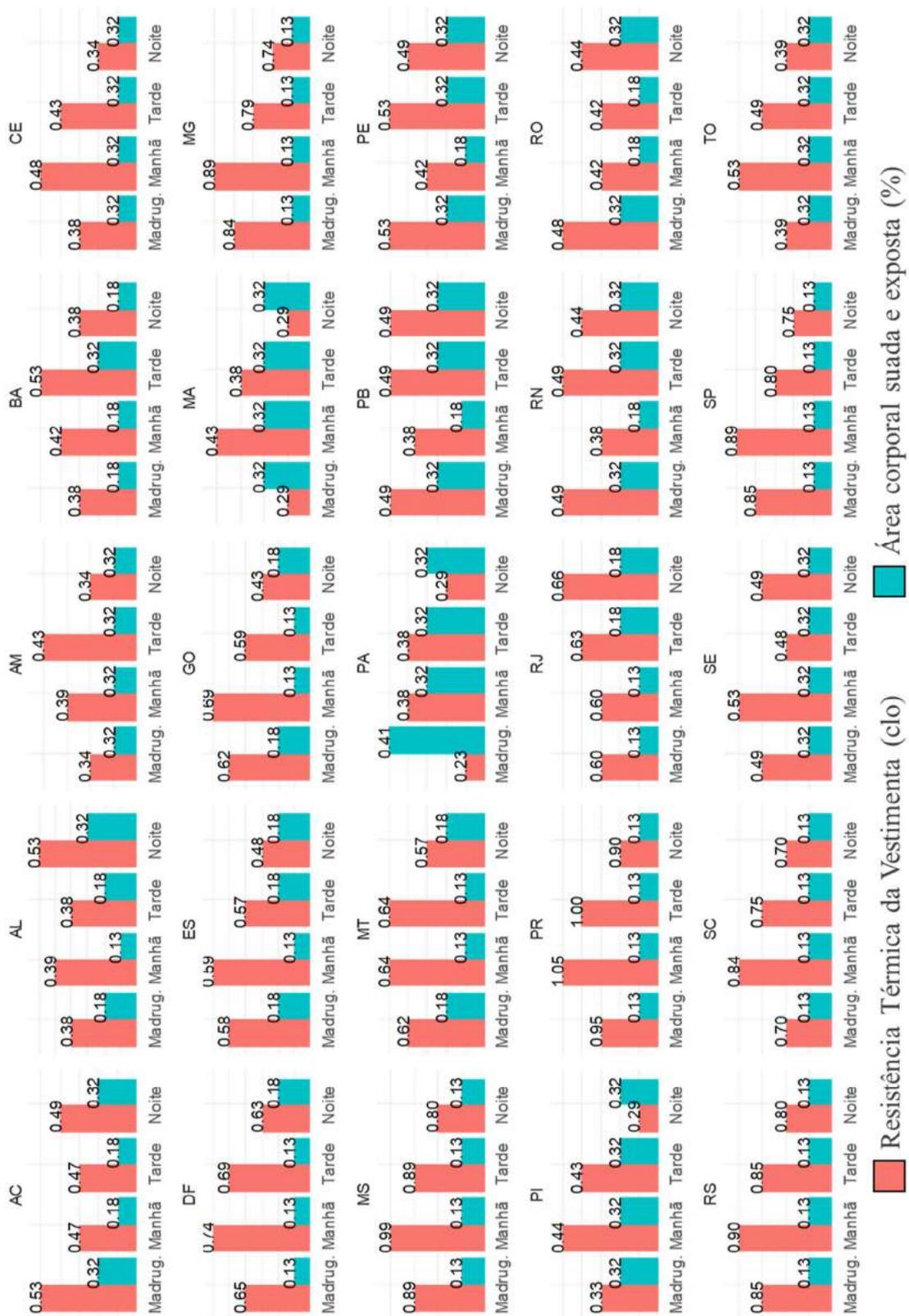
Fonte: Elaboração própria.

## Jornada da Noite



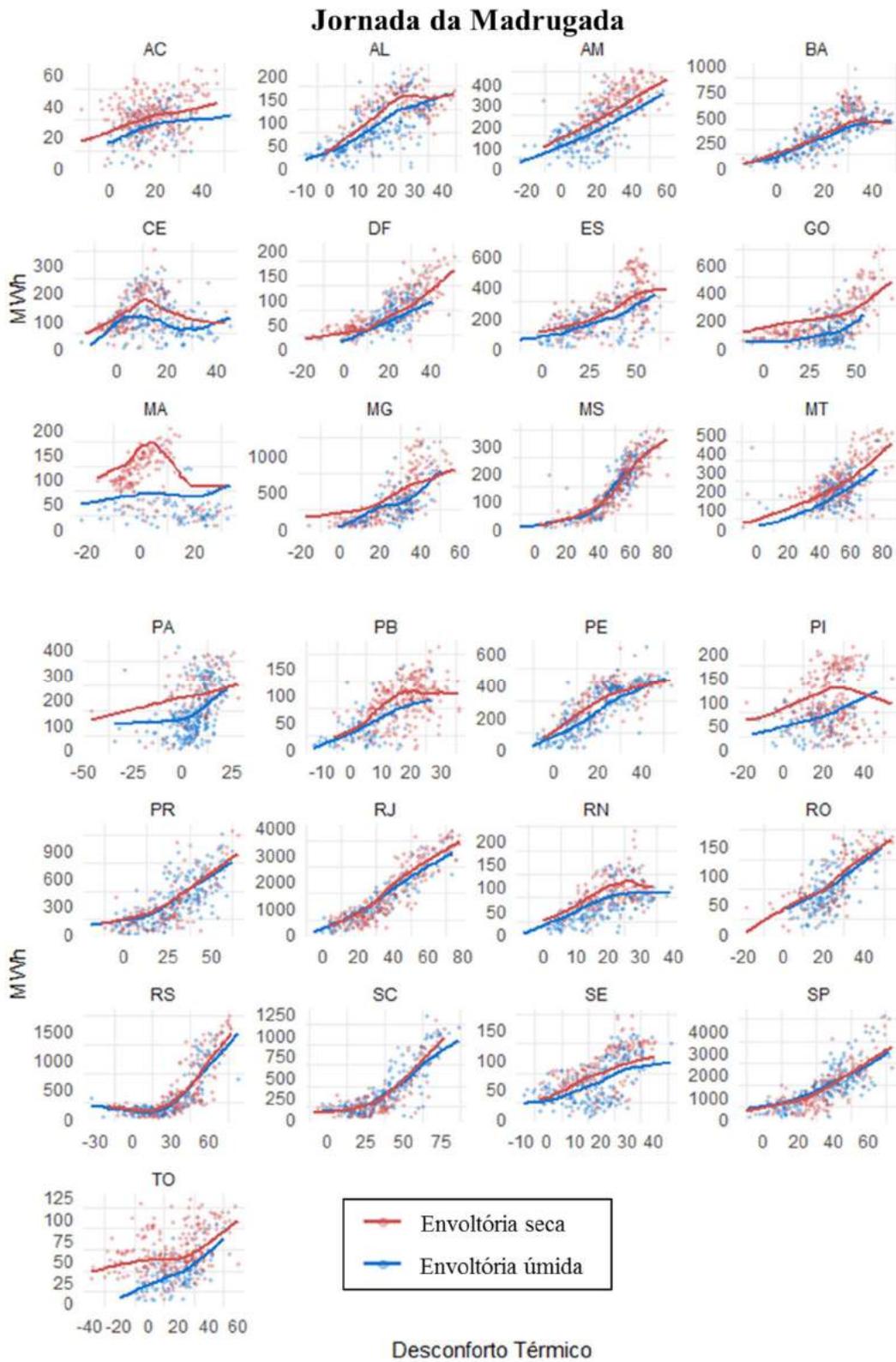
Fonte: Elaboração própria.

## APÊNDICE F – Vestimentas Coletivas do vale de carga por UF por Jornada.



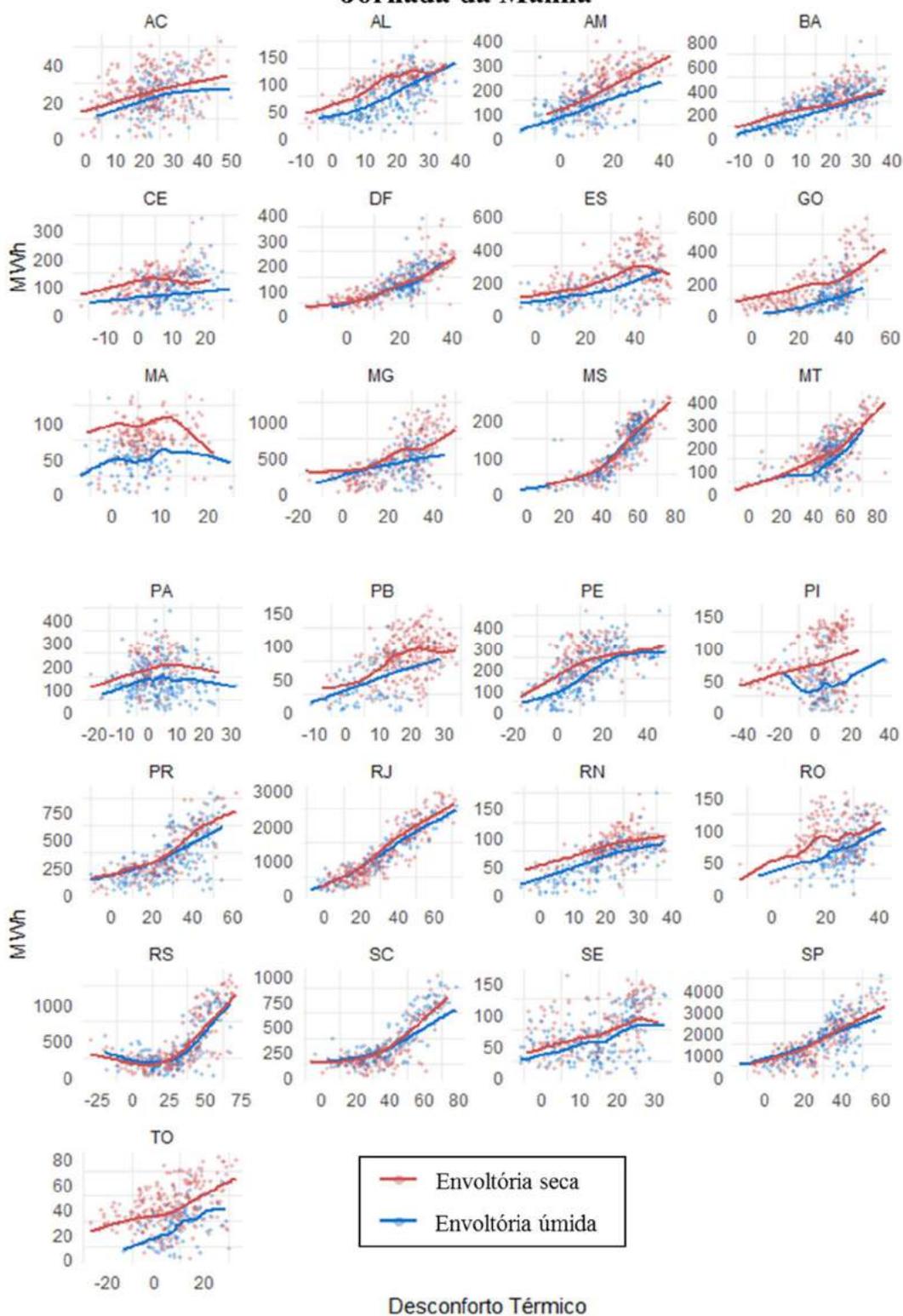
Fonte: Elaboração própria.

**APÊNDICE G – Efeito da chuva no uso elétrico de condicionamento ambiental por UF por Jornada para o ano de 2015.**



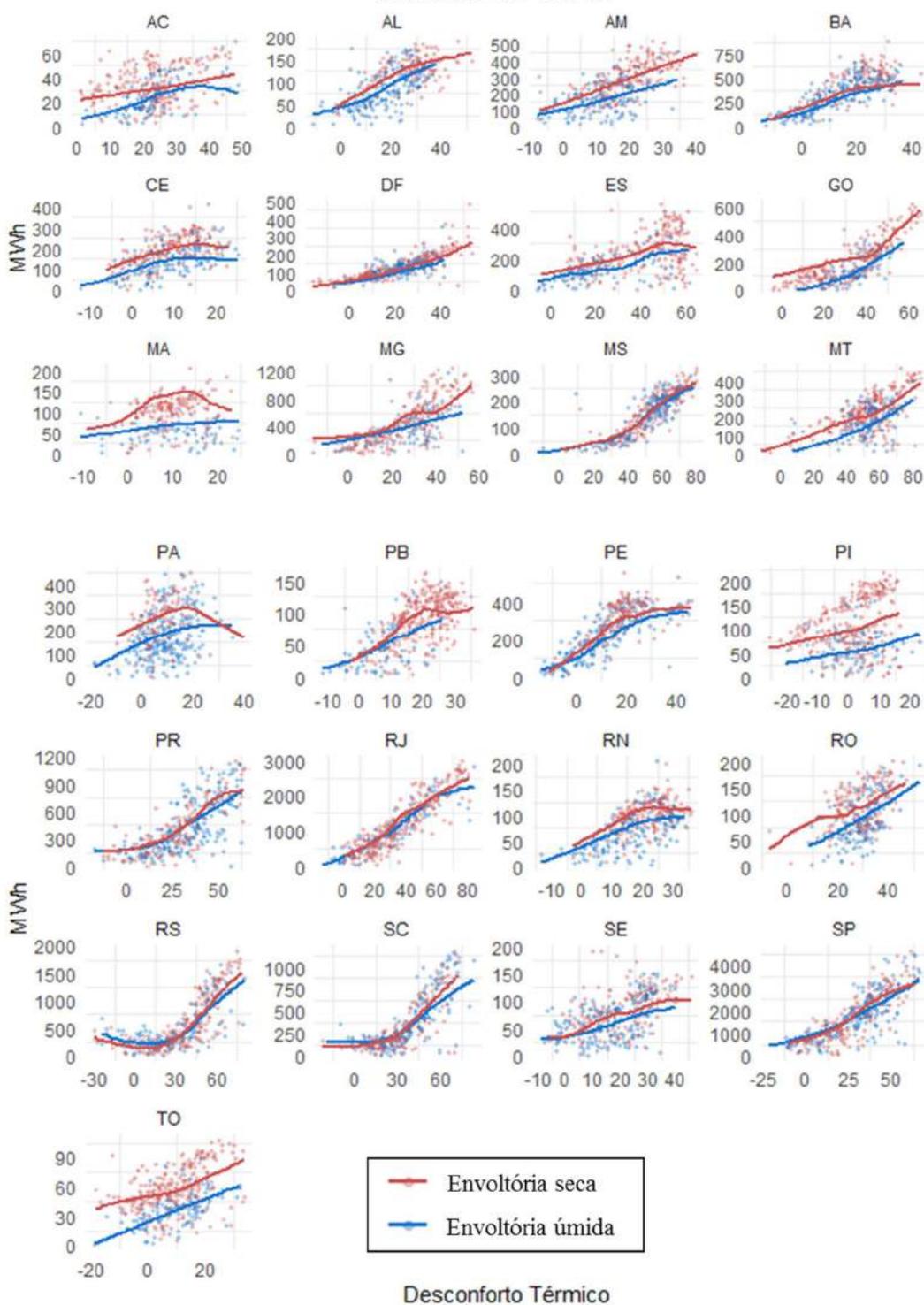
Fonte: Elaboração própria.

### Jornada da Manhã



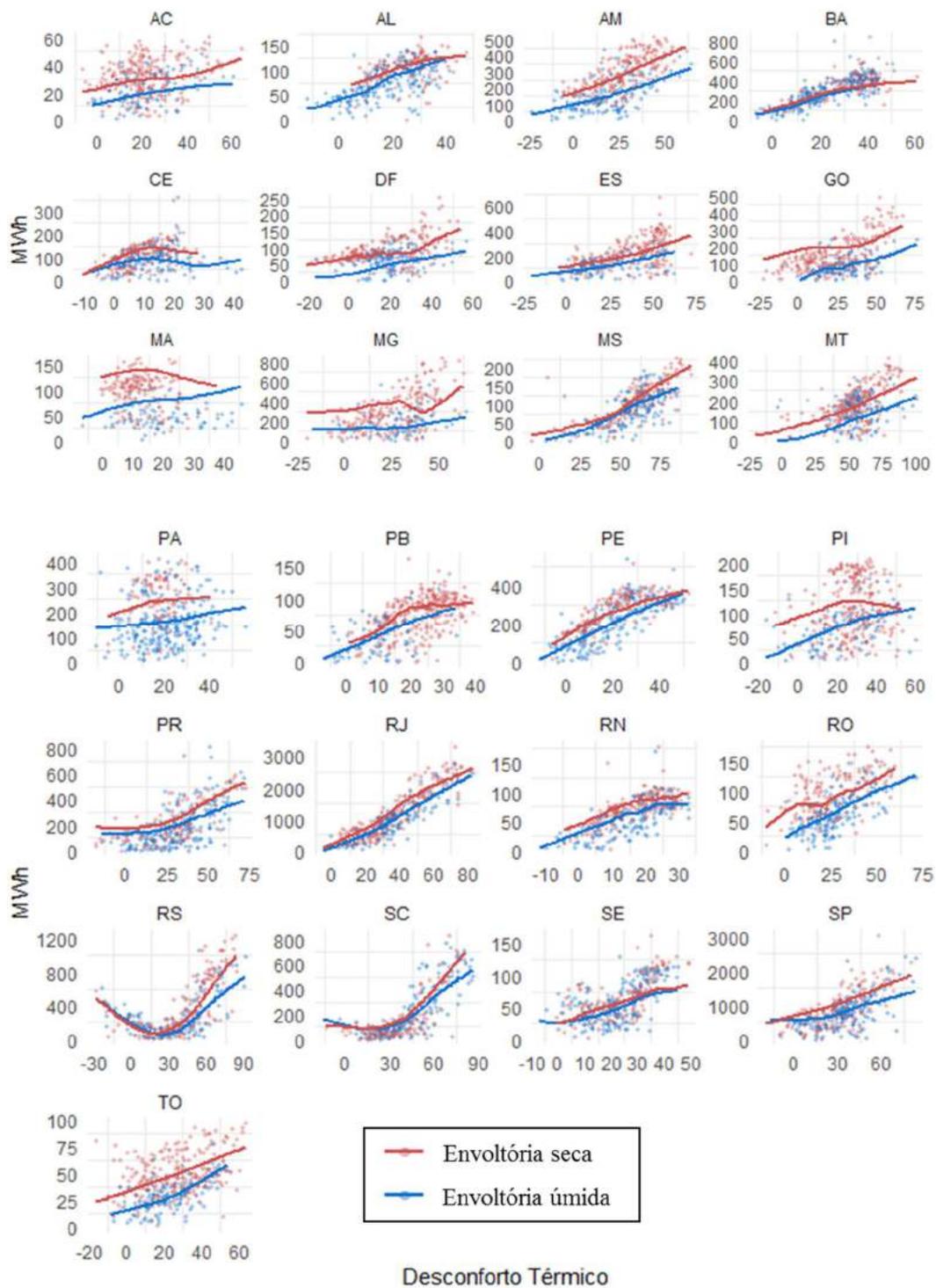
Fonte: Elaboração própria.

### Jornada da Tarde



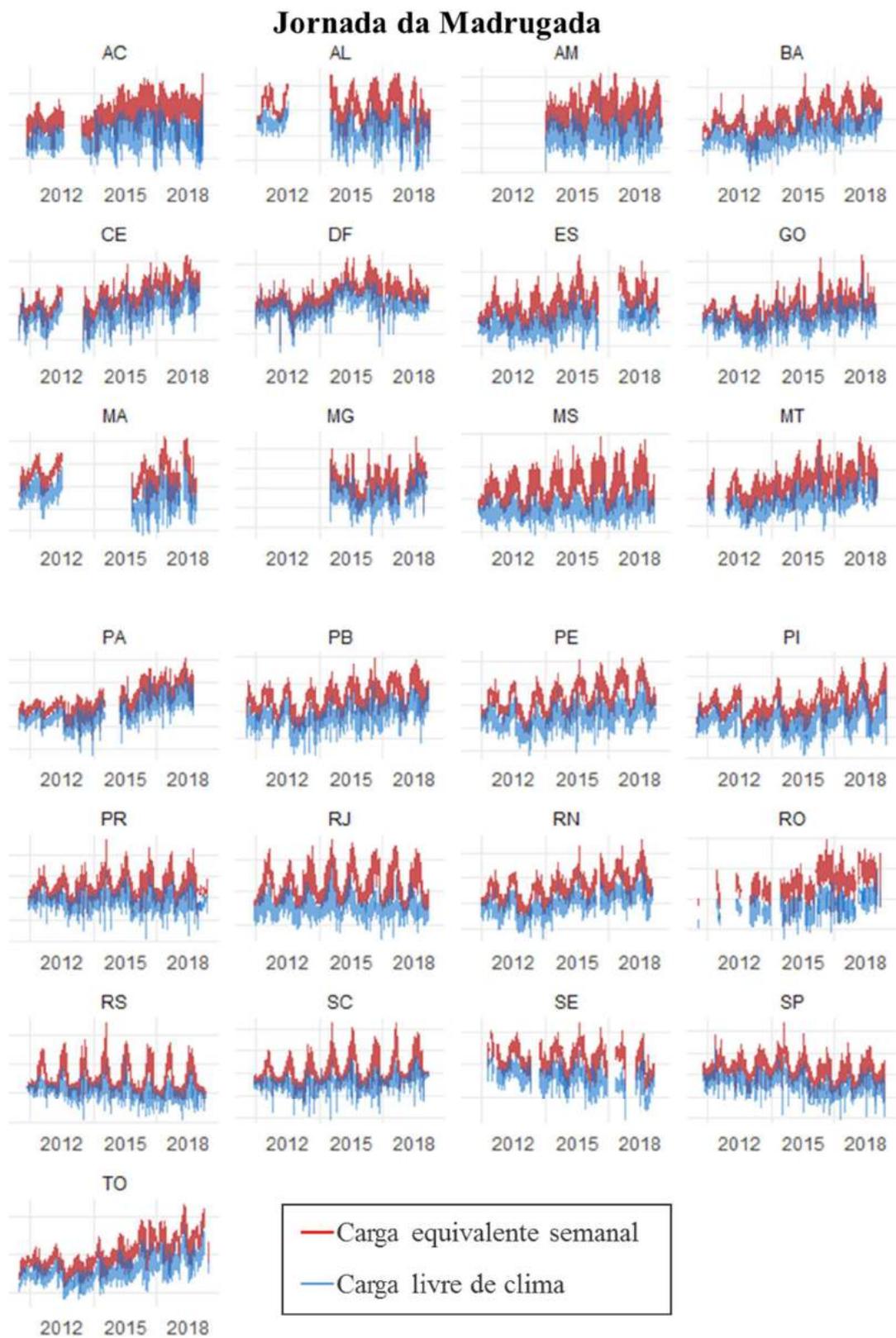
Fonte: Elaboração própria.

## Jornada da Noite



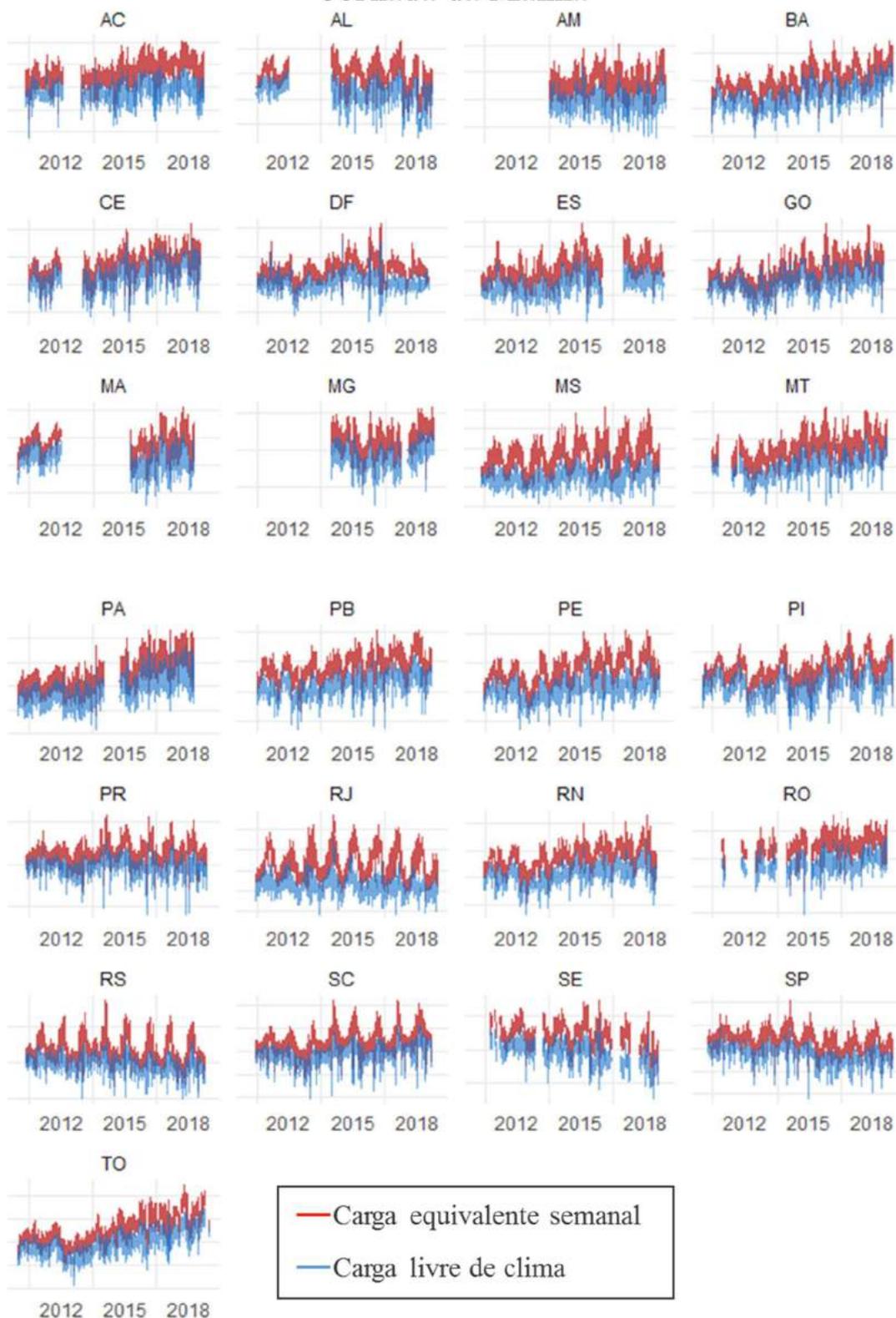
Fonte: Elaboração própria.

## APÊNDICE H – Carga livre de clima por UF por Jornada



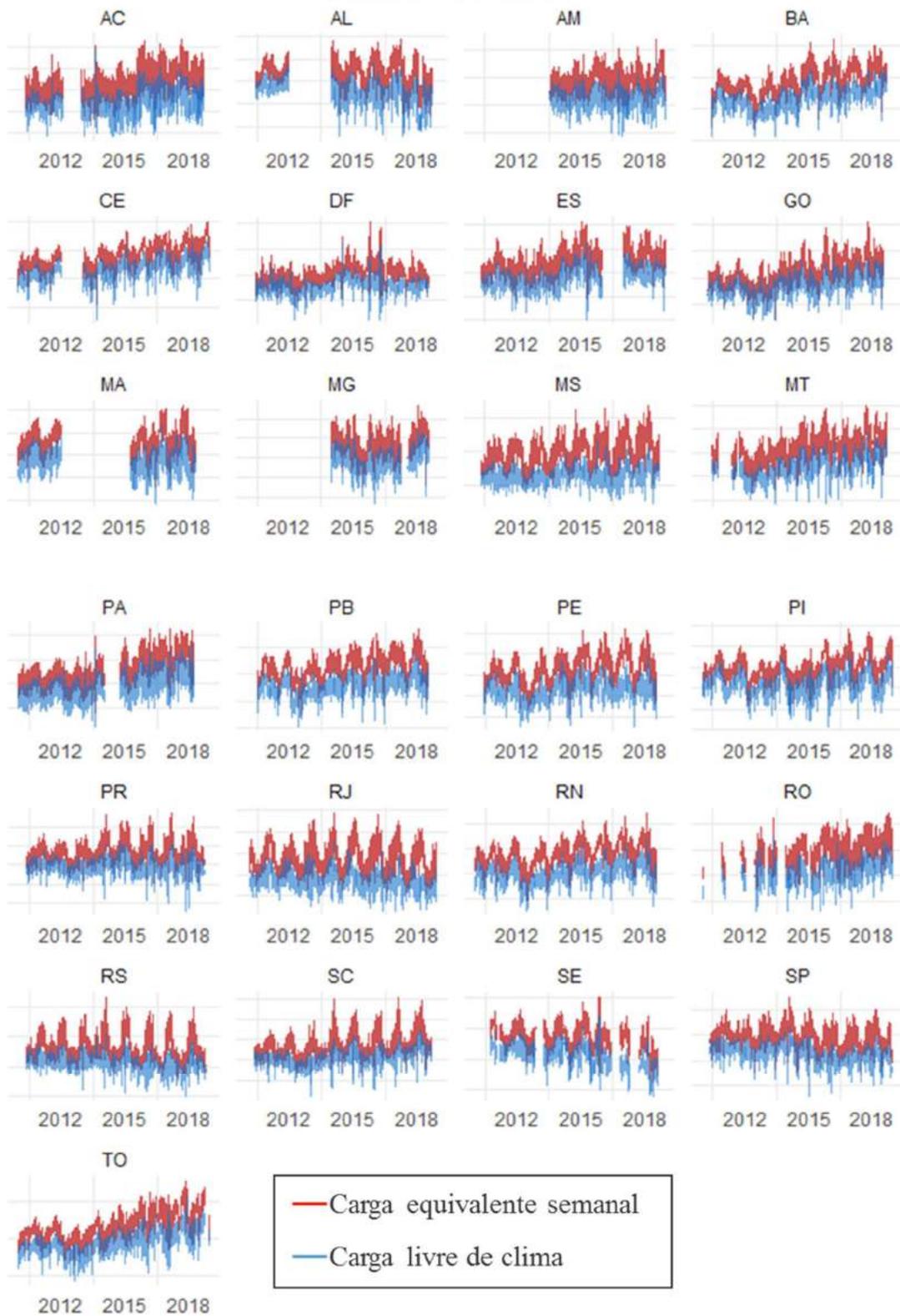
Fonte: Elaboração própria.

## Jornada da Manhã



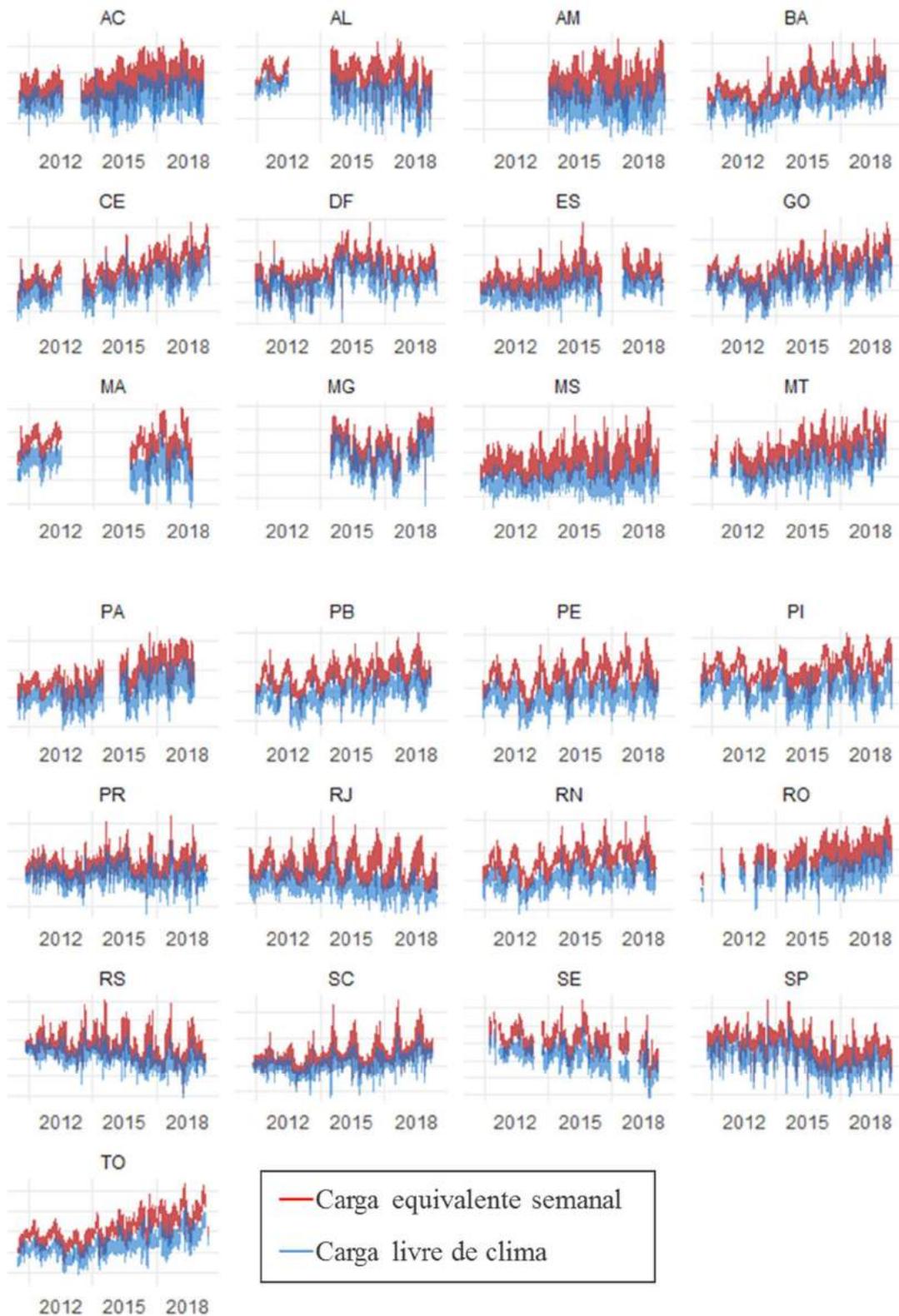
Fonte: Elaboração própria.

## Jornada da Tarde



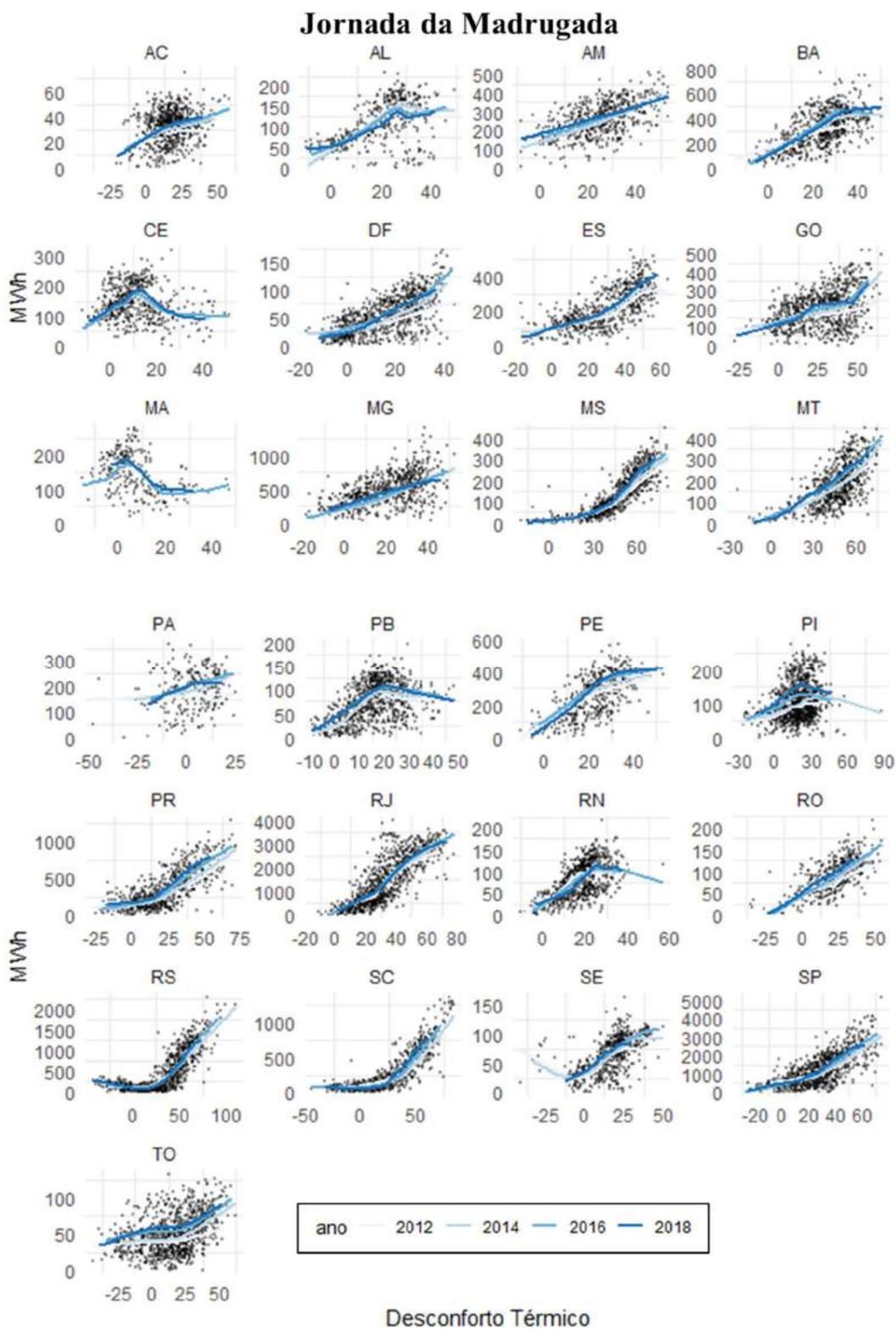
Fonte: Elaboração própria.

## Jornada da Noite



Fonte: Elaboração própria.

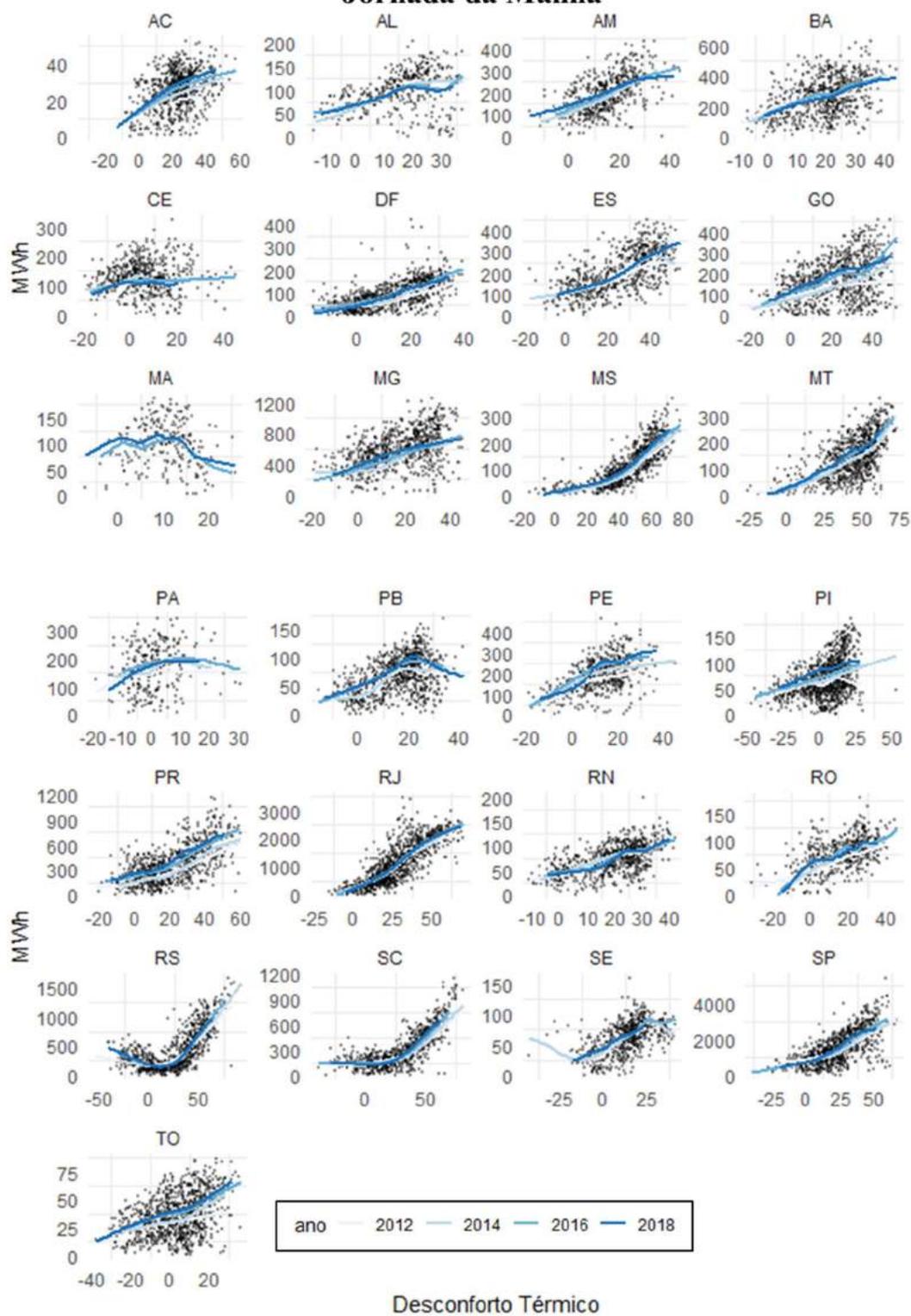
## APÊNDICE I – Efeito da posse de equipamentos por UF por Jornada



Fonte: Elaboração própria.

Nota: : Considera dias sem a ocorrência de chuva nas últimas 24 horas.

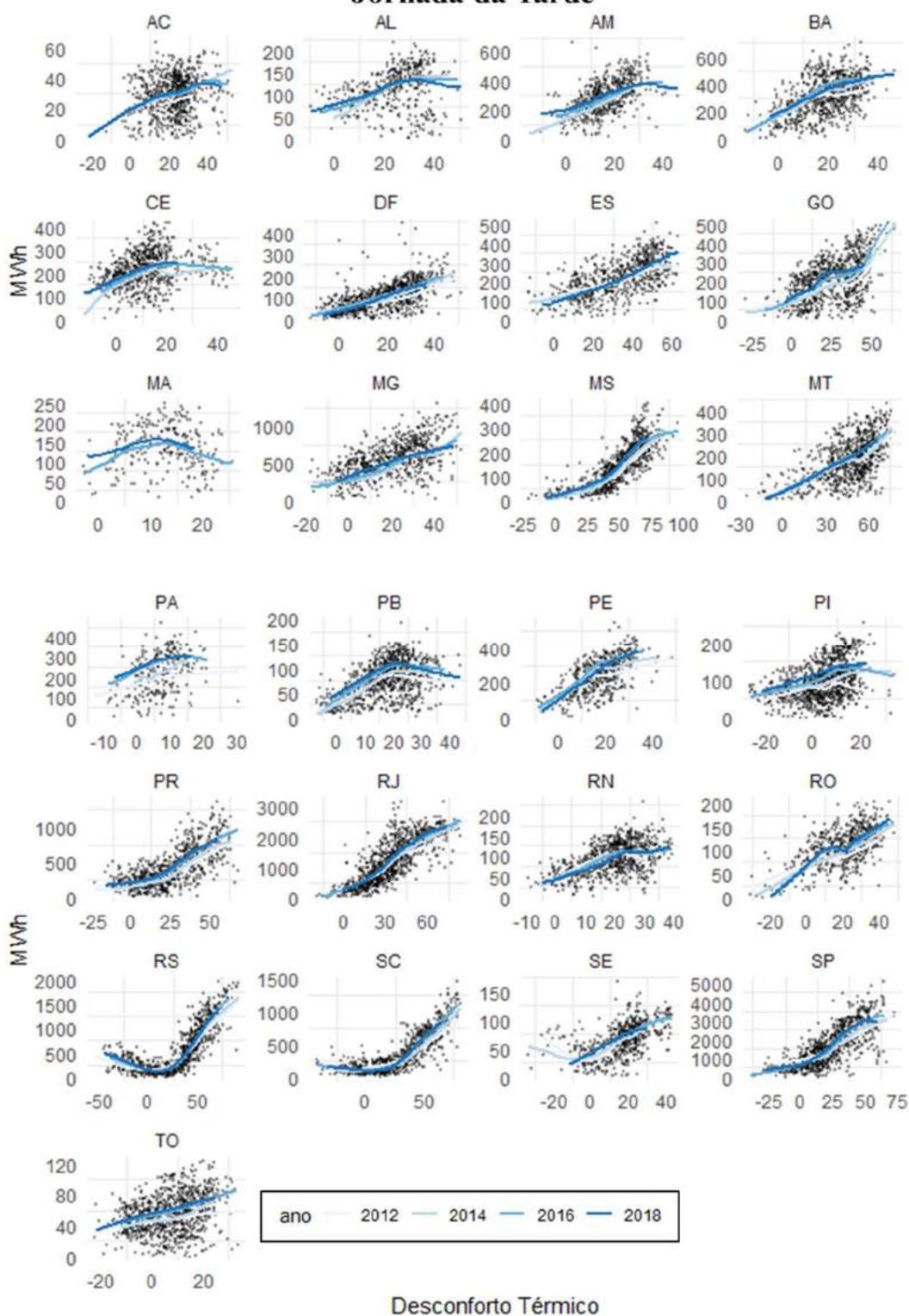
## Jornada da Manhã



Fonte: Elaboração própria.

Nota: : Considera dias sem a ocorrência de chuva nas últimas 24 horas.

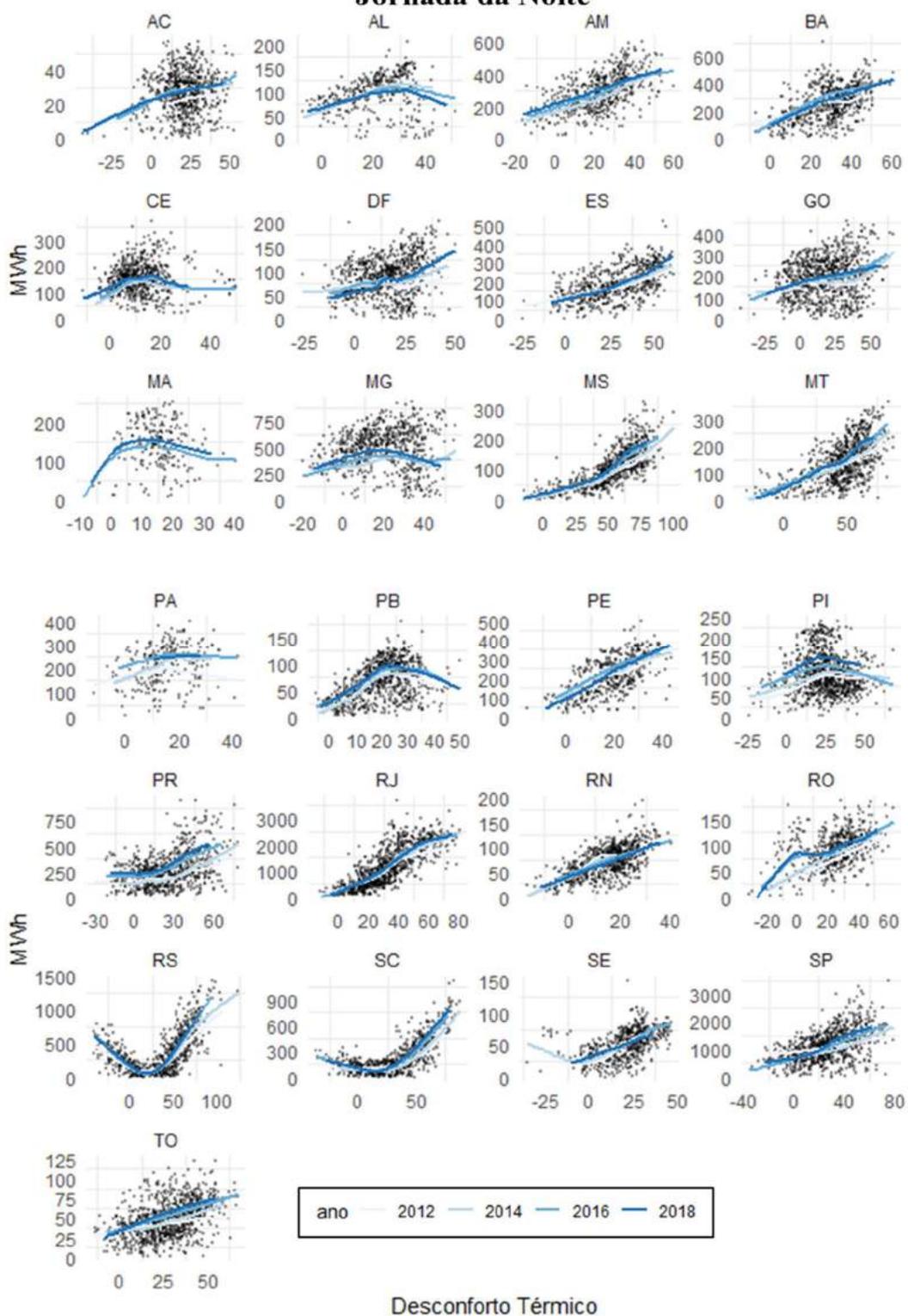
## Jornada da Tarde



Fonte: Elaboração própria.

Nota: : Considera dias sem a ocorrência de chuva nas últimas 24 horas.

## Jornada da Noite



Fonte: Elaboração própria.

Nota: : Considera dias sem a ocorrência de chuva nas últimas 24 horas.

**APÊNDICE J – Uso da eletricidade, em MWmédio, em resposta as condições climáticas por UF por Jornada por mês para o ano de 2015.**

**Jornada da Madrugada**



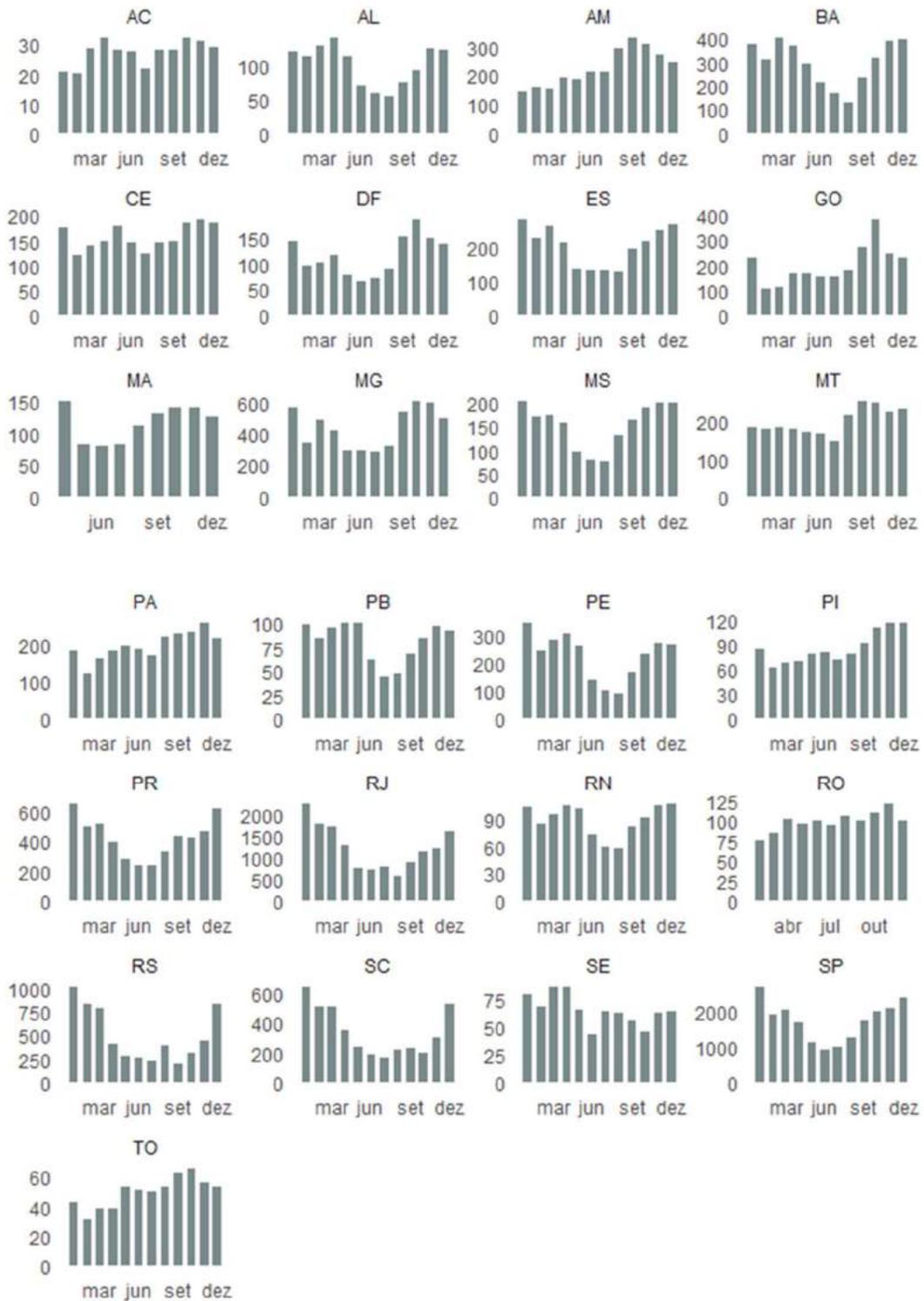
Fonte: Elaboração própria.

## Jornada da Manhã



Fonte: Elaboração própria.

## Jornada da Tarde



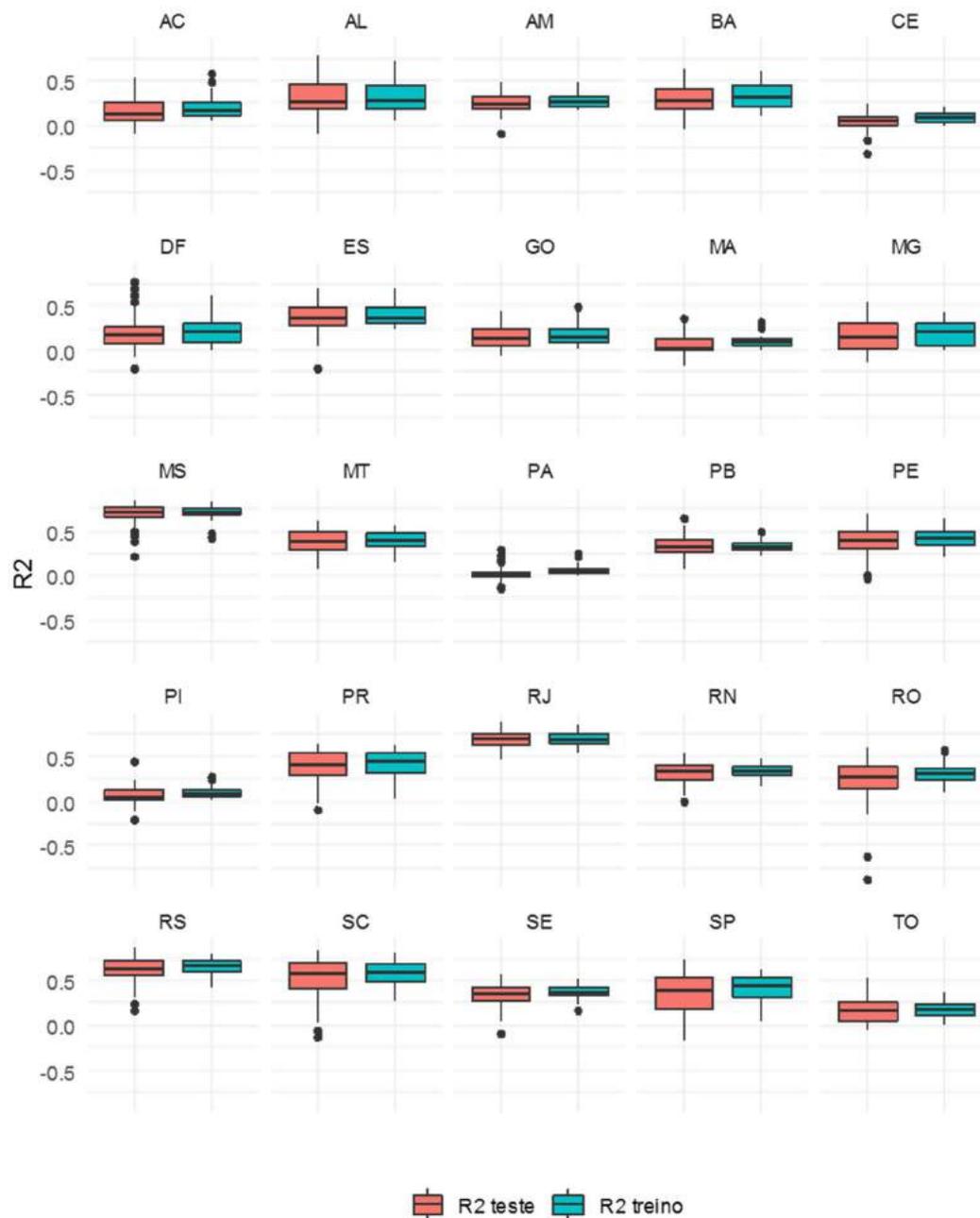
Fonte: Elaboração própria.

## Jornada da Noite



Fonte: Elaboração própria.

## APÊNDICE K – Desempenho do modelo por UF



Fonte: Elaboração própria.

Nota: : Cada boxplot representa para cada estado os coeficientes de determinação de cada jornada, ano para dias com chuva e sem chuva.

## ANEXO I – Calor metabólico produzido em função da atividade exercida

| Atividade  | W    | W/m <sup>2</sup> | Referência                                     |
|--|------|------------------|--|
| Dormindo   |      | 40               | (Auliciems & Szokolay, 2007)                   |
| Dormindo   |      | 41               | (Lamberts, et al., 2014)                       |
| Atividade basal (durante o sono)                                 | 80   |                  | (Mesquita, 1977) apud (Frota & Schiffer, 2001) |
| Reclinado  |      | 46               | (Lamberts, et al., 2014)                       |
| Reclinado, deitado na cama                                       |      | 46               | (Auliciems & Szokolay, 2007)                   |
| Datilografando   |      | 52               | (Lamberts, et al., 2014)                       |
| Sentado, relaxado  |      | 58               | (Lamberts, et al., 2014)                       |
| Sentado, em repouso  |      | 58               | (Auliciems & Szokolay, 2007)                   |
| Sentado, em repouso  | 115  |                  | (Mesquita, 1977) apud (Frota & Schiffer, 2001) |
| Em pé, em repouso  | 120  |                  | (Mesquita, 1977) apud (Frota & Schiffer, 2001) |
| Em pé relaxado ou atividade sedentária (escritório, escola, etc) |      | 70               | (Lamberts, et al., 2014)                       |
| Datilografando   |      | 70               | (Lamberts, et al., 2014)                       |
| Em pé, em repouso  |      | 70               | (Auliciems & Szokolay, 2007)                   |
| Sentado, cosendo à mão   | 130  |                  | (Mesquita, 1977) apud (Frota & Schiffer, 2001) |
| Escritório (atividade moderada)                                  | 140  |                  | (Mesquita, 1977) apud (Frota & Schiffer, 2001) |
| Em pé, trabalho leve   | 145  |                  | (Mesquita, 1977) apud (Frota & Schiffer, 2001) |
| Datilografando rápido  | 160  |                  | (Mesquita, 1977) apud (Frota & Schiffer, 2001) |
| Fazer compras, atividades laborais, lavar pratos em pé           |      | 93               | (Lamberts, et al., 2014)                       |
| Cozinhar   |      | 93               | (Lamberts, et al., 2014)                       |
| Trabalho muito leve (fazer compras, culinária, indústria leve)   |      | 93               | (Auliciems & Szokolay, 2007)                   |
| Lavando pratos   | 175  |                  | (Mesquita, 1977) apud (Frota & Schiffer, 2001) |
| Barbeando-se, banhando-se, vestindo-se                           |      | 99               | (Lamberts, et al., 2014)                       |
| Confeccionando calçados  | 190  |                  | (Mesquita, 1977) apud (Frota & Schiffer, 2001) |
| Caminhando em local plano a 2km/h                                |      | 110              | (Lamberts, et al., 2014)                       |
| Cozinhando   |      | 116              | (Lamberts, et al., 2014)                       |
| Limpando   |      | 116              | (Lamberts, et al., 2014)                       |
| Lavando e passando roupas  |      | 116              | (Lamberts, et al., 2014)                       |
| Trabalho leve médio (casa, máquina de escrever)                  |      | 116              | (Auliciems & Szokolay, 2007)                   |
| Andando  | 220  |                  | (Mesquita, 1977) apud (Frota & Schiffer, 2001) |
| Caminhando em local plano a 3km/h                                |      | 140              | (Lamberts, et al., 2014)                       |
| Subindo rampas inclinadas (velocidade de 1,6km/h) a 5%           |      | 140              | (Lamberts, et al., 2014)                       |
| Trabalho leve, em bancada  | 255  |                  | (Mesquita, 1977) apud (Frota & Schiffer, 2001) |
| Garçom   | 290  |                  | (Mesquita, 1977) apud (Frota & Schiffer, 2001) |
| Caminhando em local plano a 4km/h                                |      | 165              | (Lamberts, et al., 2014)                       |
| Subindo rampas inclinadas (velocidade de 1,6km/h) a 15%          |      | 169              | (Lamberts, et al., 2014)                       |
| Trabalho médio estável (britadeira, dança social)                |      | 175              | (Auliciems & Szokolay, 2007)                   |
| Limpar   |      | 198              | (Lamberts, et al., 2014)                       |
| Caminhando em local plano a 5km/h                                |      | 200              | (Lamberts, et al., 2014)                       |
| Lavar e passar roupas  |      | 209              | (Lamberts, et al., 2014)                       |
| Subindo rampas inclinadas (velocidade de 1,6km/h) a 20%          |      | 209              | (Lamberts, et al., 2014)                       |
| Descendo escada  | 420  |                  | (Mesquita, 1977) apud (Frota & Schiffer, 2001) |
| Serrando madeira   | 520  |                  | (Mesquita, 1977) apud (Frota & Schiffer, 2001) |
| Nadando  | 580  |                  | (Mesquita, 1977) apud (Frota & Schiffer, 2001) |
| Trabalhos pesados (serrar, aplinar à mão, tênis) até             |      | 350              | (Auliciems & Szokolay, 2007)                   |
| Trabalho muito pesado (abóbora, forno) até                       |      | 410              | (Auliciems & Szokolay, 2007)                   |
| Esforço máximo   | 870  |                  | (Mesquita, 1977) apud (Frota & Schiffer, 2001) |
| Subindo escada   | 1280 |                  | (Mesquita, 1977) apud (Frota & Schiffer, 2001) |
| Limite esforço máximo  | 1400 |                  | (Mesquita, 1977) apud (Frota & Schiffer, 2001) |

Fonte: Elaboração própria a partir das referências supracitadas.

## ANEXO II – Resistência Térmica das Vestimentas

| Man       |                     | clo  | Women     |               | clo  |
|-----------|---------------------|------|-----------|---------------|------|
| underwear | singlets            | 0.06 | underwear | bra + panties | 0.05 |
|           | T-shirt             | 0.09 |           | half slip     | 0.13 |
|           | briefs              | 0.05 |           | full slip     | 0.19 |
|           | long, upper         | 0.35 |           | long, upper   | 0.35 |
| shirt     | long, lower         | 0.35 | blouse    | long, lower   | 0.35 |
|           | light, short sleeve | 0.14 |           | light         | 0.20 |
|           | light, long sleeve  | 0.22 | heavy     | 0.29          |      |
|           | heavy, short sleeve | 0.25 | dress     | light         | 0.22 |
|           | heavy, long sleeve  | 0.29 |           | heavy         | 0.70 |
| vest:     | light               | 0.15 | skirt     | light         | 0.10 |
|           | heavy               | 0.29 |           | heavy         | 0.22 |
| trousers  | light               | 0.26 | slacks    | light         | 0.26 |
|           | heavy               | 0.32 |           | heavy         | 0.44 |
| pullover  | light               | 0.20 | pullover  | light         | 0.17 |
|           | heavy               | 0.37 |           | heavy         | 0.37 |
| jacket    | light               | 0.22 | jacket    | light         | 0.17 |
|           | heavy               | 0.49 |           | heavy         | 0.37 |
| socks     | ankle length        | 0.04 | stockings | any length    | 0.01 |
|           | knee length         | 0.10 |           | party-hose    | 0.01 |
| footwear  | sandals             | 0.02 | footwear  | sandals       | 0.02 |
|           | shoes               | 0.04 |           | shoes         | 0.04 |
|           | boots               | 0.08 |           | boots         | 0.08 |

Fonte: ASHRAE (1985) *apud* Auliciems & Szokolay (2007)

| Vestimenta                       | I <sub>clo</sub> | Vestimenta                    | I <sub>clo</sub> |
|----------------------------------|------------------|-------------------------------|------------------|
| Meia calça                       | 0,10             | Colete em tecido leve         | 0,15             |
| Meia fina                        | 0,03             | Colete em tecido pesado       | 0,29             |
| Meia grossa                      | 0,05             | Sueter em tecido pesado       | 0,37             |
| Calcinha e sutiã                 | 0,03             | Saia grossa                   | 0,25             |
| Cueca                            | 0,03             | Vestido leve                  | 0,15             |
| Cuecão longo                     | 0,10             | Vestido grosso manga comprida | 0,40             |
| Short                            | 0,11             | Jaqueta tecido leve           | 0,22             |
| Bermuda                          | 0,15             | Jaqueta tecido pesado         | 0,49             |
| Camiseta de baixo                | 0,09             | Calça fina                    | 0,20             |
| Camisa de baixo mangas compridas | 0,12             | Calça média                   | 0,25             |
| Camisa manga curta               | 0,15             | Calça flanela                 | 0,28             |
| Camisa fina manga comprida       | 0,20             | Sandálias                     | 0,02             |
| Camisa manga comprida            | 0,25             | Sapatos                       | 0,04             |
| Camisa flanela manga comprida    | 0,30             | Botas                         | 0,08             |
| Blusa com mangas compridas       | 0,15             |                               |                  |

Fonte: Lamberts, et al. (2014)

### ANEXO III – Estimação de área da superfície corporal

O calor produzido pelo metabolismo é dissipado através dos mecanismos de troca de calor descritos no capítulo “Referencial Teórico”. Segundo o modelo de dois nós, uma das formas de transferência de calor para o ambiente ocorre na pele, sendo desta forma necessária a estimação da área da superfície corporal. Pela fórmula de Du Bois (1916), tal estimação pode ser obtida a partir do peso e altura do indivíduo de acordo com a seguinte expressão:

$$A_D = 0,202 \cdot m^{0,425} \cdot l^{0,725}$$

Onde:

$A_D$  = área da superfície corporal (m<sup>2</sup>);

$m$  = peso (kg); e

$l$  = altura (m).

Para a presente dissertação serão adotados os valores de um indivíduo médio de 1,70 metros de altura pesando 70 kg. Desta forma, a superfície corporal estimada é de aproximadamente 1,8 m<sup>2</sup>.

Com relação a superfície corporal exposta e suada utilizada no modelo de dois nós ( $w_{rsW}$ ) é possível, a partir do tipo de vestimenta utilizada, determinar o parâmetro utilizando a regra dos nove criada por Wallace AB (1951).

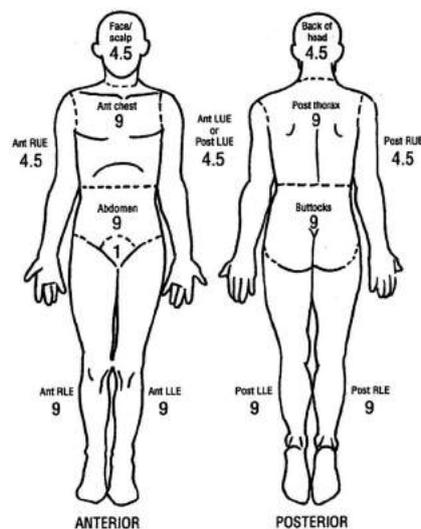


Figura 0-1: Regra dos nove.

Fonte: Wallace AB (1951)

## ANEXO IV – Lista de Feriados Nacionais e Estaduais considerados

### Feriados móveis:

| Feriado                        |
|--------------------------------|
| Páscoa                         |
| Sexta Feira Santa              |
| Carnaval                       |
| 2ª feira da semana do Carnaval |
| 4ª feira da semana do Carnaval |
| 5ª feira da semana do Carnaval |
| 6ª feira da semana do Carnaval |

Fonte: Elaboração própria.

### Feriados fixos:

| UF | Dia | Mês | Feriado  | UF       | Dia | Mês | Feriado                                |
|----|-----|-----|--|----------|-----|-----|--|
| AC | 20  | 1   | Dia do Católico  | RJ       | 23  | 4   | Dia de São Jorge                       |
| AC | 23  | 1   | Dia do Evangélico  | RJ       | 20  | 11  | Dia da Consciência Negra               |
| AC | 8   | 3   | Dia da Mulher  | RN       | 3   | 10  | Mártires de Cunhaú e Uruçu             |
| AC | 16  | 6   | Aniversário do Acre                                      | RS       | 20  | 9   | Proclamação da República Rio Grandense |
| AC | 6   | 8   | Revolução Acreana  | RO       | 4   | 1   | Aniversário de Rondônia                |
| AC | 6   | 9   | Dia da Amazônia  | RO       | 18  | 6   | Dia do Evangélico                      |
| AC | 17  | 11  | Tratado de Petrópolis                                    | RR       | 5   | 10  | Aniversário de Roraima                 |
| AL | 24  | 6   | Dia de São João  | RR       | 20  | 11  | Dia da Consciência Negra               |
| AL | 29  | 6   | Dia de São Pedro   | SC       | 11  | 8   | Dia de Santa Catarina                  |
| AL | 16  | 9   | Emancipação de Alagoas                                   | SP       | 9   | 7   | Revolução Constitucionalista           |
| AL | 20  | 11  | Dia da Consciência Negra                                 | SE       | 8   | 7   | Aniversário de Sergipe                 |
| AL | 30  | 11  | Dia do Evangélico  | GO       | 26  | 7   | Fundação da Cidade de Goiás            |
| AP | 19  | 3   | Dia de São José  | GO       | 24  | 10  | Pedra fundamental de Goiânia           |
| AP | 15  | 5   | Dia de Cabralzinho                                       | PE       | 6   | 3   | Revolução Pernambucana                 |
| AP | 25  | 7   | Dia de São Tiago   | PE       | 24  | 6   | Dia de São João                        |
| AP | 13  | 9   | Aniversário da criação do ex-território federal do Amapá | TO       | 8   | 9   | Padroeira de Tocantins                 |
| AP | 20  | 11  | Dia da Consciência Negra                                 | TO       | 5   | 10  | Aniversário de Tocantins               |
| AP | 30  | 11  | Dia do Evangélico  | Nacional | 25  | 12  | Natal                                  |
| AP | 8   | 12  | Nossa Senhora da Conceição                               | Nacional | 24  | 12  | Natal                                  |
| AM | 5   | 9   | Aniversário do Amazonas                                  | Nacional | 1   | 5   | Dia do Trabalhador                     |
| AM | 20  | 11  | Dia da Consciência Negra                                 | Nacional | 2   | 11  | Finados                                |
| AM | 8   | 12  | Nossa Senhora da Conceição                               | Nacional | 7   | 9   | Independência do Brasil                |
| BA | 2   | 7   | Independência da Bahia                                   | Nacional | 15  | 11  | Proclamação da República               |
| CE | 25  | 3   | Data Magna do Ceará                                      | Nacional | 12  | 10  | Nossa Senhora Aparecida                |
| CE | 19  | 3   | Dia de São José  | Nacional | 20  | 6   | Corpus Christi                         |
| DF | 30  | 11  | Dia do Evangélico  | Nacional | 21  | 4   | Tiradentes                             |
| MS | 11  | 10  | Aniversário do Mato Grosso do Sul                        | Nacional | 1   | 1   | Ano Novo                               |
| MA | 28  | 7   | Adesão ao Império Brasileiro                             | Nacional | 26  | 12  | Semana entre Natal e Ano novo          |
| MA | 20  | 11  | Consciência Negra  | Nacional | 27  | 12  | Semana entre Natal e Ano novo          |
| MT | 20  | 11  | Consciência Negra  | Nacional | 28  | 12  | Semana entre Natal e Ano novo          |
| PA | 15  | 8   | Adesão ao Império Brasileiro                             | Nacional | 29  | 12  | Semana entre Natal e Ano novo          |
| PA | 8   | 12  | Nossa Senhora da Conceição                               | Nacional | 30  | 12  | Semana entre Natal e Ano novo          |
| PB | 26  | 7   | Homenagem a João Pessoa                                  | Nacional | 31  | 12  | Semana entre Natal e Ano novo          |
| PB | 5   | 8   | Fundação do Estado da Paraíba                            | Nacional | 15  | 10  | Dia do Professor                       |
| PI | 19  | 10  | Dia do Piauí   | Nacional | 28  | 10  | Dia do Servidor Público                |

Fonte: Elaboração própria.

## **ANEXO V – Estatística de energia elétrica das instituições**

Integridade, coerência, qualidade e tempestividade das informações, dados e estatísticas energéticas são pré-requisito para o pleno funcionamento e governança das Instituições, bem como para possíveis adequações ao arcabouço legal do setor elétrico. Neste ínterim, a carga de energia destaca-se como uma das principais variáveis que norteiam o planejamento da expansão e operação do sistema interligado nacional.

### **Dados do ONS:**

O Operador Nacional do Sistema Elétrico, responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN) dispõe em seu Módulo 5 do Procedimento de Rede as definições e conceitos a serem seguidos no processo de apuração da carga global. Tais definições são essenciais para diversos estudos da instituição no que se refere ao planejamento da operação elétrica e energética, em seus diversos horizontes, além de estudos de ampliações e reforços.

A apuração da geração de energia em sua totalidade permite representar o total da carga atendida, ou seja, representa a totalidade da energia gerada no âmbito do SIN injetada nos sistemas de transmissão e distribuição para suprir não apenas o consumo de energia das unidades consumidora, mas também as perdas internas de redes e instalações de geração, transmissão e distribuição. Nesse sentido, o ONS mede através do Sistema de Apuração da Geração, Intercâmbio e Carga (SAGIC), de acordo com os submódulos 2.7, 18.2 e 26.2 dos Procedimentos de Rede, dados de geração das usinas do Tipo I, II-A, II-B e II-C, as quais podem impactar na segurança da rede de operação. Entretanto, para considerar os dados de toda a geração interligada ao sistema são necessárias algumas adições:

- Usinas do Tipo III, as quais situam-se fora da rede básica e não causam impactos na operação eletroenergética do SIN. No caso dos autoprodutores conectados à rede básica que possuem demanda permanentemente maior que a geração, suas respectivas usinas também são classificadas como do Tipo III. Como as usinas do Tipo III não possuem relacionamento operacional com o ONS, o envio de seus dados para o processo de consolidação da carga é de responsabilidade da distribuidora na qual a usina estiver conectada.

## Dados da CCEE:

A Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) tem como uma de suas atribuições a contabilização e a liquidação comercial de energia no Mercado de Curto Prazo de todos os agentes que participam do mercado de energia elétrica do SIN. Para isso, são realizadas medições físicas através do Sistema de Coleta de Dados de Energia (SCDE), conforme CCEE (2014). Tais medições são realizadas de 5 em 5 minutos e integralizadas em uma hora tanto de agentes de geração quanto de consumo que participam do Ambiente de Contratação Livre (ACL).

Segundo MME/ANEEL/EPE/ONS/CCEE (2017), a Figura 0-1 ilustra os principais arranjos de medição dos agentes de geração e autoprodução na CCEE. Em síntese, os arranjos “a”, “b”, “c” e “d” são aplicáveis as usinas, sendo o arranjo “a”, o mais comum. Já os arranjos “e” e “f” correspondem aos autoprodutores que podem estar situados tanto na rede básica quanto nas redes de distribuição/transmissão/DIT/ICG.

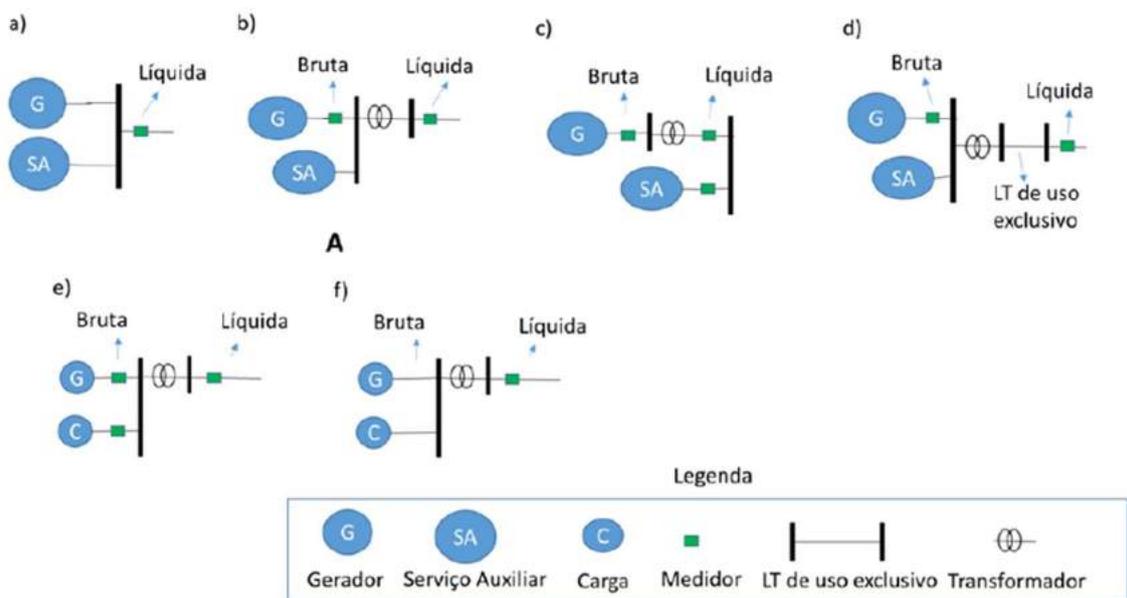


Figura 0-1: Arranjos de medição dos agentes de geração e autoprodução na CCEE

Fonte: MME/ANEEL/EPE/ONS/CCEE (2017)

## Dados da EPE:

A fim de elaborar estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético junto ao Ministério de Minas e Energia (MME), a Empresa Brasileira de Pesquisa Energética (EPE), realiza coleta de dados referentes ao consumo de energia elétrica de cada classe de consumo, além do número de consumidores, por meio de dois

sistemas:

- SAM (Sistema de Acompanhamento do Mercado), cuja coleta de dados mensais históricos de consumo e número de consumidores é de periodicidade mensal.
- SIMPLES (Sistema de Informações de Mercado para o Planejamento do Setor Elétrico), cuja coleta anual trata de dados mensais de consumo e número de consumidores, desagregados por classe de consumo, subclasse, Faixa de Tensão/Consumo, sistema interligado/isolado e cativo/livre, conforme tipologias definidas em ANEEL (2010). Além disso, são declaradas via sistema, projeções de consumo das distribuidoras para os próximos 10 anos.

As informações resultantes dos sistemas supracitados são complementadas pelo preenchimento e envio de planilhas das distribuidoras à EPE/MME, com dados relacionados a consumidores livres da rede de transmissão e autoprodutores, além de dados enviados pelos próprios consumidores livres e autoprodutores.

É importante ressaltar que os dados obtidos através dos sistemas da EPE, são informações oriundas dos sistemas de faturamento das distribuidoras, e, portanto, não guardam, necessariamente, correspondência com os meses civis. De fato, o calendário de leitura das distribuidoras pode variar de 27 a 33 dias de medição, conforme ANEEL (2010), deslocando temporalmente sobretudo os dados de seus consumidores cativos.

#### **Dados da ANEEL:**

A Agência nacional de Energia Elétrica coleta informações mensalmente pelo sistema de acompanhamento mensal padronizado (SAMP), seguindo regulamentação ANEEL (2002), com vistas a auxiliar no processo regulatório do setor de energia elétrica. Tais informações, subsidiam os processos de revisão tarifária periódica, definição de encargos do setor elétrico, cálculo da taxa de fiscalização dos serviços de energia elétrica (TFSEE), bem como a divulgação de informações à sociedade, tais como energia, demanda, tarifas médias e número de unidades consumidoras. Dentre as informações recebidas pela ANEEL através do SAMP, destacam-se:

- Demanda (MW), Energia (KWh) e Número de Unidades consumidoras conectadas ao sistema da distribuidora agregadas por classe de consumo, subclasse, modalidade tarifária, subgrupo tarifário, sistema interligado/isolado,

posto tarifário e cativo/livre.

- Tributos tais como PIS/COFINS e ICMS aplicados ao faturamento das unidades consumidoras.
- Receitas decorrentes do faturamento e refaturamento de unidades consumidoras.
- Descontos de demanda e energia aplicáveis ao mercado, decorrente de subsídios e subvenções.
- Perdas técnicas e não técnicas do sistema de distribuição.

De forma ilustrativa, a Figura 0-2 mostra a abrangência dos dados de uso de energia elétrica na ótica de cada instituição. Pode-se observar que a medição do ONS situa-se logo após a saída do gerador, enquanto a medição da CCEE, embora haja diversos esquemas de medição conforme ilustrado anteriormente na Figura 0-2, na maioria das vezes este situa-se na fronteira com a rede básica.

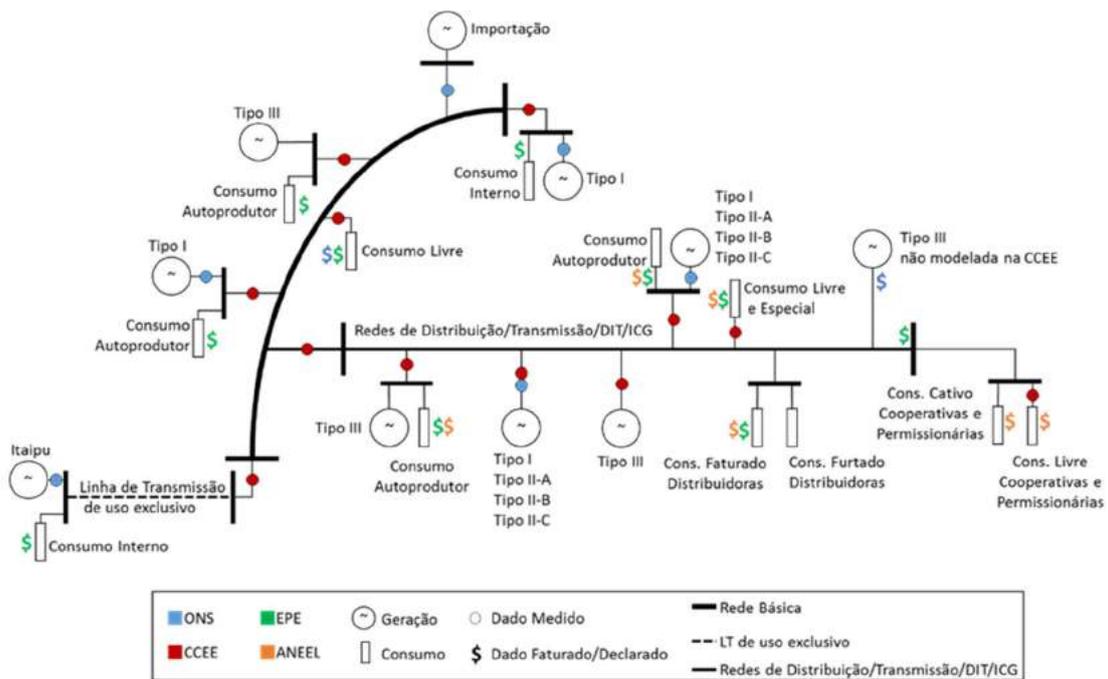


Figura 0-2: Óticas das instituições quanto ao uso da energia elétrica no SIN

Fonte: Elaboração própria com base nos Procedimentos de Rede do ONS: submódulos 2.7, 18.2 e 26.2, CCEE (2014), ANEEL (2010) e ANEEL (2002).

Dessa forma, embora todas estas instituições possuam bases de dados para tratar o uso de energia elétrica no SIN, a abrangência, processo de coleta da informação bem como periodicidade são distintas, dados seus diferentes objetivos e funções. Portanto, há de se tomar os devidos cuidados ao analisar os dados das instituições entendendo as limitações de cada base de dados.